



Università degli Studi di Napoli Federico II

Scuola di Dottorato in Ingegneria Industriale

Corso di Dottorato di Ricerca in Ingegneria dei Sistemi Meccanici
XXVI Ciclo

Titolo della Tesi

PRESTAZIONI ENERGETICHE DEGLI EDIFICI: METODOLOGIE, COMPONENTI E
TECNOLOGIE PER LA RIDUZIONE DELLA DOMANDA DI ENERGIA PRIMARIA DEL
SISTEMA EDIFICIO/IMPIANTI

Coordinatore della Scuola di Dottorato

Prof. Ing. Antonio Moccia

Coordinatore del Corso di Dottorato

Prof. Ing. Fabio Bozza

Relatori

Prof. Ing. Rita Maria Antonia Mastrullo

Prof. Ing. Giuseppe Peter Vanoli

Candidata

Rosa Francesca De Masi



Università degli Studi di Napoli Federico II

School of Doctorate in Industrial Engineering

Research Doctorate Program in Mechanical System Engineering

XXVI Cycle

Title

ENERGY PERFORMANCE OF BUILDINGS: METHODOLOGIES, EQUIPMENT AND
TECHNOLOGIES FOR REDUCING THE PRIMARY ENERGY REQUESTS OF THE
SYSTEM “BUILDING / HVAC PLANTS”

School of Doctorate Coordinator

Prof. Ing. Antonio Moccia

Doctorate Program Coordinator

Prof. Ing. Fabio Bozza

Supervisor

Prof. Ing. Rita Maria Antonia Mastrullo

Prof. Ing. Giuseppe Peter Vanoli

Candidate

Rosa Francesca De Masi

Tesi di dottorato

Prestazioni energetiche degli edifici: metodologie, componenti e tecnologie per la riduzione della domanda di energia primaria del sistema edificio/impianti

INTRODUZIONE

La Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle Regioni “Due volte 20 per il 2020: L’opportunità del cambiamento climatico per l’ Europa” si conclude con un pensiero al futuro: *l’Europa del 2050 sarà molto differente da quella di oggi, e questa differenza si evidenzierà più che altrove nel modo in cui faremo fronte alle nostre esigenze energetiche e nel rispetto che avremo per il mondo intorno a noi.*

Nel IV rapporto “*Climate Change 2007*”, il Comitato Intergovernativo sui Cambiamenti Climatici (*Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*) ha sottolineato che per contenere l’aumento del riscaldamento entro il limite dei 2°C, oltre il quale i rischi di un collasso degli ecosistemi sono elevatissimi, vanno attuate riduzioni delle emissioni di gas serra dell’ordine del 60-80% entro il secolo. Ciò significa che prolungare nel futuro la struttura energetica attuale, con i prevedibili aumenti delle richieste e delle emissioni, non è semplicemente compatibile con il futuro del pianeta e, solo attraverso l’adozione di adeguate soluzioni tecniche supportate da adeguate decisioni politiche, si potrà invertire l’attuale tendenza ed assicurare uno sviluppo sostenibile.

Pietra miliare nella negoziazione internazionale nella lotta ai cambiamenti climatici è stato il Protocollo di Kyoto, sottoscritto nel 1997; questo ha condotto al pacchetto “clima-energia” che definisce, a livello europeo, gli obiettivi da perseguire tra il 2013 e il 2020. In merito a ciò, la recente approvazione della Direttiva 2012/27/CE, *Direttiva sull’efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/C*, configura un quadro di prescrizioni e vincoli alquanto impegnativo ed ambizioso, finalizzato ad ottenere un decisivo cambio di marcia nel processo di efficientamento e riduzione dell’impatto ambientale con misure che investono in modo importante i diversi settori dell’efficienza.

La constatazione che ogni provvedimento in materia di risparmio energetico non può prescindere dal fatto che, in Europa, l’energia impiegata nel settore residenziale e terziario rappresenta circa un terzo del consumo di energia finale, ha condotto, ormai

oltre un decennio fa, alla Direttiva 2002/91/CE, “*Energy Performance of Buildings*” (EPBD), per il miglioramento del rendimento energetico in edilizia, integrata e aggiornata dalla Direttiva 2010/31/UE, “*EPBD recast*” del 19 maggio 2010, cui si farà riferimento in questo lavoro di Tesi, perché considerata il cardine per gli attuali obiettivi di efficienza energetica in edilizia.

L'Italia si è allineata a tale politica a partire dal decreto legislativo n. 192 del 19 agosto 2005 (*Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia*), così come integrato e modificato dal D. Lgs. 311/2006 e reso operativo, nei suoi aspetti principali, dal Decreto del Presidente della Repubblica 59/2009 e dal Decreto Interministeriale 26.06.2009 (recante le Linee Guida Nazionali per la Certificazione energetica degli edifici).

La pubblicazione, sulla Gazzetta Ufficiale del 3 Agosto 2013, del testo del decreto legge n. 63, del 4 giugno 2013, coordinato con la legge di conversione 3 agosto 2013, n. 90, recante: “*Disposizioni urgenti per il recepimento della Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica nell'edilizia per la definizione delle procedure d'infrazione avviate dalla Commissione europea, nonché' altre disposizioni in materia di coesione sociale*”, è l'ultimo atto ufficiale dell'iter legislativo italiano in materia di riqualificazione ed efficienza energetica del patrimonio immobiliare italiano, pubblico e privato. Risultato dell'esigenza di evitare un aggravamento della procedura di infrazione nei confronti dell'Italia, per il mancato recepimento della direttiva 2010/31/UE, la legge n. 90/2013 comporta un'evoluzione strutturale della normativa italiana sulle prestazioni energetiche, poiché una volta emanati i decreti attuativi, cambieranno la metodologia per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici, i requisiti minimi e gli ambiti di intervento.

In particolare, a partire dal 31 dicembre 2018, gli edifici di nuova costruzione occupati da pubbliche amministrazioni e di proprietà di queste ultime, e dal 1° gennaio 2021 tutti gli edifici di nuova costruzione, ivi compresi gli edifici scolastici, dovranno essere edifici a energia quasi zero (nZEB). Come prima accennato, cambia anche l'approccio metodologico con cui raggiungere i nuovi obiettivi di risparmio energetico. Rispetto ai precedenti decreti e attuando quanto previsto a livello europeo, il miglioramento delle prestazioni energetiche presuppone un'analisi del ciclo di vita economico di un edificio, individuando per esso il livello ottimale di efficienza energetica in cui l'analisi costi-benefici calcolata sul ciclo di vita economico sia positiva. Quello che si cerca di fare, cioè, è di passare da un sistema basato sul limite prescrittivo, ad un sistema in cui le prestazioni energetiche degli edifici siano confrontate con quelle di un edificio “target”. La definizione di un Reference Building costituisce, infatti, lo start-up per l'applicazione della nuova metodologia imposta a

livello europeo dal Regolamento delegato n. 244/2012 della Commissione Europea del 16 gennaio 2012.

In sintesi, l'obiettivo generale è quello di migliorare le prestazioni energetiche degli edifici con una progettazione accurata dell'involucro edilizio e con il ricorso integrato alle fonti rinnovabili, e soprattutto attraverso la riqualificazione energetica degli edifici esistenti. Quest'ultimo punto è di importanza strategica se si considera che ben oltre la metà del patrimonio edilizio italiano è stato costruito prima del 1976, anno di entrata in vigore della prima legge (la 373 del 1976) sul risparmio energetico in edilizia. Inoltre, stando alle stime dell'Associazione Nazionale Costruttori Edili (ANCE), in sei anni (2008-2013) il livello degli investimenti in nuove abitazioni si è ridotto del 54.2% in termini reali. Gli investimenti in interventi di ristrutturazione, di contro, mostrano una tenuta dei livelli produttivi (+3% nel 2013 su base annua), con un incremento negli ultimi sei anni del 12.6%, anche grazie all'effetto di stimolo degli incentivi fiscali per la riqualificazione energetica del patrimonio edilizio.

Se si vogliono raggiungere obiettivi significativi, però, è necessario che la scala di intervento della riqualificazione energetica vada ampliata: gli interventi a livello di singole abitazioni non sono sufficienti, considerando le potenzialità, l'entità e la peculiarità del patrimonio edilizio italiano. Serve cioè operare a livello di macro-scala urbana, identificando possibilità di intervento su interi complessi (ospedali, scuole etc.) di immobili e/o parti di città. Per ottenere ciò, è necessario un salto di qualità, di cui si cominciano oggi a notare le prime tracce. Facendo, infatti, riferimento ai dati del "Programma operativo interregionale (POI) Energie Rinnovabili e Risparmio Energetico 2007-2013" si trova che sono stati finanziati 272 interventi di efficientamento energetico e produzione di energia da fonti rinnovabili sugli edifici pubblici nonché oltre 400 studi di fattibilità e diagnosi energetiche. Al 30 giugno 2013, sono stati assegnati ai beneficiari circa 930 milioni di euro e ne sono stati spesi circa 440, pari rispettivamente, all'87% e al 44% della dotazione finanziaria del Programma.

Sic stantibus rebus, il progetto di ricerca maturato durante il Dottorato, partendo dall'approfondimento di questi temi, mira a supportare lo sviluppo e la diffusione di soluzioni e tecnologie innovative nonché logiche di progettazione finalizzate all'ottimizzazione dei consumi di energia primaria e della vivibilità indoor nel sistema edilizio, sia con riferimento alla progettazione ex-novo sia (e soprattutto) alla riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente.

Il titolo del lavoro di Tesi chiarisce l'organizzazione formale del lavoro presentato: "*Prestazioni energetiche degli edifici: metodologie, componenti e tecnologie per la riduzione della domanda di energia primaria del sistema edificio/impianti*". Dunque, il

tema di ricerca si incardina essenzialmente su quelle che possono considerarsi le due leve fondamentali attraverso cui un edificio può raggiungere il livello ottimale di prestazione energetica con il minor costo globale:

- metodologie di analisi e diagnosi delle prestazioni energetiche degli edifici;
- analisi di soluzioni anche innovative per l'efficientamento del sistema edificio/impianti.

Per rendere efficaci le politiche di risparmio energetico intraprese a livello comunitario, ampiamente approfondite nel primo capitolo di questo elaborato di tesi, sono necessarie metodologie di analisi delle prestazioni e strumenti di pianificazione territoriale che consentano sia di studiare l'efficienza del sistema edificio/impianti, sia di perseguire la sostenibilità del processo costruttivo con riferimento al sistema città-territorio in cui il singolo edificio risulta inserito. Da un lato, quindi, c'è l'esigenza di formalizzare una metodologia per l'analisi delle prestazioni del singolo edificio, dall'altro quella di avere strumenti e metodi affidabili per poter caratterizzare un numero di edifici sufficientemente rappresentativo delle realtà urbane in modo da poter pianificare interventi di razionalizzazione energetica e di gestire gli effetti di politiche energetiche su ampia scala.

In questa introduzione, dunque, per maggiore linearità, il lavoro presentato a conclusione del percorso di dottorato sarà delineato seguendo i due piani d'analisi individuati: il singolo edificio e la pianificazione energetica alla macro scala urbana.

L'ottimizzazione delle prestazioni energetiche del sistema edificio/impianti

Nel secondo capitolo di questo sarà proposta l'analisi critica delle principali metodologie di analisi delle prestazioni degli edifici, derivate dal recepimento dello standard EN ISO 13790: *Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling*. Il punto di partenza, infatti, per l'analisi delle prestazioni attuali e potenziali di un edificio consiste nella valutazione della affidabilità dei modelli attraverso cui rappresentare la realtà, e la valutazione di quanto l'utilizzo delle metodologie, più o meno semplificate, incida sulla correttezza dei risultati. L'analisi critica delle attuali metodologie, sovente basate sull'ipotesi di regime quasi stazionario e dunque non efficaci nel prevedere il comportamento del sistema edificio/impianti al variare delle condizioni al contorno in cui esso effettivamente opera, sarà condotto parallelamente all'analisi degli algoritmi di simulazione dinamica delle prestazioni degli edifici (Building Energy Performance Simulation, BEPS).

Nel terzo capitolo, sarà presentata una metodologia per la diagnosi energetica degli edifici, evidenziando le maggiori criticità relative alla fase di caratterizzazione (audit) e

alla simulazione tramite modello energetico calibrato, laddove sia richiesta un'analisi del comportamento reale dell'edificio (Tailored Rating) e non un'analisi su dati standardizzati (Design Rating). Lo schema per l'analisi delle prestazioni attuali messo a punto consente un approfondito esame delle condizioni di funzionamento e gestione reali del sistema edificio/impianti, finalizzato all'individuazione delle criticità nelle prestazioni energetiche degli edifici allo studio delle possibilità di miglioramento globale. La procedura di diagnosi messa a punto è stata applicata a diversi edifici; in questo lavoro di Tesi, si riporteranno solo i casi studio ritenuti più rappresentativi del lavoro dei tre anni, e in particolare: Palazzo dell'Aquila Bosco Lucarelli (edificio storico) e Palazzo Ex-INPS (edificio della prima metà del '900) che costituiscono due delle sedi amministrative e didattiche del Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi del Sannio; l'edificio Day-Hospital del complesso ospedaliero "G. Pascale", sito in Napoli. Il motore di simulazione utilizzato per determinare le prestazioni attuali e potenziali degli edifici in oggetto è EnergyPlus, codice numerico che si basa – nell'utilizzo più diffuso e testato - sul metodo delle funzioni di trasferimento e possiede una struttura modulare codificata in Fortran 90, che è l'evoluzione della sinergia fra le distinte basi tecniche DOE-2 e BLAST elaborati rispettivamente dal Ministero dell'Energia (Department of Energy, DOE) e dal Ministero della difesa (Department of Defence, DOD), con il contributo dell'ASHRAE (Technical Committee 4.7 Energy calculation).

Un nodo critico nella progettazione, esecuzione e diagnosi delle prestazioni energetiche del sistema edificio, sono i ponti termici, laddove cade l'ipotesi di monodimensionalità del flusso termico, che invece è assunta da molti diffusi codici numerici per la simulazione energetica degli edifici. Come noto, la trasmissione del calore, nei suoi effetti bi/tridimensionali, non è né trascurabile né compiutamente valutabile mediante metodologie approssimate, che ricorrono a semplici incrementi percentuale dell'energia dispersa per trasmissione, o che considerano l'effetto dei ponti termici attraverso coefficienti di scambio termico lineici o puntuali, ricavati da abachi o atlanti. Di contro, soluzioni accurate richiedono l'utilizzo della termo-fluidodinamica computazionale, la quale, però, è caratterizzata da diversi limiti nell'integrazione in codici di simulazione energetica sia per il modo in cui sono modellati i fenomeni fisici sia per gli oneri computazionali richiesti.

Nell'ottica di ottimizzare gli strumenti a disposizione della diagnostica degli edifici, quindi, in questi anni, è stato messo a punto un modello numerico di risoluzione dei ponti termici implementato in Matlab, sviluppato per consentirne l'integrazione all'interno dei codici di simulazione energetica dinamica più diffusi nella ricerca in tema di efficienza energetica in edilizia. Le validazioni numeriche e sperimentali del modello

di risoluzione proposto concernono strutture tipiche, analizzando l'affidabilità del metodo in termini di precisione della soluzione e di tempi di calcolo necessari.

Nel quarto capitolo, infine, saranno approfonditi i possibili interventi attuabili per la riqualificazione energetica di edifici esistenti, finalizzati al miglioramento del sistema edificio/impianti. Il lavoro presentato è stato sviluppato su due macro-piani convergenti, relativi ad un particolare aspetto della progettazione del retrofit energetico degli edifici.

In dettaglio, nella prima parte del quarto capitolo sono presentate analisi dettagliate di singoli interventi di riqualificazione energetica, evidenziando i principali aspetti relativi alle metodologie di calcolo e ai parametri prestazionali necessari a valutarne l'efficacia. Rispetto all'ampia casistica approfondita durante questi anni, si è ritenuto interessante riportare in questo lavoro di Tesi l'approccio utilizzato nell'ambito delle tecnologie innovative per l'efficientamento energetico in edilizia. L'evoluzione delle tecnologie edilizie, necessaria per l'incremento delle prestazioni energetiche e per il raggiungimento degli obiettivi comunitari di abbattimento delle emissioni inquinanti, ha condotto anche alla ricerca di nuovi materiali e soluzioni costruttive. Attualmente, nel panorama delle *Energy Efficiency Measures* ci sono interventi che sono pronti e non diffusi (es. Phase Changing Materials, PCM), altri che sono diffusi ma non sono studiati in maniera adeguata (es. Green Roofs).

In accordo a ciò, in questo elaborato, verrà presentata l'analisi dell'effetto dell'integrazione dei *Phase Changing Materials* nei comuni materiali da costruzione attraverso casi studio su edifici tipo rappresentativi dello stock edilizio europeo sia con riferimento alla destinazione d'uso (offices, residential and commercial buildings) sia alla tipologia costruttiva. L'obiettivo è quello di valutare il potenziale risparmio energetico soprattutto con riferimento alla climatizzazione estiva e di individuare logiche di progettazione e selezione dei materiali a cambiamento di fase in funzione della tipologia di edificio e del contesto climatico in cui questo è inserito.

Un altro aspetto approfondito è l'analisi di convenienza energetica, ambientale ed economica, derivante dal ricorso a *coperture a verde* che oggi sono oggetto di elevato interesse da parte della comunità tecnica italiana. Come accennato, spesso la diffusione di soluzioni progettuali innovative non è accompagnata da un'analisi accurata dei reali potenziali di risparmio energetico e quello dei *green roofs* ne è, secondo quanto approfondito nella ricerca di questi anni, un valido esempio. Come sarà mostrato in seguito, infatti, in un'analisi accurata di convenienza economica oltre che tecnica, le coperture a verde mostrano rilevanti limiti, dovuti al costo d'installazione e, nei climi caratterizzati da bassa intensità di precipitazioni, a quelli connessi all'irrigazione necessaria per garantire l'evapotraspirazione vegetale e quindi la riduzione del fabbisogno di raffrescamento estivo.

Nella seconda parte del quarto capitolo sarà poi presentato un approccio globale alla progettazione di interventi di riqualificazione energetica di un edificio attraverso la valutazione energetica, ambientale ed economica di possibili scenari di retrofit, mediante azioni sia sull'involucro opaco e trasparente che sugli impianti asserviti all'edificio. Un'azione di retrofit efficace non può non derivare da un'accurata diagnosi energetica attraverso la quale emergano le principali criticità, (patologie) dell'edificio, e si riescono a definire le possibili "cure". Le misure di efficienza energetica consolidate (tradizionali) o innovative individuate, saranno analizzate prima singolarmente e poi nella ricombinazione in pacchetti di misure, la cui selezione è basata su un'analisi costi-benefici.

In dettaglio, in questo lavoro di Tesi verrà presentata la progettazione del retrofit energetico degli edifici per i quali è stato costruito il modello numerico di simulazione attraverso la diagnosi energetica proposta nel terzo capitolo. Nello specifico, il retrofit di Palazzo dell'Aquila Bosco Lucarelli e Palazzo Ex-INPS consentirà di evidenziare le principali problematiche dei vincoli dovuti alla natura storico-artistica di un edificio o del contesto in cui questo è inserito. Relativamente al retrofit del Day-Hospital dell'Istituto G. Pascale, una prima parte del lavoro presentato sarà incentrata sull'applicazione di interventi tradizionali sull'involucro edilizio volti a stabilizzare le condizioni interne e rimuovere le attuali criticità. Poi, sarà presentato un particolare approfondimento sulle prestazioni del sistema HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning), attraverso l'analisi delle esigenze specifiche dell'area servita dagli impianti e dei vincoli di natura intrinseca legati alle condizioni minime per lo svolgimento delle stesse attività mediche. In particolare, per questa destinazione d'uso sono state studiate nuove combinazioni delle tecnologie esistenti e strategie di controllo del microclima che consentono di massimizzare il risparmio energetico.

In conclusione di questa premessa, si sottolinea che questa metodologia di analisi di soluzioni di retrofit è coerente con il procedimento introdotto a livello comunitario dal "Cost Optimal" e dunque i casi studio possono utilmente essere considerati come punto di partenza dell'applicazione di tale metodologia al settore terziario a destinazione d'uso anche complessa, come gli ospedali, e all'edilizia storica, settori, questi, ancora non approfonditamente investigati.

Valutare la domanda di energia alla scala urbana

Come sopra anticipato, il raggiungimento degli obiettivi comunitari in termini di sviluppo sostenibile richiede un'analisi che non si fermi al singolo edificio ma che, diversamente, riguardi l'efficienza energetica in senso ampio. È necessario, cioè, sviluppare un nuovo approccio metodologico che consenta la comprensione delle

prestazioni energetiche di un intero territorio urbanizzato, nonché strumenti di gestione e di supporto alle decisioni per l'analisi ed il governo delle trasformazioni territoriali.

Una parte della ricerca quindi è incentrata sulla messa a punto di una procedura di analisi che, applicata al trinomio edificio-città-territorio, sfruttando le potenzialità di un Sistema Informativo Territoriale, consenta la caratterizzazione energetica del patrimonio edilizio di ampi contesti urbani. La metodologia sarà presentata con applicazione al centro storico della città di Benevento, per il quale è stato creato un modello geo-referenziato, attraverso cui determinare i consumi energetici annuali di ciascun edificio. La metodologia modifica e semplifica gli schemi proposti dalle normative per il calcolo delle prestazioni energetiche, in modo da renderle applicabili in maniera rapida ad un numero elevato di edifici. È evidente che un tale approccio non può basarsi sull'analisi di dettaglio di ciascun edificio, ma le semplificazioni introdotte consentono con una buona accuratezza di stimare il fabbisogno energetico di una macro-area urbana, in modo da stabilire un ordine di priorità negli interventi di efficienza energetica. Infatti, il metodo, i risultati, e la loro affidabilità consentono di elaborare "mappe energetiche urbane" (MEU), che costituiscono uno strumento importante per un'evoluta pianificazione energetica a livello di distretto, sia in termini di controllo del territorio che di valutazione delle potenzialità di riqualificazione.

Pertanto, nell'ultima parte del quarto capitolo, partendo dagli studi e dalle criticità emerse mediante analisi energetica a scala di distretto urbano, sarà affrontato l'aspetto della progettazione di sistemi di teleriscaldamento per porzioni esistenti di città. I sistemi di teleriscaldamento urbano rappresentano un'importante opportunità di utilizzazione razionale dell'energia e un doveroso contributo al contenimento della spesa energetica, alla riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra e al controllo dell'inquinamento locale. La centrale di teleriscaldamento può utilizzare tecnologie cogenerative e/o basate sullo sfruttamento delle fonti rinnovabili garantendo, in entrambi i casi, una riduzione nello sfruttamento delle fonti fossili per fini energetici. La progettazione e il dimensionamento di tali sistemi richiede, però, un'approfondita conoscenza del contesto urbano e una preliminare caratterizzazione delle diverse utenze. Le Mappe energetiche urbane possono in questo senso rappresentare un valido strumento di supporto. Pertanto, avendo messo a punto le MEU del centro storico di Benevento, è stata dimensionata una rete a servizio di due sezioni censuarie. Il caso studio presentato consente di sottolineare da un lato i vantaggi energetici ed ambientali della diffusione di reti di teleriscaldamento/teleraffrescamento urbano, dall'altro evidenzia le principali problematiche che potrebbero incorrere e le informazioni necessarie per una opportuna progettazione.

Abstract:

Structure, methodology and purpose of the research

The Communication of the Commission to the European Parliament, the Council, the European economic and social Committee and the Committee of the Regions “20 20 by 2020: Europe's climate change opportunity” finishes with a thought to the future: *The Europe of 2050 will look very different. Nowhere will this be more obvious than in the way we supply our energy needs, and the respect we show to the world around us.*

According to IV report of Intergovernmental Panel on Climate Change, “*Climate Change 2007*”, if no action is taken to reduce emissions, the concentration of greenhouse gases in the atmosphere could reach double its pre-industrial level as early as 2035, with a global average temperature increment of over 2°C. Therefore, in order to go towards a competitive low-carbon economy and a sustainable future development, the communication of European Commission “A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050”, indicates that the EU countries should reduce their emissions around 80%, within the 2050 and compared to the 1990 level.

In this direction, the EU States shared three main targets, that should be achieved within the 2020, in order to contrast the climate change:

- a 20% reduction in EU greenhouse gas emissions compared to the 1990 levels;
- raising at 20% the energy demand converted from renewable sources;
- improvement of 20% in energy efficiency.

In June 2011, the European Council confirmed that buildings represent 40% of the Union's energy demand and the existing building stock has the highest potential in achieving energy savings. Thus, the increase of the efficiency of existing buildings is one of main roads for achieving sustainability of the built environment and in order to obtain energy saving targets fixed by international standards.

The Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) (Directive 2002/91/EC) has been the main EU policy tool aimed at improving the energy performance of buildings. The Directive upgrade, by means of the recent EPBD Recast (Directive 2010/31/EC), requires that Member States set minimum performance requirements for new buildings and for buildings undergoing major renovation “with the view to achieving cost optimal levels”.

In Italy, the receiving of the EPBD Directive started during the 2005 (Legislative Decree 192/2005). Despite this, a complete transfer and application of the European

guidelines have been almost ready only during the 2009 summer, with the Presidential Decree 59/2009 and the National Guidelines for the Building Energy Certification (Ministerial Decree 26.06.2009).

The publication in Official Gazette of the Italian Decree n. 63 of the 4th June 2013 - coordinated with the conversion Law n. 90 of 3 August 2013 and concerning "Urgent provisions for the implementation of Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19th May 2010 on the energy performance of buildings for the definition of infringement proceedings put in practice by the European Commission, as well as other provisions in the matter of social cohesion" - is the last official act of the Italian legislative "iter" in matter of energy efficiency of the real estate, both public and private.

The law n. 90/2013 provides a structural change of the Italian legislation, because - when the related decrees will be issued - both methodology and minimum requirements for assessing the energy performance of buildings will change.

More in detail, by 31 December 2020, all new buildings have to be nearly zero-energy buildings. Moreover, starting from 31 December 2018, new buildings occupied and owned by public authorities have to be nearly zero-energy buildings.

As said, there is a new methodological approach for the evaluation of building energy performances. New minimum energy performance requirements for buildings or building units will be set with a view to achieving "cost-optimal" levels. These last consist in the energy performance levels that lead to the lowest cost during the estimated economic lifecycle of the building or building elements. The methodology framework - to be used for calculating the cost-optimal levels for new and existing buildings and building elements - has been clarified in the Commission Delegated Regulation (EU) no 244/2012. The first step for the implementation of this methodology is the definition of Reference Buildings. It means a hypothetical or real reference building - characterized by defined geometry, thermo-physics and active systems - that achieves typical energy performances, typical functionality and typical costs representative of climatic conditions and geographic location.

Moreover, with reference to the Italian peculiarities, according to the Italian Plan for the National Energy Efficiency, more than 65% of energy saving potential is connected to the energy rehabilitation of the building sector, especially in regards to the civil buildings, and thus tertiary, school, dwellings and institutional/educational. Since 2007, the Italian Government strongly funded energy improvements in form of tax incentives. This strategy produced a saving in primary energy of about 1'435 GWh/year and the polluting emissions have decreased around 305 kt per year.

Starting by the aforementioned legislative frame and from the present conditions of the Italian building stock, the scientific research carried out during the Doctorate period is aimed to support the development and diffusion of innovative solutions and technologies, as well as a new methodological approach to the building design, in order to optimize primary energy requests and living conditions. The study will concern both new buildings and, mainly, refurbishment of the existing ones.

The title of this Thesis clarifies the formal organization of the presented results: *Energy performance of buildings: methodologies, equipment and technologies for reducing the primary energy requests of the system “building / HVAC plants”*.

The Thesis has been focused on two main aspects:

- a methodological approach for the analysis and diagnosis of the energy performance of buildings;
- analysis of possible energy effective actions, with reference to innovative technological solutions in order to improve the building energy performances, for both the building envelope and the installed active energy systems.

According to the energy saving policies, extensively detailed in the first chapter of this Thesis, it is necessary to formalize a methodology for analyzing accurately the performance of each single building and for characterizing a number of buildings sufficiently representative of the entire urban area.

This abstract, for clarity, summarizes the main aspects of the work carried out during the Doctorate years, according to these two research levels: the optimization of consumption of an individual building and the energy performances of buildings with reference to a whole urban context.

Optimization of energy performance of the integrated system building-hvac plants

In the second chapter of this Thesis, a critical analysis of the main methods for the analysis of the energy performance of the buildings is presented, according to the standard EN ISO 13790: *Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling*. So, it will be proposed a critical study of existing methodologies, often based on the assumption of quasi steady-state calculation. This makes possible the sizing of the heating and cooling systems, but it is not enough in order to estimate the energy performances of the building and related HVAC plants, both in terms of microclimatic control performances and energy demands. Instead, the numerical codes for the dynamic energy simulations of the integrated system building-HVAC plants allow the dynamic management of all the variables that influence the seasonal operation of the systems (external climatic conditions, time-dependent occupancy, lighting system, thermal inertia of the building envelope, performances of

HVAC at the part load conditions, control, and so on). For this reason, in the second chapter, a large analysis of algorithms for hourly and sub-hourly energy investigations will be proposed.

The target is the implementation of a method for a reliable energy diagnosis of buildings, aimed to an integrated design of energy refurbishment, proper to take into account all topics related to energy efficiency in buildings, and thus both building envelope and active systems. More in detail, the methodology will be applied to an historical building Palazzo dell'Aquila Bosco Lucarelli and to a building, presently known as EX-INPS. Both are located in the ancient center of an Italian city, Benevento. These buildings host didactic and administrative uses of the Department of Engineering of University of Sannio. Moreover, the reliability of the proposed approach will be investigated with reference to a medium-size health care facility, the National Institute for the Cancer Treatment "G. Pascale", located on the hill area of Naples.

Together with the formalization of a kind of procedural protocol, this study is aimed at underlining also the common criticalities related to an accurate energy diagnosis of buildings, for correctly identifying the building energy performances (i.e., "Tailored Ratings") and not the ones under conventional boundary conditions (i.e., "Asset Ratings").

More in detail, the proposed methodology - by crossing data derived by energy audits, energy signatures by investigations of the historical energy requests, in-situ investigations (as, for instance, building infrared thermography and studies by heat flow meters) - allows an accurate building modeling, in order to simulate the present energy performances by means of a building simulation program operating under transient conditions. The calibrated hourly energy simulations have been generally performed with EnergyPlus; it makes possible the simulation of heating, cooling, lighting, ventilation and all the other energy flows interesting the buildings. This simulation engine - originally based on the resolution methodologies of BLAST and DOE-2, developed respectively by the Department of Defence (DOD) and the Department of Energy (DOE), with ASHRAE (Technical Committee 4.7 Energy calculation) - has been recently restructured, by including innovative analysis capabilities.

In order to optimize the tools available for the buildings diagnosis, in this years, it has been validated a numerical model, written in MatLabTM, which solves thermal bridges - under bi-dimensional heat transfer conditions - in transient regime. Thermal bridges are areas of risk of the building envelope, but these are often neglected in energy audits, since most numerical codes for building energy simulations adopt heat transfer models based on one-dimensional heat fluxes. Really, often this causes lack of reliability. More in detail, the model allows estimation of thermal bridge effects under

dynamic conditions (hourly and sub-hourly) and it has been validated both numerically and experimentally, through comparisons with FVM methods and data measured by means of a proper apparatus, consisting in a set of heat flow meters, thin flux sensors, temperature probes, infrared thermographic camera. About it, typical thermal bridges will be investigated in this Thesis.

In the fourth chapter, finally, possible and feasible interventions for refurbishment of the energy efficiency of existing buildings are largely studied. The work presented was developed in two converging steps, focused on the main aspects of the design of the energy retrofit of buildings.

In detail, the first part will show the analysis of energy improvements achievable with innovative technologies for energy efficiency in buildings, focusing on calculation methods and performance parameters. Currently, among various Energy Efficiency Measures, there are solutions that are technologically ripe but not widespread (eg. Phase Changing Materials, PCM), others that are widespread but not studied adequately (eg. Green Roofs).

According to this notation, in order to reduce the energy demands for air-conditioning, with reference to both the heating and cooling seasons, this Thesis tries to propose guidelines for both the design and the optimization of new passive technologies, such as the phase change materials (PCMs). More in detail, the energy, environmental and economic impacts of single and double layer of PCM wallboards, adopted as energy efficiency measure, will be investigated for some case study buildings, assumed as typological of the building stock.

Furthermore, a large parametric analysis will be proposed for evaluating the technical and economic feasibility of green roofs, applied to a modern office building, by considering various vegetation typologies and different external coatings. Even if green roofs show satisfactory energy and ambient performances, if maintenance and irrigation costs are considered, these are – very often – quite poorly profitable energy efficiency measures. This outcome will be verified for several European climates, intensity of rainfalls and needs of irrigation.

Moreover, in the second part of the fourth chapter, various designs of energy refurbishments of building will be presented, with a comprehensive approach based on energy assessment and environmental and economic feasibility of some possible scenarios of retrofit. The energy efficiency measures selected will be analysed individually and then in recombination in packages of measures, whose selection is based on cost-benefit analysis.

More in details, the same case studies proposed in the chapter three have been considered. The knowledge of historical energy requests coupled to the building

profiles of use (i.e., occupancy, schedules of indoor temperatures, HVAC system's activation, and so on) allowed adjustments of the numerical model that, once calibrated, has been used as present scenario, useful for design and evaluate a set of energy efficiency measures, aimed to improve the building energy performances. The retrofit action will involve both the building envelope and the HVAC systems and equipment.

In particular, for Palazzo dell' Aquila Bosco Lucarelli and Palazzo Ex-INPS, the proposed actions for the energy rehabilitation have been chosen in order to take into account the particular boundary conditions, and thus the historical value of the building and/or the historical context in which it is located.

As regard the energy retrofit of Hospital "G. Pascale", the achievable energy savings will be firstly examined by improving the thermal-physical characteristics of the building envelope and then by analyzing the role played by the HVAC systems and equipment. The indoor comfort conditions will be analyzed as well as the reduction of energy demands, depending on various installable HVAC systems. Indeed, the active plants are characterized by quite different energy demands, due to different achievable quality of microclimatic control and indoor air quality.

In conclusion of this abstract, it is emphasized that this method of analysis agrees with the procedure "Cost-Optimal" and, therefore, the case studies can be considered as the starting point of the application of this methodology to the tertiary sector; indeed, presently these aren't thoroughly investigated.

Energy performance of buildings of urban contexts and districts

As above-mentioned, the achievement of European objectives - in terms of sustainable development - requires an analysis of energy performance of large urban areas. Thus, a new methodological approach for characterizing energy performances of an entire urban area and aimed to improving the building energy use and supply, can be a relevant target.

For this reason, a part of the research will be focused on the description of a numerical procedure which allows the characterization of the energy performances of new and existing buildings, in large urban context, through Geographic Information Systems (GIS). The proposed methodology tries to codify a new process of integrated urban planning, aimed to identify and design energy efficient new buildings and refurbishment of existing ones, for sustainable urban development and growth.

Therefore, this Thesis proposes a method for the definition of geo-referenced models, through which it will be possible to determine the energy consumption of each building and then to support the management of territorial transformations. Using the

entire buildings as control volume, their behaviors have been studied according to the standard EN ISO 13790, for the evaluation of the heating energy required for the winter heating, and by developing a hybrid new methodology for the summer cooling prediction. The application of standardized procedures, indeed, is too computationally onerous, when the target is the indicative distribution of the energetic quality of urban areas.

The new procedure has been applied to over 500 buildings of the historical center of Benevento, an Italian city, and the reliability of outcomes has been verified by various comparisons. The results allowed the development of "urban-energy maps" (UEMs), that provide geo-referenced information of energy performances, with reference to the heating and cooling energy demands, for individual buildings as well as for entire parts of cities. Thus, the UEMs are an important tool that the public institutions can use for an advanced energy planning, in terms of both territorial control and evaluation of the energy retrofit potential.

Indeed, UEMs can be used for evaluating present criticalities, and for designing possible urban energy retrofits, as installation of smart grids, district heating and cooling systems, coupled – for instance – with combined cooling, heat and power systems (CCHP), in order to satisfy various energy demands. Indeed, these maps allow the individuation of energy demand distribution and identification of suitable areas, as well as the calculation of seasonal energy demands and daily distribution of loads, with reference to each building and then for the entire urban areas.

As example, in this Thesis, the design of thermal and electric micro-grids that connect two urban cadastral sections of the city center of Benevento will be described. More in detail, various energy scenarios - on varying the designed alternative systems – will be analyzed, by optimizing the achievable energy and environmental benefits.

Capitolo 1

Tre volte 20 per il 2020: l'efficienza energetica in edilizia

La Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle Regioni “Due volte 20 per il 2020 [1]: L'opportunità del cambiamento climatico per l'Europa” si conclude con un pensiero rivolto al futuro: *l'Europa del 2050 sarà molto differente da quella di oggi, e questa differenza si evidenzierà più che altrove nel modo in cui faremo fronte alle nostre esigenze energetiche e nel rispetto che avremo per il mondo intorno a noi.*

Il primo capitolo di questo elaborato di tesi sviluppa e approfondisce questo pensiero che può essere considerato il fulcro delle attuali politiche economiche e sociali internazionali.

Il consenso scientifico sull'evidenza dei cambiamenti climatici e sulle sue cause è ormai generale: l'attuale dipendenza del sistema energetico mondiale da fonti primarie di origine fossile combuste per soddisfare circa l'80% del fabbisogno globale, è la principale causa delle emissioni di anidride carbonica che stanno alterando in modo pericolosamente rapido il clima del pianeta.

Continuare ad emettere gas serra ad un tasso uguale o superiore a quello attuale causerebbe un ulteriore riscaldamento e provocherebbe molti cambiamenti nel sistema climatico globale del XXI secolo: questa la conclusione del IV rapporto “*Climate Change 2007*” [2]. Il Comitato Intergovernativo sui Cambiamenti Climatici (*Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*), nel confermare le indicazioni generali già presenti nel precedente rapporto del 2001, ha fatto salire dal 66% al 90% la stima dell'incidenza del fattore antropico sull'innalzamento della concentrazione di gas serra in atmosfera. Per mantenere l'aumento del riscaldamento entro il limite dei 2°C, oltre il quale i rischi di un collasso degli ecosistemi sono elevatissimi, vanno attuate riduzioni delle emissioni di gas serra dell'ordine del 60-80% entro il secolo.

Ciò significa che prolungare nel futuro la struttura energetica attuale, con i prevedibili aumenti dei consumi e delle emissioni, non è semplicemente compatibile con il futuro del pianeta e, solo attraverso l'adozione di adeguate soluzioni tecniche supportate da adeguate decisioni politiche, si potrà invertire l'attuale tendenza ed assicurare uno sviluppo sostenibile.

Il concetto di “*sviluppo sostenibile*”, si trova per la prima volta all'interno del Rapporto Brundtland dal titolo “*Our Common Future*” redatto nel 1987 dalla Commissione mondiale per l'Ambiente e lo Sviluppo (*World Commission on*

Environment and Development, WCED), istituita nel 1983 su incarico delle Nazioni Unite. All'interno del rapporto viene formulata una linea guida per lo sviluppo sostenibile, ancora oggi valida, e viene data la definizione a cui attualmente si fa riferimento: *“uno sviluppo che garantisca i bisogni delle generazioni attuali senza compromettere la possibilità che le generazioni future riescano a soddisfare i propri”*. Ciò non significa rinunciare al benessere ed allo sviluppo culturale e tecnologico ma garantirlo senza minacciare irreversibilmente le risorse del pianeta.

In ambito internazionale, la preoccupazione dovuta alle alterazioni climatiche e la consapevolezza della dipendenza da fonti energetiche esauribili ha portato alla *United Nations Conference on Environment and Development* (UNFCCC), nota come *“Earth Summit”*, tenutasi a Rio de Janeiro nel 1992, dove i Paesi partecipanti hanno sottoscritto un *piano di azione per la realizzazione dello sviluppo sostenibile proiettato nel XXI secolo*. In questo piano di azione, chiamato *“Agenda 21”* (Agenda di azioni per il XXI secolo), erano contenute indicazioni di natura programmatica che, oltre a trattare i grandi problemi ambientali, cercassero di formulare delle raccomandazioni che potessero coniugare i cosiddetti *“tre pilastri dello sviluppo”*: economia, ambiente e società. L'ultimo atto della linea programmatica stabilita dall'UNFCCC è stato il Summit delle Nazioni Unite sul cambiamento climatico, tenutosi a Doha (dicembre 2012), conclusosi con un prolungamento degli impegni di Kyoto fino al 2020, e l'impegno a redigere, entro il 2015, un nuovo accordo globale che, a partire dal 2020, determini un impegno comune a tutti gli Stati per risolvere cause e conseguenze del cambiamento climatico. Sostanzialmente in quest'ultimo vertice i governi si sono impegnati a cercare un accordo più ampio del *Protocollo di Kyoto* sottoscritto nel 1997, primo vero atto della nuova strategia internazionale.

Il tema efficienza energetica riveste sempre maggiore importanza per l'Europa, dal pacchetto clima energia 20-20-20 per il 2020 e susseguenti atti programmatici e normativi, alla più recete direttiva sull'efficienza energetica (Direttiva 2012/27/CE [3]). Con la sua approvazione si configura un quadro di prescrizioni e vincoli assai impegnativo ed ambizioso finalizzati ad ottenere un decisivo cambio di marcia nel processo di efficientamento e riduzione dell'impatto ambientale con misure che investono in modo importante i diversi settori dell'efficienza.

La constatazione che ogni provvedimento in materia di risparmio energetico non può prescindere dal fatto che l'energia impiegata nel settore residenziale e terziario rappresenta circa un terzo del consumo di energia finale, in linea con quanto descritto nelle premesse della direttiva europea 2002/91/CE - *Energy Performance of Buildings, EPBD* [4] -, oggi aggiornata dalla Direttiva 2010/31/CE (EPBD recast,[5]) , ha condotto, in Italia, al decreto legislativo n. 192 del 19 agosto 2005 [6] (*Attuazione della direttiva*

2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia) modificato ed integrato ripetutamente fino al recente testo del decreto legge n. 63, del 4 giugno 2013, coordinato con la legge di conversione 3 agosto 2013, n. 90 [7], recante: “*Disposizioni urgenti per il recepimento della Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica nell'edilizia per la definizione delle procedure d'infrazione avviate dalla Commissione europea, nonché altre disposizioni in materia di coesione sociale*”.

L'obiettivo generale è quello di migliorare le prestazioni energetiche degli edifici con una progettazione accurata dell' involucro edilizio e con il ricorso integrato alle fonti rinnovabili, nonché attraverso la riqualificazione energetica degli edifici esistenti. Quest'ultimo punto è di importanza strategica se si considera che il 40% del patrimonio edilizio italiano è stato costruito prima del 1976, anno di entrata in vigore della prima legge (la 373, [8]) sul risparmio energetico nelle costruzioni edilizie, con cui si imposero limiti minimi all'isolamento termico degli edifici. Pertanto la qualità energetica della gran parte dell'architettura italiana, sia per lo stato di conservazione che per le ataviche tecniche costruttive, è molto lontana dagli standard perseguiti.

Il risparmio di energia primaria attribuibile agli interventi di riqualificazione energetica che hanno beneficiato degli incentivi fiscali previsti dalla Legge Finanziaria 296/06 (e successive modifiche) nel 2011 è stato superiore a 1'435 GWh/anno, con una conseguente riduzione di CO₂ emessa in atmosfera pari a 305 kt/anno. È necessario, però, che la scala di intervento della riqualificazione energetica, se si vogliono raggiungere obiettivi significativi, sia ampliata: gli interventi a livello di singole abitazioni non sono sufficienti, considerando le potenzialità e l'entità nonché peculiarità del patrimonio edilizio italiano. Serve operare a livello di macro-scala urbana, con una pianificazione degli interventi che mappi le potenzialità del territorio, identificando possibilità di intervento su interi complessi (ospedali, scuole etc.) di immobili e/o parti di città.

Per ottenere ciò, è necessario un salto di qualità, di cui si cominciano oggi a notare le prime tracce. Facendo infatti riferimento ai dati del “Programma operativo interregionale (POI) Energie Rinnovabili e Risparmio Energetico 2007-2013” si trovano finanziamenti per 272 interventi di efficientamento energetico e produzione di energia da fonti rinnovabili sugli edifici pubblici, oltre a 400 studi di fattibilità e diagnosi energetiche. Al 30 giugno 2013, sono stati assegnati ai beneficiari circa 930 milioni di euro e ne sono stati spesi circa 440, pari rispettivamente, all'87% e al 44% della dotazione finanziaria del Programma.

La normativa sul risparmio energetico in edilizia ad oggi sta subendo una progressiva evoluzione e radicale trasformazione energetiche dovuta all'esigenza

sempre più frequente di stabilire valori di riferimento, *benchmark*, per la valutazione delle prestazioni energetiche reali dei sistemi edificio–impianto analizzati, e di stimare i costi energetici ed economici di consumo per la stesura di contratti di gestione del servizio energia. Per quanto riguarda i dati di benchmark, abitualmente si tende a confrontare il consumo energetico dell'oggetto edilizio posto sotto analisi con valori tratti dalla letteratura internazionale, difficilmente calzanti con le caratteristiche climatiche e edilizie italiane. Si ricorre quindi all'utilizzo di fattori per la correzione del valore di riferimento, al fine di adattarlo al contesto in cui è inserito l'edificio oggetto dell'analisi.

La definizione di un Reference Building costituisce inoltre lo start-up per l'applicazione della nuova metodologia di classificazione delle prestazioni imposta a livello europeo dal Regolamento delegato n. 244/2012 della Commissione Europea del 16 gennaio 2012 [9].

In Italia, la definizione di Reference Building incontra alcune difficoltà oggettive, vista la peculiarità del contesto edilizio italiano:

- una grande presenza di edifici storici;
- un basso tasso di turn-over in edilizia;
- una diffusa mancanza di controlli sul rispetto delle norme di prestazione energetica dell'edificio;
- significative differenze climatiche e di tipologie costruttive tra le regioni;
- diversi valori di trasmittanza e sistemi impiantistici sul territorio nazionale, senza una esatta correlazione tra l'età dell'edificio e livello di isolamento.

Attualmente il riferimento è rappresentato dal progetto TABULA (*Typology Approach for Building Stock Energy Assessment*) ma molte risultano ancora le categorie di edificio escluse, soprattutto relativamente al settore terziario.

Gli aspetti connessi a questo breve quadro di sintesi introduttivo saranno sviluppati nelle tre sezioni in cui è organizzato il primo capitolo di questo lavoro di tesi.

Nel dettaglio, la prima sezione di questo capitolo analizza il sistema energetico nazionale e internazionale, evidenziando i settori d'uso a maggior incidenza e le principali tappe e i principali provvedimenti in materia di cambiamenti climatici e sviluppo sostenibile. D'altra parte, le problematiche relative all'energia e all'ambiente e quelle connesse al cambiamento climatico hanno acquisito nuovi caratteri e ulteriore rilievo nel quadro dell'attuale crisi economica, per cui la sostenibilità dello sviluppo è diventato un tema che associa all'esigenza della salvaguardia del pianeta quella della crescita. La seconda parte di questo capitolo pertanto analizza criticamente il contesto normativo e legislativo riguardante l'efficienza energetica in edilizia, mettendo in

evidenza le potenzialità di questo settore sia con riferimento alla progettazione ex-novo che – soprattutto - alla riqualificazione energetica del patrimonio edilizio emergente. Infine nella terza sezione sarà approfondito il concetto di *Reference Building*, così come è attualmente trattato a livello internazionale e si cercheranno di individuare le basi teoriche, dal punto di vista metodologico, per la definizione di tali edifici.

È proprio a partire dalle opportunità evidenziate da quest'analisi e dalle sfide verso cui l'Italia e l'Europa tutta muovono, che si è sviluppato l'intero lavoro di tesi maturato in questo percorso di dottorato, poi presentato nei successivi capitoli attraverso casi studio e indagine numeriche.

1.1 Strategia energetica nazionale: un'energia più competitiva e sostenibile

Far fronte alle conseguenze relative al cambiamento climatico, assicurare la competitività del sistema produttivo e garantire la sicurezza e l'accessibilità energetica a tutti i cittadini sono le problematiche che segneranno l'Italia e l'Europa almeno fino al 2050, e che richiederanno una trasformazione radicale del sistema energetico e del funzionamento della società. Coerentemente con queste necessità, nel marzo 2013, il governo italiano ha pubblicato il documento ufficiale con la nuova *Strategia Energetica Nazionale (SEN)* [10].

Il primo obiettivo individuato in questo documento è quello di *ridurre significativamente il gap di costo* dell'energia per i consumatori e le imprese, allineando prezzi e costi dell'energia a quelli europei al 2020, e assicurando che la transizione energetica di più lungo periodo (2030-2050) non comprometta la competitività industriale. A questo si aggiunge il *superamento degli obiettivi ambientali e di decarbonizzazione* definiti dal Pacchetto europeo Clima-Energia 2020 (cosiddetto "20-20-20") [1] e di *ridurre la dipendenza energetica* con il miglioramento della sicurezza di approvvigionamento. Infine, lo sviluppo del settore energetico potrebbe contribuire alla *crescita economica sostenibile* poiché lo sviluppo della filiera industriale dell'energia può fornire opportunità, nazionali e internazionali, in continua evoluzione.

In questa prima sezione pertanto saranno contestualizzati tali obiettivi, esaminando i principali aspetti, a livello nazionale ed internazionale, della struttura dell'offerta e della domanda di energia ed il modo in cui il rapporto tra le due è capace di influenzare gli scenari presenti ed attesi.

1.1.1 Il contesto energetico internazionale

Secondo i dati forniti dal rapporto annuale della BP Review of World Energy, reso noto nel giugno 2013 [11] nel 2010 i consumi di energia primaria mondiali sono

aumentati del 32% rispetto al 2001, con andamenti fortemente contrastanti nelle diverse regioni geografiche (Tabella 1.1), segnando una riduzione nella sola Unione Europea (-5%).

In particolare, tra le fonti di energia, l'uso di gas e rinnovabili è sempre più in espansione, mentre il petrolio sta progressivamente perdendo peso (dal ~45% dell'energia primaria degli anni '70 a poco più del 30% attuale e al ~27% previsto nel 2035).

	Energia primaria [Mtep] 2001	Energia primaria [Mtep] 2012	Variazione 2001/2012	Incidenza sul totale (dati 2012)
Nord America	2698	2725	1.0%	22%
Sud e Centro America	469.8	665.3	42%	5.3%
Europe ed Eurasia	2858.	2929	2.5%	23%
Medio Oriente	444.6	761.9	71%	6.1%
Africa	282.3	403.3	43%	3.2%
Asia (Pacifico)	2666	4992	87%	40%
Paesi OECD ¹	5410	5489	1.5%	44%
Paesi non-OECD	4009	6988	74%	56%
Unione Europea	1756	1673	-4.7%	13%
Ex-Unione Sovietica	937.5	1029	10%	8.2%
Totale	9419	12'477	32%	-

Tabella 1.1: Consumo di energia primaria nel mondo, confronto tra il 2001 e il 2012.

Fonte: BP Review of World Energy

Poiché l'economia globale è in fase di rallentamento, prevedere l'evoluzione dello scenario energetico futuro è un esercizio complesso. Facendo riferimento ai trend elaborati dall'Agenzia Internazionale per l'Energia (IEA), si prevede che la domanda di energia nel mondo sarà in crescita (+35% al 2035), ma con un andamento fortemente differenziato e con i paesi in via di sviluppo che, tra vent'anni, potrebbero rappresentare oltre il 60% della domanda globale. Le maggiori preoccupazioni circa l'evoluzione del bilancio domanda-offerta, riguardano non solo l'esauribilità di fonti fossili e gas ma anche la stabilità dei mercati e la sicurezza degli approvvigionamenti. Infatti la vulnerabilità delle economie rispetto a possibili interruzioni di fornitura aumenterà di pari passo con il forte sviluppo dei commerci internazionali dell'energia, poiché i nuovi giacimenti sono sempre più costosi da sfruttare.

Approfondendo il dato di consumo relativo all'Unione Europea, si ricava che il maggior settore di uso finale è quello civile (41%), seguito dai trasporti (32%) e dall'industria (25%) [12]. Ciò che si riscontra elaborando i dati dei bilanci energetici dei

¹ OECD: Organization For Economic Co-operation and Development. Ne fanno parte: Australia, Austria, Belgio, Canada, Cile, Corea del Sud, Danimarca, Finlandia, Francia, Germania, Giappone, Grecia, Ungheria, Islanda, Israele, Italia, Lussemburgo, Messico, Nuova Zelanda, Norvegia, Olanda, Polonia Portogallo, Regno Unito, Repubblica Ceca, Repubblica di Irlanda, Slovacchia, Slovenia, Spagna, Svezia, Svizzera, Turchia, USA.

diversi paesi è che il percorso intrapreso per l'efficientamento energetico ha consentito al netto una riduzione di 130 Mtep sugli usi finali tra il 2000 e il 2010, e il maggior miglioramento si è raggiunto nel settore civile (38% del totale). Recentemente, con la Comunicazione COM (2011) 119 [13] la Commissione Europea ha confermato che questo è il risultato a cui puntare anche nel prossimo futuro, poiché il settore degli edifici è quello a maggior potenziale.

Per la civiltà contemporanea la disponibilità di energia costituisce sia una premessa indispensabile per assicurare gli alti livelli di qualità della vita raggiunti, sia la chiave dello sviluppo economico e sociale. All'interno di tale contesto, il problema delle emissioni risulta legato in maniera diretta all'uso dei combustibili fossili a cui le economie dei paesi industrializzati ed emergenti sono legate dato che, attualmente, i derivati del petrolio rappresentano ancora la fonte energetica meno costosa.

Attualmente i paesi che rappresentano oltre l'80% delle emissioni globali si sono impegnati a raggiungere obiettivi nazionali nell'ambito degli accordi della Conferenza mondiale sul clima (COP 16) in Messico (*Cancun Climate Change Conference, Novembre 2010*). Tuttavia, secondo un recente rapporto dell'UNEP (*United Nations Environment Programme*) [14], la piena attuazione di tali impegni permetterebbe di ottenere soltanto il 60% delle riduzioni di emissione necessarie entro il 2020. In assenza di un'azione risoluta a livello mondiale per contrastare il cambiamento climatico, le temperature medie potrebbero aumentare di oltre 2°C entro il 2050 e di oltre 4°C entro il 2100. Per scongiurare questo pericolo, entro il 2050 le emissioni globali di gas serra dovranno essere almeno dimezzate rispetto al 1990.

1.1.2 Le strategie europee per la de-carbonizzazione e lo sviluppo sostenibile

Negli ultimi anni, l'Unione Europea (UE) ha assunto un ruolo di leadership mondiale nel processo di riduzione delle emissioni di gas serra. Il passo fondamentale in tale direzione è stato il *Pacchetto Clima-Energia* (approvato nel dicembre 2008 e pubblicato nella Gazzetta ufficiale del 5 giugno 2009) in cui sono fissati gli obiettivi energetici e ambientali per il 2020: 20% della riduzione dei consumi, 20% di riduzioni delle emissioni, 20% di rinnovabili.

Come dichiarato nella Comunicazione COM(2011) 112 [15], per operare la transizione verso un'economia competitiva a basse emissioni di carbonio, l'UE deve prepararsi ad abbattere le proprie emissioni dell'80% entro il 2050 rispetto al 1990. La proiezione di riferimento, nella parte superiore di Figura 1.1, mostra che con le politiche esistenti, si potrebbe superare l'obiettivo di riduzione del 20% e conseguire entro il 2020 un abbattimento delle emissioni del 25%. Inoltre l'analisi dei vari scenari rivela che se venissero adottate ulteriori strategie in funzione delle opzioni tecnologiche man

mano disponibili, una riduzione delle emissioni dell'80% al 2050 comporterebbe riduzioni interne delle emissioni del 40% e 60% rispetto ai livelli del 1990 entro il 2030 e 2040.

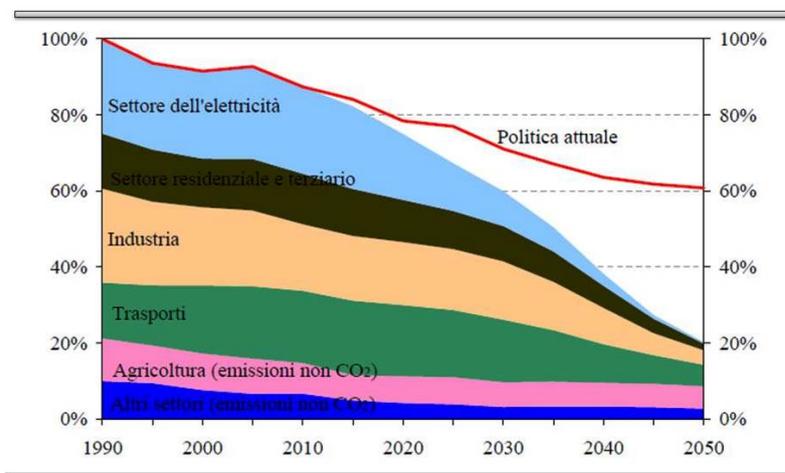


Figura 1.1: Proiezione al 2050 delle potenziali riduzioni delle emissioni di gas serra dell'UE.
Fonte: Comunicazione della Commissione Europea COM (2011) 112

Nel documento citato, sono state anche evidenziate possibili piste di intervento per i settori più importanti, esaminando una serie di scenari basati su diversi tassi di innovazione tecnologica e prezzi dei combustibili fossili. Ne sono scaturiti risultati ampiamente convergenti per quanto riguarda l'entità delle riduzioni necessarie in ciascun settore nel 2030 e 2050, come si evince dai dati in Tabella 1.2.

Riduzione inquinanti rispetto al 1990	2005	2030	2050
Produzione di elettricità (CO ₂)	-7%	Da -58% a -8%	Da -93% a -9%
Industria (CO ₂)	-20%	Da -34% a -0%	Da -83% a -7%
Trasporti (escl. marittimi) (CO ₂)	+30%	Da +20% a -9%	Da -54% a -7%
Residenziale e Servizi (CO ₂)	-12%	Da -37% a -3%	Da -88% a -1%
Agricoltura (CO ₂)	-20%	Da -36% a -7%	Da -42% a -9%
Altre emissioni (diverse da CO ₂)	-30%	Da -72% a -7%	Da -70% a -8%
Totale	-7%	Da -40% a -4%	Da -79% a -2%

Tabella 1.2: Riduzioni attese delle emissioni inquinanti con le politiche di efficienza energetica.
Fonte: Comunicazione della Commissione Europea COM (2011) 112

Come si evince dallo scenario tracciato, il settore civile (residenziale e servizi), offre possibilità di ridurre le emissioni a breve termine e a costi contenuti, in primo luogo grazie al miglioramento dell'efficienza energetica nell'edilizia. Mentre gli edifici nuovi dovranno essere progettati ad altissima efficienza energetica, secondo il nuovo concetto di *Nearly Zero Energy Building* (Edifici ad energia quasi zero, nZEB), che sarà

approfondito nella seconda sezione di questo capitolo, la ristrutturazione del parco immobiliare esistente, e in particolare il finanziamento dei necessari investimenti, rappresentano invece una sfida molto complessa.

L'analisi della Commissione Europea, infatti, prevede che nel prossimo decennio occorrerà aumentare di 200 miliardi di euro gli investimenti in componenti e attrezzature per l'edilizia a basso consumo energetico.

1.1.3 Energia e ambiente in Italia: i dati, la sfida e le opportunità

La domanda di energia primaria in Italia, nel 2012, stando ai dati del Ministero dello Sviluppo Economico, si è attestata sui 177.8 Mtep, il 3.5% in meno rispetto al 2011 [16]. La contrazione del fabbisogno energetico del 2012 è stata determinata dall'effetto di diversi fattori: il clima più mite, il perdurare della crisi economica e l'applicazione di politiche di efficienza energetica. La composizione percentuale delle fonti energetiche (Figura 1.2) impiegate per la copertura della domanda nel 2012 è stata caratterizzata, rispetto all'anno precedente, dalla riduzione della quota del petrolio dell'8% e da un significativo incremento delle rinnovabili, cresciute del 9%.

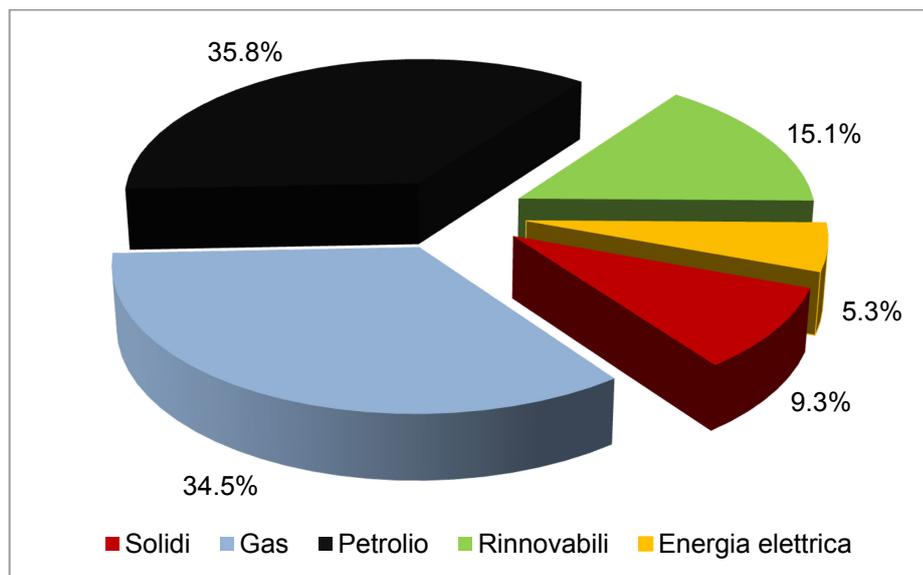


Figura 1.2: Domanda di energia primaria per fonte, anno 2012.
Fonte: elaborazioni dati BEN 2012- MSE

Nel 2012, gli impieghi finali di energia sono stati pari a 129.2 Mtep, con una riduzione del 4.2% rispetto al 2011. La ripartizione degli impieghi tra i diversi settori mostra una forte incidenza di quello relativo agli usi civili, con una quota del 36.1% rispetto al 34.4% del 2011. Seguono il settore dei trasporti (30.3%) e l'industria (24.0%). La parte rimanente è di pertinenza del settore agricoltura e delle scorte di carburante per il trasporto marittimo internazionale (cosiddetti bunkeraggi), mentre il

5.0% è destinato ad usi non energetici, in particolare nell'industria petrolchimica (Tabella 1.3).

Fabbisogno per settore e per fonti [Mtep]						
	Solidi	Gas	Petrolio	Rinnovabili	Energia elettrica	Totale
Industria	4.356	12.285	4.263	0.270	9.810	30.983
Trasporti	-	0.753	36.181	1.273	0.925	39.132
Usi civili	0.004	25.545	3.675	3.402	13.996	46.621
Agricoltura		0.123	2.167	0.151	0.499	2.940
Usi non energetici	0.088	0.467	5.864		-	6.419
Bunkeraggi	-	-	3.124		-	3.124
Totale	4.447	39.173	55.274	5.095	25.229	129.218

Tabella 1.3: Consumi finali di energia 2012, distribuzione per fonti.
Fonte: elaborazioni dati BEN 2012- MSE

Dalle elaborazioni del *Ministero dello Sviluppo Economico* [16], si ricava che, nonostante il crescente sviluppo delle attività proprie del settore terziario, il settore residenziale assorbe ancora il 60% dei consumi complessivi del settore civile. Nel 2010, il consumo energetico del settore residenziale è stato di circa 28 Mtep, con un incremento dell'8.3% rispetto al 2009. La principale fonte energetica utilizzata, il gas naturale, ha registrato un aumento del 9.0%; incrementi si sono registrati anche per la legna (+52%) e per l'energia elettrica (+0.9%). Le altre fonti energetiche hanno subito tutte una riduzione del consumo.

Dalla ripartizione dell'utilizzo dell'energia nel settore residenziale [17] emerge che il riscaldamento copre oltre due terzi dei consumi complessivi, risultando nel 2010 pari al 68% del totale, e tale utilizzo appare stabile nel tempo (69% nel 1990). Il consumo per uso cucina è passato dal 7 al 6%, quello per la produzione di acqua calda sanitaria è diminuito dall'11 al 9%, mentre, il consumo di energia elettrica per gli usi "obbligati" è aumentato dal 13 al 17% (Figura 1.3). Da questi andamenti comincia ad emergere un trend sempre più evidente: la diffusione dei sistemi per la climatizzazione estiva usualmente ad attivazione elettrica.

In Figura 1.4 viene mostrata l'evoluzione del consumo di energia per abitazione in diversi paesi europei. Si evince che per l'Italia c'è stata una riduzione dell'8.3% nel 2010 rispetto al 2000 ma questa variazione è inferiore al corrispondente valore della media UE-27 (-15.5%) ed in particolare al valore delle riduzioni ottenute da Germania, Francia e Regno Unito.

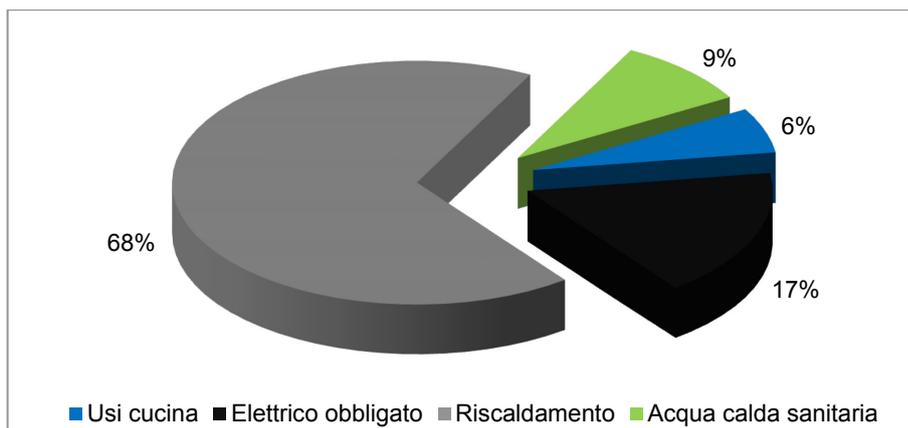


Figura 1.3: Suddivisione dei consumi energetici nel settore residenziale.
Fonte RAEE-2011

Il consumo elettrico per abitazione, nel periodo considerato, in Italia ha registrato una riduzione di poco superiore al 4%, collegata all'acquisto e all'utilizzo da parte dei consumatori di apparecchi elettrici più efficienti, rispetto all'aumento di circa il 6% della media europea; il consumo termico per abitazione è diminuito, ma in misura notevolmente inferiore a quanto verificatosi per la maggior parte dei Paesi europei.

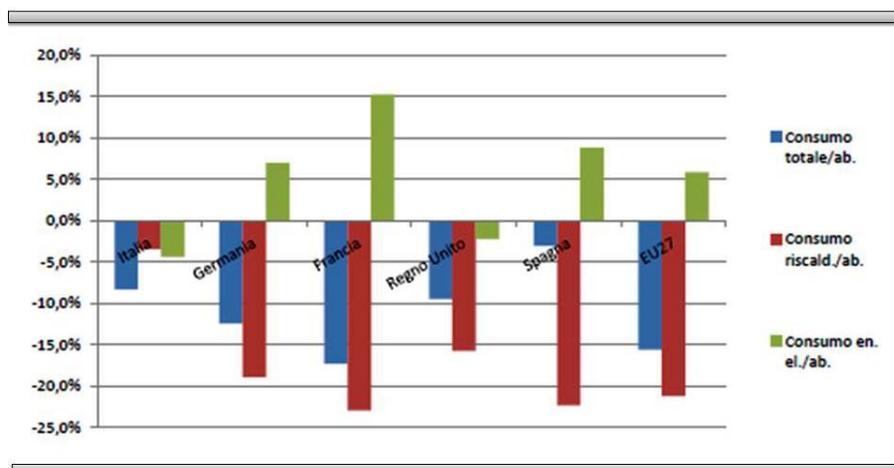


Figura 1.4: Variazione consumo totale, elettrico, riscaldamento per abitazione (2000-2010).
Fonte: elaborazione ENEA su dati ODYSSEE

Pertanto, in primo luogo nel residenziale, in cui l'efficienza degli impianti e le caratteristiche degli edifici hanno una forte incidenza sui consumi finali, l'adozione di una politica di risparmio energetico ancora più efficace può produrre effetti significativi già a partire dal breve periodo, grazie alla disponibilità di ampi margini di incremento di efficienza e di riduzione delle emissioni. È evidente però la necessità di trovare tecniche e metodologie costruttive, calate nello specifico contesto territoriale, tali da

consentire un'ottimizzazione del consumo di energia, sfruttando l'interazione con il contesto energetico esterno.

I consumi del settore terziario, in cui sono compresi gli edifici adibiti ai servizi, al commercio e alla Pubblica Amministrazione, risultano in continua e forte crescita passando da meno di 9.5 Mtep del 1995 a oltre 20 Mtep nel 2010, con un incremento medio annuo pari al 3.4% [17]. Rispetto a quanto visto nel residenziale, c'è una differente distribuzione delle fonti energetiche in quanto sono utilizzati quasi esclusivamente gas (50.4%) ed energia elettrica (45.4%).

Recenti studi sviluppati da ENEA² e CRESME³ hanno consentito di stimare i consumi specifici degli edifici del terziario per diverse destinazioni d'uso (Figura 1.5). I risultati di questi studi hanno mostrato che i consumi energetici degli edifici ad uso non residenziale possono essere ridotti in modo significativo e i costi relativi agli interventi possono risultare contenuti, in misura non trascurabile, con operazioni di efficientamento da programmare in corrispondenza di interventi necessari per la manutenzione straordinaria dell'edificio.

Visti gli indirizzi della recente Direttiva 2012/27/EU sull'efficienza energetica [3], di cui si parlerà diffusamente a breve, che impone agli Stati Membri di promuovere l'efficienza energetica negli edifici pubblici dell'Amministrazione Centrale, e data la difficile congiuntura economica che si sta attraversando, l'utilizzo di questo approccio dovrà essere promosso con opportune misure e provvedimenti che ne semplifichino l'adozione.

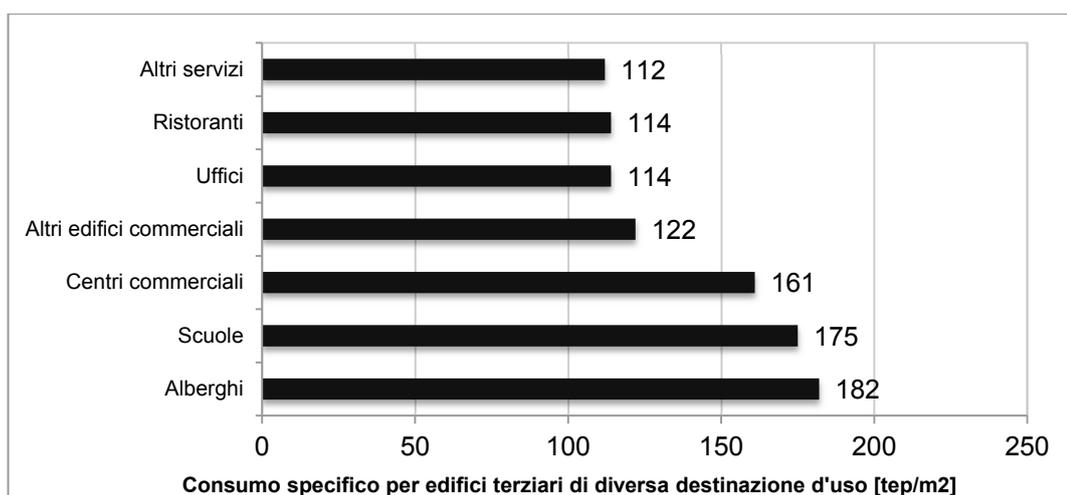


Figura 1.5: Confronto consumi specifici edifici terziario per diverse destinazioni d'uso.

Fonte: RAEE 2011- ENEA

² ENEA: Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile.

³ CRESME: Centro Ricerche Economiche Sociali di Mercato per l'Edilizia e il Territorio.

Per sintetizzare i risultati ad oggi raggiunti, basta analizzare l'andamento dell'indice ODEX⁴ rispetto ai livelli di consumo del 1990. Questo nel 2010, per l'intera economia, è risultato pari a 87.0 con un miglioramento di 1.2 punti percentuali (Figura 1.6) rispetto al 2009.

I vari settori hanno contribuito in modo diverso all'ottenimento di questo risultato: il residenziale è quello che ha avuto miglioramenti regolari e costanti con un indice globale pari a 71.4 che significa un incremento di efficienza del 28.6%, rispetto al 1990; l'industria ha avuto significativi miglioramenti solo negli ultimi sei anni; il settore dei trasporti, che ha mostrato andamento altalenante, ha infine registrato l'incremento di efficienza più modesto.

Facendo riferimento agli obiettivi di efficienza stabiliti nel primo Piano d'Azione per l'Efficienza Energetica (PAEE, 2007) [18] si riscontra che il superamento dei target stabiliti per il 2010 (47'711 GWh/anno pari al 3.6% dell'ammontare medio annuo del consumo nazionale di riferimento contro il 3.0% atteso) è per il 70% (31'427 GWh/anno) connesso ai miglioramenti del settore residenziale.

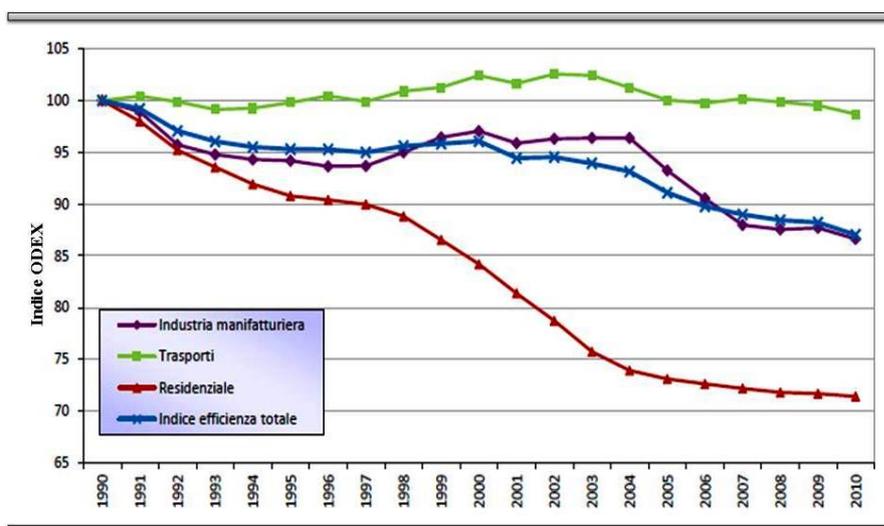


Figura 1.6: Indici di efficienza energetica (1990=100).
Fonte: RAEE 2011- ENEA

Per quanto detto, quindi, l'efficienza energetica in edilizia rappresenta il punto focale degli obiettivi nazionali al 2020, poiché contribuisce alla riduzione dei costi energetici, alla riduzione delle emissioni e dell'impatto ambientale, nonché al miglioramento della sicurezza ed indipendenza di approvvigionamento e allo sviluppo della crescita

⁴ Base: ODEX. Si tratta di un indice alternativo all'intensità energetica generale utilizzato nel progetto ODYSSEE. Risulta dall'aggregazione dell'evoluzione dell'unità di consumo a livello dettagliato, per sotto-settore o utilizzo finale, osservato nell'arco di un periodo determinato. Questo indice ODYSSEE non comprende molti fattori come i cambiamenti strutturali e altri cambiamenti, non legati all'efficienza energetica (ad esempio l'effetto "rimbalzo"). Cfr. anche: www.odyssee-indicators.org.

economica. Questa esigenza è stata confermata nel PAEE (Piano d'Azione Efficienza Energetica, 2011) [19].

Dagli obiettivi riportati Figura 1.7 si evince che oltre 2/3 del potenziale individuato di risparmio per il 2016 e 2020 sono relativi ad interventi da realizzarsi nel residenziale e terziario.

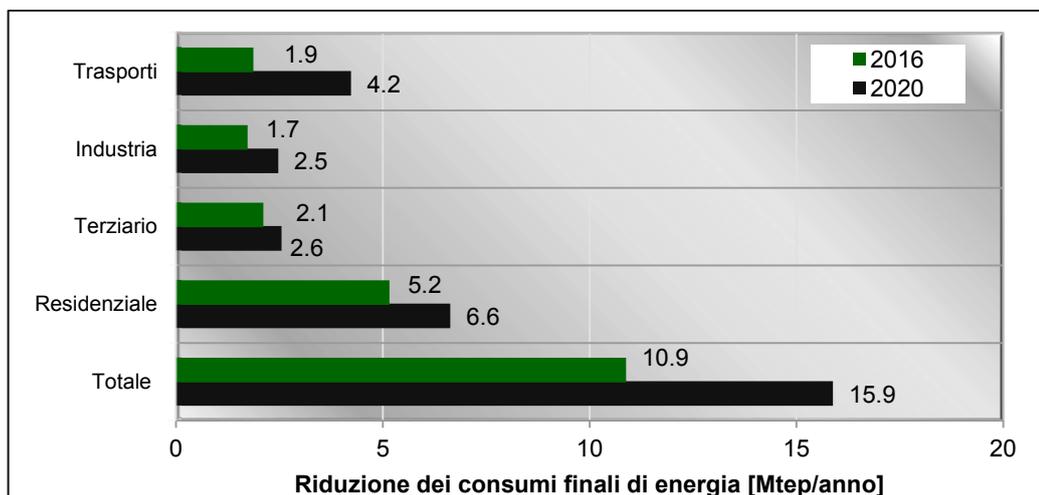


Figura 1.7: Riduzioni nei consumi finali di energia attesi al 2016 e 2020 (Mtep).
Fonte PAEE-2011

Se si trasforma questa soglia di abbattimento in interventi necessari a raggiungerla, si perviene ad un complesso mix di interventi per un importo stimato complessivo di spesa pari a 56.1 miliardi di euro dal 2012 al 2020 [20].

1.1.4 Una priorità per lo sviluppo sostenibile: l'efficienza energetica in edilizia

Coerentemente con quanto detto precedentemente in termini di contesto internazionale, di sfide e punti di forza del sistema energetico italiano, la Strategia Energetica Nazionale [10] si articola in 7 priorità, ciascuna con specifiche misure a supporto avviate o in corso di definizione:

1. Efficienza energetica;
2. Mercato competitivo del gas e Hub sud-europeo;
3. Sviluppo sostenibile delle energie rinnovabili;
4. Sviluppo delle infrastrutture e del mercato elettrico;
5. Ristrutturazione della raffinazione e della rete di distribuzione dei carburanti;
6. Produzione sostenibile di idrocarburi nazionali;
7. Modernizzazione del sistema di governance.

In linea con la scelta di fondo di progressiva de-carbonizzazione dell'economia, le azioni proposte dalla Strategia Nazionale consentiranno un forte progresso degli standard ambientali, con il raggiungimento e superamento di tutti gli impegni europei al 2020, e un avvicinamento progressivo verso gli obiettivi della Roadmap 2050 [15]. Come si evince in Figura 1.8, per la riduzione delle emissioni di gas serra, ci si attende un livello del 21% inferiore rispetto a quello del 2005, superando gli obiettivi europei per l'Italia, quantificabili nel 18% di riduzione rispetto alle emissioni del 2005 (in linea con il Piano nazionale di riduzione della CO₂ e della de-carbonizzazione dell'economia italiana). Per quanto riguarda lo sviluppo delle energie rinnovabili, ci si attende che l'Italia raggiunga il 19-20% dei consumi finali lordi (e 22-23% dei consumi primari), mentre relativamente all'efficienza energetica, c'è una previsione di risparmi fino al 24% (pari a circa 20 Mtep di energia primaria in meno rispetto ad oggi).

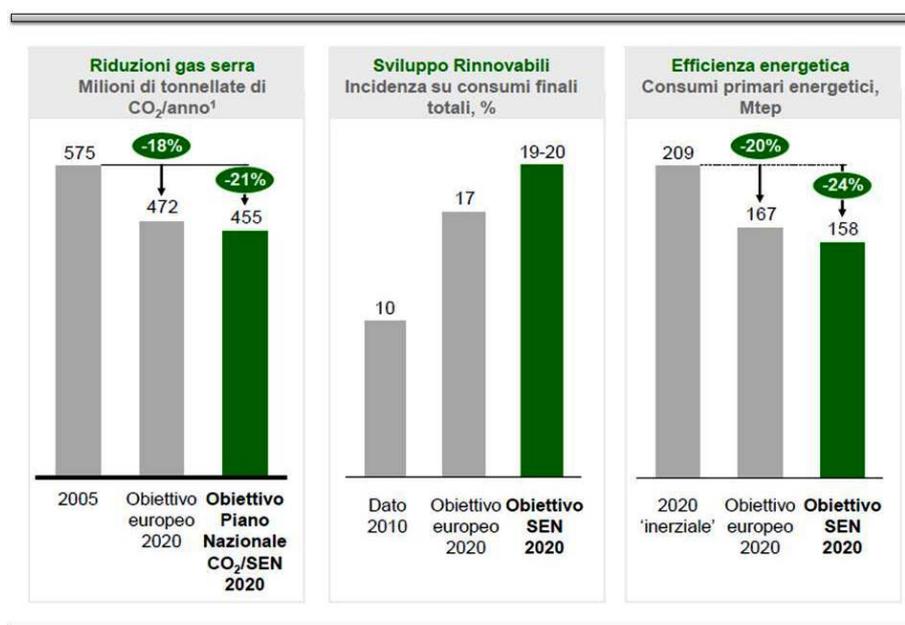


Figura 1.8: Il superamento degli impegni ambientali europei al 2020.
Fonte: *Strategia Energetica Nazionale, 2013*

In termini di efficienza energetica, l'Italia parte già da un buon livello medio: siamo infatti uno dei primi Paesi per intensità energetica in Europa, con un livello inferiore alla media di circa il 14%. In ogni caso c'è un elevato potenziale di risparmio energetico non sfruttato. Molteplici studi confermano il grande potenziale di numerose azioni di efficienza energetica con ritorno economico positivo, come lo studio in Figura 1.9 in cui si vede come la maggior parte degli interventi di efficientamento abbiano "costo negativo" (ovvero l'investimento viene ripagato dai risparmi economici conseguiti).

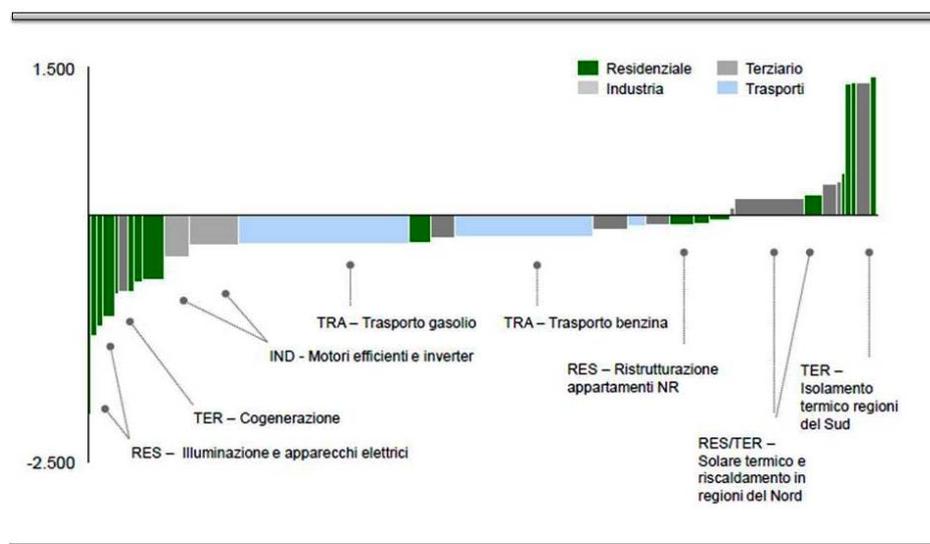


Figura 1.9: Costo medio risparmio energetico, €/tep, esempi.
 Fonte: *Strategia Energetica Nazionale, 2013*

Nonostante questi potenziali, spesso il processo di efficientamento è però ostacolato da numerose barriere, come ad esempio in ambito residenziale gli elevati investimenti iniziali o, per la Pubblica Amministrazione, l'impossibilità, fino all'emanazione del Conto Termico nel 2013 avanzato, di accedere a sistemi di detrazione fiscali. Per superare queste difficoltà alcune azioni sono state già avviate nel corso del 2012, ma occorrerà razionalizzare strumenti e azioni dedicate, attraverso il controllo e l'*enforcement* delle misure, con un rafforzamento di verifiche e sanzioni per il rispetto di normative e standard e per il raggiungimento degli obiettivi di risparmio energetico per i soggetti obbligati.

Accanto agli strumenti fiscali di supporto, brevemente descritti nella seconda parte di questo capitolo, il documento di formalizzazione della SEN, individua alcuni *fattori abilitanti* fondamentali per il programma di efficienza energetica. Tra questi, c'è il rafforzamento del modello ESCO (Energy Service Company), tramite l'introduzione di criteri di qualificazione, lo sviluppo e la diffusione di modelli contrattuali innovativi per il finanziamento tramite terzi e la creazione di Fondi di garanzia dedicati o di appositi Fondi rotativi per progetti più grandi, con possibile partecipazione di Istituti finanziari pubblici.

A questo si aggiunge l'inserimento di nuove spinte all'efficienza e ad investimenti per la sostenibilità, l'esigenza di sostenere la sensibilizzazione del pubblico, delle aziende e della PA, e il supporto alla ricerca e innovazione, con l'introduzione di agevolazioni finanziarie per la promozione di progetti di ricerca, sviluppo e innovazione tecnologica, start up di imprese innovative.

1.1.5 La riqualificazione energetica degli edifici: risultati e potenzialità

Negli ultimi 10 anni il 58.6% delle abitazioni ha subito almeno un intervento di manutenzione straordinaria o di ammodernamento, impiantistico o edilizio (Tabella 1.4). Si tratta di 17.6 milioni di abitazioni interessate, su un complesso di poco oltre 30 milioni di unità [20].

A confermare, e sollecitare, l'impiego delle risorse nella riqualificazione immobiliare vi sono stati diversi fattori: la vetustà del patrimonio edilizio; gli interventi su abitazioni appena acquistate (il volume delle compravendite almeno fino al 2010 è stato elevato); l'adeguamento alle normative europee in alcuni settori; il breve ciclo di vita degli impianti di climatizzazione; le politiche incentivanti.

	2001		2011	
	migliaia	%	migliaia	%
Abitazioni esistenti	27'269	100.0	30'038	100.0
Interventi nei precedenti 10 anni	11'871	43.5	17'613	58.6
– Impiantistica	9'729	35.7	12'524	41.7
– Strutture	1'833	6.7	2'756	9.2
– Estetica	7'825	28.7	9'214	30.7

Tabella 1.4: Stock e attività di riqualificazione nelle abitazioni al 2001 e al 2011.

Dai dati del censimento ISTAT 2011 [21], risulta uno stock nazionale di edifici superiore ai 14 milioni, l'11% in più rispetto al 2001. In particolare gli edifici residenziali sono aumentati del 4.3% nel corso del decennio, raggiungendo il numero di 11'714'262. Le abitazioni sono invece 28'863'604, il 5.8% in più del 2001. Se il settore delle costruzioni è oggi, dopo l'espansione durata sino al 2006, caratterizzato da una situazione generale di crisi, soprattutto per gli ambiti della residenza di nuova costruzione e per le opere pubbliche, i comparti del recupero e della manutenzione, viceversa, mostrano una sostanziale tenuta e confermano l'andamento costante o in lieve crescita caratteristico degli ultimi decenni. Infatti fra il 2008 ed il 2012 gli investimenti in abitazioni si sono ridotti del 21 % in termini reali (stime ANCE⁵), con una contrazione del 47.3% della nuova edilizia abitativa, ma con una crescita del 9.3% per la spesa reale in ristrutturazioni.

D'altra parte la qualità energetica di un edificio dipende in buona parte anche dallo stato di conservazione e dall'epoca di costruzione. Come si evince dallo schema in Figura 1.10 1.10, lo stock edilizio è formato da un consistente numero di edifici costruiti prima della seconda guerra mondiale (il 30.1%).

Dal dopoguerra fino a tutti gli anni '90 l'edificato abitativo italiano si è espanso enormemente (il 70% degli edifici e il 78% delle abitazioni si riferisce a tale periodo)

⁵ANCE: Associazione Nazionale Costruttori Edili

con un incremento del numero medio di alloggi per edificio, che resta relativamente basso.

Solo l'ultimo ciclo immobiliare (post 2001) evidenzia una concentrazione più elevata su edifici di dimensioni più elevate (il 4.5% degli edifici e il 9.2% delle abitazioni è stato costruito dopo il 2001) raggiungendo le 5.2 abitazioni per edificio.

Se si prendono in considerazione le tipologie costruttive in funzione dell'epoca di costruzione si trova che:

- fino al 1910 si hanno strutture in muratura portante realizzate con diverse tecnologie;
- tra il 1910 e il 1970 convivono muratura portante e strutture in cemento armato con pareti di tamponamento esterno, quasi sempre in doppio tavolato con forati;
- dopo il 1970 predominano le strutture in cemento armato; negli ultimi anni c'è un nuovo interesse per le strutture in muratura portante, anche se il calcestruzzo armato continua a prevalere numericamente.

ABITAZIONI			EDIFICI		
STOCK	30'038'200		STOCK	11'740'083	
Prima del 1919	3'893'567	13.0%	Prima del 1919	2'150'259	18.3%
1919-1945	2'704'969	9.00%	1919-1945	1'383'815	11.8%
1946-1960	4'333'882	14.4%	1946-1960	1'659'829	14.1%
1961-1971	5'707'383	19.0%	1961-1971	1'967'957	16.8%
1972-1981	5'142'940	17.1%	1972-1981	1'983'206	16.9%
1982-1991	3'324'794	11.1%	1982-1991	1'290'502	11.0%
1992-2001	2'161'345	7.20%	1992-2001	771'927	6.60%
Dopo il 2001	2'769'320	9.20%	Dopo il 2001	532'588	4.50%

Figura 1.10: Stock per epoca di costruzione.

Fonte CRESME

Si deve però sottolineare che l'attuale inefficienza energetica degli edifici italiani è frutto non solo di soluzioni tecniche che al momento della costruzione non erano caratterizzate da obiettivi di risparmio energetico, ma anche del degrado nel tempo degli edifici a causa dell'assenza di manutenzione che ha incrementato la scarsa

efficienza dei sistemi di involucro e degli impianti nel garantire una buona climatizzazione interna.

Come mostrato in Tabella 1.5, le condizioni di manutenzione del patrimonio edilizio indicano che oltre il 22% degli edifici risulta in stato di conservazione mediocre (19.9%) o pessimo (2.2%); nel complesso si tratta di circa 2.6 milioni di edifici con evidenti necessità di riqualificazione.

	Ottimo		Buono		Mediocre		Pessimo	
	<i>Num.</i>	<i>%</i>	<i>Num.</i>	<i>%</i>	<i>Num.</i>	<i>%</i>	<i>Num.</i>	<i>%</i>
Prima del 1919	316'700	14.7	1'049'615	48.8	680'381	31.6	103'563	4.8
Dal 1919 al 1945	193'696	14.0	691'480	50.0	436'613	31.6	62'026	4.5
Dal 1946 al 1961	279'450	16.8	913'295	55.0	425'106	25.6	41'978	2.5
Dal 1962 al 1971	444'051	22.6	1'142'554	58.1	357'587	18.2	23'765	1.2
Dal 1972 al 1981	619'516	31.2	1'114'754	56.2	237'164	12.0	11'772	0.6
Dal 1982 al 1991	450'912	34.9	709'981	55.0	123'812	9.6	5'797	0.4
Dal 1992 al 2001	367'438	47.6	346'595	44.9	54'807	7.1	3'087	0.4
Dopo il 2001	382'931	71.9	133'147	25.0	15'445	2.9	1'065	0.2
Totale	3'054'694	25.9	6'101'421	52.0	2'330'915	19.9	253'053	2.2

Tabella 1.5: Edifici per epoca di costruzione e stato manutentivo.

Fonte CRESME

E' altresì evidente la forte correlazione tra la vetustà dell'edificio e le condizioni di manutenzione poiché oltre il 30% degli edifici in condizioni insufficienti è di edificazione precedente al 1919. Parimenti, fino agli anni '70 si osservano alte percentuali di immobili con necessità di riqualificazione [20].

In tali situazioni, sarebbero auspicabili interventi sull'involucro edilizio, ma la riqualificazione energetica comporta spesso interventi invasivi non tollerabili o incompatibili con la presenza degli utenti. Inoltre, ci si trova spesso al cospetto di edifici storici nei quali l'isolamento termico o la sostituzione di componenti edilizi non è possibile. In questi casi una diversa gestione del sistema edificio-impianto in abbinamento alla migliore tecnologia nella generazione del calore e ad una sua sapiente conduzione può favorire un soddisfacente livello di comfort termico con un minore impegno di potenza installata e soprattutto minore consumo di energia primaria.

Seguendo il tasso fisiologico di rinnovamento del comparto edilizio, i livelli prefissati dagli obiettivi energetici UE e nazionali saranno raggiunti in tempi largamente eccedenti le scadenze prefissate. Infatti in accordo ai dati del CRESME la trasformazione del parco immobiliare nell'UE avvengono con:

- × tasso annuo di realizzazione di nuove costruzioni: 1-1.5%;
- × tasso annuo di esecuzione di manutenzioni ordinarie e straordinarie: 2.0%;
- × tasso annuo di rinnovo del parco tecnologico impiantistico: 5.0%;
- × tasso annuo di demolizione: 0.2-0.5%.

L'Italia non si differenzia nella sostanza da tale comportamento, con una dinamica troppo lenta rispetto agli "impegni 20-20-20". Non basta, quindi, concentrare gli sforzi sulle nuove edificazioni ma è necessario stimolare e facilitare il processo di riqualificazione energetica delle strutture esistenti. In un contesto di drammatica crisi per l'edilizia di nuova costruzione, il mercato potenziale della riqualificazione energetica degli edifici abitativi ha mostrato negli ultimi cinque anni una dinamica vivace: + 6.0% nel 2008, +2.5% nel 2009 e +9.8% nel 2010 e +6.2% nel 2011. Nella realtà solo una parte di questa attività si è tradotta in interventi mirati al contenimento dell'energia consumata. Come si evince dai dati (Tabella 1.6) elaborati dal CRESME, il peso della spesa delle famiglie in interventi funzionali all'efficienza energetica, rispetto al complesso degli interventi di riqualificazione edilizia, è passato dal 25.8% nel 2007 al 32.0% nel 2011.

	2007	2008	2009	2010	2011
Totale riqualificazione (milioni di euro)	40'632	41'134	41'215	43'319	44'716
Interventi EE ¹ (milioni di euro)	10'480	11'476	11'843	13'264	14'325
Incidenza %	25.8%	27.9%	28.7%	30.6%	32.0%

Tabella 1.6: Investimenti in riqualificazione nell'edilizia residenziale.

Fonte CRESME

(1 Interventi potenzialmente funzionali all'efficienza energetica)

Per contestualizzare questi dati rispetto agli interventi strettamente finalizzati all'efficienza energetica, si può far riferimento ai dati pubblicati nel Rapporto ENEA sulle *detrazioni fiscali del 55% per la riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente nel 2011* [22]. Questo Rapporto sintetizza i risultati dell'applicazione della legge finanziaria 27 dicembre 2006 n. 296 (integrata e modificata da provvedimenti normativi successivi), che ha disposto la possibilità di ottenere detrazioni fiscali del 55% (65% per le spese sostenute dal 6 giugno 2013 al 31 dicembre 2014) della spesa sostenuta per la realizzazione di interventi di risparmio energetico nel patrimonio immobiliare nazionale esistente. In dettaglio all'art. 1 vengono specificate le tipologie di intervento:

- × *Comma 344:* riqualificazione energetica globale dell'edificio;
- × *Comma 345:* interventi su strutture opache orizzontali e verticali e su finestre comprensive di infissi;
- × *Comma 346:* installazione di pannelli solari per la produzione di acqua calda;
- × *Comma 347:* sostituzione di impianti di climatizzazione invernale con impianti dotati di caldaie a condensazione o, in alternativa, con pompe di calore ad alta efficienza ovvero con impianti geotermici a bassa entalpia.

Dal 1° gennaio 2012, inoltre, la detrazione è stata estesa alle spese per interventi di sostituzione di scaldacqua tradizionali con scaldacqua a pompa di calore dedicati alla produzione di acqua calda sanitaria.

Dalla Figura 1.11 si evince che gli incrementi più ampi nel ricorso allo strumento di defiscalizzazione si sono registrati tra il 2007 (anno di avvio) e il 2008 con il +134% e tra il 2009 (anno previsto per l'interruzione del provvedimento) e il 2010 con un notevole +70% rispetto a un 2009. In particolare il numero di pratiche inviate all'ENEA per accedere alle detrazioni è stato di 280'700, per investimenti complessivi superiori a 3'300 milioni di euro.

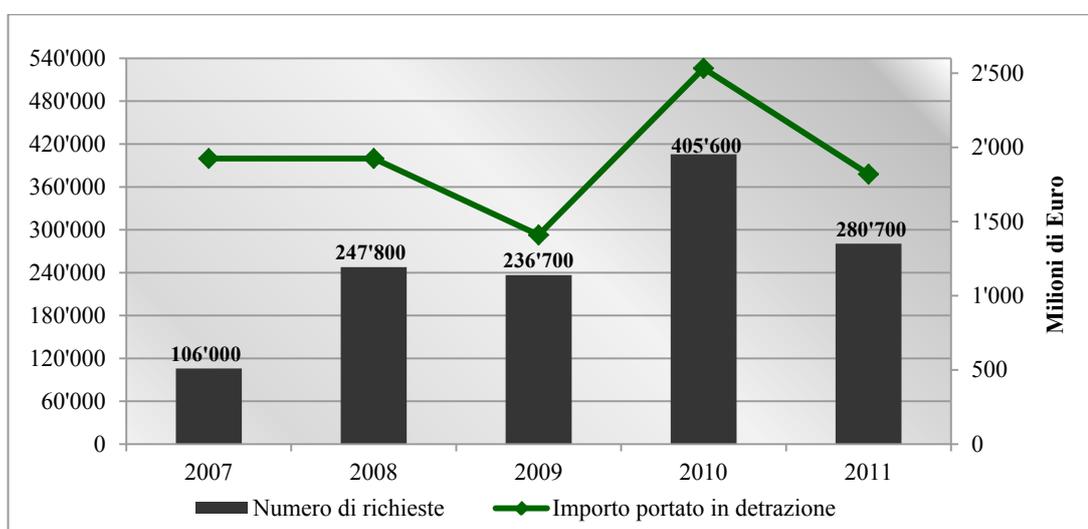


Figura 1.11: Dati relativi alle documentazioni pervenute ad ENEA per detrazioni del 55%.

Complessivamente, quindi, dal 2007, gli interventi di riqualificazioni (almeno quelli che sono stati registrati per le detrazioni) hanno consentito un valore complessivo di risparmio energetico prodotto pari a quasi 8'000 GWh che corrispondono ad un beneficio ambientale in termini di CO₂ non emessa in atmosfera pari a oltre 1'600 kt. I dati parziali rispetto ad ogni anno sono riportati in Figura 1.12.

Da un'analisi quantitativa sugli interventi di riqualificazione energetica per i quali si è fatta domanda di detrazione fiscale nel 2011 [22] risulta che la maggior parte delle pratiche riguarda la sostituzione degli infissi (59%), ossia oltre 165'000 interventi che rappresentano il 95% delle pratiche relative al comma 345 cui si aggiungono circa 9'000 richieste (3% del totale) per la coibentazione di strutture opache verticali e orizzontali. Circa il 28% del totale, coinvolgono la sostituzione dell'impianto di climatizzazione invernale (80'000 pratiche) e il restante 11% è per l'installazione di pannelli solari per la produzione di acqua calda sanitaria (quasi 30'000 pratiche).

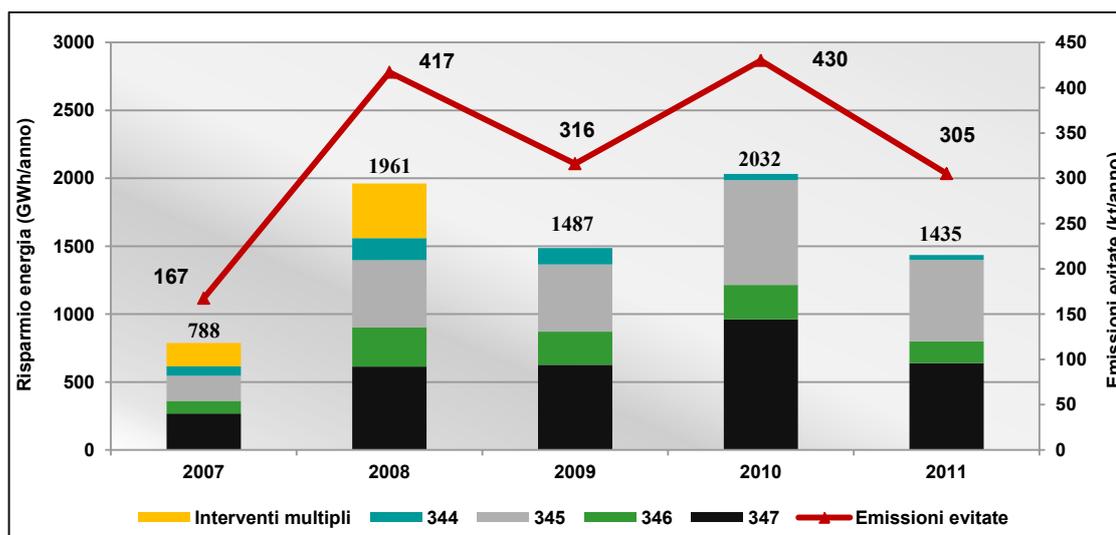


Figura 1.12: Risparmio energetico ed emissioni inquinanti: risultati cumulati per i diversi anni.

C'è da osservare però che la diffusione degli interventi di riqualificazione energetica ammessi a beneficio fiscale non è omogenea sul territorio nazionale. Il 60% riguardano le sole Lombardia, Veneto, Piemonte ed Emilia-Romagna. Sotto il profilo degli effetti per singolo abitante (risparmio energetico pro-capite, anidride carbonica pro-capite) i maggiori benefici risultano essere concentrati in regioni di area alpina (Valle D'Aosta, Trentino-Alto Adige, Piemonte) mentre i minimi valori si localizzano nelle regioni meridionali (Campania, Sicilia e Calabria).

In termini di risparmio energetico, i dati disponibili mostrano che, in linea generale, agli interventi di riqualificazione dell'involucro edilizio vengono associati valori medi di risparmio energetico molto interessanti (compresi cioè tra 17.5 e 25.0 MWh/anno per intervento medio). Piuttosto efficaci risultano anche le sostituzioni di impianto di climatizzazione invernale, e tra queste in particolare gli impianti geotermici (17.8 MWh/anno medi) e le caldaie a biomasse (16.2 MWh/anno medi). Il minor valore di risparmio invece si registra per l'intervento medio di installazione di pannelli solari termici (circa 5.3 MWh/anno) e per l'intervento-tipo di sostituzione degli infissi (risparmi medi dichiarati inferiori a 3.0 MWh/anno).

Se confrontiamo questi valori con quanto riportato nell'indagine CRESME si evince che ci sono ancora ampi potenziali da sfruttare. Le dimensioni del patrimonio edilizio (terziario e residenziale) e la sua articolazione per tipologia edilizia ed età rappresentano elementi importanti nella valutazione della realtà e delle prospettive del settore dell'efficienza energetica.

Anche se è difficile tratteggiare lo scenario a causa delle numerose variabili interne ed esterne, riguardo la situazione politico-economica, si può ipotizzare comunque che il settore della riqualificazione energetica continuerà a crescere e, a partire dal 2020,

riguarderà l'80% del mercato. Questi dati sono di notevole interesse soprattutto se pensati in riferimento alla riduzione dei consumi, in quanto dato l'esiguo tasso di *turn-over* degli edifici (ciclo di vita che va da 50 a più di 100 anni), è chiaro che nel breve e medio termine, se è possibile, bisogna migliorare le prestazioni energetiche degli edifici esistenti usando un approccio diverso rispetto a quello utilizzato per gli edifici di nuova costruzione, che rappresentano una piccola percentuale del patrimonio edilizio italiano.

1.1.6 I fondi strutturali per l'efficienza energetica

L'investimento complessivamente previsto per tutti i paesi della UE nell'ambito della nuova programmazione 2007-2013 dei Fondi Strutturali, distribuito su un periodo di sette anni, ammonta a 308 miliardi di euro. I tre fondi strutturali previsti dal regolamento generale sono: il Fondo europeo di sviluppo regionale (FESR), il Fondo sociale europeo (FSE) e il Fondo di coesione.

Il Fondo europeo di sviluppo regionale (FESR) definisce il proprio ruolo e i propri campi di intervento nella promozione degli investimenti pubblici e privati al fine di ridurre le disparità regionali nell'Unione con programmi in materia di sviluppo regionale, di cambiamento economico, di potenziamento della competitività e di cooperazione territoriale su tutto il territorio dell'UE. Il Fondo sociale europeo (FSE) sostiene l'occupazione e aiuta i cittadini a potenziare la propria istruzione e le proprie competenze, in modo da accrescere le opportunità di lavoro. Il Fondo di coesione contribuisce a interventi nei settori dell'ambiente e delle reti di trasporti trans-europee. Quest'ultimo si attiva per Stati membri aventi un reddito nazionale lordo inferiore al 90% della media comunitaria, coprendo quindi i nuovi Stati membri e su base transitoria anche la Grecia, il Portogallo e la Spagna.

La programmazione 2007-2013 dei Fondi Strutturali evidenzia l'importanza che il tema dell'energia riveste nella politica dell'Unione. L'allocazione complessiva per tutti i paesi i 27 paesi UE delle risorse finanziarie, sulle singole tipologie di intervento riguardanti le fonti energetiche rinnovabili e l'efficienza energetica, è di quasi 9 miliardi di euro, di cui poco meno del 50% per l'efficienza energetica. Tra le rinnovabili, spicca la biomassa (20% delle risorse); le restanti tecnologie (solare, eolico, idroelettrico e geotermico) assorbono, ciascuna, circa il 10% delle risorse. Per quanto riguarda la distribuzione tra i diversi obiettivi, quasi 7 miliardi sono dedicati alle aree Convergenza, 1.75 circa all'obiettivo "Competitività regionale e occupazione" e 325 milioni alla Cooperazione territoriale. Circa il 22% dello stanziamento complessivo dell'UE è destinato ai trasporti.

In Italia, il *Quadro Strategico Nazionale* (QSN) per il periodo 2007-2013 [23] è stato strutturato attraverso Programmi Operativi Regionali con contributo comunitario FESR

e Programmi Operativi Regionali con contributo comunitario FSE e, per le Regioni dell'obiettivo Convergenza e per l'area del Mezzogiorno, attraverso cinque Programmi Operativi Nazionali con contributo comunitario del FESR, tre Programmi Operativi Nazionali con contributo comunitario del FSE e due Programmi Operativi Interregionali (con contributo comunitario FESR).

In particolare, la scelta dei due Programmi Interregionali "Energie rinnovabili e risparmio energetico" e "Attrattori culturali, naturali e turismo" risponde all'esigenza, segnalata dalle stesse regioni, di promuovere un'azione collettiva in quegli ambiti di "policy" che offrono l'opportunità, per l'uno, di cogliere la natura sistemica dell'energia e, per l'altro, di valorizzare asset contigui non sufficientemente riconoscibili in modo disgiunto.

La parte prevalente della strategia del QSN, attuata con le risorse comunitarie e nazionali, avverrà attraverso Programmi Operativi Regionali con programmi finanziati con contributo FESR e programmi finanziati con contributo FSE. In particolare gli interventi previsti per la riduzione delle emissioni di CO₂ sono riportati nei Programmi Operativi Regionali FESR, nel POIN "Energie rinnovabili e risparmio energetico" e nel PON "Reti e mobilità" anche questi ultimi finanziati dal fondo FESR.

La Tabella 1.7 riporta le risorse finanziarie (comunitarie e nazionali) per interventi di riduzione dei gas serra ripartite per documento di programmazione e per tema. Dall'analisi di questi dati si evidenzia che il settore trasporti ha disponibili le maggiori risorse finanziarie, che ammontano a 5.8 miliardi di euro circa dai POR FESR e 2.71 miliardi di euro dal PON "Reti e mobilità", per un totale generale del settore trasporti pari a 8.51 miliardi di euro. Importanti sono anche le risorse finanziarie a disposizione delle fonti rinnovabili e del risparmio energetico, che insieme ammontano a circa 3'882 milioni di euro.

Risorse [Milioni di euro]	POR FESR Convergenza	POR FESR Competitività	POIN Energia	PON Trasporti	Totale
Fonti rinnovabili	833.0	617.9	780.0		2'231
Risparmio Energetico	460.2	426.8	763.8		1'651
Trasporti	4'680	1'119		2'711	8'510
Rifiuti	617.2	68.10			685.3
Totale	6'590	2'302	1'544	2'711	13'097

Tabella 1.7: Risorse finanziarie per interventi con impatto sulle emissioni inquinanti.

Fonte: QSN 2007-2013

Tra questi, il Programma Operativo Interregionale Energie Rinnovabili e Risparmio Energetico 2007-2013 (POI Energia), sostiene interventi di efficientamento, risparmio energetico e produzione di energia da fonti rinnovabili in Calabria, Campania, Puglia, Sicilia (Regioni Obiettivo "Convergenza"). Il POI è finanziato da fondi comunitari e

nazionali, ed è il risultato di un intenso lavoro di concertazione tra il Ministero dello Sviluppo Economico (MSE), il Ministero dell'Ambiente (MATTM), le Regioni italiane Obiettivo "Convergenza" ed un nutrito partenariato economico e sociale. Tre sono le linee di intervento del POI, definite come *Asse I* "Produzione di energia da fonti rinnovabili", *Asse II* "Efficienza energetica e ottimizzazione del sistema energetico", *Asse III* "Assistenza tecnica e azioni di accompagnamento". Gli interventi si rivolgono:

- alle amministrazioni pubbliche, per sviluppare la cultura delle energie rinnovabili e del risparmio energetico attraverso il finanziamento di investimenti sugli edifici di proprietà delle amministrazioni stesse;
- ai privati, con incentivi a sostegno degli investimenti rivolti alle imprese costruttrici di componenti per il settore delle energie rinnovabili, oppure appartenenti alla filiera del risparmio energetico;
- alle amministrazioni pubbliche o ai privati per rafforzare la rete di distribuzione dell'energia. La dotazione finanziaria 2007- 2013 è di circa 1'103 milioni di euro di euro, di cui il 72.83% cofinanziato dall'Unione Europea– FESR.

Con riferimento ai dati pubblicati dal ministero e aggiornati al 30 giugno 2013 [24], il "*Programma operativo interregionale (POI) Energie Rinnovabili e Risparmio Energetico 2007-2013*" ha attuato interventi che hanno interessato:

- ✓ immobili pubblici;
- ✓ imprese attive nel settore delle energie rinnovabili;
- ✓ pubbliche amministrazioni e settore privato per il miglioramento della rete di distribuzione di energia;
- ✓ istituti di ricerca per lo sviluppo e la sistematizzazione delle conoscenze del potenziale geotermico nelle Regioni Convergenza.

Relativamente agli edifici pubblici, i finanziamenti per interventi di efficientamento energetico e produzione di energia da fonti rinnovabili sono stati 272 di cui 100 completati. In particolare:

- × 10 progetti hanno interessato Aziende Sanitarie Locali e Aziende Ospedaliere;
- × 14 progetti sono destinati a strutture scolastiche;
- × 84 interventi sono rivolti all'efficientamento energetico di 183 edifici situati in comuni fino a 15.000 abitanti, compresi borghi antichi e di pregio;

- × 19 progetti fanno capo ad Amministrazioni dello Stato appartenenti alle amministrazione e istituzioni che tutelano la legalità e la sicurezza nelle Regioni delle aree Convergenza;
- × oltre 140 hanno riguardato immobili di amministrazioni centrali e locali rilevanti per al cittadinanza.

Molti sono stati gli studi di fattibilità e diagnosi energetiche finanziati: sono stati realizzati 25 studi di fattibilità per la selezione e progettazione di interventi in aree pilota nelle isole minori e aree naturali protette (23) e su strutture aeroportuali nelle isole minori (2) e sono in corso di realizzazione 359 diagnosi energetiche su strutture aeroportuali (15), musei e siti archeologici (20), edifici giudiziari (3), strutture del patrimonio comunale (134), edifici del patrimonio in comuni singoli e associati ed in borghi montani e marginali (40) e strutture provinciali (147)

Inoltre, sono stati 45i progetti approvati per il sostegno a investimenti produttivi nella filiera delle biomasse, in particolare da "filiera corta" e per lo sviluppo dell'imprenditoria legata alla componentistica per la produzione di energia e per l'efficientamento energetico. A questi si aggiungono 11 progetti per il potenziamento e l'adeguamento della rete di distribuzione dell'energia elettrica finalizzati alla diffusione delle fonti rinnovabili e della micro cogenerazione, per un valore di 208 M€.

Infine, relativamente all' utilizzo della fonte geotermica nell'ambito del progetto VIGOR⁶ (Valutazione del potenziale Geotermico delle RegiOni della convergenza), sono state ampliate e sistematizzate le conoscenze esistenti sul potenziale di energia geotermica nelle Regioni Convergenza, e sono stati realizzati 8 studi di fattibilità per progetti pilota per la realizzazione di interventi innovativi di valorizzazione ed utilizzo di questa fonte energetica.

Dai dati presentati si evince che il complesso quadro finanziario relativo all'efficienza energetica ha promosso molti interventi in diversi campi.

Tra i casi studio presentati in questo lavoro di tesi, ci sarà la riqualificazione dell'Istituto Nazionale Tumori IRCCS Fondazione "G. Pascale". L'istituto ospedaliero ha di recente avviato un processo di riqualificazione dei propri edifici ed impianti, volto al miglioramento delle condizioni di occupazione, alla riduzione dei consumi energetici da fonte tradizionale associati all'utilizzo degli edifici e alla sicurezza degli addetti e dei fruitori. In particolare, tale riqualificazione si inserisce nel piano di interventi strutturali già individuati dall'Istituto per il biennio 2010-2011. All'interno di tali attività, nell'ambito

⁶ Il progetto VIGOR (Valutazione del potenziale Geotermico delle RegiOni della convergenza) ha lo scopo di fornire informazioni analitiche utili ad avviare attività di prospezione e di utilizzo dell'energia da fonte geotermica, attraverso la realizzazione di una puntuale attività di ricognizione, analisi e studio finalizzata a sistematizzare ed ampliare le conoscenze del potenziale naturale e delle possibilità di valorizzazione della risorsa geotermica sul territorio delle Regioni Campania, Calabria, Puglia e Sicilia (regioni della Convergenza).

di una convenzione di ricerca e supporto tecnico scientifico, è stato siglato un accordo di collaborazione tra l'Azienda Ospedaliera e il Dipartimento di Ingegneria (DING) dell'Università degli Studi del Sannio. In particolare il progetto presentato è stato premiato quale intervento esemplare dal piano di finanziamento pubblico POIN Energia.

1.1.7 Impatto regionale delle misure nazionali di risparmio energetico: nella regione Campania

Facendo riferimento al dato più aggiornato attualmente disponibile (Rapporto energia ambiente 2009-2010 [25]), il fabbisogno di energia primaria in Campania nel 2008 è stato di 7'514 ktep. In Tabella 1.8 viene riportata la suddivisione per fonte dei consumi di energia finale al 2008. Dal confronto con il trend degli ultimi vent'anni si evince che rispetto ai livelli del 1990 il fabbisogno totale è aumentato con un picco nel 2005 del 17%. Solo negli ultimi anni c'è stata un'inversione nei consumi, con una riduzione del 6% al 2008 rispetto ai livelli del 2005.

Consumi finali (ktep)	Combustibili solidi	Petrolio	Gas naturale	Rinnovabili	Energia elettrica	Totale
	2	3'630	1'154	322	1'492	6'600

Tabella 1.8: Consumi finali nel 2008 per tipologia di fonte in Campania.
Fonte ENEA: Rapporto Energia e Ambiente 2009-2010

Analizzando la ripartizione per settori di consumo (Figura 1.13) si evince che il settore a maggior incidenza è quello dei trasporti (44%), cui segue quello residenziale (25%). Complessivamente il settore civile (terziario più residenziale) rappresenta il 36% dei consumi.

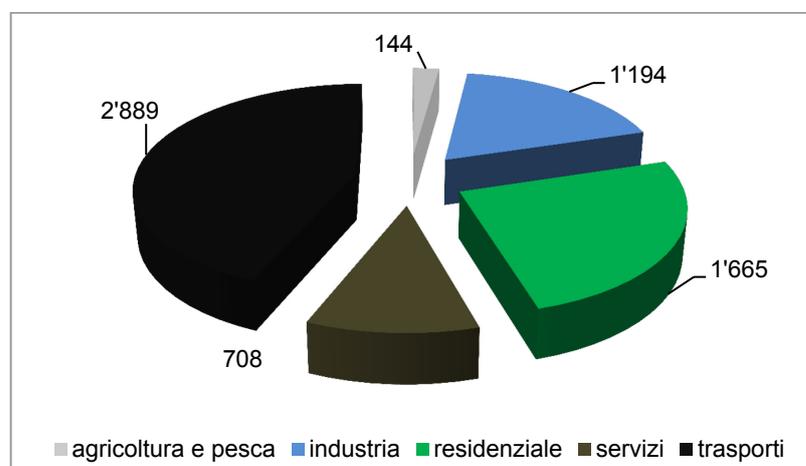


Figura 1.13: Consumi finali di fonti energetiche per settore economico - Anno 2008 (ktep).

La composizione del patrimonio edile della regione Campania, per avere qualche riferimento utile per gli studi mostrati nel prosieguo di questo lavoro di tesi, può essere ricostruito a partire dai dati pubblicati nel Bollettino Ufficiale della Regione Campania n. 27 Speciale del 6 maggio 2009 [26]. In particolare, Tabella 1.9 riporta la suddivisione per epoca di costruzione degli edifici ad uso abitativo di tutte le province campane.

Dai dati si evince che circa il 60% degli immobili sono stati costruiti prima della legge 373 del 1973 e quindi senza alcuna attenzione all'efficienza energetica.

	Prima del 1919	Dal 1919 al 1945	Dal 1946 al 1961	Dal 1962 al 1971	Dal 1972 al 1981	Dal 1982 al 1991	Dopo il 1991	TOTALE
Caserta	45'754	29'331	36'930	68'540	86'736	50'925	28'231	346'447
Benevento	18'838	12'237	15'870	25'847	20'537	18'939	10'997	123'265
Napoli	162'931	101'722	175'794	251'220	168'799	154'558	53'722	1'068'746
Avellino	20'085	14'419	15'612	32'009	35'495	55'581	23'491	196'792
Salerno	68'859	37'986	60'823	90'437	85'798	76'869	33'750	454'522
Campania	316'467	195'795	305'029	468'053	397'365	356'872	150'191	2'189'772

Tabella 1.9: Abitazioni in edifici ad uso abitativo, suddivise per epoca di costruzione.

Fonte: Censimento ISTAT 2001

Relativamente ai finanziamenti in efficienza energetica stabiliti a partire del 2007, da un'analisi quantitativa dei dati specifici della Regione Campania riportati nel rapporto RAEE [17] risulta che:

- ✓ la maggior parte delle pratiche nell'anno 2011 riguarda la sostituzione degli infissi (68%);
- ✓ il 14% degli interventi è relativo alla sostituzione dell'impianto di climatizzazione invernale;
- ✓ il 9% prevede l'installazione di pannelli solari per la produzione di acqua calda sanitaria;
- ✓ circa il 2% di tutte le pratiche inviate riguarda la coibentazione di strutture opache.

Nella Tabella 1.10 si possono vedere i dati dei costi e del risparmio ottenuto per tipologia di intervento.

Considerando il rapporto tra risparmio energetico associato al singolo intervento e costo dell'intervento di riqualificazione energetica, è importante sottolineare che:

- × gli interventi sull'involucro edilizio hanno valori di costo e di risparmio energetico superiori rispetto alle altre tipologie (con valori superiori ai 13 MWh/anno e ai 48'000 €/intervento);
- × alla sostituzione degli infissi si associano costi medi pari a circa 12'000 €/intervento e risparmi medi pari a 2.0 MWh/anno;
- × le installazioni di pannelli solari termici risultano particolarmente convenienti nell'ottica di costo/beneficio (6.4 MWh/anno di risparmio al costo medio di 7'900 €/intervento);
- × tra gli impianti di climatizzazione invernale, predominano le caldaie a condensazione (risparmio pari a 3.1 MWh/anno al costo di 8'700 €/intervento).

Intervento	Costo Totale (€)	Importo in detrazione (€)	Costo medio per intervento (€)	Risparmio Totale (kWh/anno)
Strutture opache verticali	3'468'862	1'907'874.24	53'685	999'949
Strutture opache orizzontali	3'673'972	2'020'684.77	48'864	1'052'296
Infissi	47'204'602	25'962'531.08	12'026	7'926'001
Solare termico	3'075'708	1'691'639.14	6'401	3'813'900
Climatizzazione invernale	13'296'322	7'312'977.09	10'893	4'851'437
Totale	70'719'466	38'895'706.32	12'265	18'643'583

Tabella 1.10: Resoconto interventi ammessi alle detrazioni fiscali in Campania nel 2011.

Facendo un confronto a livello nazionale si evince che la Campania è una delle regioni in cui si riscontra la minore penetrazione di interventi sull'involucro edilizio. In termini di costi medi regionali, relativamente alla sostituzione degli infissi, i dati ottenuti in valore assoluto mostrano che mentre il costo medio nazionale si aggira attorno a 9'500 € per intervento, il valore massimo si registra in Campania. Ne consegue che il costo effettivo del risparmio energetico ottenuto da questa tipologia di intervento sia piuttosto variabile in funzione della localizzazione dell'intervento stesso.

Il fatto che ben oltre la metà degli interventi effettuati sia del tipo caratterizzato dal più basso potenziale in termini di risparmio energetico (sostituzione degli infissi), conferma l'ipotesi secondo cui i committenti, nella scelta dell'intervento di riqualificazione energetica, tendano sempre più a preferire fattori come la semplicità di installazione e la snellezza delle procedure per accedere al beneficio fiscale, rispetto all'effettiva valenza tecnico-economica in termini di risparmio energetico.

In realtà, c'è anche un'altra considerazione importante da fare, e cioè che tutti gli interventi di riqualificazione ad oggi finanziati, mirano ad incrementare le prestazioni del sistema-edificio impianto soprattutto con riferimento alla climatizzazione invernale.

Invece, soprattutto nelle regione del Sud Italia, l'aspetto predominante a talune latitudini e quello del surriscaldamento degli ambienti nel periodo estivo. Da questo punto di vista, mancano cioè politiche di sovvenzionamento specifiche per tipologie di intervento mirate al miglioramento delle prestazioni estive.

Appare subito necessario quindi sottolineare che la progettazione della riqualificazione energetica di un edificio e la resa in termini di rapporto tra kWh risparmiati e costo dell'investimento devono essere inquadrati e interpretati in funzione dello specifico contesto climatico e culturale nel quale vengono realizzati. Risulta difficile generalizzare e definire un insieme di misure univoco in Italia, visto le differenze climatiche e di contesto esistenti. Questo aspetto della progettazione della riqualificazione energetica sarà approfondito nel corso di questo lavoro di tesi, tracciando delle linee guida attraverso i casi studio proposti.

1.2 Efficienza energetica negli edifici: quadro normativo

La pubblicazione, sulla Gazzetta Ufficiale del 3 Agosto 2013, del testo del decreto legge n. 63, del 4 giugno 2013, coordinato con la legge di conversione 3 agosto 2013, n. 90, recante: “*Disposizioni urgenti per il recepimento della Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica nell'edilizia per la definizione delle procedure d'infrazione avviate dalla Commissione europea, nonché' altre disposizioni in materia di coesione sociale*”, è l'ultimo atto ufficiale del iter legislativo italiano in materia di efficienza energetica in edilizia [7].

Risultato dell'esigenza di evitare un aggravamento della procedura di infrazione nei confronti dell'Italia, per il mancato recepimento della direttiva 2010/31/UE [2] nonché per porre definitivamente rimedio anche alla procedura d'infrazione in materia di attestato di certificazione energetica e di informazione al pubblico al momento di trasferimenti e locazioni, il decreto legge n. 63/2013 interviene nel settore della riqualificazione ed efficienza energetica del patrimonio immobiliare italiano, pubblico e privato.

In questa sezione, dopo aver delineato il contesto normativo comunitario in materia di efficienza energetica e le implicazioni nazionali da esso comportate, considerati gli obiettivi di questo lavoro di tesi si ritiene opportuno sintetizzare molto brevemente quelle che sono state le tappe fondamentali della legislazione nel campo dell'efficienza energetica che hanno portato poi all'emanazione del suddetto decreto legge, soffermandosi in modo dettagliato su quelli che sono gli attuali obblighi e vincoli in tale ambito.

Nella Figura 1.14 è mostrato uno schema riassuntivo dei principali provvedimenti relativi all'efficienza energetica che saranno discussi nel prosieguo di questo capitolo.

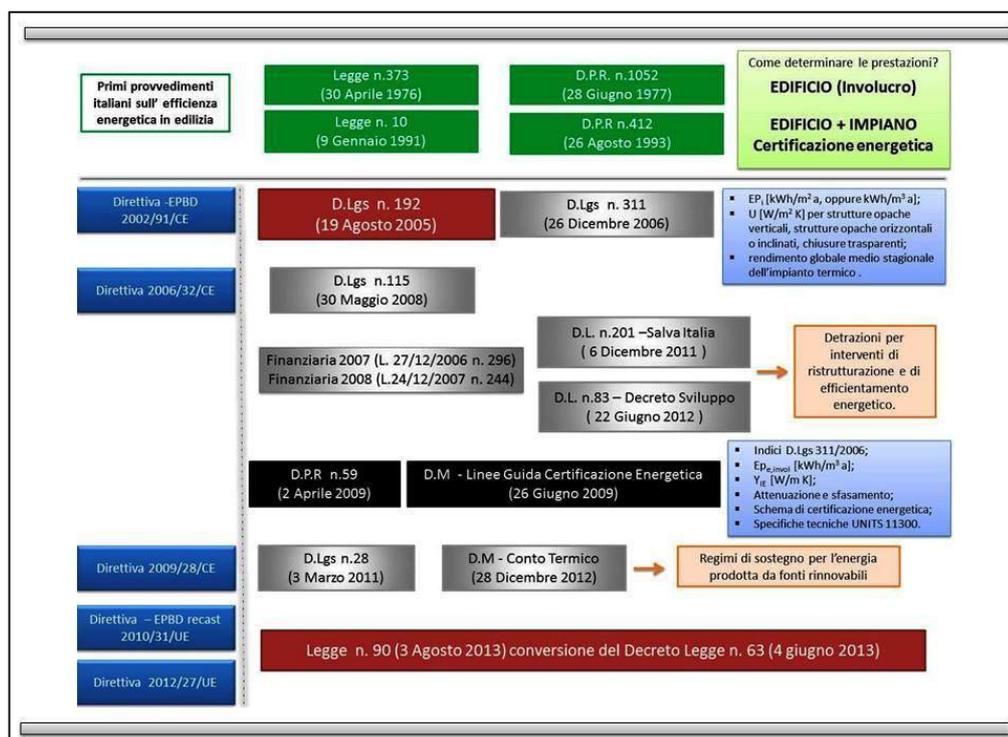


Figura 1.14: Flow-chart dei principali provvedimenti relativi all'efficienza energetica in edilizia

1.2.1 Gli orientamenti internazionali

In Europa, la direttiva 2002/91/CE, “*Energy Performance of Buildings Directive*” (EPBD)[4] [4] , per il miglioramento del rendimento energetico in edilizia, ha dato il primo input ad una politica comunitaria finalizzata ad accelerare le azioni di risparmio energetico e a ridurre le differenze tra i vari stati dell’Unione, definendo metodologie comuni finalizzate allo sviluppo di standard minimi di prestazione energetica. Questa, considerata la direttiva cardine per gli obiettivi di efficienza energetica in edilizia, è stata recentemente aggiornata e sostituita dalla Direttiva 2010/31/UE, “*Energy Performance of Buildings, EPBD- recast*” del 19 maggio 2010 [5], cui pertanto si farà riferimento in questo lavoro.

Tale direttiva ha imposto che gli Stati membri adottino, a livello nazionale o regionale, una metodologia di calcolo della prestazione energetica⁷ degli edifici che tenga conto di determinati aspetti, tra cui le caratteristiche termiche, gli impianti di condizionamento d’aria e di produzione di acqua calda, l'impianto di illuminazione incorporato e le condizioni climatiche interne. In conformità alla citata metodologia di calcolo, i requisiti minimi di prestazione energetica da adottare e rivedere ogni 5 anni,

⁷ Prestazione energetica: definita come la quantità di energia effettivamente consumata o che si prevede possa essere necessaria per soddisfare i vari bisogni connessi ad un uso standard dell'edificio.

sono proiettati a conseguire *livelli ottimali in funzione dei costi*⁸. Nel fissare i requisiti minimi, gli Stati membri possono distinguere tra gli edifici già esistenti e quelli di nuova costruzione, nonché tra diverse tipologie edilizie.

In particolare, gli edifici nuovi dovranno rispettare i requisiti e, prima dell'inizio dei lavori di costruzione, essere sottoposti ad una valutazione sulla fattibilità relativa all'installazione di sistemi di fornitura di energia da fonti rinnovabili, pompe di calore, sistemi di teleriscaldamento o teleraffrescamento urbano o collettivo e sistemi di cogenerazione. Invece, gli edifici esistenti, destinati a subire ristrutturazioni importanti, dovranno subire un miglioramento della loro prestazione energetica in modo da poter soddisfare i requisiti minimi. Gli elementi edilizi che fanno parte dell'involucro dell'edificio e hanno un impatto significativo sulla prestazione energetica dell'involucro dell'edificio (gli infissi, ad esempio) devono anch'essi rispettare i requisiti minimi in materia di prestazione energetica quando sono rinnovati o sostituiti, in modo da raggiungere livelli ottimali in funzione dei costi.

Uno degli aspetti più innovativi della Direttiva 2010/31/UE è la definizione degli *Edifici ad energia quasi zero* (nZEB - Nearly Zero Energy Building), cioè edifici ad altissima prestazione energetica, il cui basso fabbisogno dovrebbe essere coperto in misura molto significativa da energia prodotta da fonti rinnovabili. Gli edifici di nuova costruzione occupati da enti pubblici e di proprietà di questi ultimi dovranno essere a energia quasi zero già a partire dal 31 dicembre 2018. L'obbligo per tutti gli altri edifici di nuova costruzione diventa cogente dal 31 dicembre 2020.

In tema di certificazione di prestazione energetica, gli Stati membri sono chiamati ad adottare un sistema di certificazione energetica degli edifici. L'attestato deve comprendere informazioni sul consumo energetico degli edifici, nonché delle raccomandazioni per il miglioramento in funzione dei costi. In caso di vendita o locazione di un edificio o di un'unità immobiliare, l'indicatore di prestazione energetica che figura nell'attestato di prestazione energetica va riportato in tutti gli annunci dei mezzi di comunicazione commerciali. In caso di costruzione, vendita o locazione di un edificio o di un'unità immobiliare, l'attestato va mostrato al potenziale acquirente o nuovo locatario e consegnato all'acquirente o al nuovo locatario. Per gli edifici in cui una metratura utile totale di oltre 500 m² è occupata da enti pubblici e per gli edifici con una superficie totale di oltre 500 m² abitualmente frequentati dal pubblico, l'attestato di prestazione energetica va affisso in un luogo chiaramente visibile per il pubblico (il 9 luglio 2015 la soglia sarà abbassata a 250 m²).

⁸ I livelli ottimali in funzione dei costi sono definiti all'art. 5 come i livelli di prestazione energetica che comportano il costo più basso durante il ciclo di vita economico stimato.

Il più recente provvedimento in materia di efficienza energetica è la *Direttiva 2021/27/EU sull'efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/C* [3].

Questa è entrata in vigore il 4 dicembre 2012, e le sue disposizioni dovranno essere recepite entro il 5 giugno 2014. La nuova direttiva stabilisce un quadro comune di misure per la promozione dell'efficienza energetica nell'Unione al fine di garantire il conseguimento dell'obiettivo principale relativo all'efficienza energetica del 20% entro il 2020 e di gettare le basi per ulteriori miglioramenti dell'efficienza energetica al di là di tale data.

Relativamente all'efficienza nell'uso dell'energia, per la prima volta viene affrontato compiutamente il problema della riqualificazione energetica degli edifici esistenti come aspetto preminente degli interventi di efficienza energetica in edilizia. All'Articolo 4, infatti, viene prescritto che ogni Stato membro dovrà prevedere "una strategia a lungo termine per mobilitare investimenti nella ristrutturazione del parco nazionale di edifici residenziali e commerciali, sia pubblici che privati". In questo campo, il ruolo esemplare è assegnato agli edifici degli enti pubblici. Infatti a partire dal 1° gennaio 2014 e per ogni anno a seguire, ciascuno Stato Membro dovrà ristrutturare e rendere energeticamente efficiente (rispettando almeno i requisiti minimi di prestazione energetica stabiliti) il 3% della superficie coperta utile totale degli edifici riscaldati e/o raffreddati di proprietà del governo centrale o da esso occupati. La norma si applicherà agli edifici con una superficie coperta utile totale superiore a 550 m² e, dal luglio del 2015, a quelli con una superficie di 250 m².

A questi obblighi si aggiunge che entro il 2013 ciascuno stato deve rendere pubblico un inventario degli edifici riscaldati e/o raffreddati del governo centrale con una superficie coperta utile totale superiore a 500 m² e, a partire dal 9 luglio 2015, superiore a 250 m². Tale inventario, che si può considerare a tutti gli effetti un catasto energetico, comprende i seguenti dati: la superficie coperta; la prestazione energetica di ciascun edificio o dati energetici pertinenti.

Un altro aspetto rilevante, sul quale peraltro il lavoro di tesi presentato può considerarsi incardinato, è l'articolo 8: *Audit energetici e sistemi di gestione dell'energia*. In quest'articolo viene prescritto che le grandi imprese dovranno iniziare a dotarsi di audit energetico, entro dicembre 2015; tale audit da effettuarsi ogni 4 anni, deve essere svolto in modo indipendente da esperti accreditati. Gli Stati membri dovranno adottare misure per promuovere *la disponibilità, per tutti i clienti finali, di audit energetici di elevata qualità, efficaci in rapporto ai costi*.

Per quanto riguarda il supporto economico, la Commissione, direttamente o per il tramite degli istituti finanziari europei, prevede di assistere gli Stati membri nella messa

a punto dei meccanismi di finanziamento e dei regimi di supporto tecnico per incrementare l'efficienza energetica in vari settori. A loro volta gli Stati membri potranno istituire un fondo nazionale per l'efficienza energetica, destinato a sostenere iniziative nazionali in materia di efficienza energetica.

1.2.2 Il ruolo dell' Unione Europea nelle politiche ambientali mondiali

Dando seguito a quanto annunciato nel piano d'azione per una politica energetica europea (approvato dal Consiglio europeo del marzo 2007), il 23 gennaio 2008 la Commissione ha presentato la comunicazione "*Due volte 20 per il 2020 - L'opportunità del cambiamento climatico per l'Europa*" con cui ha illustrato un pacchetto di interventi nel settore dell'energia e della lotta ai cambiamenti climatici, prefiggendosi di limitare il riscaldamento del Pianeta a 2°C entro il 2020 [1]. Il raggiungimento di questi obiettivi deve avvenire attraverso un sistema combinato di utilizzo di energie rinnovabili e di razionalizzazione energetica. Sul piano giuridico, il *Pacchetto 20-20-20* rimanda a quattro direttive e altri due documenti comunitari:

- Regolamento (CE) n. 443/2009 del Parlamento Europeo e del Consiglio, del 23 aprile 2009, che definisce i livelli di prestazione in materia di emissioni delle autovetture nuove nell'ambito dell'approccio comunitario integrato finalizzato a ridurre le emissioni di CO₂ dei veicoli leggeri;
- Direttiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio, del 23 aprile 2009, sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle Direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE;
- Direttiva 2009/29/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio, del 23 aprile 2009, che modifica la Direttiva 2003/87/CE al fine di perfezionare ed estendere il sistema comunitario per lo scambio di quote di emissione di gas a effetto serra;
- Direttiva 2009/30/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio, del 23 aprile 2009, che modifica la Direttiva 98/70/CE per quanto riguarda le specifiche relative a benzina, combustibili diesel e gasolio nonché l'introduzione di un meccanismo inteso a controllare e ridurre le emissioni di gas a effetto serra, modifica la direttiva 1999/32/CE del Consiglio per quanto concerne le specifiche relative al combustibile utilizzato dalle navi adibite alla navigazione interna e abroga la Direttiva 93/12/CEE;
- Direttiva 2009/31/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio, del 23 aprile 2009, relativa allo stoccaggio geologico di biossido di carbonio e recante modifica della Direttiva 85/337/CEE del Consiglio, delle Direttive del Parlamento Europeo e del Consiglio 2000/60/CE, 2001/80/CE, 2004/35/CE, 2006/12/CE,

2008/1/CE e del regolamento n. 1013/2006 del Parlamento Europeo e del Consiglio;

- Decisione n. 406/2009/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio, del 23 aprile 2009, concernente gli sforzi degli Stati membri per ridurre le emissioni dei gas a effetto serra al fine di adempiere agli impegni della Comunità in materia di riduzione delle emissioni di gas a effetto serra entro il 2020.

Gli obiettivi di incremento della produzione energetica mondiale da fonti di energia rinnovabili e della riduzione delle emissioni di gas serra si sono concretizzati nella Direttiva 2009/28/CE [27] e nella Direttiva 2009/29/CE [28].

Ai fini degli obiettivi di questa tesi, si riassumono i contenuti principali della Direttiva 2009/28/CE, prima di passare all'analisi del sistema normativo e legislativo italiano. La Direttiva 2009/28/CE stabilisce un quadro comune per la promozione dell'energia da fonti rinnovabili (FER) fissando gli obiettivi nazionali obbligatori per la quota complessiva di energia da fonti rinnovabili sul consumo finale lordo di energia e per la quota di energia da fonti rinnovabili nei trasporti. In particolare, ogni Stato membro deve assicurare (art. 2) che la propria quota di energia da fonti rinnovabili sul consumo finale lordo di energia nel 2020, sia almeno pari al proprio obiettivo nazionale generale per la quota di energia da fonti rinnovabili per quell'anno. La Tabella 1.11 riporta i dati riferiti all'Italia.

Quota di energia da FER nel consumo finale lordo di energia nel 2005 (%)	4.91
Obiettivo di energia da FER nel consumo finale lordo di energia nel 2020 (%)	17.0
Consumo atteso totale di energia, adeguato, nel 2020 (Ktoe)	131.2
Quantitativo atteso di energia da fonti rinnovabili per l'obiettivo al 2020 (Ktoe)	22.3

Tabella 1.11: Valore atteso di fonti rinnovabili nel bilancio energetico al 2020 per l'Italia.

Tali obiettivi nazionali generali obbligatori sono coerenti con l'obiettivo di una quota pari almeno al 20 % di energia da fonti rinnovabili nel consumo finale lordo di energia della Comunità nel 2020. Il consumo finale lordo di energia da fonti rinnovabili è calcolato (art. 5) come la somma del consumo finale lordo di elettricità da fonti energetiche rinnovabili e del consumo finale lordo di energia da fonti rinnovabili per il riscaldamento e il raffreddamento e per i trasporti.

Al fine di conseguire più facilmente gli obiettivi fissati, ogni Stato deve promuovere e incoraggiare l'efficienza ed il risparmio energetico. Il corretto funzionamento dei regimi di sostegno nazionali è espressamente riconosciuto quale "strumento importante per

raggiungere l'obiettivo fissato dalla presente Direttiva". Nella parte propriamente dispositiva della Direttiva, sono quindi espressamente identificati come mezzi per il raggiungimento degli obiettivi (art. 3) il regime di sostegno nazionale e i meccanismi di cooperazione transfrontaliera. Ogni Stato membro inoltre deve assicurare che la propria quota di energia da fonti rinnovabili, con riferimento tutte le forme di trasporto nel 2020, sia almeno pari al 10% del consumo finale di energia nel proprio settore dei trasporti.

In accordo all'articolo 4, ciascuno stato ha dovuto presentare entro il 30 giugno 2009 un piano di azione nazionale che fissa la quota di energia da fonti rinnovabili consumata nel settore dei trasporti, dell'elettricità e del riscaldamento per il 2020, e in cui prevedere le modalità delle riforme per pianificare, fissare le tariffe, nonché regolamentare l'accesso alle reti elettriche, a favore dell'energia da fonti rinnovabili.

Quando uno Stato membro ritiene di trovarsi, per causa di forza maggiore, nell'impossibilità di raggiungere la quota di energia da fonti rinnovabili assegnatagli, ne informa la Commissione che se dimostra la sussistenza dell'impossibilità deve decidere le modalità di adeguamento del consumo finale lordo di energia da fonti rinnovabili dello Stato membro per l'anno 2020.

La Direttiva prevede che gli Stati membri possano "scambiare" una quantità di energia da fonti rinnovabili mediante un trasferimento statistico, intraprendere progetti comuni per la produzione di elettricità e di riscaldamento da fonti rinnovabili e inoltre stabilire una cooperazione con paesi terzi.

Altro punto importante del documento è la garanzia di origine dell'aliquota di energia prodotta da fonte rinnovabile: ciascuno Stato membro dovrà essere in grado di poter garantire l'origine dell'elettricità, nonché dell'energia per il riscaldamento e il raffreddamento, da fonti rinnovabili. L'informazione contenuta in queste garanzie di origine è normalizzata e deve essere riconosciuta in tutti gli Stati membri. Essa può anche venire utilizzata per fornire ai consumatori informazioni relative alla composizione delle varie fonti di elettricità. Anche le reti di trasmissione dell'energia dovranno essere adeguate: gli Stati membri dovranno realizzare le infrastrutture necessarie alle energie prodotte da fonti rinnovabili nel settore dei trasporti.

La Direttiva si riferisce anche all'energia prodotta a partire dai biocarburanti e dai bioliquidi (articoli 17, 18 e 19) che devono essere realizzati a partire da materie prime provenienti dall'interno o dall'esterno della Comunità, ma che non devono essere prodotti a partire da materie prime provenienti da terreni di grande valore in termini di diversità biologica o che presentino un rilevante stock di carbonio. La riduzione delle emissioni di gas a effetto serra grazie all'uso di biocarburanti e di bioliquidi presi in

considerazione, deve essere pari almeno al 35%, percentuale che a decorrere dal 1° gennaio 2017 diventerà del 50%.

1.2.3 La prestazione energetica in edilizia in Italia dal D.P.R. 59/2009 fino al D.M. del 26 giugno 2009

In Italia, la prima legge per il contenimento dei consumi energetici è stata la legge N. 373 del 30 aprile del 1976 ed il relativo regolamento di esecuzione D.P.R. 1052 del giugno del 1977 [8] frutto dell'esigenza di limitare i costi dei consumi energetici anche in ambito edilizio a seguito della guerra del Kippur. La disposizione più rilevante di questi due provvedimenti era l'obbligo del calcolo delle dispersioni termiche dell'involucro (mediante il coefficiente C_d ⁹), che dovevano essere contenute entro un valore massimo prestabilito, determinato dal contesto climatico e dal rapporto di forma dell'edificio. La legge in definitiva mirava ad avere involucri con una buona resistenza termica in modo da assicurare il comfort riducendo i consumi energetici per il riscaldamento (vincolando quindi solo le caratteristiche di isolamento dell'edificio, senza valutazione delle prestazioni degli impianti).

Successivamente, la legge N.10 del gennaio 1991 - *Norme per l'attuazione del Piano Energetico Nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia* – [29] e il D.P.R. del giugno del 1993 N.412 [30], hanno abrogato la legge 373. A partire da questi due provvedimenti, l'obiettivo del risparmio energetico è stato affrontato non solo dal punto di vista dell'involucro edilizio ma anche dal punto di vista dell'efficienza dell'impianto, ed inoltre, per la prima volta si è introdotto il tema della “certificazione energetica”.

La differenza più significativa, rispetto alla legge precedente, riguardava il legame tra edificio ed impianto in quanto le prestazioni dell'impianto termico e la trasmittanza dell'involucro concorrevano insieme alla determinazione di un nuovo parametro chiamato FEN (fabbisogno energetico normalizzato per la climatizzazione invernale) che qualificava sul piano delle prestazioni l'intero sistema. Inoltre, al fine di migliorare i processi di trasformazione dell'energia, ridurre i consumi di energia e migliorare le condizioni di compatibilità ambientale dell'utilizzo dell'energia a parità di servizio reso e di qualità della vita, la legge 10/91 favoriva ed incentivava, in accordo con la politica energetica della Comunità economica europea, l'utilizzazione delle fonti rinnovabili di energia.

⁹Il Coefficiente volumico di dispersione termica (C_d) è il rapporto tra la potenza termica dispersa per trasmissione attraverso l'involucro riscaldato in condizioni di progetto, ed il prodotto del volume lordo riscaldato e la differenza tra la temperatura interna di progetto e quella esterna di progetto.

Come si evince da questo breve quadro, se fossero stati emessi i necessari decreti attuativi, c'erano tutte le premesse per realizzare una tra le più avanzate ed efficaci normative di risparmio energetico nel settore edilizio, in quanto la legge 10/91 conteneva i principi cardine su cui si è poi sviluppata tutta la politica internazionale in materia di efficienza energetica in edilizia. La situazione però si è evoluta diversamente.

Il D.Lgs. 19/8/2005 n. 192 *“Attuazione della Direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia”*, rappresenta lo strumento legislativo italiano di formale recepimento della EPBD [6]. Questo ha introdotto le necessarie modifiche e integrazioni alla disciplina già vigente in materia, definendo il concetto di *“prestazione energetica di un edificio”* come *la quantità di energia effettivamente consumata o che si prevede possa essere necessaria per soddisfare i vari bisogni connessi ad un uso standard dell'edificio, compresi tra gli altri, il riscaldamento, il riscaldamento dell'acqua, il raffreddamento, la ventilazione e l'illuminazione*. Tra le prescrizioni introdotte, già si prevedeva che gli edifici dovessero essere dotati, entro l'ottobre del 2006, di un attestato di certificazione energetica, il quale andava allegato a tutti gli atti di compravendita immobiliare, pena la nullità della compravendita stessa.

Successivamente, tale decreto è stato modificato ed integrato con la pubblicazione del D.Lgs. N. 311 [31] approvato dal Consiglio dei Ministri il 29/12/2006: *“Disposizioni correttive ed integrative al D.Lgs. n. 192/2005 in attuazione alla Direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico in edilizia.”* Tra le principali modifiche c'era l'aver esteso l'obbligo di certificazione energetica anche agli edifici esistenti in caso di locazione o di trasferimento a titolo oneroso e di aver introdotto in modo decisivo l'obiettivo della riqualificazione energetica degli edifici esistenti.

A partire dal D.Lgs 311/2006, la prestazione energetica di un edificio viene espressa da uno o più descrittori che tengono conto della coibentazione, delle caratteristiche tecniche e di installazione, della progettazione e della posizione in relazione agli aspetti climatici, dell'esposizione solare e dell'influenza delle strutture adiacenti, dell'esistenza di sistemi di trasformazione propria di energia e degli altri fattori, compreso il clima degli ambienti interni, che influenzano il fabbisogno energetico. In aggiunta alla verifica del fabbisogno di energia primaria, veniva introdotta la necessità di effettuare la verifica della trasmittanza termica delle strutture edilizie opache e delle chiusure trasparenti che delimitano l'edificio, nonché la verifica del rendimento degli impianti termici.

Nell'allegato C del D.Lgs 311/2006 sono indicati i valori limite per i parametri necessari alla definizione dell'efficienza energetica degli edifici differenziati per tipologia di edificio e per orizzonte temporale:

- × indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale (EP_i)¹⁰ [kWh/m² a - kWh/m³ a];
- × trasmittanza termica¹¹ (U) delle strutture opache verticali, orizzontali o inclinate [W/m² K];
- × trasmittanza termica delle chiusure trasparenti [W/m² K];
- × rendimento globale medio stagionale dell'impianto termico (η_g) [%].

Per il parametro EP_i , i valori limite sono divisi in funzione della tipologia di edificio, del rapporto di forma (S/V)¹², della zona climatica, dei gradi giorno¹³ e di tre scadenze temporali: 2006, 2008 e 2010. Nella Tabella 1.12 sono riportati, ad esempio, i valori limite dell'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale relativi all'anno 2010.

S/V	Zona climatica									
	A	B		C		D		E		F
	fino a 600 GG	A 601 GG	A 900 GG	A 901 GG	A 1400 GG	A 1401 GG	A 2100 GG	A 2101 GG	A 3000 GG	Oltre 3000 GG
<0.2	8.5	8.5	12.8	12.8	21.3	21.3	34	34	46.8	46.8
>0.9	36	36	48	48	68	68	88	88	116	116

Tabella 1.12: $EP_{i,lim}$ [kWh/m² anno] dal 1 gennaio 2010.
Edifici residenziali della classe E1, esclusi collegi, conventi, case di pena e caserme.

Relativamente ai valori limite per la trasmittanza termica delle strutture opache e trasparenti, le tabelle dell'Allegato C, sono divise in funzione della zona climatica e dell'intervallo temporale. La Tabella 1.13 riporta ad esempio i limiti per le strutture opache verticali.

Una nuova fase per l'efficienza energetica degli edifici e per la pianificazione urbanistica dell'Italia si è aperta il 10 giugno 2009 con la pubblicazione sulla Gazzetta Ufficiale del Decreto del Presidente della Repubblica, 2 aprile 2009, n. 59 :*"Regolamento di attuazione dell'art. 4, comma 1, lett. a) e b), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/Ce sul rendimento energetico in edilizia"* in vigore dal 25 giugno 2009 [32]. Il DPR 59/2009 di fatto ha reso

¹⁰Quantità di energia primaria complessivamente richiesta nel corso di un anno, per mantenere nel volume riscaldato la temperatura interna di progetto.

¹¹Flusso di calore che passa attraverso una parete per m² di superficie e per grado di differenza tra le temperature.

¹²Fattore di forma, in cui V (m³) è il volume lordo delle parti di edificio riscaldato e S (m²) è l'area delle superfici esterne degli elementi che delimitano il volume.

¹³I gradi giorno di una località sono la somma, estesa a tutti i giorni di un periodo annuale convenzionale di riscaldamento delle sole differenze positive giornaliere di temperatura dell'ambiente e la temperatura esterna media giornaliera.

obbligatoria la maggior parte dei requisiti minimi transitori previsti dall'Allegato I del D.Lgs 192/2005 e sue modifiche, con alcune novità.

Zona climatica	Dal 1.1.2006 U (W/ m² K)	Dal 1.1.2008 U (W/ m² K)	Dal 1.1.2010 U (W/ m² K)
A	0.85	0.72	0.62
B	0.64	0.54	0.48
C	0.57	0.46	0.40
D	0.50	0.40	0.36
E	0.46	0.37	0.34
F	0.44	0.35	0.33

Tabella 1.13: Trasmittanza limite per le strutture opache verticali.

Per quanto riguarda le metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici l'*art. 3* definisce che si debbano adottare le norme tecniche nazionali, definite nel contesto delle norme EN a supporto della direttiva 2002/91/CE, della serie UNI/TS 11300 e loro successive modificazioni, ovvero:

- UNI/TS 11300 - 1 (*Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 1*): Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale [33][33];
- UNI/TS 11300 - 2 (*Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 2*): Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria [34];
- UNI TS 11300 - 3 (*Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 3*): Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva [35];
- UNI TS 11300 - 4 (*Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 4*): Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria [36].

Invero, all'atto di emanazione del D.P.R. 59/2009 solo le prime due parti della specifica tecnica UNI/TS 11300 erano state pubblicate, per cui solo queste risultano ufficialmente richiamate come riferimento procedurale.

Relativamente agli ambiti di applicazione, il decreto 192/2005 non è stato modificato, per cui il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici si applica a: edifici di nuova costruzione; edifici esistenti di superficie utile superiore ai 1000 m², nel caso di ristrutturazione integrale o di ampliamento volumetrico superiore al 20%

dell'intero edificio esistente. Prescrizioni meno restrittive sono stabilite per ristrutturazioni limitate, con riferimento a singoli componenti di involucro e impianti installati; in sostanza le verifiche che gli edifici devono rispettare sono vincolate al tipo di utenza così come definite al DPR 412/93 [30].

L'art. 4, nel definire i Criteri generali e requisiti delle prestazioni energetiche degli edifici ed impianti, conferma molti aspetti dell'Allegato I del decreto 192/2005. Resta pertanto obbligatoria la verifica dell'indice di prestazione per la climatizzazione invernale, e viene mantenuta la procedura semplificata nel caso di edifici con rapporto tra superficie trasparente e superficie utile dell'edificio minore di 0,18. A differenza delle precedenti normative però in cui ci si riferiva alla sola necessità di ridurre il fabbisogno energetico dovuto alle richieste termiche invernali, il nuovo decreto pone l'attenzione anche alle prestazioni dell'edificio atte a garantire un adeguato comfort termico in regime estivo. A tal fine viene introdotta la verifica sul valore dell'indice di prestazione energetica per il raffrescamento estivo dell'involucro edilizio ($EP_{e,inv}$)¹⁴ i cui valori limite sono mostrati nella Tabella 1.14.

Zona climatica	Tipologia edificio	
	Residenziali ¹⁵ $EP_{e,inv}$ [kWh/m ² anno]	Altra destinazione d'uso $EP_{e,inv}$ [kWh/m ³ anno]
A-B	40	30
C-D-E-F	14	10

Tabella 1.14: Valori limite per $EP_{e,inv}$.

Oltre all' $EP_{e,inv}$ è introdotto un ulteriore limite al comportamento dell'involucro in regime estivo, attraverso l'introduzione della *trasmissione termica periodica* Y_{IE} , (W/m² K): "parametro che valuta la capacità di una parete opaca di sfasare ed attenuare il flusso termico che la attraversa nell'arco delle 24 ore, definita e determinata secondo la UNI EN 13786". Per il rispetto dei limiti imposti alla Y_{IE} , si può ricorrere a diverse soluzioni tecniche, tra le quali, a titolo d'esempio coperture a verde, strutture massive, materiali a cambiamento di fase (citati solo indirettamente dal decreto).

Ancora al fine di limitare i fabbisogni energetici in regime estivo e la temperatura interna per tutte le categorie di edifici¹⁶, nel caso di nuova costruzione e nel caso di ristrutturazioni totali sono introdotte le seguenti prescrizioni tecniche:

14 L'indice di prestazione energetica per il raffrescamento estivo dell'involucro edilizio è definito come rapporto tra il fabbisogno annuo di energia termica per il raffrescamento dell'edificio, (calcolata tenendo conto della temperatura di progetto estiva secondo la norma UNI/TS 11300-1), e la superficie utile dell'edificio per gli edifici residenziali, o il volume per gli edifici con altre destinazioni d'uso.

15 Si intendono gli edifici residenziali della classe E1, così come classificati, in base alla destinazione d'uso, all'articolo 3, del decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412, esclusi collegi, conventi, case di pena e caserme.

- la valutazione dei sistemi schermanti delle superfici vetrate, interni o esterni, tali da ridurre l'apporto di energia termica per irraggiamento solare;
- per tutte le zone climatiche, esclusa la F, con irradianza media mensile sul piano orizzontale maggiore o uguale a 290 (W/m² anno), le pareti verticali poste a est, sudest, sud, sud-ovest, ovest devono avere una massa superficiale M_s maggiore di 230 (kg/m²), oppure il valore della trasmittanza termica periodica Y_{IE} deve essere inferiore a 0.12 (W/m² K);
- per tutte le zone climatiche esclusa la F con irradianza media mensile sul piano orizzontale maggiore o uguale a 290 (W/m² anno) le chiusure opache orizzontali ed inclinate devono avere un valore della trasmittanza termica periodica Y_{IE} inferiore a 0.20 (W/m² K);
- attenzione all'utilizzo delle condizioni ambientali esterne e delle caratteristiche distributive degli spazi per favorire la ventilazione naturale dell'edificio, nonché la previsione di sistemi di ventilazione meccanica nel rispetto di quanto stabilito all'art. 5, comma 13, del D.P.R. 412/1993.

Il D.P.R. 59/2009 rende obbligatoria la presenza di sistemi schermanti esterni. Qualora se ne dimostri, nella relazione tecnica, la non convenienza in termini tecnico-economici, questi sistemi possono essere omessi in presenza di superfici vetrate con fattore solare minore o uguale a 0.5.

Come in precedenza accennato, il percorso di verifica è differente per gli interventi di ristrutturazione o manutenzione straordinaria relativi all'involucro edilizio e per ampliamenti volumetrici minori del 20%¹⁷. Diversamente da quanto indicato nel D.Lgs 311, solo per questa categoria di interventi è prescritta la verifica della trasmittanza termica secondo gli stessi limiti riportati nell'Allegato C. I valori di trasmittanza devono essere rispettati a ponte termico corretto o dalla trasmittanza termica media della "parete corrente più ponte termico".

Per nuove costruzioni, ristrutturazioni totali, parziali o manutenzione straordinaria, resta confermato il limite della trasmittanza delle strutture di separazione tra edifici o unità immobiliari o di separazione tra ambienti dotati di impianto di riscaldamento e ambienti non riscaldati, che deve essere minore di 0.80 (W/m² K). Allo stesso modo deve essere verificata l'assenza di condensazioni superficiali e interstiziali delle pareti opache con condizioni al contorno di umidità relativa interna pari al 65% e temperatura interna 20°C.

¹⁶ Sono inclusi tutti gli edifici, così come classificati in base alla destinazione d'uso all'articolo 3 del decreto N.412 del 1993, ad eccezione delle categorie E.5 (edifici adibiti ad attività commerciali e assimilabili), E.6 (edifici adibiti ad attività sportive), E.7 (edifici adibiti ad attività scolastiche e assimilabili), E.8 (edifici adibiti ad attività industriali e artigianali).

¹⁷ È l'ambito d'intervento descritto all'articolo 3 comma 2 lettera C, punto 1 del decreto legislativo 192/2005.

Per gli interventi di nuova installazione o ristrutturazione di impianti termici, come già previsto nel punto nell'Allegato C del decreto 192/2005, il valore del rendimento globale medio stagionale, nel caso in cui la potenza nominale del focolare del generatore sia maggiore di 100 kW, deve essere maggiore del valore:

$$\eta_g = (75 + 4 \log P_n) \quad [\%] \quad \text{eq 1.1}$$

ove P_n è la potenza utile nominale del generatore o dei generatori di calore al servizio del singolo impianto termico. La formula è stata modificata con circa un punto percentuale in più di rendimento minimo rispetto al D.Lgs 311. L'impianto deve essere preferibilmente centralizzato sia per la climatizzazione invernale sia per quella estiva.

Merita infine un cenno quanto previsto per lo sviluppo delle fonti rinnovabili: il DPR 59/2009 fissa gli obblighi in merito alla dotazione minima di fonti energetiche rinnovabili nel caso di edifici pubblici o privati. In caso di nuova costruzione, nuovi impianti termici o ristrutturazione degli stessi è obbligatorio l'utilizzo di fonti rinnovabili per la produzione di energia termica ed elettrica, in particolare con una integrazione di almeno il 50% della produzione di acqua calda sanitaria da fonti energetiche rinnovabili; le modalità applicative sono rimandate in relazione al dimensionamento ad un successivo provvedimento. Tale limite è ridotto al 20% per gli edifici situati nei centri storici. Anche per l'energia elettrica è imposta una produzione da fonti rinnovabili, ma senza stabilire limiti minimi. Detta prescrizione vale per gli edifici pubblici o privati sia nuovi che esistenti nel caso di ristrutturazione integrale degli elementi edilizi costituenti l'involucro e nel caso di demolizione e ricostruzione in manutenzione straordinaria.

I limiti prescrittivi relativi alla produzione da fonte rinnovabile sono stati aggiornati con la pubblicazione del Decreto n. 28 del 3 Marzo 2011 di cui si parlerà a breve.

Al DPR 59/2009 presto si è aggiunto il Decreto Ministeriale del 26 giugno 2009 con cui sono state introdotte le nuove Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici [37]. La certificazione energetica di un edificio, come definita al comma 3 dell'Allegato A al Decreto 192, è il *complesso delle operazioni svolte da soggetti qualificati per il rilascio dell'Attestato di Certificazione Energetica e delle raccomandazioni per il miglioramento della prestazione energetica*. Essa parte da una preventiva diagnosi energetica a partire dai dati di ingresso relativi a località, utenza, edificio e impianti, finalizzata alla determinazione della prestazione energetica dell'immobile e all'individuazione degli interventi di riqualificazione energetica che risultano economicamente convenienti.

Le linee guida definiscono un sistema di certificazione energetica degli edifici in grado di fornire informazioni sulla qualità energetica degli immobili di immediata

comprensione, contribuendo ad una applicazione omogenea della certificazione energetica degli edifici coerente con la direttiva 2002/91/CE e con i principi desumibili dal D.Lgs. 192, attraverso la definizione di una procedura nazionale che comprende:

- × l'indicazione di un sistema di classificazione degli edifici;
- × l'individuazione di metodologie di calcolo della prestazione energetica utilizzabili in modo alternativo in relazione alle caratteristiche dell'edificio e al livello di approfondimento richiesto;
- × la disponibilità di metodi semplificati che minimizzino gli oneri a carico dei cittadini.

La validità massima dell'Attestato di Certificazione Energetica (come definito dalle Linee Guida) è di 10 anni. In esso la prestazione energetica complessiva dell'edificio è espressa mediante l'indice di prestazione energetica globale EP_{gl} , dato dalla somma degli indici di prestazione energetica relativi alla climatizzazione invernale, alla produzione di acqua calda sanitaria, alla climatizzazione estiva e all'illuminazione artificiale. In particolare la determinazione dell'indice di prestazione energetica per l'illuminazione è obbligatoria solo per collegi, conventi, case di pena e caserme, appartenenti alla categoria E1, e per gli edifici di categoria da E2 ad E7, di cui all'art. 3 del D.P.R. 412/1993. Tuttavia, nella fase di avvio sono stati considerati solo gli indici di prestazione di energia primaria per la climatizzazione invernale e per la preparazione dell'acqua calda per usi igienici e sanitari.

Come già detto, all'atto di emanazione delle Linee Guida non era stata ancora pubblicata della UNI/TS 11300 Parte III [35] pertanto il D.M. 26/06/2009 adotta per la climatizzazione estiva sono stati adottati metodi di valutazione qualitativa delle caratteristiche dell'involucro edilizio, volti all'individuazione di un livello di qualità prestazionale, che deve essere indicata negli attestati di certificazione energetica. In sintesi, sono individuati i seguenti due metodi, la cui scelta di utilizzo è determinata dalla metodologia adottata per il calcolo della prestazione energetica:

- I. metodo basato sulla determinazione dell'indice di prestazione termica dell'edificio per il raffrescamento ($EP_{e,inv}$), descritto precedentemente;
- II. metodo basato sulla determinazione di parametri qualitativi, sfasamento (s) e fattore di attenuazione (fa), calcolati secondo la norma UNI EN ISO 13786 (*"Prestazione energetica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento"*, 2008). Questo metodo può essere utilizzato solo nel caso di edifici residenziali esistenti fino a 1000 m².

Il D.M. 26/06/2009 quindi attribuisce una qualità prestazionale, decrescente dal livello "I" al livello "V" in funzione dei valori dei parametri calcolati, come riportato nelle tabelle seguenti.

Come già scritto, l'indicazione della prestazione energetica degli edifici mediante classi ne individua chiaramente il comportamento dal punto di vista dei consumi, e di conseguenza la ricaduta sul valore economico. Classificare gli edifici in base alla prestazione energetica fornisce agli utenti chiare informazioni, che infondono una maggiore consapevolezza e consentono di stimare il valore commerciale dell'immobile anche in funzione della prestazione energetica stessa. Allo stesso modo, il certificato energetico consiste in un valido ausilio nella valutazione della convenienza economica di eventuali interventi di riqualificazione.

EP_{e,invol} [kWh /m² anno]	Prestazioni	Qualità
<10	Ottime	I
10 ≤ EP _{e,invol} <20	Buone	II
20 ≤ EP _{e,invol} <30	Medie	III
30 ≤ EP _{e,invol} <40	Sufficienti	IV
≥40	Mediocri	V

Tabella 1.15: Qualità prestazionale per la climatizzazione estiva rispetto all' EP_{e,invol}.

Sfasamento [ore]	Attenuazione	Prestazioni	Qualità
S>12	fa<0.15	Ottime	I
12 ≥ S >10	0.15 ≤ fa <0.3	Buone	II
10 ≥ S >8	0.3 ≤ fa <0.4	Medie	III
8 ≥ S >6	0.4 ≤ fa <0.6	Sufficienti	IV
S ≤ 6	fa ≥ 0.6	Mediocri	V

Tabella 1.16: Qualità prestazionale estiva rispetto ad attenuazione e sfasamento.

In merito alla rappresentazione delle prestazioni energetiche globali e parziali dell'edificio, si ritiene opportuno, per la massima efficacia comunicativa, affiancare ad una rappresentazione grafica diretta delle predette prestazioni, conforme al punto 3 degli allegati 6 e 7 (comprensiva quindi dell'indicazione della prestazione raggiungibile con la realizzazione degli interventi di riqualificazione raccomandati) un sistema di valutazione basato su classi.

La figura seguente mostra il modello di Attestato di Certificazione Energetica, come riportato nel D.M. 26/06/2009. La classe energetica globale dell'edificio è l'etichetta di

efficienza energetica attribuita all'edificio sulla base di un intervallo convenzionale di riferimento. La classe energetica è contrassegnata da una lettera. In considerazione del livello medio di efficienza del parco immobiliare nazionale e soprattutto per stimolare interventi di riqualificazione diffusi, che possano concretizzarsi agevolmente in passaggi di classe, si ritiene opportuno, avere a disposizione un congruo numero di classi, soprattutto al di sopra della soglia di riferimento legislativo.

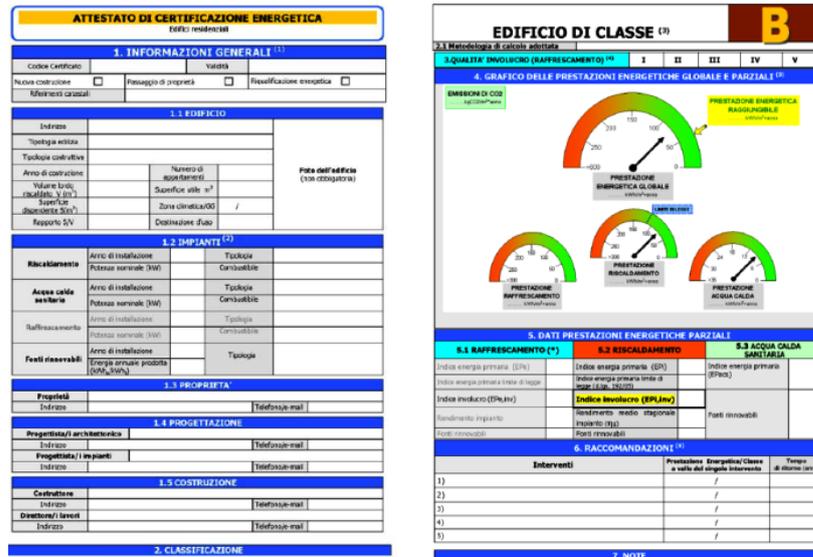


Figura 1.15: Modello di Attestato di certificazione energetica per edifici residenziali.i

Le classi energetiche individuate sono indicate, con prestazione decrescente, con le lettere da A+ a G. È possibile utilizzare, a livello regionale, dei sistemi di classificazione diversi da quello nazionale, a patto che i valori di prestazione indicati siano confrontabili tra loro.

1.2.4 Obiettivi e traiettorie per le energie rinnovabili

Il decreto n.28 del 3 marzo 2011 [38], detto *Decreto Rinnovabili*, recepisce la Direttiva 2009/28/CE con l'obiettivo di *ridefinire in maniera organica gli strumenti, i meccanismi, gli incentivi e il relativo quadro istituzionale/finanziario in materia di energie rinnovabili, ribadendo, tra l'altro, il ruolo complementare e sinergico delle politiche di efficienza energetica.*

Innanzitutto è opportuno chiarire la definizione che il decreto dà di fonte rinnovabile: *energia proveniente da fonti rinnovabili non fossili, vale a dire energia eolica, solare, aerotermica, geotermica, idrotermica e oceanica, idraulica, biomassa, gas di discarica, gas residuati dai processi di depurazione e biogas, ove la fonte aerotermica è l'energia accumulata nell'aria ambiente sotto forma di calore.*

Obiettivi nazionali cui tendere è portare, nel 2020, al 17% la quota complessiva di energia da fonti rinnovabili rispetto al consumo finale lordo di energia e almeno al 10% la quota di energia da fonti rinnovabili in tutte le forme di trasporto.

Focalizzando l'analisi sugli aspetti relativi all'efficienza energetica in edilizia, la principale novità introdotta dal decreto riguarda l'obbligo, nel caso di edifici nuovi o edifici sottoposti a ristrutturazioni rilevanti, di progettare impianti di produzione di energia termica in modo da garantire il contemporaneo rispetto della copertura, tramite il ricorso ad energia prodotta da impianti alimentati da fonti rinnovabili, del 50% dei consumi previsti per l'acqua calda sanitaria e delle seguenti percentuali della somma dei consumi previsti per l'acqua calda sanitaria, il riscaldamento e il raffrescamento:

- × il 20% quando la richiesta del pertinente titolo edilizio è presentata dal 31 maggio 2012 al 31 dicembre 2013;
- × il 35% quando la richiesta del pertinente titolo edilizio è presentata dal 1° gennaio 2014 al 31 dicembre 2016;
- × il 50% quando la richiesta del pertinente titolo edilizio è rilasciato dal 1° gennaio 2017.

Per gli edifici pubblici questi livelli di produzione sono incrementati del 10%, mentre non si applicano qualora l'edificio sia allacciato ad una rete di teleriscaldamento. In caso di utilizzo di pannelli solari termici o fotovoltaici disposti sui tetti degli edifici, i predetti componenti devono essere aderenti o integrati nei tetti medesimi, con la stessa inclinazione e lo stesso orientamento della falda.

L'inosservanza di tale obbligo comporta il diniego del rilascio del titolo edilizio. Gli impianti alimentati da fonti rinnovabili per l'assolvimento di tale obbligo accedono agli incentivi statali solo per la quota eccedente quella necessaria per il rispetto dei medesimi vincoli. D'altronde, gli edifici che riescono a raggiungere una percentuale superiore al 30% rispetto a quella fissata dal decreto, potranno usufruire di un bonus volumetrico del 5%. In più, i soggetti pubblici potranno concedere a terzi le superfici di proprietà per la realizzazione di impianti di produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili.

Un aspetto molto dibattuto del decreto è che gli obblighi non possono essere assolti tramite impianti da fonti rinnovabili che producano esclusivamente energia elettrica la quale alimenti, a sua volta, dispositivi o impianti per la produzione di acqua calda sanitaria, il riscaldamento e il raffrescamento. Se da una parte questo favorisce la combinazione di più forme di rinnovabili, dall'altro sfavorisce notevolmente la diffusione del solare fotovoltaico, unica tipologia di investimento che ad oggi ha avuto un costante e continuo sistema di sovvenzionamento.

Infine, il decreto prescrive che la potenza elettrica degli impianti alimentati da fonti rinnovabili che devono essere obbligatoriamente installati sopra o all'interno dell'edificio o nelle relative pertinenze, misurata in kW, sia calcolata secondo la seguente equazione:

$$P = K/S \quad \text{eq 1.2}$$

dove S è la superficie in pianta dell'edificio al livello del terreno, misurata in m², e K è un coefficiente (m²/kW) che assume i seguenti valori:

- × K=80: richiesta del titolo edilizio presentata dal 31 maggio 2012 al 31 dicembre 2013;
- × K=65: richiesta del titolo edilizio presentata dal 1° gennaio 2014 al 31 dicembre 2016;
- × K= 50: richiesta del titolo edilizio presentata dal 1° gennaio 2017.

Un titolo molto corposo del documento è incentrato sui regimi di sostegno applicati all'energia prodotta da fonte rinnovabile e all'efficienza energetica. L'obiettivo è quello di promuovere l'efficacia, l'efficienza la semplificazione e la stabilità dei sistemi di incentivazione, perseguendo nel contempo l'armonizzazione con altri strumenti di analoga finalità. I diversi incentivi sono trattati separatamente in tre diversi casi:

- × produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile;
- × produzione di energia termica da fonti rinnovabile e per l'efficienza energetica;
- × utilizzo delle fonti rinnovabili nei trasporti.

La logica che è alla base di tutti gli incentivi è quella di assicurare una equa remunerazione dei costi di investimento che sia costante per tutto il periodo di diritto e tenga conto del valore economico dell'energia prodotta o risparmiata.

Al citato regime di sostegno introdotto dal *Decreto Rinnovabili* è stata data attuazione con più di un anno e mezzo di ritardo, con il Decreto Ministeriale del 28 dicembre 2012: *Incentivazione della produzione di energia termica da fonti rinnovabili ed interventi di efficienza energetica di piccole dimensioni* [39].

Gli interventi incentivabili previsti, con aggiornamento dell'incentivo la prima volta dopo due anni dall'entrata in vigore del Decreto e a seguire ogni tre anni, sono di due diverse categorie:

Capitolo 1: Tre volte 20 per il 2020: l'efficienza energetica in edilizia

- × interventi di incremento dell'efficienza energetica in edifici esistenti, parti di edifici esistenti o unità immobiliari esistenti di qualsiasi categoria catastale, dotati di impianto di climatizzazione (art.4, comma 1);
- × interventi di piccole dimensioni relativi ad impianti per la produzione di energia termica da fonti rinnovabili e sistemi ad alta efficienza (art. 4, comma 2).

Sono ammessi, in qualità di beneficiari degli interventi oggetto dell'incentivazione, sia le Amministrazioni Pubbliche (PA) sia i Soggetti Privati (SP). Le tipologie di interventi incentivabili, i soggetti ammessi e la durata degli incentivi sono riportati nella Tabella 1.17.

SIGLA	TIPOLOGIA DI INTERVENTO	SOGGETTI AMMESSI	DURATA (anni)
1.A	Isolamento termico di superfici opache delimitanti il volume climatizzato	PA	5
1.B	Sostituzione di chiusure trasparenti comprensive di infissi delimitanti il volume climatizzato	PA	5
1.C	Sostituzione di impianti di climatizzazione invernale con generatori di calore a condensazione di qualsiasi potenza	PA	5
1.D	Installazione di sistemi di schermatura e/o ombreggiamento di chiusure trasparenti con Esposizione da Est-Sud-Est a Ovest, fissi o mobili, non trasportabili.	PA	5
2A-1	Sostituzione di impianti di climatizzazione invernale esistenti con impianti utilizzando pompe di calore elettriche o a gas, anche geotermiche con potenza termica utile nominale inferiore o uguale a 35 kW	PA-SP	2
2A-2	Sostituzione di impianti di climatizzazione invernale esistenti con impianti di climatizzazione invernale utilizzando pompe di calore elettriche o a gas, anche geotermiche con potenza termica utile nominale maggiore di 35 kW e inferiore o uguale a 1000 kW	PA-SP	5
2B-1	Sostituzione di impianti di climatizzazione invernale o di riscaldamento delle serre e dei fabbricati rurali esistenti con generatori alimentati da biomassa con potenza termica nominale al focolare inferiore o uguale a 35 kW	PA-SP	2
2B-2	Sostituzione di impianti di climatizzazione invernale o di riscaldamento delle serre e dei fabbricati rurali esistenti con generatori alimentati da biomassa con potenza termica nominale al focolare maggiore di 35 kW e inferiore o uguale a 1000 kW	PA-SP	5
2C-1	Installazione di collettori solari termici, anche abbinati a sistemi di solar cooling, con superficie solare lorda inferiore o uguale a 50 m ²	PA-SP	2
2C-2	Installazione di collettori solari termici, anche abbinati a solar cooling, con superficie solare lorda superiore a 50 m ² e inferiore/uguale a 1000 m ²	PA-SP	5
2D	Sostituzione di scaldacqua elettrici con scaldacqua a pompa di calore	PA-SP	2

Tabella 1.17: Soggetti ammessi, tipologia e durata degli incentivi.

Nel paragrafo relativo agli strumenti di supporto finanziario si approfondirà il discorso relativo ai limiti delle spesa incentivabile e alle condizioni di accesso

all'incentivo, con riferimento agli interventi per il miglioramento dell'efficienza energetica dell'edilizia (1A, 1B, 1C, 1d, 2A-1 e 2A-2).

L'art.12 del Conto Termico prevede che l'incentivo erogato non sia cumulabile con altri incentivi statali, ad eccezione dei fondi di garanzia, dei fondi di rotazione e dei contributi in conto interesse. Solo per gli edifici pubblici il conto termico è cumulabile con gli incentivi in conto capitale, nel rispetto della normativa comunitaria e nazionale.

Dalle poche nozioni evidenziate per brevità di trattazione, e dall'esperienza ricavata durante il percorso di dottorato, si ritiene opportuno fare alcune osservazioni di merito sull'aspetto degli incentivi per l'efficienza energetica e la diffusione delle fonti rinnovabili, utili a capire le evoluzioni future della situazione.

Sicuramente, il Decreto Ministeriale 28/12/2012 definisce un quadro incentivante chiaro e stabile per le rinnovabili termiche, che amplia gli incentivi ai soggetti pubblici che non possono godere delle detrazioni fiscali di riqualificazione energetica e ristrutturazione edilizia poiché non sono soggetti IRPEF/IRES, garantendo un incremento dell'utilizzo di FER e del risparmio energetico. I Soggetti Privati, almeno per il primo periodo di esercizio del Conto Termico, si trovano a dover scegliere tra i nuovi incentivi o quelli delle agevolazioni fiscali; la scelta è a discrezione del committente e dovrebbe essere effettuata in seguito a studi di fattibilità tecnico-economica. Le motivazioni a vantaggio del conto termico sono note: tempi brevi e incentivi monetari diretti.

Un altro elemento positivo è l'aver puntato sulla semplificazione burocratica; ad esempio, per alcune tipologie di interventi, non è necessaria l'asseverazione di un tecnico abilitato ma è sufficiente una dichiarazione sostitutiva del Soggetto Responsabile dell'intervento (art.7, c. 6, lettera c). Per il settore delle biomasse, la Coldiretti ha evidenziato che si tratta indubbiamente di un intervento di promozione dell'energia termica tra i più rilevanti su scala europea, che pone l'accento sulla qualità delle tecnologie di conversione energetica per apparecchi domestici e impianti, sulla loro manutenzione programmata e istituisce un'iniziale attenzione alla qualità dei biocombustibili. La possibilità di effettuare gli interventi non solo negli edifici ma anche nei fabbricati rurali esistenti insieme alla possibilità, per le sole aziende agricole, di eseguire sia la sostituzione che l'installazione ex novo di impianti di climatizzazione invernale a biomassa, consentiranno un incremento dell'utilizzo delle FER.

In vista di una revisione futura, già prevista ai sensi dell'art.1 comma 2 del Decreto, al fine di consentire realmente all'incentivo di essere commisurato alla producibilità termica degli impianti, si rendono necessarie apposite strategie per la riduzione dei costi dei contabilizzatori di energia termica (CET) al fine di non incidere troppo sugli interventi cui sono abbinati. Infatti, come sollevato da diverse associazioni, nel tentativo

di semplificare il più possibile il meccanismo, l'entità dell'incentivo non è stata legata alla producibilità dell'impianto ma gli incentivi risultano proporzionali all'entità dell'intervento. In questo modo è tradito, almeno per il momento, lo spirito del Decreto Rinnovabili. Inoltre non tenendo conto dei differenti costi delle tecnologie disponibili sul mercato, si corre il rischio di privilegiare impianti di qualità scadente. Sicuramente la difficoltà tecnica della contabilizzazione dell'energia termica prodotta da un impianto rispetto quella elettrica ha inciso sulle decisioni del legislatore; infatti l'introduzione di CET avrebbe comportato ulteriori spese a carico del committente, nonché la necessità di istituire un sistema di monitoraggio, in loco e telematico, con conseguente aggravio dei costi.

Un'altra criticità riguarda l'impegno di spesa (par. 2.7). La spesa complessiva annua di 900 milioni di euro, prevista per l'incentivazione di tutte le rinnovabili termiche e per le misure di efficienza energetica, non può essere ritenuta adeguata, soprattutto se si considerano le osservazioni riportate nel documento pubblicato recentemente circa la *Strategia Energetica Nazionale (SEN)* [10] con riferimento all'importanza di puntare sulle rinnovabili termiche e se confrontata con i fondi destinati alle rinnovabili elettriche.

Per il settore delle pompe di calore AiCARR - Associazione Italiana Condizionamento dell'Aria Riscaldamento e Refrigerazione - suggerisce:

- × di riequilibrare i valori degli incentivi;
- × di tener conto dell'evoluzione della progettazione del sistema edificio-impianto verso gli nZEB così come previsto dalle più recenti Direttive Europee, dando quindi maggiore enfasi all'efficienza energetica complessiva nell'intero anno. In tal modo, infatti, si premierebbero le tecnologie efficienti non solo in inverno ma anche in estate;
- × di passare al più presto, almeno per gli impianti di media e grossa taglia, da una incentivazione basata sui dati nominali a una basata sulle prestazioni reali contabilizzate, che comporterebbe una maggiore attenzione alla manutenzione ed al corretto dimensionamento;
- × di modificare i criteri di ammissibilità agli incentivi, al fine di rendere più lineare la relazione tra importo dell'incentivo e valore del COP, premiando così le aziende che investono in R&D.

Uno dei punti su cui l'AiCARR si è espressa con maggiore determinazione nel suo *Position Paper* [40] è il calcolo della produzione di energia da fonte rinnovabile con pompa di calore, in quanto influisce su molte scelte, non solo tecniche, ma anche politiche. Il calcolo effettuato in accordo a quanto previsto nel D.Lgs 28/2011 infatti deve essere inteso come convenzionale, perché parte da un approccio statistico

semplificato, comunque diverso dall'impostazione propria delle Direttive e delle normative relative all'efficienza energetica. Infatti la metodologia del Decreto 28 prende in considerazione solo la pompa di calore e non tutto il sistema di generazione, parificando tra loro generatori di integrazione a bassa efficienza, come quelli a resistenza elettrica, con quelli ad elevata efficienza, come le caldaie a condensazione. A questo si aggiunge che il metodo propone un calcolo medio stagionale, anziché considerare in modo puntuale quando e se viene effettivamente prodotta energia sfruttando una fonte rinnovabile. Il calcolo medio stagionale comporta gravi errori, poiché, utilizzando un metodo semplificato, la quantità di energia prodotta sfruttando le fonti di energia rinnovabile è a volte sottostimata fino ad essere annullata del tutto, altre volte sovrastimata. L'impostazione convenzionale del calcolo quindi non è congruente con la normativa sull'efficienza energetica e può portare a favorire sistemi che richiedono una maggiore quantità di energia primaria. In particolare, questa impostazione penalizza tutte le pompe di calore alimentate a metano, sia quelle a compressione collegate ad un motore endotermico che quelle ad assorbimento. L'impostazione convenzionale penalizza inoltre tutte le caldaie a condensazione, che, pur non essendo in grado di sfruttare l'energia da fonte rinnovabile, possono comunque contribuire a limitare i consumi energetici nelle condizioni più gravose per le pompe di calore. Pertanto, sarebbe opportuno che il confronto tra le diverse soluzioni fosse fatto a parità di energia primaria.

In definitiva comunque l'AiCARR ritiene corretto lo spirito del Decreto, in quanto promuove lo sfruttamento delle FER anche nel settore termico e molto positivo il riferimento esplicito ad aggiornamenti periodici, a testimonianza della consapevolezza di operare in un settore in continua evoluzione tecnologica. Inoltre l'AiCARR considera fondamentale l'introduzione di una futura tariffazione ad hoc per l'energia elettrica per l'alimentazione delle pompe di calore; vi è la necessità di una tariffa elettrica specifica, non gravata da oneri impropri, che riduca i costi di funzionamento. Il settore del solare termico necessita della commisurazione degli incentivi basata sulle prestazioni reali contabilizzate in modo da favorire una maggiore attenzione alla progettazione e alla manutenzione durante il funzionamento dell'impianto. Allo stesso tempo, per la diffusione dello sfruttamento delle biomasse, l'introduzione della nozione di filiera corta e un opportuno snellimento delle specifiche tecniche richieste contribuirebbero in maniera significativa al rilancio della gestione dei boschi e alla riduzione delle importazioni di materia prima dall'estero.

Da queste considerazioni, si può concludere che al legislatore spetta il compito di prevedere opportune modifiche, in considerazione dell'evoluzione delle tecnologie e della normativa sulle detrazioni fiscali, visti i successivi decreti di aggiornamento, al fine

di risolvere le criticità riscontrate. Occorre, quindi, definire meglio l'ambito di applicazione in modo da creare uno strumento unico ed omogeneo, nonché di maggiore efficacia, per tutti gli interventi di produzione di energia termica rinnovabile ed evitare sovrapposizioni con gli interventi per l'efficienza energetica negli edifici che possono essere oggetto delle detrazioni fiscali.

1.2.5 Il recepimento italiano della Direttiva 2010/31/UE

Pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale del 3 agosto 2013, e in vigore dal giorno successivo, la Legge 90/2013 di conversione con modificazioni del D.L. 63/2013 [7] recepisce la Direttiva 2010/31/UE, dettando le nuove regole sulla prestazione energetica degli edifici attraverso un aggiornamento del D.Lgs. 192/2005.

Il provvedimento ha la finalità di *promuove il miglioramento della prestazione energetica degli edifici tenendo conto delle condizioni locali e climatiche esterne, nonché delle prescrizioni relative al clima degli ambienti interni e all'efficacia sotto il profilo dei costi*. Rispetto ai precedenti decreti e attuando quanto previsto a livello europeo, il miglioramento delle prestazioni energetiche presuppone un'analisi del ciclo di vita economico di un edificio, individuando per esso il livello ottimale di efficienza energetica in funzione dei costi. Si passa cioè ad una progettazione che mira alla ricerca di un punto di ottimo tra efficienza energetica, analisi economica e impatto ambientale.

Risulta modificata la definizione di prestazione energetica di un edificio: *quantità annua di energia primaria effettivamente consumata o che si prevede possa essere necessaria per soddisfare, con un uso standard dell'immobile, i vari bisogni energetici dell'edificio, la climatizzazione invernale e estiva, la preparazione dell'acqua calda per usi igienici sanitari, la ventilazione e, per il settore terziario, l'illuminazione, gli impianti ascensori e scale mobili*. Tale quantità deve essere espressa attraverso uno o più descrittori che tengano conto del livello di isolamento dell'edificio e delle caratteristiche tecniche e di installazione degli impianti tecnici e la sua definizione può essere fornita in termini di energia primaria non rinnovabile, rinnovabile, o totale come somma delle precedenti. Quello che si ritiene opportuno sottolineare, rispetto alla precedente versione, è l'aggiunta di un capoverso che specifica gli usi da includere per il settore terziario e la particolarizzazione nel caso di fabbisogno ricoperto da energia rinnovabile.

Quest'ultima precisazione è necessaria perché, per dare seguito a quanto introdotto dalla direttiva 2010/31/UE, viene prescritto (art.4-bis) che a partire dal 31 dicembre 2018, gli edifici di nuova costruzione occupati da pubbliche amministrazioni e di proprietà di queste ultime, e dal 1° gennaio 2021 tutti gli edifici di nuova costruzione, ivi

compresi gli edifici scolastici, devono essere *edifici a energia quasi zero*. Un edificio a energia quasi zero viene definito come un edificio ad altissima prestazione energetica, in cui il fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo è coperto in misura significativa da energia da fonti rinnovabili prodotta in situ cioè prodotta, captata o prelevata all'interno del confine del sistema (confine energetico dell'edificio)¹⁸.

Entro il 30 giugno 2014, inoltre, è prevista la definizione di un Piano d'azione destinato ad aumentare anche attraverso politiche e misure finanziarie ad hoc, il numero di edifici a energia quasi zero, definendo perciò anche gli obiettivi intermedi di miglioramento della prestazione energetica degli edifici di nuova costruzione entro il 2015. Il Piano d'azione dovrà prevedere in particolare, i seguenti elementi:

- ✓ l'applicazione della definizione di edifici a energia quasi zero alle diverse tipologie di edifici e indicatori numerici del consumo di energia primaria;
- ✓ l'individuazione, sulla base dell'analisi costi-benefici di casi specifici per i quali non si applica l'obbligo di essere ad energia quasi zero.

Un momento decisivo per l'aggiornamento della legislazione in materia di efficienza energetica è l'emanazione dei decreti attuativi previsti dall'art.4, a partire da quella data infatti risulta abrogato il D.P.R. 59/2009 e cambieranno la metodologia per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici, i requisiti minimi e gli ambiti di intervento.

Relativamente alle metodologie di calcolo e ai requisiti minimi, attualmente, resta in vigore quanto prescritto all'art. 3 del D.P.R 59/2009, con l'aggiunta di due testi di riferimento: raccomandazione CTI 14/2013[41] [41]; UNI EN 15193/2008 [42]. Invece, l'attuale sistema verrà aggiornato e modificato in linea definitiva appena saranno emessi i decreti attuativi in relazione ai paragrafi 1 e 2 dell'allegato I della Direttiva 2010/31/UE. In particolare, i nuovi requisiti minimi da introdurre e aggiornare ogni cinque anni saranno basati sulle valutazioni tecniche ed economiche di convenienza, fondate sull'analisi costi benefici del ciclo di vita economico degli edifici.

Nel definire tali limiti, nel documento si indica che in caso di nuova costruzione e di ristrutturazione importante, i requisiti saranno determinati con l'utilizzo dell'*edificio di riferimento*. Quello che si cerca di fare, infatti, è di passare da un sistema di legislazione delle prestazioni basato sul limite prescrittivo, ad un sistema in cui le prestazioni (sia nel caso di verifica progettuale o diagnosi) siano confrontate con quelle di un edificio "target", identico in termini di geometria (sagoma, volumi, superficie calpestabile, superfici degli elementi costruttivi e dei componenti), orientamento, ubicazione territoriale, destinazione d'uso e situazione al contorno e avente

¹⁸ Confine del sistema o confine energetico dell'edificio è il confine che include tutte le aree di pertinenza dell'edificio, sia all'interno che all'esterno dello stesso, dove l'energia è consumata o prodotta, così come definito all'art. 2 della Legge 90 del 3 Agosto 2013.

caratteristiche termiche e parametri energetici predeterminati. Questo aspetto, di assoluta novità, chiarisce l'entità della trasformazione che la futura (nonché imminente) legislazione energetica si accinge a subire, e data la sua importanza si è ritenuto di dedicarvi una sezione ad hoc (paragrafo 1.3), analizzando con dettaglio tutte le implicazioni che comporterebbe il recepimento degli orientamenti internazionali in materia.

In merito agli ambiti di intervento, a partire dall'emanazione dei suddetti decreti attuativi, le prescrizioni dovranno essere applicate sia all'edilizia pubblica che privata, e in maniera diversificata per le nuove costruzioni, le ristrutturazioni importanti e, per la prima volta nella normativa nazionale in modo specifico per gli interventi di riqualificazione energetica¹⁹. Sono escluse dall'applicazione del decreto gli edifici:

- industriali, artigianali e agricoli non residenziali quando gli ambienti sono riscaldati per esigenze del processo produttivo o utilizzando reflui energetici del processo produttivo non altrimenti utilizzabili;
- gli edifici rurali non residenziali sprovvisti di impianti di climatizzazione e quelli adibiti a luoghi di culto e allo svolgimento delle attività religiose;
- i fabbricati isolati con una superficie utile totale inferiore a 50 metri quadrati;
- gli edifici il cui utilizzo standard non prevede l'installazione e l'impiego di sistemi tecnici, quali box, cantine, autorimesse, parcheggi multipiano, depositi, strutture stagionali a protezione degli impianti sportivi, ecc.

Per questi ultimi il decreto si applica limitatamente alle porzioni eventualmente adibite ad uffici e assimilabili, purché scorporabili ai fini della valutazione di efficienza energetica. Infine risultano esclusi dall'obbligo di attestazione della prestazione energetica degli edifici, e delle verifiche relative all'esercizio, la manutenzione e le ispezioni degli impianti tecnici, gli edifici sottoposti a vincoli artistici purché si dimostri che il rispetto delle prescrizioni implichi un'alterazione sostanziale del loro carattere o aspetto, con particolare riferimento ai profili storici, artistici e paesaggistici.

Inoltre, i decreti attuativi comporteranno l'aggiornamento, in relazione all'articolo 8 e agli articoli da 14 a 17 della direttiva 2010/31/UE, delle modalità di progettazione, installazione, esercizio, manutenzione e ispezione degli impianti termici per la climatizzazione invernale ed estiva degli edifici, nonché i requisiti professionali e i criteri di accreditamento per assicurare la qualificazione e l'indipendenza degli esperti e degli

¹⁹ Definizione da Art.2, Legge n.90 /2013: un edificio esistente è sottoposto a riqualificazione energetica quando i lavori in qualunque modo denominati ricadono in tipologie diverse da quelle indicate come "ristrutturazione importante di un edificio" che cioè insistono su oltre il 25% della superficie dell'involucro dell'intero edificio, comprensivo di tutte le unità immobiliari che lo costituiscono (a titolo esemplificativo e non esaustivo) nel rifacimento di pareti esterne, di intonaci esterni, del tetto o dell'impermeabilizzazione delle coperture.

organismi a cui affidare l'attestazione della prestazione energetica degli edifici e l'ispezione degli impianti di climatizzazione.

A monte di questo viene introdotta una nuova definizione di impianto termico: *impianto tecnologico destinato ai servizi di climatizzazione invernale o estiva degli ambienti, con o senza produzione di acqua calda sanitaria, indipendentemente dal vettore energetico utilizzato, comprendente eventuali sistemi di produzione, distribuzione e utilizzazione del calore nonché gli organi di regolarizzazione e controllo.* In particolare, sono compresi negli impianti termici gli impianti individuali di riscaldamento mentre non lo sono sistemi come stufe, caminetti, apparecchi di riscaldamento localizzato ad energia radiante; tali apparecchi, se fissi, sono tuttavia assimilati agli impianti termici quando la somma delle potenze nominali del focolare degli apparecchi al servizio della singola unità immobiliare è maggiore o uguale a 5 kW. Non sono considerati impianti termici i sistemi dedicati esclusivamente alla produzione di acqua calda sanitaria al servizio di singole unità immobiliari ad uso residenziale ed assimilate. Inoltre, in caso di edifici di nuova costruzione e in caso di edifici soggetti a ristrutturazione importante, è prevista una valutazione della fattibilità tecnica, ambientale ed economica per l'inserimento di sistemi alternativi ad alta efficienza, tra i quali sistemi di fornitura di energia rinnovabile, cogenerazione, teleriscaldamento e tele-raffrescamento, pompe di calore e sistemi di monitoraggio e controllo attivo dei consumi. La valutazione della fattibilità tecnica di sistemi alternativi deve essere documentata e disponibile a fini di verifica.

Prima di concludere questa sezione si vogliono infine sottolineare gli effetti che la legge n.90 del 2013 ha avuto nell'immediato; questi riguardano la disciplina in campo di certificazione energetico, le sanzioni per il mancato rispetto dei vincoli imposti e lo sviluppo di strumenti finanziari per la promozione dell'efficienza energetica degli edifici.

In materia di certificazione energetica cambiano molte cose; innanzitutto la definizione, si passa da attestato di certificazione energetica ad *attestato di prestazione energetica inteso* (APE), un documento redatto nel rispetto delle norme contenute nel decreto e rilasciato da esperti qualificati e indipendenti che attesta la prestazione energetica di un edificio attraverso l'utilizzo di specifici descrittori e fornisce raccomandazioni per il miglioramento dell'efficienza energetica. Con un nuovo Decreto, inoltre, sarà predisposto l'adeguamento del [37] al fine di introdurre:

- metodologie di calcolo semplificate per edifici con ridotte dimensioni e prestazioni energetiche di modesta qualità, finalizzate a ridurre i costi a carico dei cittadini;

- definizione di un attestato di prestazione energetica che comprenda tutti i dati relativi all'efficienza energetica dell'edificio, i quali consentano di valutare e confrontare edifici diversi;
- uno schema di annuncio di vendita o locazione, per esposizione nelle agenzie immobiliari, che renda uniformi le informazioni sulla qualità energetica degli edifici fornite ai cittadini;
- definizione di un sistema informativo comune per tutto il territorio nazionale, di utilizzo obbligatorio per le regioni e le province autonome, che comprenda la gestione di un catasto degli edifici, degli attestati di prestazione energetica e dei relativi controlli pubblici.

Relativamente al campo di applicazione, le novità più importanti riguardano l'obbligo di dotare gli edifici di nuova costruzione o oggetto di ristrutturazioni importanti di APE prima del rilascio del certificato di agibilità, l'obbligo di rilascio dell'APE anche in caso di trasferimento di un immobile a titolo gratuito, nonché di allegarlo al contratto di vendita, agli atti di trasferimento di immobili a titolo gratuito o ai nuovi contratti di locazione, pena la nullità degli stessi contratti. Nel caso di offerta di vendita o di locazione, i corrispondenti annunci tramite tutti i mezzi di comunicazione commerciali devono riportare gli indici di prestazione energetica dell'involucro e globale dell'edificio o dell'unità immobiliare e la classe energetica corrispondente. Per gli edifici utilizzati da pubbliche amministrazioni e aperti al pubblico con superficie utile totale superiore a 500 m² (a partire dal 9 luglio 2015, la soglia è abbassata a 250 m²), il proprietario o al soggetto responsabile della gestione, deve provvedere al produrre l'attestato di prestazione e ad affiggerlo con evidenza all'ingresso dell'edificio stesso o in altro luogo chiaramente visibile al pubblico. Per gli edifici scolastici tali obblighi ricadono sugli enti proprietari.

Fortemente modificato risulta l'articolo 15 del decreto legislativo n. 192/2005, in materia di sanzioni. In particolare, il professionista che rilascia la relazione tecnica o un attestato di prestazione energetica senza il rispetto degli schemi e delle modalità stabilite nel decreto, è punito con una sanzione amministrativa non inferiore a 700 euro e non superiore a 4'200 euro. Il direttore dei lavori che omette di presentare al comune l'asseverazione di conformità delle opere rispetto all'attestato di qualificazione energetica, prima del rilascio del certificato di agibilità, è punito con sanzione amministrativa non inferiore a 1'000 euro e non superiore a 6'000 euro. Il proprietario o il conduttore dell'unità immobiliare, l'amministratore del condominio, o l'eventuale terzo che se ne è assunta la responsabilità, qualora non provveda alle operazioni di controllo e manutenzione degli impianti di climatizzazione è punito con la sanzione

amministrativa non inferiore a 500 euro e non superiore a 3'000 euro. In tutti i casi, l'ente che provvede ad applicare le sanzioni è tenuto anche a dare comunicazione ai relativi ordini o collegi professionali per i provvedimenti disciplinari conseguenti.

L'operatore incaricato del controllo e manutenzione che non provvede a redigere e sottoscrivere il rapporto di controllo tecnico è punito con sanzione amministrativa non inferiore a 1'000 euro e non superiore a 6'000 euro. In caso di violazione dell'obbligo di dotare di un attestato di prestazione energetica gli edifici di nuova costruzione e quelli sottoposti a ristrutturazioni importanti, il costruttore o il proprietario è punito con la sanzione amministrativa non inferiore a 3'000 euro e non superiore a 18'000 euro, mentre nel caso di locazione, il proprietario è punito con la sanzione amministrativa non inferiore a 300 euro e non superiore a 1'800 euro e nel caso di vendita, la sanzione amministrativa è non inferiore a 3'000 euro e non superiore a 18'000 euro.

In caso di violazione dell'obbligo di riportare i parametri energetici nell'annuncio di offerta di vendita o locazione, il responsabile dell'annuncio è punito con la sanzione amministrativa non inferiore a 500 euro e non superiore a 3'000 euro.

1.2.6 Gli strumenti di supporto finanziario

La Legge di Stabilità 2014 ha prorogato la detrazione fiscale IRPEF (Imposta sul reddito delle persone fisiche) e IRES (Imposta sul reddito delle società) per gli interventi di riqualificazione energetica degli edifici. La detrazione è stata confermata nella misura del 65% per le spese sostenute dal 6 giugno 2013 al 31 dicembre 2014, mentre è del 50% per le spese che saranno effettuate nel 2015. Riguardo agli interventi sulle parti comuni degli edifici condominiali e su tutte le unità immobiliari di ciascun condominio, la detrazione si applica nella misura del 65%, se la spesa è sostenuta nel periodo compreso tra il 6 giugno 2013 e il 30 giugno 2015, e del 50%, per le spese che saranno effettuate dal 1° luglio 2015 al 30 giugno 2016. A partire dal 1° gennaio 2016 (1° luglio 2016 per i condomini) l'agevolazione sarà invece sostituita con la detrazione fiscale del 36% prevista per le spese relative alle ristrutturazioni edilizie. Per l'applicazione dell'aliquota occorre far riferimento, a prescindere dall'inizio dei lavori di intervento, a due distinti criteri a seconda della natura del soggetto che accede alla agevolazione: criterio di cassa (data dell'effettivo pagamento) per le persone fisiche, gli artigiani, i professionisti e gli enti non commerciali, e criterio di competenza (data di ultimazione della prestazione, indipendentemente dalla data dei pagamenti) per le imprese individuali, le società e gli enti commerciali.

L'agevolazione fiscale è concessa quando si eseguono interventi che aumentano il livello di efficienza energetica degli edifici esistenti nel limite massimo riportato in Tabella 1.18.

	Detrazione massima
Riqualificazione energetica di edifici esistenti	100'000 euro
Involucro edifici (es. pareti, finestre gli infissi su edifici esistenti)	60'000 euro
Installazione di pannelli solari	60'000 euro
Sostituzione degli impianti di climatizzazione invernale	30'000 euro

Tabella 1.18: Detrazione massima per tipologia di intervento.

Non sono agevolabili spese effettuate in corso di costruzione dell'immobile in modo coerente con la normativa di settore adottata a livello comunitario in base alla quale tutti i nuovi edifici sono assoggettati a prescrizioni minime della prestazione energetica. La detrazione d'imposta del 55% (65%) non è cumulabile con altre agevolazioni fiscali previste per i medesimi interventi da altre disposizioni di legge nazionali né riconosciuti dalla Comunità Europea, dalle Regioni o dagli enti locali. Se gli interventi realizzati rientrano sia nelle agevolazioni previste per il risparmio energetico sia in quelle previste per le ristrutturazioni edilizie, si potrà fruire, per le medesime spese, soltanto dell'uno o dell'altro beneficio fiscale.

Possono usufruire della detrazione tutti i contribuenti residenti e non residenti, anche se titolari di reddito d'impresa, che possiedono, a qualsiasi titolo, l'immobile oggetto di intervento. In particolare, sono ammessi all'agevolazione:

- le persone fisiche, compresi gli esercenti arti e professioni;
- i contribuenti che conseguono reddito d'impresa (persone fisiche, società di persone o di capitali);
- le associazioni tra professionisti;
- gli enti pubblici e privati che non svolgono attività commerciale.

In particolare, le detrazioni, sono riconosciute se le spese sono state sostenute per:

- × riduzione del fabbisogno energetico per il riscaldamento;
- × interventi di efficientamento sull'involucro edilizio;
- × installazione di pannelli solari;
- × sostituzione degli impianti di climatizzazione invernale.

Per lavori di sostituzione di impianti di climatizzazione invernale si intende la sostituzione, integrale o parziale, di impianti di climatizzazione invernale esistenti con impianti dotati di caldaie a condensazione e contestuale messa a punto del sistema di distribuzione. Per fruire dell'agevolazione è necessario, quindi, sostituire l'impianto preesistente e installare quello nuovo. Non è agevolabile, invece, l'installazione di

sistemi di climatizzazione invernale in edifici che ne erano sprovvisti. Dal 1° gennaio 2008, l'agevolazione è ammessa anche per la sostituzione di impianti di climatizzazione invernale con pompe di calore ad alta efficienza e con impianti geotermici a bassa entalpia. Dal 1° gennaio 2012, inoltre, la detrazione è stata estesa alle spese per interventi di sostituzione di scaldacqua tradizionali con scaldacqua a pompa di calore dedicati alla produzione di acqua calda sanitaria. Anche per la sostituzione di impianti di climatizzazione invernale non è più richiesta (dal 15 agosto 2009) la presentazione dell'attestato di prestazione energetica.

Nella definizione delle misure si tiene conto dell'opportunità di agevolare ulteriori interventi rispetto a quelli previsti dal presente decreto, quali ad esempio le schermature solari, la micro-cogenerazione e la micro-trigenerazione per il miglioramento dell'efficienza energetica, nonché interventi per promuovere l'efficienza idrica e per la sostituzione delle coperture di amianto negli edifici.

Questi incentivi riguardano essenzialmente investimenti effettuati da soggetti privati. Nel campo della pubblica amministrazione, il riferimento invece è rappresentato dal Decreto Ministeriale del 28 Dicembre 2012 [39]. Per gli interventi di incremento dell'efficienza energetica di cui alla Tabella 1.17, l'accesso all'incentivo è consentito se sono verificati i corrispondenti requisiti di soglia mostrati in Tabella 1.19 e in Tabella 1.20.

	Valore della trasmittanza U per tipologia di intervento			
	Solaio di terra	Solaio di copertura	Strutture opache verticali	Chiusure trasparenti ²⁰
Zona climatica A	≤0.50 W/m ² K	≤0.27 W/m ² K	≤0.45 W/m ² K	≤3.08 W/m ² K
Zona climatica B	≤0.38 W/m ² K	≤0.27 W/m ² K	≤0.34 W/m ² K	≤2.00 W/m ² K
Zona climatica C	≤0.33 W/m ² K	≤0.27 W/m ² K	≤0.28 W/m ² K	≤1.75 W/m ² K
Zona climatica D	≤0.28 W/m ² K	≤0.22 W/m ² K	≤0.24 W/m ² K	≤1.67 W/m ² K
Zona climatica E	≤0.25 W/m ² K	≤0.20 W/m ² K	≤0.23 W/m ² K	≤1.50 W/m ² K
Zona climatica F	≤0.23 W/m ² K	≤0.19 W/m ² K	≤0.22 W/m ² K	≤1.33 W/m ² K

Tabella 1.19: Valori di trasmittanza massimi consentiti per l'accesso agli incentivi.

Gli interventi 1D di Tabella 1.17 sono incentivati esclusivamente se abbinati, sul medesimo edificio, ad almeno uno degli interventi 1A o 1B. Per tali sistemi è inoltre richiesta una prestazione di schermatura solare di classe 3 o superiore in accordo con la norma UNI EN 14501 [43] e inoltre sono ammessi esclusivamente i meccanismi automatici di regolazione e controllo delle schermature basati sulla rilevazione della radiazione solare incidente. Invece gli interventi 1C, necessitano dell'installazione di

²⁰La sostituzione delle chiusure trasparenti deve essere comprensiva di infissi, e congiuntamente devono essere installati sistemi di termoregolazione.

dispositivi di regolazione di tipo modulante agente sulla portata e, in caso di potenza nominale del focolare superiore ai 100 kW, necessitano di bruciatore di tipo modulante, di una regolazione climatica agisce direttamente sul bruciatore e con una pompa di tipo elettronico a giri variabili. Tali interventi sono agevolati per le annualità successive alla prima a condizione che siano effettuate le manutenzioni secondo la normativa.

Tipologia di intervento	Requisiti tecnici di soglia
Installazione di generatori di calore a condensazione ad alta efficienza di potenza termica al focolare inferiore o uguale a 35 kW	Rendimento termico utile $\geq 93+2 \cdot \log P_n$ ²¹
Installazione di generatori di calore a condensazione ad alta efficienza di potenza termica al focolare superiore a 35 kW	Rendimento termico utile $\geq 93+2 \cdot \log P_n$

Tabella 1.20: Requisiti di soglia minimi consentiti per l'accesso agli incentivi interventi 1C

L'incentivo (sia $I_{tot} \leq I_{max}$) è calcolato come: .

$$I_{tot} = \%Spesa \cdot C \cdot S_{int} \quad \text{eq 1.3}$$

dove :

- × S_{int} :superficie oggetto dell'intervento [m²], quando l'intervento è la sostituzione di un generatore, questo termine diventa P_{int} cioè la somma delle potenze termiche nominali del focolare dei generatori di calore installati [kWt];
- × C: costo specifico sostenuto[€/m² - €/kWt], definito dal rapporto tra la spesa in euro e la superficie di intervento. Sono previsti i valori massimi riportati in Tabella 1.21 e Tabella 1.22;
- × %Spesa: percentuale incentivata della spesa totale sostenuta per l'intervento [%], come espressa in Tabella 1.21 e Tabella 1.22;
- × I_{tot} : incentivo totale, cumulato per gli anni di godimento, connesso all'intervento in oggetto [€];
- × I_{max} : valore massimo raggiungibile dall'incentivo totale [€].

Alcune associazioni hanno evidenziato che le scelte fatte potrebbero premiare filiere industriali di altri paesi poiché il modello che si cerca di tradurre in Italia ha uno stampo fortemente nord-europeo e poco indicato per le zone climatiche del nostro paese. Ne sono un esempio i limiti severi previsti per i valori di trasmittanza.

²¹ P_n è la potenza nominale del generatore, espressa in kWt. Per valori di P_n maggiori di 400 kWt si applica il limite massimo corrispondente a $P_n = 400$ kWt.

Tipologia di intervento	Percentuale incentivata (%Spesa)	Costo massimo ammissibile (C_{max})	Valore massimo dell'incentivo (I_{max}) [€]
a- Solaio di copertura			(a+b+c)≤250.000
Esterno	40	200 €/m ²	
Interno	40	100 €/m ²	
Copertura ventilata	40	250 €/m ²	
b- Solaio di terra			
Esterno	40	120 €/m ²	
Interno	40	100 €/m ²	
c- Strutture opache verticali			
Esterno	40	100 €/m ²	
Interno	40	80 €/m ²	
Parete ventilata	40	150 €/m ²	
Chiusure trasparenti	40	350 €/m ² per le zone climatiche A, B e C	45.000
		450 €/m ² per le zone climatiche D,E e F	60.000
Installazione di generatore di calore a condensazione $P_{n, int} \leq 35$ kW	40	160 €/kW _t	2.300
Installazione di generatore di calore a condensazione $P_{n, int} > 35$ kW	40	130 €/kW _t	26.000

Tabella 1.21: Riferimenti per il calcolo dell'incentivo in interventi sull'involucro edilizio.

Inoltre, solo le PA possono usufruire dell'incentivo per la sostituzione dei serramenti e l'installazione dei sistemi schermati che in ogni caso non è considerato un provvedimento autonomo ma deve essere accompagnato dall'installazione delle valvole termostatiche o altro sistema di termoregolazione, se l'edificio non ne è già dotato. Invero, appare molto basso il valore massimo posto per l'incentivo della sostituzione delle chiusure trasparenti e dell'installazione dei sistemi di schermatura e/o ombreggiamento, anche perché, quello che tendenzialmente si trova con gli studi di fattibilità è che questo rappresenta proprio l'intervento a maggior costo iniziale negli interventi di retrofit energetico.

Tipologia di intervento	Percentuale incentivata (%Spesa)	Costo massimo (C_{max}) [€/m ²]	Valore massimo dell'incentivo (I_{max}) [€]
Installazione dei sistemi di schermatura e/o ombreggiamento fissi / integrati, o mobili	40	150	20.000
Installazione di meccanismi automatici di regolazione e controllo delle schermature	40	30	3.000

Tabella 1.22: Coefficienti di calcolo dell'incentivo per tecnologia e valore massimo

Invece, in merito ad interventi per l'isolamento termico dell'involucro opaco le spese ammissibili riguardano solo l'isolamento; se si utilizzasse un componente al contempo

strutturale e isolante, l'incentivo dovrebbe essere corrisposto anche per la parte strutturale e il Decreto non tiene conto di ciò.

1.3 L'evoluzione delle politiche di efficienza energetica: dal limite prescrittivo al Reference Building

Il regolamento delegato n. 244/2012 della Commissione Europea [9], del 16 gennaio 2012, ha integrato la Direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio sulla prestazione energetica nell'edilizia [5], istituendo, in accordo all'articolo 5, un quadro metodologico comparativo per il calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica per gli edifici nuovi ed esistenti e per gli elementi edilizi.

Il quadro metodologico specifica le regole con cui comparare le misure di efficienza energetica, incluse quelle che prevedono lo sfruttamento delle fonti rinnovabili e l'insieme o le varianti delle singole misure più semplici adottate, sulla base della prestazione energetica primaria e del costo assegnato alla loro attuazione.

In particolare, sono definite le procedure per il calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi sulla base sia della prospettiva macroeconomica (che considera i costi e i benefici per tutta la società degli investimenti in efficienza energetica) che di quella finanziaria (che considera solamente l'investimento stesso), lasciando poi a ciascuno Stato il compito di determinare quale calcolo debba diventare il riferimento nazionale per la valutazione dei requisiti minimi nazionali di prestazione energetica. È opportuno però che i requisiti minimi nazionali di prestazione energetica non siano inferiori di più del 15 % ai risultati dei calcoli di ottimalità dei costi adottati come riferimento nazionale. Il livello ottimale in funzione dei costi si situa dunque all'interno della forchetta dei livelli di prestazione per i quali l'analisi costi-benefici sul ciclo di vita è positiva.

Nel dettaglio, la metodologia, definita del *Cost Optimal*, si articola in sei fasi, descritte nel dettaglio:

- I. definizione degli edifici di riferimento;
- II. identificazione delle misure di efficienza energetica;
- III. calcolo del fabbisogno di energia primaria;
- IV. calcolo del costo globale in termini di valore attuale netto;
- V. analisi di sensibilità per i calcoli che includono i prezzi dell'energia;
- VI. derivazione del livello ottimale in funzione dei costi delle prestazioni.

1.3.1 Il Reference Building

Per *edificio di riferimento* (Reference Building) si intende un edificio di riferimento ipotetico o reale che sia tipico in termini di geometria e sistemi, prestazione energetica

dell'involucro e dei sistemi, funzionalità e struttura dei costi del contesto urbano e sociale analizzato e sia rappresentativo delle condizioni climatiche e dell'ubicazione geografica.

Ciascuno stato è chiamato a definire i propri edifici di riferimento, uno per le nuove costruzioni e almeno due per gli edifici esistenti sottoposti a ristrutturazione completa, per le seguenti categorie:

- × abitazioni monofamiliari;
- × condomini di appartamenti e multifamiliari;
- × edifici adibiti a uffici.

Gli edifici individuati possono essere anche classificati e differenziati per dimensioni, età, struttura dei costi, materiali costruttivi, modelli d'uso o zona climatica, in modo da ricostruire un attendibile quadro di riferimento del contesto edilizio considerato. Alle succitate categorie, se ne possono aggiungere altre per le quali esistono specifici requisiti di prestazione energetica quali: strutture scolastiche; ospedali; alberghi e ristoranti; impianti sportivi; esercizi commerciali per la vendita all'ingrosso o al dettaglio; altri tipi di fabbricati che usano energia.

Inoltre, per gli edifici esistenti (residenziali e non residenziali), l'analisi deve essere effettuata considerando l'applicazione di almeno una misura/pacchetto/variante rappresentativi di una ristrutturazione standard, necessaria cioè a portare l'edificio al soddisfacimento dei limiti di efficienza energetica prescritti dai regolamenti nazionali. Invece, per gli edifici nuovi (residenziali e non residenziali), i requisiti minimi di prestazione energetica attualmente in vigore costituiscono il requisito di base da soddisfare.

Anche se in allegato al Decreto si trovano delle schede esemplificative per la definizione di un Reference Building, le informazioni raccolte non risultano esaustive per destinazioni d'uso diverse dal residenziale, e inoltre la mancanza di una metodologia univoca condivisa a livello internazionale genera molte difficoltà ed incertezze soprattutto relativamente al reperimento ed all'accuratezza delle informazioni (sia architettoniche che impiantistiche) necessarie a definire la tipologia di edificio. L'approccio più comunemente adottato prevede l'utilizzo di dati estratti da elaborazioni statistiche o studi di settore, e ove queste non fossero disponibili le informazioni utilizzate risultano di provenienza eterogenea e in generale basate sull'esperienza di chi sta conducendo l'analisi.

È importante poi sottolineare un altro aspetto, e cioè che il livello di dettaglio delle informazioni descrittive dell'edificio, dipende dal tipo di analisi da effettuare, ovvero dal metodo di calcolo che si intende utilizzare. Anche se questa problematica sarà

affrontata con maggior dettaglio nel secondo capitolo di questo lavoro di tesi, si ritiene opportuno fare qualche considerazione *ad hoc* anche in questa sezione.

Infatti c'è da osservare che se si utilizza un approccio di "tipo standard", basato cioè su un metodo di calcolo quasi-stazionario, le informazioni necessarie per l'analisi sono molto minori rispetto a quelle che sarebbero necessarie per un'analisi del comportamento dell'edificio in condizioni reali. In merito, la Direttiva 2010/31/UE suggerisce l'analisi della prestazione energetica attraverso metodi dinamici al fine di ottenere una maggiore accuratezza nei risultati. Tuttavia una simulazione termo-energetica dinamica del comportamento di un edificio richiede un elevato numero di informazioni rispetto a metodi semplificati come quello quasi-stazionario. Ciò significa che anche la definizione dell'edificio di riferimento richiederebbe un'accurata diagnosi energetica del patrimonio edilizio al fine di raccogliere informazioni dettagliate sulle caratteristiche del sistema edificio-impianto e sulle reali condizioni di funzionamento in funzione della destinazione d'uso dell'edificio stesso.

Questo aspetto evidenzia l'esigenza di avere sistemi informatici di acquisizione e raccolta dati sia livello del singolo edificio che su macro-scala, in modo da creare piattaforme condivise e facilmente gestibili attraverso cui reperire le necessarie informazioni e che siano il punto di partenza per l'elaborazione di dati accurati sul patrimonio edilizio esistente. Il lavoro di tesi presentato affronterà anche questo aspetto attraverso un caso studio.

In generale comunque, riferendosi ai *Benchmark Models* statunitensi [44], i dati necessari alla definizione dei modelli, possono essere classificati in quattro principali sotto-insiemi di informazioni:

- × Funzione: destinazioni d'uso delle diverse zone dell' edificio, profili di utilizzo e di occupazione, descrizione del sito e determinazione dei carichi termici interni;
- × Forma: caratteristiche tipologico-formali e geometriche dell'edificio;
- × Involucro Edilizio: proprietà termo-fisiche dei componenti di involucro;
- × Impianto: taglia e tipologia dell'impianto di condizionamento.

Come evidenziato da Corgnati et al. [45], in funzione dell'origine e della tipologia di dati raccolti possono essere definiti differenti modelli di edifici di riferimento:

- × *Example Building*: modello di edificio definito in base all'esperienza;
- × *Real Building*: edificio realmente esistente, scelto come edificio rappresentativo di una specifica categoria di edifici in funzione dell'epoca di costruzione e della dimensione.

- × *Theoretical Building*: edificio di tipo virtuale, definito attraverso dati di base statistica.

L'Example Building non è un edificio realmente esistente ma di tipo fittizio, definito da esperti attraverso l'ausilio di manuali di progettazione e documenti normativi. Invece, il *Real Building* e il *Theoretical Building* sono definiti a partire da elaborazioni di analisi statistiche del patrimonio edilizio. Tendenzialmente queste non riescono ad abbracciare l'intero patrimonio edilizio ma solo di una porzione di questo "campione edilizio". Quest'ultimo, analizzato attraverso appositi progetti di ricerca, censimenti a livello nazionale e certificati di prestazione energetica, risulta così descritto in maniera sintetica. I dati di tali analisi sono processati ed utilizzati per la definizione dei modelli degli edifici secondo due modalità: in forma aggregata o in forma disaggregata. Pertanto, nel primo caso si seleziona all'interno del campione un edificio reale che sia il più possibile rappresentativo, in quanto con caratteristiche pari a quelle medie del campione di edifici, come emerso dalle analisi statistiche. Nel caso in cui invece i dati vengono "ri-aggregati" al fine di definire un modello di edificio, che non corrisponde ad un edificio reale come nel caso precedente, ma piuttosto ad un edificio virtuale, detto *Theoretical Building*. Sebbene attraverso i tre approcci metodologici sia possibile perseguire il medesimo risultato, ciascuno dei modelli risulta diverso dagli altri per l'appunto in funzione della tipologia di dati di input utilizzati.

Ad oggi non pochi sono gli studi internazionali e i progetti di ricerca per la definizione di condivisi edifici di riferimento. Il primo e più completo studio in materia è quello condotto dall' U.S. Department of Energy (DOE) nell'ambito del programma *Building Technologies*. Lo scopo di questo progetto è stato quello di sviluppare modelli di riferimento energetico di edifici standard o per gli edifici del terziario più comuni che servissero come punti di riferimento per analisi relative all'efficienza energetica in edilizia. I modelli definiti presentano caratteristiche costruttive realistiche e sono rappresentativi delle pratiche di costruzione americane. In particolare sono stati sviluppati 15 tipi di edifici commerciali (in Figura 1.16 si riporta la geometria del modello di una scuola secondaria) e un edificio residenziale multifamiliare il cui comportamento energetico è stato simulato con analisi dinamica in 16 località che rappresentano tutte le zone climatiche degli Stati Uniti.

Per ogni tipo di edificio, ci sono tre versioni del modello di riferimento: nuova costruzione, edificio costruito dopo il 1980 o prima del 1980. Tutte le versioni hanno la stessa forma, stesse zone termiche e gli stessi profili di occupazione e di funzionamento, cambiano invece i valori di isolamento, i livelli di illuminazione e tipologia ed efficienza degli impianti di condizionamento. I nuovi modelli di costruzione

sono conformi ai requisiti minimi di ANSI/ASHRAE/IESNA standard 90.1/2004 [46], i modelli post- 1980 soddisfano i requisiti minimi di standard 90.1/1989 [47], mentre i modelli pre -1980 sono stati sviluppati attraverso studi tecnici di settore.

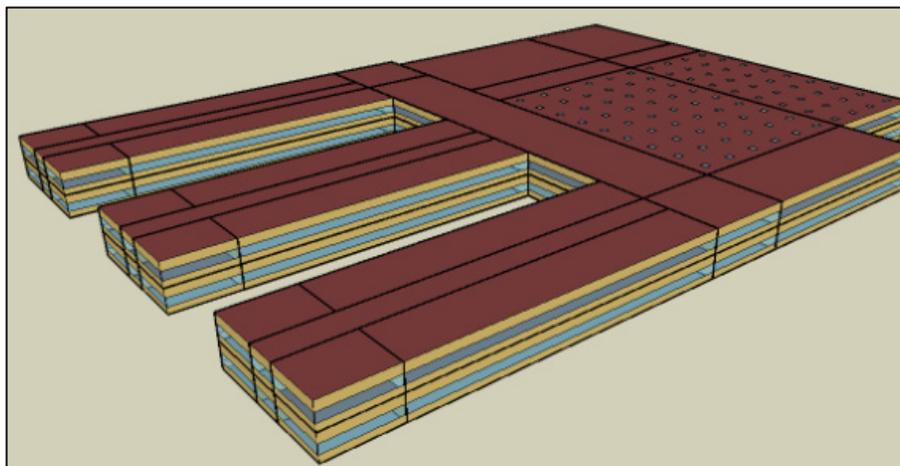


Figura 1.16: Modello di edificio per una scuola secondaria.

I diversi modelli sono descritti nella relazione [44] e sono disponibili nella pagina http://commercialbuildings.energy.gov/reference_buildings.html, come file di input per EnergyPlus.

A livello europeo, nello studiare l'applicabilità della definizione di Nearly Zero Energy Building (nZEB), il Building Performance Institute Europe [48] ha proposto due edifici di riferimento che sono stati simulati in tre località climatiche (Madrid, Copenhagen e Stoccarda). Questi rientrano nella categoria degli Example Buildings per edifici di nuova costruzione in quanto non sono edifici realmente esistenti e sono il risultato di una serie di assunzioni di esperti. I parametri che definiscono le prestazioni termiche dei componenti edilizi e l'efficienza dei sistemi tecnici dell'edificio sono stati scelti in modo da essere significativamente migliori dei limiti minimi prescritti dalle norme di ciascuno stato, ma allo stesso tempo da rimanere al di sopra della migliore tecnologia disponibile e di essere abbastanza vicini alla fattibilità economica. In altre parole, l'intenzione era di posizionare il rendimento energetico degli edifici di riferimento nell'intervallo tra il livello ottimale richiesto dalle Direttiva 2010/31/UE e quello della migliore tecnologia disponibile.

In particolare il primo, un edificio monofamiliare (Figura 1.17), è un bungalow indipendente con un'area netta di 129 m². Questo tipo di edificio è stato selezionato perché ritenuto uno dei più critici, nel raggiungimento dei principi di una progettazione nZEB per il suo elevato rapporto di forma (S/V) e quindi per la sua elevata superficie disperdente.

Il secondo è un edificio di quattro piani, con un'area lorda di 1653 m² che può essere assimilato sia ad un edificio del terziario (alberghi, scuole, ospedali, uffici), sia ad un edificio residenziale multi-familiare. Su ciascun piano, si trovano due Open Office e una sala riunioni centrale, per un totale di 96 postazioni di lavoro (24 per piano).

È importante notare che la definizione di un edificio di riferimento per il settore terziario risulta piuttosto complicata, poiché vi è una grande varietà di tipi edilizi all'interno del settore non residenziale, sia in Italia che in Europa, dagli uffici alla sanità, dagli edifici scolastici a quelli industriali o per attività commerciali. Considerando anche la quantità di dati necessaria per le diverse destinazioni d'uso, la definizione di un Reference Building risulta quindi una grande sfida.

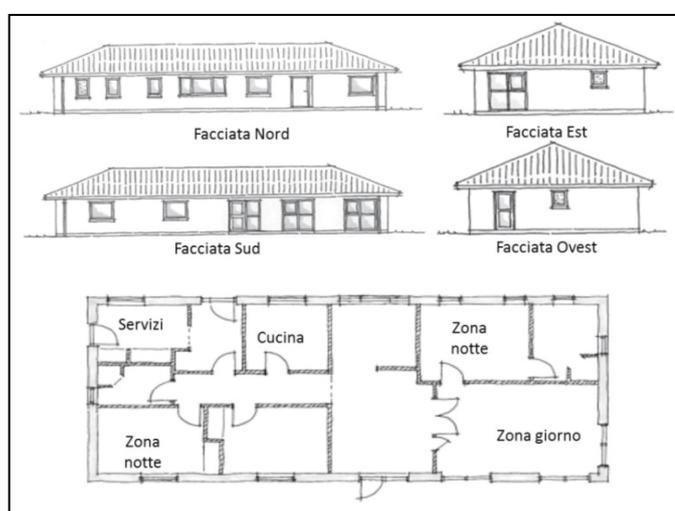


Figura 1.17: Pianta e prospetti del palazzo residenziale di riferimento.

Altri studi degni di nota a livello europeo, sono i due progetti TABULA e ASIEPI, realizzati nell'ambito del programma *Intelligent Energy Europe* (IEE), finalizzato a creare una struttura armonizzata per quanto concerne le tipologie edilizie in Europa. In particolare, il progetto TABULA – *Typology approach for building stock energy assessment* (Approccio tipologico per la valutazione energetica del parco immobiliare) – che ha visto la partecipazione di 13 paesi tra cui l'Italia, è stato finalizzato alla creazione di una struttura armonizzata per edifici tipo a destinazione residenziale. La classificazione proposta del parco edilizio residenziale è basata sulla definizione di "edifici tipo" nazionali, in funzione del periodo di costruzione, della geometria e delle condizioni climatiche. Ogni tipologia edilizia è caratterizzata da dimensioni, fattori di forma, proprietà termo-fisiche, efficienza degli impianti di riscaldamento ed altri indicatori energetici. Un obiettivo fondamentale del progetto è stato quello di stimare il consumo di energia del parco edilizio nazionale e, di conseguenza, di prevedere il

potenziale impatto delle misure di efficienza energetica, al fine di selezionare le strategie efficaci per la riqualificazione degli edifici esistenti.

Di particolare interesse sono i fascicoli nazionali sulla tipologia edilizia [49]. I *Reference Buildings* sviluppati dalla sezione italiana del progetto TABULA sono principalmente dei Real Buildings dal punto di vista delle caratteristiche geometriche ed Example e Theoretical Buildings in relazione all'epoca di costruzione ed alla tipologia edilizia considerata (Figura 1.18 e Figura 1.19). Gli edifici definiti (uno nuovo e due esistenti di diverse epoche), sono stati collocati in due zone climatiche (B ed E, ai sensi del D.P.R. 412/93), per quattro tipologie edilizie (abitazione monofamiliare, piccolo condominio, grande condominio, edificio ad uso ufficio), per un totale di 24 edifici di riferimento.

Building Type Matrix				Italy			
Region	Construction Year Class	Additional Classification	SFH Single-Family House	TH Terraced House	MFI Multi-Family House	AB Apartment Block	
1	Middle Climatic Zone (Zona climatica media - ZONA E) ... 1900	generic					
2	Middle Climatic Zone (Zona climatica media - ZONA E) 1901 ... 1920	generic					
3	Middle Climatic Zone (Zona climatica media - ZONA E) 1921 ... 1945	generic					
4	Middle Climatic Zone (Zona climatica media - ZONA E) 1946 ... 1960	generic					
5	Middle Climatic Zone (Zona climatica media - ZONA E) 1961 ... 1975	generic					
6	Middle Climatic Zone (Zona climatica media - ZONA E) 1976 ... 1990	generic					
7	Middle Climatic Zone (Zona climatica media - ZONA E) 1991 ... 2005	generic					
8	Middle Climatic Zone (Zona climatica media - ZONA E) 2006 ...	generic					

Figura 1.18: Matrice tipologia edilizia della zona climatica E (progetto TABULA).

Il progetto ASIEPI (Assessment and Improvement of the EPBD Impact) ha invece definito all'interno di uno studio pilota, una serie di 12 edifici di riferimento di abitazioni monofamiliari che rientrano nella categoria di Example Buildings in quanto definiti in base all'esperienza [50]. L'obiettivo del progetto era quello di sviluppare e testare uno strumento di comparazione tra gli Stati Membri circa l'applicazione delle prescrizioni energetiche minime introdotte con la Direttiva EPBD 2002/91/CE.

Building-type	ROOFS/CEILING ⁽¹⁾	FLOORS	WALLS	WINDOWS	DOORS
 up to 1900	 Pitched roof with wood structure and planking	 Concrete floor on soil	 Masonry with lists of stones and bricks (40 cm)	 Single glass, metal frame without thermal break	 Wooden door
 1901-1920	 Pitched roof with wood structure and planking	 Concrete floor on soil	 Masonry with lists of stones and bricks (40 cm)	 Single glass, metal frame without thermal break	 Wooden door
 1921-1945	 Pitched roof with wood structure and planking	 Concrete floor on soil	 Solid brick masonry (38 cm)	 Single glass, wood frame	 Wooden door
 1946-1960	 Pitched roof with brick-concrete slab	 Concrete floor on soil	 Solid brick masonry (38 cm)	 Single glass, wood frame	 Wooden door
 1961-1975	 Pitched roof with brick-concrete slab	 Concrete floor on soil	 Hollow brick masonry (40 cm)	 Single glass, wood frame	 Wooden door
 1976-1990	 Pitched roof with brick-concrete slab, low insulation	 Floor with reinforced brick-concrete slab, low insulation	 Hollow wall brick masonry (40 cm), low insulation	 Double glass, air filled, wood frame	 Double panel wooden door
 1991-2005	 Ceiling with reinforced brick-concrete slab, medium insulation	 Floor with reinforced brick-concrete slab, medium insulation	 Hollow brick masonry (40 cm), medium insulation	 Double glass, air filled, wood frame	 Double panel wooden door

Figura 1.19: Matrice tipologia degli elementi d'involucro (progetto TABULA).

1.3.2 Definizione delle misure di efficienza energetica

Le misure di efficienza energetica per gli edifici nuovi ed esistenti devono riguardare tutti i parametri che hanno un impatto diretto o indiretto sulla prestazione energetica dell'edificio, e possono essere accorpate in pacchetti di misure o varianti che devono integrare, tra le altre cose, la produzione energetica da fonti rinnovabili. In merito a ciò, gli obblighi vincolanti stabiliti nell'applicazione nazionale dell'articolo 13 della Direttiva 2009/28/CE si considerano come una sola misura/pacchetto/variante.

Le misure individuate devono comprendere gli interventi necessari per soddisfare i requisiti minimi di prestazione energetica attualmente in vigore così come il soddisfacimento di eventuali regimi nazionali di sostegno e devono includere soluzioni in grado di soddisfare i requisiti minimi di prestazione energetica per gli edifici a energia quasi zero per le nuove costruzioni ed eventualmente anche per il retrofit di quelli esistenti. Tali misure devono anche essere compatibili con i livelli di qualità dell'aria e di comfort dell'ambiente interno, nel rispetto delle vigenti norme europee sulla qualità dell'aria interna o norme nazionali equivalenti.

1.3.3 Calcolo del fabbisogno di energia primaria

La prestazione energetica di un edificio è determinata sulla base della quantità di energia, reale o calcolata, consumata annualmente per soddisfare le varie esigenze legate ad un uso normale dell'edificio e corrisponde al fabbisogno energetico per il

riscaldamento e il raffrescamento che consente di mantenere la temperatura desiderata dell'edificio e coprire il fabbisogno di acqua calda nel settore domestico. Tale calcolo può essere effettuato sulla base del quadro comune generale di cui all'allegato I della Direttiva 2010/31/UE o sulle pertinenti norme CEN esistenti per il calcolo della prestazione energetica oppure con un metodo di calcolo nazionale equivalente, purché conforme all'articolo 2, paragrafo 4, e all'allegato I della direttiva 2010/31/UE.

Ai fini del calcolo di ottimalità dei costi, i risultati della prestazione energetica sono espressi in metri quadrati di superficie utile e fanno riferimento al fabbisogno di energia primaria determinato attraverso fattori di conversione di energia definiti a livello nazionale.

1.3.4 Calcolo del costo globale in termini di valore attuale netto

L'analisi dei costi parte dal calcolo del costo globale dell'edificio o degli elementi edilizi. Questo è la somma del valore attuale dei costi dell'investimento iniziale, dei costi di gestione e dei costi di sostituzione (riferiti all'anno di inizio), nonché dei costi di smaltimento, se del caso. Per il calcolo a livello macroeconomico, in questa somma, si introduce anche una categoria di costo supplementare relativa al costo delle emissioni di gas a effetto serra ovvero il valore monetario del danno ambientale causato dalle emissioni di CO₂ relative al consumo di energia negli edifici. Il riferimento normativo per la metodologia è rappresentato dalla normativa UNI EN 15459 del 2008: *Prestazione energetica degli edifici - Procedura di valutazione economica dei sistemi energetici degli edifici* [51].

Per garantire un approccio comune all'applicazione del quadro metodologico comparativo, nel regolamento sono stabilite anche le principali condizioni necessarie per effettuare i calcoli del valore attuale netto, quali l'anno di inizio per i calcoli e il periodo di calcolo da impiegare.

In particolare, l'anno iniziale è quello su cui si basano tutti i calcoli e a partire dal quale è determinato il periodo di calcolo; invece il periodo di calcolo è assunto di 30 anni per gli edifici residenziali e pubblici e di 20 anni per gli edifici commerciali non residenziali. Lo stabilire di un periodo di calcolo comune non è in conflitto con il diritto di ciascuno stato di fissare una propria durata per il ciclo di vita economico degli edifici e/o degli elementi edilizi, poiché quest'ultimo potrebbe essere effettivamente più lungo o più breve del periodo di calcolo fissato.

Assunto ciò, i costi globali per gli edifici e gli elementi edilizi sono calcolati sommando i diversi tipi di costi e applicando a essi un fattore di sconto, così da

esprimerli in termini di valore nell'anno iniziale, con l'aggiunta del valore residuo attualizzato, come di seguito esplicitato:

$$C_g(\tau) = C_I + \sum_j [\sum_{i=1}^{\tau} (C_{a,i}(j) \times R_d(i)) - V_{f,\tau}(j)] \quad \text{eq 1.4}$$

Ove:

- $C_g(\tau)$: costo globale (riferito all'anno iniziale) nell'arco del periodo calcolato;
- τ : periodo di calcolo
- C_I : costo iniziale dell'investimento per la misura o l'insieme di misure j ;
- $C_{a,i}(j)$: costo annuale durante l'anno i per la misura o l'insieme di misure j ;
- $V_{f,\tau}(j)$: valore residuo della misura o dell'insieme di misure j alla fine del periodo di calcolo (attualizzato all'anno iniziale);
- $R_d(i)$: fattore di sconto per l'anno i sulla base del tasso di sconto "r" da calcolare;

In particolare, come costo dell'investimento iniziale si assume la somma dei costi per la progettazione, l'acquisto degli elementi edilizi, il collegamento delle forniture, l'installazione e i procedimenti di messa in servizio. Invece i costi annuali $C_{a,i}$ sono calcolabili come la somma:

$$C_{a,i} = C_{e,i} + C_{m,i} + C_{f,i} + C_{so,i} \quad \text{eq 1.5}$$

In cui:

- $C_{e,i}$ sono i costi di esercizio energetico complessivo, comprensivi del prezzo dell'energia, delle tariffe di capacità e delle tariffe di rete;
- $C_{m,i}$ sono i costi annuali di manutenzione ordinaria o straordinaria e comprendono i costi annuali di ispezione, pulizia, regolazioni, riparazioni e materiale di consumo;
- $C_{f,i}$ rappresentano tutti i costi connessi con il funzionamento dell'edificio, fra cui le spese annuali per assicurazioni, utenze di servizi pubblici, altri oneri fissi e fiscalità
- $C_{so,i}$ sono i costi di sostituzione di componenti d'involucro o d'impianto, conteggiati a partire dal confronto tra l'orizzonte temporale dell'analisi e la durata di vita dei componenti.

Infine se si ritiene di considerarli, ai costi annuali andrebbero sommati i costi di smaltimento, $C_{sm,i}$. Questi comprendono i costi relativi alla dismissione per la fine della vita utile di un edificio o di un elemento edilizio, e quindi sono la somma dei costi per lo smantellamento, la rimozione degli elementi edilizi non ancora giunti alla fine della loro vita utile, il trasporto e il riciclaggio.

I dati per queste voci di costo si basano sulla situazione del mercato a livello nazionale e vanno espressi come costi reali al netto dell'inflazione. Ovvero, i prezzi di cui tenere conto sono quelli a carico del cliente, comprensivi di tutte le imposte, dell'IVA e degli altri oneri. Idealmente, occorre includere nel calcolo anche i sussidi disponibili, ma si può optare per la loro esclusione, purché siano esclusi anche i regimi di sostegno alle tecnologie, nonché eventualmente i sussidi esistenti ai prezzi dell'energia.

Per attualizzare all'anno iniziale i vari costi è necessario moltiplicarli per il tasso di sconto R_d oppure per il fattore di attualizzazione f_{pv} . Nello specifico, il primo è utilizzato nel caso dei costi periodici, come quelli di sostituzione o come il valore finale di un componente edilizio o impiantistico, mentre il secondo è utilizzato nel caso di costi che si ripetono annualmente, come quelli relativi al consumo energetico. In particolare questi vanno calcolati in accordo alle seguenti equazioni:

- Tasso di sconto: $R_d(p) = \left(\frac{1}{1+R_r}\right)^p$ eq 1.6

- Tasso di interesse reale: $R_r = \frac{R-R_i}{1+R_i}$ eq 1.7

- Fattore di attualizzazione: $f_{pv}(p) = \frac{(1+R_r)-1}{R_r(1+R_r)^p}$ eq 1.8

dove "p" rappresenta il numero di anni a partire dal periodo iniziale, R_r il tasso di interesse reale, R_i il tasso di inflazione, e R tasso di interesse del mercato.

Il tasso di sconto è un valore definito per comparare il valore del denaro in date diverse, espresso in termini reali. Da questo si deriva il fattore di sconto, un coefficiente di moltiplicazione usato per convertire un flusso finanziario in un determinato momento nel suo valore equivalente alla data iniziale. Il tasso di sconto da impiegare nel calcolo finanziario viene determinato dopo aver svolto un'analisi di sensibilità su almeno due tassi diversi a scelta.

Nel proiettare l'evoluzione del costo dell'energia, ci si può avvalere delle previsioni dell'evoluzione dei prezzi dell'energia pubblicate dalla Commissione europea e aggiornate ogni due anni, per petrolio, gas, carbone ed elettricità, sul sito web: http://ec.europa.eu/energy/observatory/trends_2030/index_en.htm, utilizzando come base la media dei prezzi assoluti dell'energia (espressa in euro) per tali rispettive fonti

di energia nell'anno dell'esercizio di calcolo. Analoghe stime possono essere fatte in maniera autonoma per la previsione dell'evoluzione dei prezzi di altri vettori energetici utilizzati in misura significativa nel contesto regionale/locale e, se del caso, anche per le tariffe applicate nei periodi di punta. Inoltre si deve considerare l'effetto dell'evoluzione (prevista) dei prezzi sui costi non energetici in funzione dell'innovazione e dell'adeguamento tecnologico raggiungibile.

Nella stima dei costi, il regolamento europeo invita a far riferimento alla norma UNIEN 15459 sui dati economici per gli elementi edilizi nel definire i cicli di vita economici stimati per detti elementi edilizi [51].

Infine, il valore residuo di un edificio è la somma dei valori residui dell'edificio e degli elementi edilizi al termine del periodo di calcolo. Questo è determinato da un ammortamento lineare dell'investimento iniziale o del costo di sostituzione di un dato elemento edilizio fino alla fine del periodo di calcolo, attualizzato all'inizio del periodo di calcolo. La durata dell'ammortamento è determinata dal ciclo di vita economico di un edificio o elemento edilizio. Può essere necessario correggere i valori residui degli elementi edilizi per tenere conto del costo della loro rimozione dall'edificio alla fine del ciclo di vita economico stimato dell'edificio stesso.

Nel caso dello scenario macroeconomico occorre includere anche una nuova categoria di costo per le emissioni di gas a effetto serra, ottenendo la seguente metodologia adattata del costo globale:

$$C_g(\tau) = C_I + \sum_j \left[\sum_{i=1}^{\tau} (C_{a,i}(j) \times R_d(i) + C_{c,i}(j)) - V_{f,\tau}(j) \right] \quad \text{eq 1.9}$$

in cui $C_{c,i}(j)$ rappresenta il costo delle emissioni di carbonio per la misura o l'insieme di misure j durante l'anno i . Il costo delle emissioni di carbonio nell'arco del periodo di calcolo può essere ottenuto moltiplicando la somma delle emissioni annuali di gas a effetto serra per i prezzi previsti per tonnellata di CO₂ equivalente delle quote di emissione in ogni anno in cui sono emesse, impiegando inizialmente una soglia minima di 20 EUR per tonnellata di CO₂ equivalente fino al 2025, di 35 EUR fino al 2030 e di 50 EUR dopo il 2030, in linea con le attuali previsioni della Commissione sui prezzi del carbonio del sistema ETS²² (misurati a prezzi reali e costanti in euro del 2008, da adattare alle date del calcolo e alla metodologia prescelta).

La Figura 1.20 riporta uno schema riassuntivo per il calcolo del costo globale, indicando le diverse fonti necessarie.

²²Il Sistema di scambio di quote emissione dell'UE (European Union Emissions Trading Scheme - EU ETS) è la principale misura dell'Unione Europea in attuazione del Protocollo di Kyoto per ridurre le emissioni di gas a effetto serra nei settori industriali a maggior impatto sui cambiamenti climatici. Il Sistema è istituito dalla Direttiva 2003/87/CE e successive modificazioni (Direttiva ETS).

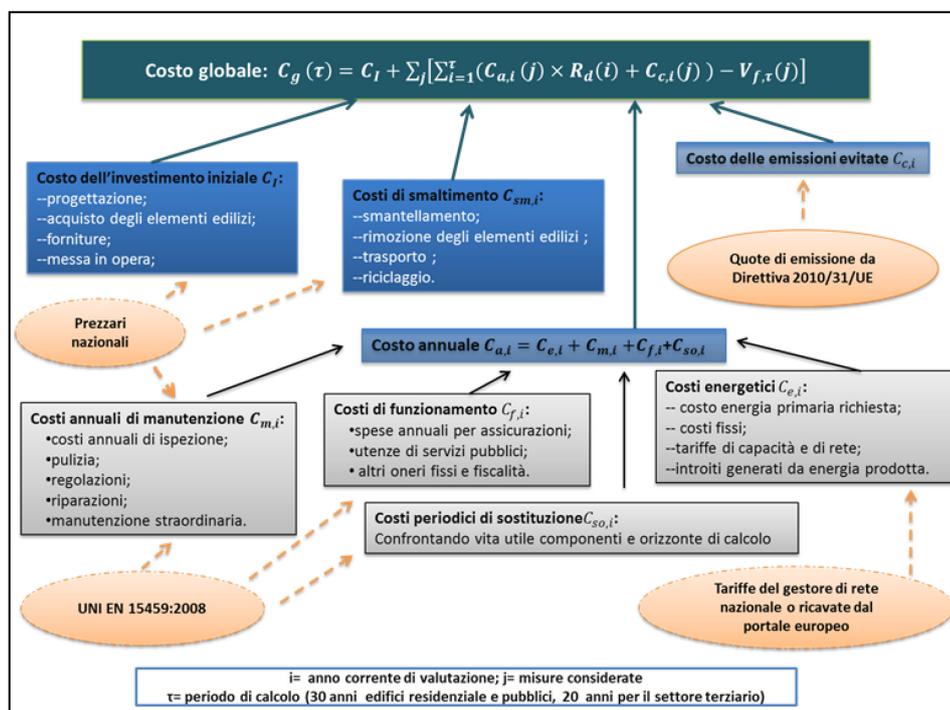


Figura 1.20: Schema riassuntivo per il calcolo del costo globale.

1.3.5 Analisi di sensibilità per i dati di costo

I calcoli e le proiezioni dei costi che comportano numerose ipotesi e incertezze, fra cui per esempio l'evoluzione dei prezzi dell'energia nel tempo, devono essere corredati da un'analisi di sensibilità per valutare la solidità dei principali parametri utilizzati.

Relativamente ai tassi di sconto, l'analisi di sensibilità deve essere svolta utilizzando almeno due tassi di sconto espressi entrambi in termini reali per il calcolo macroeconomico e due tassi per il calcolo finanziario. Uno dei tassi di sconto da impiegare per l'analisi di sensibilità del calcolo macroeconomico deve essere del 3% espresso in termini reali.

1.3.6 Derivazione di un livello ottimale di prestazione in funzione dei costi

L'ultima parte dell'analisi riguarda il confronto tra i risultati del costo globale calcolato per le diverse misure di efficienza energetica ipotizzate e per le combinazioni di quest'ultime. Nei casi in cui l'esito dei calcoli dell'ottimalità dei costi produca gli stessi costi globali per livelli diversi di prestazione energetica, si impiegano i requisiti che risultino in un consumo minore di energia primaria come base di confronto con i requisiti minimi di prestazione energetica esistenti.

La determinazione dell'intervallo di valori minimi tra gli interventi applicati all'edificio, non è un'operazione di semplice risoluzione in quanto non sempre è possibile individuare un minimo tra gli interventi: alcuni interventi possono infatti rivelarsi ottimali

per il miglioramento della prestazione energetica ma richiedere dei costi di investimento molto elevati e quindi non rappresentare un valore ottimale, come ad esempio l'intervento 1 in Figura 1.21.

Alcuni interventi possono richiedere sia un elevato costo globale che avere consumi elevati in termini di energia primaria, collocandosi così in alto a destra (interventi 5 e 6) in Figura 1.21.

L'intervallo di livello ottimale di prestazione energetica corrisponde pertanto alla combinazione di misure di efficientamento energetico (intervento 2, 3 e 4) con il minor costo globale.

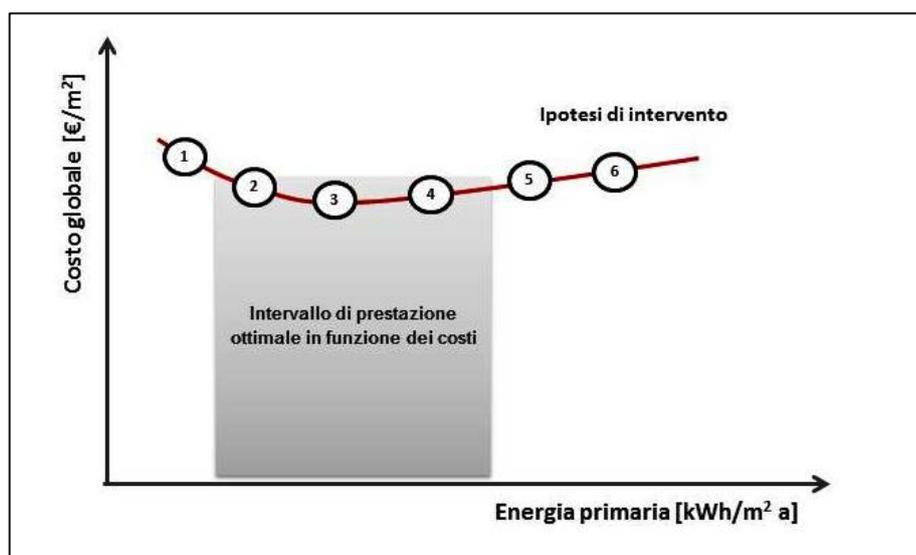


Figura 1.21: Esempio di determinazione della prestazione ottimale in funzione dei costi.

Una volta deciso quale calcolo — macroeconomico o finanziario — debba essere adottato come riferimento nazionale, si calcolano le medie dei livelli ottimali in funzione dei costi della prestazione energetica calcolati per tutti gli edifici di riferimento utilizzati, presi nel loro insieme, per confrontarle con le medie dei requisiti di prestazione energetica esistenti per i medesimi edifici di riferimento, al fine di consentire il calcolo dello scarto fra i requisiti di prestazione energetica esistenti e i livelli ottimali calcolati in funzione dei costi.

Altre considerazioni possono essere fatte confrontandogli ambiziosi obiettivi (al 2020) definiti dallo standard nZEB e i livelli di prestazione ottimali per la metodologia Cost-Optimal. Tre sono le principali differenze individuabili Figura 1.22:

- ✓ gap finanziario: differenza tra il costo effettivo delle soluzioni ottimali e le soluzioni conformi alla definizione nZEB;
- ✓ divario di rendimento energetico: differenza tra il fabbisogno di energia primaria a livelli ottimali e le soluzioni conformi alla definizione nZEB;

- ✓ gap ambientale: differenza tra le emissioni inquinanti associate alle necessità di energia primaria a livelli ottimali e le soluzioni conformi alla definizione nZEB, quest'ultima mira a livelli di emissioni <3 kg [CO₂/m²/anno].

La distanza tra i livelli raggiungibili e i traguardi imposti a partire dal 2020 dovrebbe essere opportunamente valutata per garantire la coerenza tra le politiche europee e nazionali in materia di efficienza energetica. Il divario energetico e ambientale da colmare tenderà ad annullarsi quando i requisiti degli edifici ad “energia zero” diventeranno vincolanti per tutti i nuovi edifici.

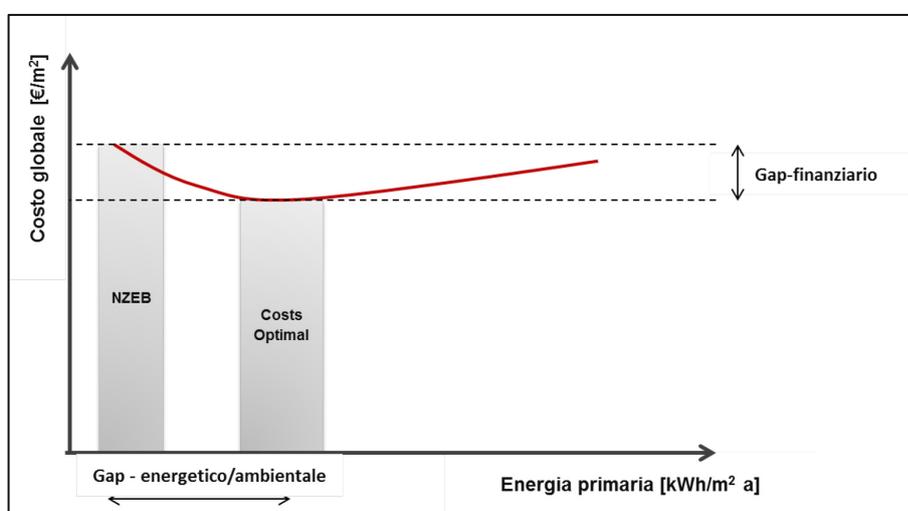


Figura 1.22: Relazione tra Cost Optimal e target energetico al 2020 (nZEB)

Relativamente al gap finanziario, questo potrebbe essere differente a causa dell'effetto di diversi fattori che possono essere soggetti a cambiamenti come ad esempio i costi della tecnologia (per reazione a mercati più maturi e ad una maggiore diffusione di tecnologie innovative per l'efficientamento), o la variazione del prezzo dell'energia.

1.3.7 Sintesi dell' applicazione della metodologia del “Cost Optimal”

Il seguente diagramma sintetizza tutti gli steps necessari all'implementazione della metodologia con particolare riferimento a contesto italiano (Figura 1.23).

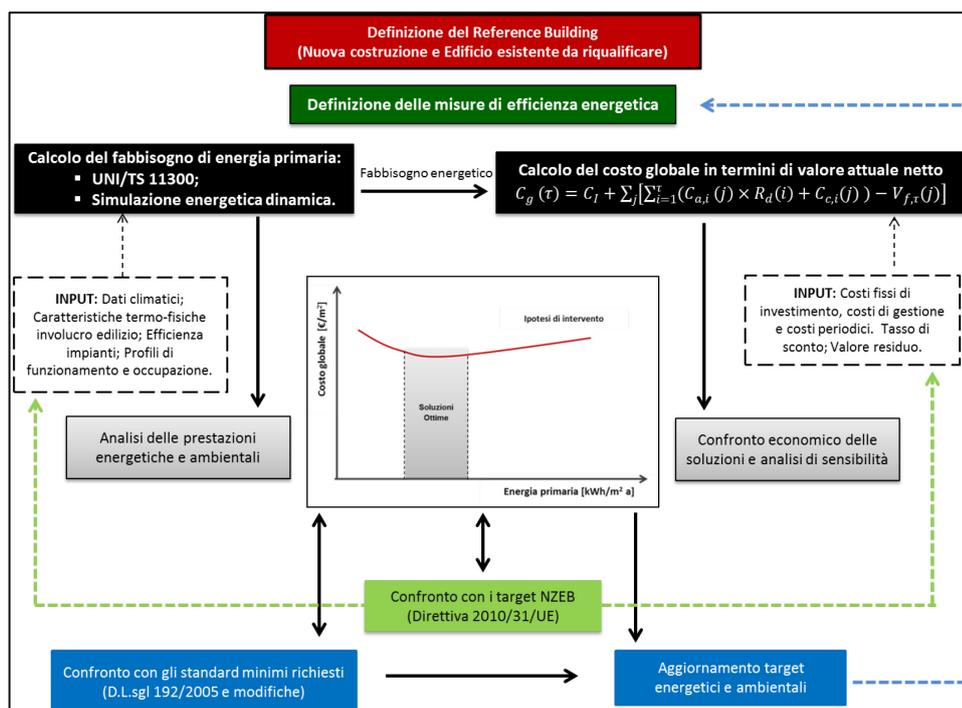


Figura 1.23: Flowchart della metodologia, con riferimento al contesto italiano.

Si vuole sottolineare che a livello internazionale sono stati svolti diversi studi sul calcolo dei livelli di prestazione energetica ottimali in funzione dei costi basati sulla procedura di calcolo indicata dalla Direttiva.

Il riferimento scientifico più autorevole in materia risulta il documento del BPIE (*Buildings Performance Institute Europe*), dal titolo *“Implementing the cost optimal methodology in EU countries. Lessons learned from three case studies”* [52]. In questo documento, per evidenziare le implicazioni della scelta di diversi valori per i fattori chiave (ad esempio, i tassi di sconto, tipologia di intervento/pacchetto di interventi, costi, prezzi energetici) concorrenti all’attuazione a livello nazionale della metodologia del Cost Optimal, vengono mostrati i risultati per tre casi studio collocati in Austria, Germania e Polonia. Per ogni località, la valutazione è stata fatta solo per uno o due tipi di nuovi edifici residenziali, ovvero per abitazioni monofamiliari e/o multi-familiari.

In *“Cost Optimal and nearly zero (nZEB) energy performance calculations for residential buildings with REHVA definition for nZEB national implementation”* [53] invece, si presenta la determinazione dei livelli di prestazione energetica ottimali in funzione dei costi per edifici ad energia quasi zero. Attraverso l’applicazione della procedura di calcolo indicata dalla Direttiva, lo studio, articolato in sette fasi, definisce differenti ipotesi di intervento, in particolare a livello impiantistico, su un edificio monofamiliare, selezionato come edificio di riferimento per nuove costruzioni in Estonia.

Similmente, in [54], è stato sviluppato un caso studio per un Reference Building selezionato all'interno del progetto TABULA, e sito nell'area urbana di Torino. Per questo Reference Building, un edificio per appartamenti appartenente all'epoca di costruzione 1946-1960, sono state analizzate differenti ipotesi di efficientamento energetico, sia a livello di involucro edilizio che di sistema impiantistico, ed è stato calcolato il costo globale corrispondente a ciascuna ipotesi e sono stati così individuati i livelli ottimali di prestazione energetica in funzione dei costi. Con lo stesso approccio, invece, Fabbri et al. hanno presentato i risultati per il retrofit di una villetta bi-familiare collocata a Ravenna [55].

Capitolo 2

Le metodologie di calcolo degli indici di prestazione energetica

Per rendere efficaci le politiche di risparmio energetico intraprese a livello comunitario, sono necessarie metodologie di analisi delle prestazioni e strumenti di pianificazione territoriale che consentano sia di studiare l'efficienza del sistema edificio/impianti, sia di perseguire la sostenibilità del processo costruttivo *from cradle to grave* (dalla culla alla tomba) con riferimento al sistema città-territorio in cui il singolo edificio risulta inserito.

Da un lato, quindi, c'è l'esigenza di formalizzare una metodologia per l'analisi delle prestazioni del singolo edificio, dall'altro quella di avere strumenti e metodi affidabili per poter caratterizzare un numero di edifici sufficientemente rappresentativo delle realtà urbane, in modo da poter pianificare interventi di razionalizzazione energetica e di gestire gli effetti di politiche energetiche su ampia scala. L'obiettivo di questo capitolo quindi è quello di analizzare le principali metodologie di analisi delle prestazioni degli edifici e di studiare possibili procedure per analisi di efficienza energetica sul trinomio "edificio-città-territorio".

Per progettare un edificio sostenibile dal punto di vista energetico, ambientale ed economico lungo tutto il suo ciclo di vita, occorre far ricorso a pratiche progettuali che permettano di effettuare consapevolmente le scelte strategiche e tecnologiche che consentono il raggiungimento degli obiettivi previsti dalle attuali normative sul risparmio energetico. In particolare, il progettista deve poter determinare le prestazioni del sistema edificio - impianti al variare di condizioni al contorno quali il clima, la disponibilità e il costo delle fonti energetiche, il comportamento degli occupanti, le modalità di gestione degli impianti.

L'esistenza di uno schema generale che definisca la metodologia di calcolo della prestazione energetica degli edifici costituisce un requisito essenziale per l'adozione delle misure previste dalle direttive europee 2002/91/CE e 2010/31/UE (recast) sulla prestazione energetica degli edifici.

La normativa tecnica a supporto della direttiva 2002/91/CE è stata realizzata da un gruppo di Comitati Tecnici (TC) del Comitato Europeo di Normazione (CEN). Tuttavia, nella fase di sviluppo è mancato un coordinamento efficiente e si è determinato un eccessivo numero di testi normativi, ridondanti e tra loro, spesso non adeguatamente collegati. Il corposo pacchetto delle oltre 40 norme (pacchetto EPBD) è risultato

pertanto di difficile applicazione per una valutazione univoca delle prestazioni energetiche degli edifici e per una sua traduzione in software applicativi, soprattutto con riferimento alle norme tecniche riguardanti gli impianti. Ciò ha determinato nei vari Stati Membri lo sviluppo di specifiche normative nazionali idonee per una applicazione ai fini della certificazione energetica degli edifici, mediante recezione di parti del pacchetto EPBD, unitamente a dati applicativi nazionali. In particolare, in Italia, il Comitato Termotecnico Italiano (CTI) ha sviluppato il pacchetto di specifiche tecniche UNI/TS 11300 [33,34,35,36], e nel 2013 la Raccomandazione CTI 14/2013 [41] relativa alla determinazione della prestazione energetica per la classificazione dell'edificio.

A seguito della pubblicazione della Direttiva 31/2010 (EPBD2) è stato formalmente accettato dal CEN il mandato M/480 della Commissione Europea [56] mirato all'aggiornamento dell'intero pacchetto di norme tecniche di interesse. Le attività di aggiornamento sono state avviate nel novembre 2011 e il coordinamento dei lavori è stato affidato al comitato CEN/TC 371 che si avvale, oltre del contributo dei delegati nazionali, anche del "Chair Advisory Panel", costituito da esperti già impegnati sul tema. Al momento, dunque si sta lavorando alla revisione della EN 15603 - *Energy performance of buildings: Overall energy use and definition of energy ratings* -, documento base che fornisce le indicazioni fondamentali per l'impostazione del bilancio energetico dell'edificio [57].

La prima parte di questo capitolo dunque riguarderà le metodologie di calcolo degli indici di prestazione energetica recepite dall'applicazione della norma EN ISO 13790: *Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling* [65]. Tuttavia il calcolo del fabbisogno di energia così come definito dalla [65], non consente di delineare con sufficiente grado di dettaglio il comportamento nel tempo del sistema edificio – impianti. Il metodo utilizzato, infatti, è basato sull'ipotesi di regime quasi stazionario e considera valori medi mensili delle variabili intese sia come input che come output.

Infatti, per una progettazione in grado di valutare le interazioni tra i diversi sottosistemi che interagiscono nel sistema edificio/impianti e di prevedere il comportamento del sistema al variare delle condizioni al contorno, è necessario disporre di strumenti di calcolo più avanzati di quanto richiesto dalla normativa. Nella caratterizzazione energetica del sistema edificio/impianti quindi, sta diventando una pratica sempre più diffusa l'impiego di modelli di simulazione per poter esaminare nel dettaglio temporale, cioè in regime dinamico, gli effetti delle scelte progettuali compiute e per la verifica della prestazione. La disponibilità di modelli di calcolo avanzati consente di studiare il sistema al variare dei parametri che lo definiscono e di confrontare diverse soluzioni progettuali.

La simulazione numerica delle prestazioni degli edifici (*Building Energy Performance Simulation, BEPS*) ha avuto un forte incremento sia a livello di potenzialità che di ricerca, nell'ultimo quinquennio. Nel tempo, sono stati costruiti modelli più complessi, aumentando progressivamente il grado di dettaglio nella rappresentazione dei fenomeni fisici che si volevano descrivere. Quanto agli algoritmi per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici, è possibile distinguere essenzialmente modelli di calcolo basati sulle funzioni di trasferimento (Transfer Function Method, TFM) e modelli ai volumi finiti.

Una funzione di trasferimento è un algoritmo in grado di legare le sollecitazioni (es. temperature, flussi termici) indotte su un sistema con la risposta del sistema stesso. Nel metodo TFM vengono utilizzate funzioni di trasferimento della parete (CTF, Conduction Transfer Function) per il calcolo del flusso termico trasmesso per conduzione all'interno delle varie pareti d'involucro, funzioni di trasferimento ambiente (RTF, Room Transfer Function) per valutare il flusso termico convettivo che interessa l'aria ambiente, e funzioni di trasferimento impianto (SATF, Space Air Transfer Function) per valutare la potenza termica addotta/sottratta dall'impianto di climatizzazione.

Nelle più recenti versioni del manuale ASHRAE Handbook – Fundamentals [59], al metodo TFM è stato sostituito un metodo che fa uso delle sole funzioni di trasferimento CTF per la valutazione del flusso termico trasmesso per conduzione attraverso l'involucro in regime dinamico; invece per valutare il flusso termico che deve essere fornito all'ambiente per mantenere una certa temperatura, è adoperato il bilancio termico sull'aria ambiente (AHB, Air Heat Balance). Tale modello è stato adottato nei più diffusi software di simulazione come EnergyPlus e TRNSYS.

Nei metodi ai volumi finiti, il sistema continuo oggetto di analisi, il dominio, viene suddiviso in un insieme di porzioni discrete (volumi di controllo) a ciascuna delle quali è applicata una serie di equazioni di bilancio (conservazione della massa, conservazione dell'energia, conservazione della quantità di moto). In tale approccio è possibile migliorare la soluzione migliorando la discretizzazione del dominio: l'aria interna ad un ambiente può ad esempio essere considerata come un unico volume di controllo (perciò con proprietà quali la temperatura, umidità e concentrazione di inquinanti costanti) oppure suddivisa in molteplici volumi di controllo per studiarne ad esempio la stratificazione termica. Questa seconda soluzione risulta utile nel caso della determinazione del flusso termico scambiato per conduzione attraverso una parete, poiché possono essere determinati i valori di temperatura e i flussi termici in corrispondenza delle separazioni tra un volume e l'altro, ovvero all'interno della parete. Tale modello è quello adottato ad esempio dal software ESP-r.

In sintesi, disponendo di un programma di simulazione energetica, è oggi possibile valutare gli effetti dell'orientamento degli edifici e/o della distribuzione delle masse termiche, i vantaggi ottenibili adottando involucri edilizi a prestazioni variabili in termini di isolamento termico e di schermatura solare, le prestazioni di sistemi energetici alimentati da fonti energetiche rinnovabili, ecc.

Da queste considerazioni si comprende l'importanza di avere a disposizione uno strumento che gestisca l'esecuzione di un gran numero di simulazioni, riducendo i tempi di calcolo, in modo da individuare la configurazione ottimale del sistema oggetto di studio in base a parametri tecnici, economici e normativi. È evidente che l'utilizzo di sistemi di simulazione dinamica del comportamento del sistema edificio, sposta l'impostazione della pratica progettuale da un approccio di tipo progetto-verifica ad uno basato sull'ottimizzazione. Appare evidente, cioè, che la simulazione non è più solo uno strumento di verifica di soluzioni progettuali preselezionate, ma questa può essere associata a tecniche di ottimizzazione costi-benefici sulla vita utile dell'edificio.

Nei paragrafi seguenti pertanto verranno analizzate le procedure di calcolo e le caratteristiche essenziali degli algoritmi di simulazione dinamica, con particolare riferimento al motore di simulazione Energy Plus utilizzato per le analisi presentate nei successivi capitoli [60].

L'approccio metodologico all'analisi delle prestazioni sul singolo edificio è solo uno dei punti su cui si focalizzerà questo capitolo. Il raggiungimento degli obiettivi comunitari in termini di sviluppo sostenibile richiede un'analisi che non si fermi al singolo edificio ma che riguardi l'efficienza energetica in senso ampio. È necessario cioè sviluppare un nuovo approccio metodologico che consenta la comprensione delle prestazioni energetiche di un intero territorio urbanizzato, nonché strumenti di gestione e di supporto alle decisioni per l'analisi ed il governo delle trasformazioni territoriali.

In questo capitolo dunque sarà presentata una procedura di analisi che, applicata al trinomio edificio-città-territorio, sfruttando le potenzialità di un Sistema Informativo Territoriale, consenta la caratterizzazione energetica del patrimonio edilizio di ampi contesti urbani. La metodologia sarà presentata con applicazione al centro storico della città di Benevento, per il quale è stato creato un modello georeferenziato, attraverso cui determinare i consumi energetici annuali di ciascun edificio. La metodologia modifica e semplifica gli schemi proposti dalle normative per il calcolo delle prestazioni energetiche, in modo da renderle applicabili in maniera rapida ad un numero elevato di edifici. È evidente che un tale approccio non può basarsi sull'analisi di dettaglio di ciascun edificio, ma le semplificazioni introdotte consentono con una buona accuratezza di stimare il fabbisogno energetico di una macro-area urbana, in modo da stabilire un ordine di priorità negli interventi di efficienza energetica. Infatti, il metodo, i

risultati, e la loro affidabilità consentono di elaborare “mappe energetiche urbane”, (MEU), che costituiscono uno strumento importante per un’evoluta pianificazione energetica a livello di distretto, sia in termini di controllo del territorio che di valutazione delle potenzialità di riqualificazione.

2.1 Gli standard tecnici europei successivi alla EPBD

La direttiva 2002/91/CE - *Energy Performance of Building* - è entrata ufficialmente in vigore nel gennaio 2003. Per favorire una sua armonica integrazione nei regolamenti legislativi di ciascuna nazione, nel gennaio 2004, la Commissione Europea ha formulato il mandato M/343 al CEN [61] che ha portato alla pubblicazione di 31 norme tecniche.

Il recasting della Direttiva sull'efficienza energetica degli edifici (2010/31/UE) ha evidenziato la necessità di rivedere, completare e armonizzare le norme tecniche disponibili, al fine di ottenere un quadro normativo sistematico, chiaro e univoco. Pertanto nel dicembre 2010, la Commissione Europea ha trasmesso a CEN, CENELEC e ETSI il mandato M/480 [56] per lo sviluppo di norme europee nel settore della prestazione energetica degli edifici. Tale mandato costituisce il seguito del mandato M/343.

Nel seguito del paragrafo saranno descritti i contenuti principali delle norme tecniche derivate dal lavoro dei comitati tecnici coinvolti nella standardizzazione delle metodologie di calcolo, con uno sguardo critico alle implicazioni nel nuovo mandato M/480.

2.1.1 La direttiva sull'efficienza energetica (EPBD) e il ruolo del mandato M/343

Il mandato M/343 ha portato alla pubblicazione di 31 norme nel periodo 2007-2008, da parte di cinque diversi Comitati Tecnici del CEN, coordinati dal CEN/TC 371 - Project Committee EPBD, per ricoprire i differenti aspetti relativi alle prestazioni degli edifici e degli impianti ad esso asserviti:

- CEN/TC 89 —Thermal performance of buildings and building components;
- CEN/TC 156 —Ventilation for buildings;
- CEN/TC 169 —Light and lighting;
- CEN/TC 228 —Heating systems in buildings;
- CEN/TC 247 —Building automation, controls and building management.

In particolare sono stati richiesti al Comitato Europeo per la Standardizzazione, un complesso insieme di nuovi standard tecnici relativi alle metodologie di calcolo, necessarie a consentire una appropriata valutazione degli usi

finali di energia e delle correlate emissioni inquinanti per il sistema integrato edificio/impianti.

Oltre ai comitati tecnici citati, nel processo di standardizzazione delle procedure di calcolo sono stati coinvolti anche altri sotto-comitati al fine di contribuire nel loro campo specifico di competenza. In particolare:

- CEN/TC 33: Doors, windows, shutters, building hardware and closures;
- CEN/TC 125: Building walls;
- CEN/TC 129: Building glasses;
- CEN/TC 46: Oil stoves;
- CEN/TC 110: Heat exchangers;
- CEN/TC 48: Domestic Hot Water heaters;
- CEN/TC 57: Central heating boilers;
- CEN/TC 62: Independent gas-fired space heaters;
- CEN/TC 88: Thermal insulating materials and products;
- CEN/TC 109: Central heating boilers using gaseous fuels;
- CEN/TC 113: Heat pump and air-conditioners;
- CEN/TC 130: Space heating appliances without integral heat sources;
- CEN/TC 179: Gas-fired air heaters;
- CEN/TC 182: Refrigerating systems, safety and environmental requirements;
- CEN/TC 312: Thermal Solar Systems and Components.

Ad oggi, sono state completate e pubblicate circa 40 norme tecniche, delle quali 30 circa sono completamente nuove, mentre le altre sono revisioni o integrazioni di vecchie procedure. La relazione reciproca tra tutte queste direttive e il loro uso, è regolamentato dal rapporto tecnico noto come *Umbrella Document* [62]. Tale documento si è trasformato nel rapporto tecnico CEN/TR 15615:2008 - *Explanation of the general relationship between various European Standards and the Energy Performance of Buildings Directive* - che contiene le istruzioni per ottenere un uso armonico delle procedure di calcolo introdotte con le direttive e le norme approvate [63].

Sostanzialmente, l'*Umbrella Document* identifica quattro documenti principali, necessari all'applicazione delle prescrizioni contenute nell' EPBD, soprattutto relativamente alla certificazione energetica degli edifici:

- **EN 15603**: *Energy performance of buildings - Overall energy use and definition of energy ratings* [57];
- **EN 15217**: *Energy performance of buildings - Methods for expressing energy performance and for energy certification of buildings* [64];

- **EN ISO 13790:** *Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling* [65];
- **EN ISO 15316:** *Energy performance of buildings - Heating systems in buildings* [66-78].

In particolare, le prime due consentono di esprimere le prestazioni energetiche dell'edificio, i consumi globali di energia, il fabbisogno di energia primaria e le emissioni di CO₂. Inoltre questi sono gli standard che permettono di fare una valutazione degli usi di energia e di dare una definizione della valutazioni delle prestazioni energetiche, fornendo anche indicazioni generali sul meccanismo di certificazione energetica degli edifici.

Invece, la norma EN ISO 13790 rappresenta il documento chiave per valutare le prestazioni della costruzione, descrivendo le procedure di calcolo per i fabbisogni relativi sia al riscaldamento che al raffrescamento, considerando molti dei fenomeni di scambio termico e dei carichi presenti come:

- ✓ il contributo al bilancio dovuto alla trasmissione e alla ventilazione;
- ✓ la trasmittanza termica delle componenti opache e delle superfici trasparenti;
- ✓ scambi termici radiativi e i carichi endogeni;
- ✓ fattori di utilizzazione degli apporti gratuiti e delle dispersioni energetiche estive.

Infine, l'EN ISO 15316, nelle sue diverse sezioni, descrive le metodologie per il calcolo dei rendimenti relativi ai vari sottosistemi e dispositivi, sia per il riscaldamento domestico che per la produzione di acqua calda sanitaria.

Relativamente alla metodologia di calcolo, nell' *Umbrella Document* viene evidenziato che è possibile impostare la metodologia di calcolo secondo diversi approcci. In particolare, nella norma EN ISO 13790, il fabbisogno può essere calcolato su base oraria, mensile o annuale, attraverso valutazioni più o meno dettagliate, laddove la scelta del livello di approfondimento dipende dagli obiettivi del calcolo e dalla complessità dell'edificio. In particolare si distinguono diversi tipi di valutazione energetica di calcolo, così come ricavati dallo standard EN ISO 15603 e riportati nella Tabella 2.1.

Per capire questa classificazione, occorre considerare quanto proposto dall'EN 15603, in cui sono individuate due diverse metodologie di valutazione: a) valutazioni da calcolo; b) valutazioni da misura. In entrambi i casi le prestazioni energetiche dell'edificio sono valutate a partire dalla somma degli dei differenti consumi di energia,

quali: riscaldamento, raffrescamento, ventilazione, illuminazione, produzione di acqua calda sanitaria.

Tipo di valutazione	Dati di progetto			Scopo della valutazione
	Utenza	Clima	Edificio	
Di progetto (Design Rating)	Standard	Standard	Elaborati di progetto	Permesso di costruire, Certificazione o qualificazione energetica
Standard (Asset Rating)	Standard	Standard	Reale	Certificazione o qualificazione energetica
Adattata all'utenza (Tailored Rating)	A seconda della finalità		Reale	Ottimizzazione, diagnosi e programmazione di interventi di riqualificazione

Tabella 2.1: Tipi di calcolo per la valutazione energetica.

Le valutazioni da misura sono basate sulle fatture energetiche, in modo da riuscire a ricostruire i fabbisogni energetici sulle richieste reali della costruzione. Invece, le valutazioni da calcolo sono basate su valutazioni fisico-numeriche, differenziate per tipologia di costruzione, e si dividono in tre possibili alternative: valutazione di progetto, standard, adattata all'utenza.

Ovviamente, il livello di precisione maggiore si ha con la valutazione adattata all'utenza e con quella basata sulle fatture energetiche, che diventano necessarie quando l'analisi dell'edificio ha come obiettivo interventi di riqualificazione energetica, per valutare l'effettiva convenienza tecnico-economica di un intervento proposto. Queste, pertanto, saranno le tecniche utilizzate in questo lavoro di tesi.

Laddove, invece, lo scopo della valutazione è quello di ottenere un permesso di costruzione o confrontare le prestazioni di energia di diverse costruzioni, si dovrebbe usare uno dei primi due metodi. Infatti, per rendere possibile un confronto coerente, bisogna adoperare le stesse condizioni al contorno (soprattutto per quanto riguarda i profili di occupazione, le caratteristiche delle apparecchiature installate, la ventilazione, le condizioni impostate di confort).

Ritornando alla norma EN ISO 13790, sebbene essa descriva la procedura generale per il fabbisogno energetico della costruzione, le caratteristiche dei sistemi tecnici della costruzione stessa sono definite in altre norme, per cui questa deve essere continuamente confrontata con altri documenti tecnici fra cui:

- **EN 15316-Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies** [66-78];
- **EN15243- Ventilation for Buildings - Calculation of room temperatures and of load and energy for buildings with room conditioning systems:** definisce in modo completo i sistemi di raffrescamento [79];

- **EN 15241- Ventilation for buildings – Calculation methods for energy requirements due to ventilation systems in buildings:** introduce la metodologia per valutare l'impatto energetico del sistema di ventilazione [80];
- **EN 15193 -Energy performance of buildings – Energy requirements for lighting:** fornisce la metodologia per la valutazione dell'illuminazione artificiale [81];
- **EN 15232-Energy performance of buildings - Impact of Building Automation, Controls and Building Management:** definisce i criteri per valutare i sistemi di automazione e controllo [82].

Per quanto riguarda i requisiti minimi di efficienza energetica, nelle norme approvate dal CEN non sono indicati limiti o valori minimi, poiché questi devono essere definiti a livello nazionale, secondo le tipologie di costruzione più diffuse, le tecnologie usate e , soprattutto, il contesto climatico.

Relativamente a quello che in Italia è l'attestato di certificazione energetica, nella norma EN 15217 è contenuto un modello, e alcuni consigli e suggerimenti per crearlo, dove l'etichetta energetica è caratterizzata da differenti classi di prestazione, determinate dal confronto tra i requisiti di prestazione minimi (R_r) e il valore di riferimento per le costruzioni esistenti (R_s).

Il criterio di classificazione adottato della suddetta norma è riportato nella Figura 2.1.

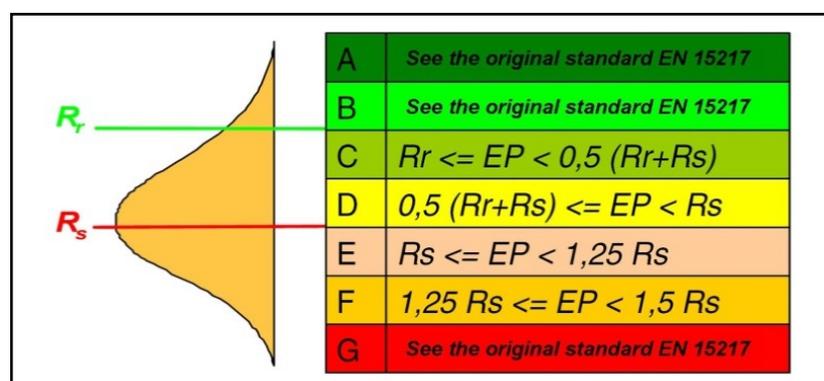


Figura 2.1: Classi energetiche per stabilire le prestazioni energetiche di un edificio.
Fonte: EN 15217

Per quanto riguarda il criterio per stabilire le classi di prestazioni, possono essere applicate alcune differenti specifiche nazionali, in quanto a volte è molto difficile determinare un valore di riferimento in contesti caratterizzati da un'alta variabilità delle tipologie costruttive, e in condizioni climatiche non uniformi. L'Italia ne è un buon esempio; infatti, essendo caratterizzata da zone climatiche molto differenti e da tecniche diversificate nelle costruzioni, non può essere identificato un unico valore di

R_s se non con grandi approssimazioni. Per questi motivi, lo schema di certificazione italiano adotta un metodo differente, interamente basato sul valore di R_r .

Per quanto riguarda le verifiche agli impianti, sono state approvate dal CEN le seguenti norme:

- **EN 15378** - *Energy performance of buildings - Inspection of boilers and heating systems*: fornisce i criteri per l'ispezione delle caldaie, della rete di distribuzione e dei terminali, di qualsiasi tipo di sistema di riscaldamento a combustibile liquido, solido o gassoso [83];
- **EN 15239** - *Ventilation for buildings – Energy performance of buildings - Guidelines for inspection of ventilation systems*: definisce la metodologia per le ispezioni periodiche dei sistemi di ventilazione naturale e meccanica [84];
- **EN 15240** - *Ventilation for Buildings - Energy performance of buildings – Guidelines for the inspection of air-conditioning systems*: descrive i criteri per il controllo degli impianti di condizionamento [85].

2.1.2 Norme tecniche di riferimento: quadro di sintesi

Come già accennato, la norma UNI EN ISO 13790, *Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling* [58], versione ufficiale in lingua inglese della norma europea EN ISO 13790 [65], fornisce metodi di calcolo per la valutazione del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti di edifici residenziali e non residenziali. In questo paragrafo, saranno sottolineati alcuni aspetti della metodologia introdotta, ma una descrizione completa sarà data nel paragrafo successivo relativamente alle Specifiche Tecniche pubblicate in Italia.

La UNI EN ISO 13790 [58] è un'estensione delle precedenti versioni (2005 e 2001), che comprendevano solo un metodo semplificato per il calcolo dei fabbisogni termici per il riscaldamento, per edifici residenziali.

L'indicatore calcolato è il fabbisogno annuo di energia per il riscaldamento e il raffrescamento, al netto degli impieghi annuali di energia dei sistemi di riscaldamento, raffrescamento e ventilazione, e delle richieste per il funzionamento degli ausiliari, separatamente valutati. La norma assume come riferimento temporale il calcolo su base mensile, anche se è possibile fare bilanci energetici orari per la maggior parte delle simulazioni annuali più dettagliate. Nella scrittura dei bilanci di energia, è opportuno considerare la divisione in più zone termiche quando l'edificio presenta diversi spazi, caratterizzati da differenti temperature operative, oppure interessati da un riscaldamento intermittente e da differenziazioni nel raffrescamento. A volte dal calcolo dei fabbisogni energetici dell'edificio, con l'ausilio degli standard tecnici, tra cui la EN

15316, è possibile poi procedere al calcolo dei rendimenti di impianto e alla prestazione globale del sistema complesso edificio/impianti.

In sintesi, nell'applicazione si possono individuare tre passi operativi principali.

Il primo passo consiste nella caratterizzazione dell'involucro edilizio e dello studio del suo comportamento, in modo che il risultato sia l'energia netta richiesta dall'edificio, senza considerare le efficienze dei dispositivi per la climatizzazione e gli altri usi (acqua calda sanitaria, illuminazione, ventilazione). I dati richiesti sono relativi alle caratteristiche termo-fisiche dell'involucro, la destinazione d'uso della costruzione, le condizioni impostate all'interno (temperatura e l'umidità) e le caratteristiche climatiche. A valle di ciò, è possibile valutare i primi due parametri che influiscono sulle dispersioni e sugli apporti:

- flusso termico per trasmissione (scambio diffusivo);
- flusso termico per ventilazione (scambio convettivo);
- flussi di origine solare;
- guadagni dovuti a sorgenti endogene di energia termica.

I bilanci sono effettuati su base mensile. Il secondo passo è basato sulla valutazione delle efficienze dei sistemi di condizionamento, la ventilazione, la produzione di acqua calda sanitaria e i sistemi di illuminazione. Il calcolo è effettuato considerando il rapporto tra le efficienze dei vari sottosistemi in cui si può dividere l'impianto, includendo l'opportuna valutazione dei consumi dei dispositivi ausiliari, al fine di pesare i consumi di ciascuno di essi rispetto all'efficienza nel bilancio globale.

Infine con l'ultimo passo si intende sintetizzare i risultati dei primi due, attraverso il calcolo degli indicatori di efficienza energetica.

L'applicazione della metodologia richiede, ovviamente, un insieme di dati d'ingresso, nel seguito elencati:

- i parametri che governano gli scambi per ventilazione e trasmissione;
- i parametri necessari a stimare i guadagni solari e i carichi endogeni;
- le caratteristiche climatiche del sito;
- la definizione delle caratteristiche d'involucro e delle proprietà termofisiche dei componenti opachi e trasparenti;
- i livelli termici da ricreare all'interno dell'ambiente riscaldato o raffrescato;
- le principali caratteristiche tecniche degli impianti operanti;
- i consumi dovuti agli ausiliari e alle operazioni complementari;
- le perdite di energia dovute ai sottosistemi impiantistici, e la frazione recuperabile;

- l'individuazione e la caratterizzazione delle differenti zone termiche dell'edificio;
- le caratteristiche dei sistemi di regolazione, distribuzione, emissione e accumulo degli impianti operanti.

In sintesi, come risultati saranno ottenuti:

- × fabbisogno annuo di energia per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti;
- × rendimenti degli impianti di riscaldamento e raffrescamento;
- × energia annuale primaria usata per riscaldamento e raffrescamento considerando le eventuali perdite;
- × la durata della stagione estiva ed invernale, che hanno effetto sui consumi di energia, sia in termini di usi finali che di richieste degli ausiliari.

Le metodologie di calcolo così come recepite dalla normativa tecnica italiana UNI/TS 11300, saranno nel dettaglio descritte nei paragrafi seguenti.

In questo paragrafo, invece, si riporta una breve descrizione dei principali documenti tecnici risultanti dal mandato M/343 e connesse all'applicazione della UNI EN ISO 13790. La Figura 2.2 schematizza la connessione tra i diversi documenti di cui si discute, nella loro versione di recepimento in lingua inglese.

UNI EN 15217 - Energy performance of buildings - Methods for expressing energy performance and for energy certification of buildings. In vigore dal 13 settembre 2007, tale norma è la versione ufficiale in lingua inglese della EN 15217 [64], pubblicata sulla GUCE²³ nel giugno 2007 e preparata dal comitato tecnico CEN/TC 89. Essa specifica:

- a. gli indicatori globali per esprimere la prestazione energetica complessiva degli edifici, comprendente i sistemi di riscaldamento, ventilazione, condizionamento dell'aria, acqua calda sanitaria e illuminazione;
- b. le modalità per esprimere i requisiti di prestazione energetica per la progettazione di nuovi edifici o la ristrutturazione di edifici esistenti;
- c. le procedure per definire i valori di riferimento;
- d. le modalità per elaborare una procedura per la certificazione energetica degli edifici.

²³La GUCE è la versione elettronica (E) della serie C della Gazzetta ufficiale dell'Unione europea (GU). Questa infatti si articola in due serie collegate tra loro: L per gli atti legislativi e C per comunicazioni e informazioni; e un supplemento, S, per i bandi di appalto.

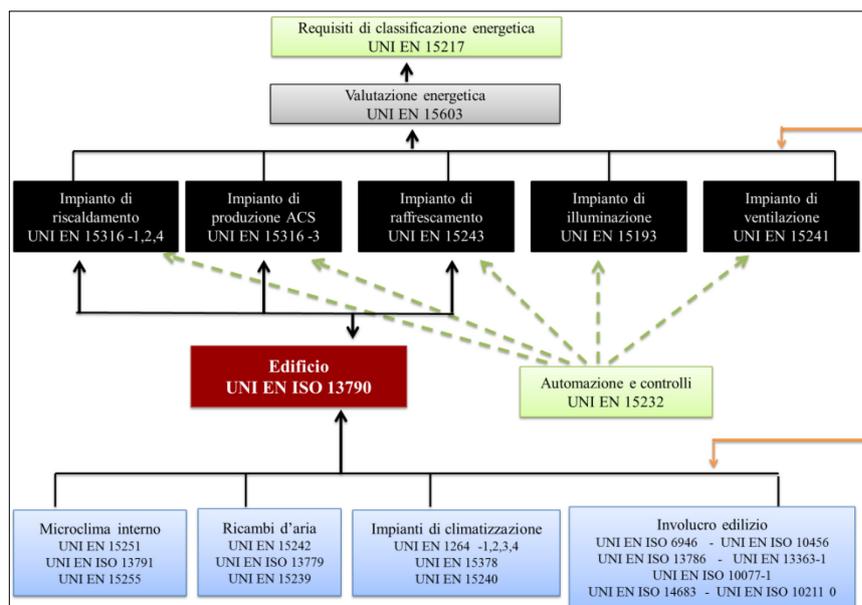


Figura 2.2: Schema della normativa tecnica europea per il calcolo della prestazione energetica degli edifici.

In accordo a tale norma, le prestazioni energetiche dell'edificio devono essere espresse mediante un indicatore globale di prestazione energetica (EP), definito come la media di tutte le forme di energia erogata ed esportata per mezzo di vettori energetici, normalizzata in funzione della superficie climatizzata. L'indicatore globale di prestazione energetica può riferirsi, oltre che all'energia primaria, anche alle emissioni di CO₂, o all'energia netta erogata normalizzata in funzione di un qualunque parametro, definito però dalla politica energetica nazionale. In generale, comunque, l'indicatore di prestazione energetica può essere determinato a partire da dati standard (ad esempio, valori di progetto) o realmente misurati. Nel primo caso, l'indicatore è detto indicatore di energia standard e nel secondo, indicatore di energia misurata.

UNI EN 15603 - *Energy performance of buildings - Overall energy use and definition of energy ratings*. Questo documento trascrive i contenuti della norma europea EN 15603 [57] e riassume i risultati derivanti da altre norme che consentono il calcolo dei consumi energetici specifici dei vari servizi all'interno dell'edificio. Essa fornisce gli strumenti per le valutazioni energetiche basate sull'energia primaria, sull'emissione di anidride carbonica o su altri parametri definiti da politiche energetiche nazionali e stabilisce i principi generali per il calcolo dei fattori di conversione in energia primaria e i coefficienti di emissione di anidride carbonica.

UNI EN 15378 - *Heating systems in buildings - Inspection of boilers and heating systems*. È la versione ufficiale in lingua inglese della norma europea EN 15378 [83]. In

vigore dal 21 febbraio 2008, la norma specifica le procedure di ispezione ed i metodi di misura opzionali per la valutazione della prestazione energetica delle caldaie esistenti e degli impianti di riscaldamento. Le caldaie considerate sono quelle per riscaldamento, produzione acqua calda per uso domestico o entrambe, con alimentazione a gas o a combustibili liquidi o solidi. Le parti degli impianti di riscaldamento considerate nella norma sono: a) caldaie, inclusi gli strumenti di controllo; b) impianti di produzione di acqua calda per uso domestico; c) reti di distribuzione del riscaldamento, inclusi gli accessori e gli strumenti di controllo; d) emettitori di calore, inclusi gli accessori; e) sistemi di controllo degli impianti di riscaldamento.

UNI EN 15240 - *Ventilation for buildings - Energy performance of buildings - Guidelines for inspection of air-conditioning systems*. La norma, in vigore dal 7 Febbraio 2008, recepisce i contenuti della EN 15240 [85]. In particolare essa descrive la metodologia per l'ispezione degli impianti di climatizzazione presenti negli edifici per il raffrescamento o il riscaldamento dei locali dal punto di vista della richiesta energetica. L'ispezione può per esempio prendere in considerazione la conformità dell'impianto rispetto al progetto originale ed a eventuali modifiche, alle reali esigenze ed allo stato attuale dell'edificio, il corretto funzionamento dell'impianto, la funzione e il posizionamento dei diversi componenti, la potenza assorbita e la potenza utile fornita. Non è prevista una verifica completa dell'impianto di condizionamento dell'aria ma una corretta valutazione del suo funzionamento e dell'impatto sul consumo di energia. In tal modo soluzioni per il suo miglioramento o per l'utilizzo di sistemi alternativi.

UNI EN 15316-1 - *Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 1: General*. Versione ufficiale in lingua inglese della norma europea EN 15316 - Parte 1 [66], questa norma definisce lo schema per il calcolo dell'energia utilizzata dagli impianti per il riscaldamento e la produzione di acqua calda sanitaria negli edifici. La norma ha lo scopo di fornire i dati in ingresso ed in uscita necessari per i calcoli, in modo da avere un metodo comune su base europea. Il metodo di calcolo facilita l'analisi energetica dei diversi sottosistemi dell'impianto di riscaldamento, attraverso la determinazione delle perdite di energia e dei relativi fattori di rendimento. Questa analisi del rendimento consente la comparazione fra sottosistemi diversi e consente, di valutare l'impatto di ciascun sottosistema sulla prestazione energetica complessiva dell'edificio. È in vigore dal 28 maggio 2008.

UNI EN 15316-2 - *Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 2*. La norma recepisce la seconda parte dello standard EN 15316 [67, 68] e si divide in due sotto-categorie

- *Part 2-1 - Space heating emission systems*: fornisce i dati in entrata ed in uscita ed i collegamenti (struttura) necessari al fine di elaborare un metodo di calcolo comune su base europea. La prestazione energetica può essere stimata sia attraverso i valori di rendimento del sistema di emissione sia mediante l'aumento delle temperature negli ambienti, causato dall'inefficienza dei sistemi di emissione.
- *Part 2-3 - Space heating distribution systems*: fornisce una metodologia per calcolare/stimare le perdite termiche delle reti di distribuzione degli impianti di riscaldamento ad acqua e il relativo fabbisogno di energia elettrica ausiliaria.

UNI EN 15316-3 - *Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 3*. La norma è la versione ufficiale in lingua inglese della terza parte dello standard EN 15316 [69, 70, 71] e si divide in tre sotto-categorie:

- *Part 3-1 - Domestic hot water systems, characterisation of needs (tapping requirements)*: fornisce i metodi di calcolo per determinare il fabbisogno energetico per la produzione di acqua calda sanitaria per un edificio o parte di esso.
- *Part 3-2 - Domestic hot water systems, distribution*: fornisce i metodi di calcolo per le perdite termiche dell'impianto di distribuzione di acqua calda sanitaria e di quelle recuperabili per il riscaldamento degli ambienti nonché per determinare l'energia ausiliaria dell'impianto di distribuzione di acqua calda sanitaria.
- *Part 3-3 - Domestic hot water systems, generation*: fornisce i metodi di calcolo per le perdite termiche dell'impianto di generazione di acqua calda sanitaria e di quelle recuperabili per il riscaldamento degli ambienti, nonché per determinare l'energia ausiliaria degli impianti di generazione di acqua calda sanitaria.

UNI EN 15316-4 - *Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 4*. Analogamente all'originale standard EN 15316 – Parte 4, la norma si divide in sette parti ciascuna relativa ad un sistema di generazione di energia [72, 73, 74, 75, 76, 77,78].

- *Part 4-1 - Space heating generation systems, combustion systems (boilers)*: definisce i dati di ingresso richiesti, il metodo di calcolo e i dati in uscita per i sistemi di generazione del calore mediante sistemi a combustione (caldaie). La

norma si applica anche ai casi di generazione combinata di riscaldamento e acqua calda sanitaria.

- *Part 4-2: Space heating generation systems, heat pump systems*: si applica alle pompe di calore per riscaldamento, scaldacqua con pompa di calore e pompe di calore per la produzione combinata di riscaldamento e acqua calda sanitaria. Il metodo di calcolo si applica a pompe di calore ad azionamento elettrico, pompe di calore con motore a combustione interna e pompe di calore ad assorbimento, inclusi i sistemi di controllo.
- *Part 4.3 - Heat generation systems, thermal solar systems*: ha lo scopo di fornire i dati in ingresso e in uscita necessari per valutare i sistemi solari termici (incluso il controllo), per il riscaldamento, la produzione di acqua calda sanitaria negli edifici e la combinazione di entrambi.
- *Part 4.4 - Heat generation systems, building-integrated cogeneration systems*: descrive un metodo di calcolo dei requisiti energetici, della produzione di elettricità e di energia termica, e delle perdite recuperabili delle unità di cogenerazione (riscaldamento e produzione acqua calda) in un edificio. Tali unità sono comunemente riconosciute come unità di piccola e micro-cogenerazione, o micro o piccoli CHP
- *Part 4-5 - Space heating generation systems, the performance and quality of district heating and large volume systems*: ha lo scopo di fornire il metodo per determinare la prestazione energetica delle reti di riscaldamento e raffrescamento urbane e di definire i confini del sistema, i dati in ingresso richiesti, il metodo di calcolo e i dati in uscita risultanti.
- *Part 4-6 - Heat generation systems, photovoltaic systems*: ha lo scopo di fornire per i sistemi fotovoltaici:- i dati in ingresso richiesti;- il metodo di calcolo;- i dati in uscita risultanti.
- *Part 4-7 - Space heating generation systems, biomass combustion systems*: definisce i dati di input, il metodo di calcolo e i risultati di output per i sistemi di combustione a biomassa a caricamento manuale.

UNI EN 15243 - Ventilation for buildings - Calculation of room temperatures and of load and energy for buildings with room conditioning systems. Lo scopo della norma, in vigore dal 22 maggio 2008 in modo conforme alla EN 15243 [79], è quello di definire un quadro generale che prevede l'utilizzo di metodi su base oraria per tutti i casi in cui non è possibile l'utilizzo di metodi semplificati. In particolare questa descrive:

- a. le modalità con cui i metodi di calcolo delle temperature, dei carichi sensibili e del fabbisogno energetico degli ambienti, devono essere utilizzati ai fini della progettazione;
- b. i metodi di calcolo che permettono di determinare i carichi latenti di raffrescamento e di riscaldamento degli ambienti, i carichi di riscaldamento, raffrescamento umidificazione e deumidificazione dell'edificio e i corrispondenti carichi degli impianti;
- c. l'approccio generale di calcolo della prestazione energetica globale degli edifici dotati di impianto di climatizzazione degli ambienti;
- d. i metodi di calcolo semplificati per il fabbisogno energetico degli specifici impianti e il loro campo di applicazione.

UNI EN 15193 - *Energy performance of buildings - Energy requirements for lighting.*

Con errata corrige del 22 febbraio 2011, la norma è la versione ufficiale della EN 15193 [81]. Questa specifica la metodologia di calcolo del consumo energetico degli impianti di illuminazione negli edifici e definisce un indicatore numerico dei requisiti energetici per l'illuminazione da utilizzare per la certificazione energetica. Essa può essere usata sia per gli edifici esistenti, sia per gli edifici nuovi o in ristrutturazione. La norma fornisce anche i riferimenti su cui basare i valori limiti di energia previsti per l'illuminazione. Inoltre fornisce una metodologia per il calcolo dell'energia istantanea consumata per l'illuminazione e per la stima dell'efficienza energetica globale dell'edificio.

UNI EN 15255 - *Energy performance of buildings - Sensible room cooling load calculation - General criteria and validation procedures.* Essa recepisce la norma europea EN 15255 [86] e tiene conto delle correzioni introdotte il 19 settembre 2007. La norma definisce il livello dei dati in entrata e in uscita, e prescrive le condizioni richieste per un metodo di calcolo del carico sensibile di raffrescamento di un singolo ambiente a temperatura costante e/o variabile. Lo scopo della norma è validare i metodi di calcolo utilizzati per valutare il carico massimo di raffrescamento per la scelta dell'attrezzatura e per la progettazione dell'impianto di raffrescamento nonché per valutare il profilo della temperatura quando la capacità di raffrescamento dell'impianto è ridotta. Inoltre, i dati che si possono ricavare consentono di esaminare possibili riduzioni del carico nonché di effettuare un'analisi dei carichi parziali come richiesto da progettazione, funzionamento e controllo dell'impianto.

UNI EN 15265 - *Energy performance of buildings - Calculation of energy needs for space heating and cooling using dynamic methods - General criteria and validation procedures*. La norma definisce una serie di assunti, requisiti e prove di validazione per le procedure utilizzate per il calcolo del fabbisogno annuale di energia per il riscaldamento e il raffrescamento di un ambiente in un edificio, in accordo allo standard europeo EN 15265 [87]. La norma non impone alcuna tecnica numerica specifica per il calcolo del fabbisogno di riscaldamento o di raffrescamento e delle temperature interne di un ambiente. Infatti, lo scopo è quello di validare i metodi di calcolo utilizzati per valutare la prestazione energetica di ogni ambiente di un edificio.

UNI EN 15242 - *Ventilation for buildings - Calculation methods for the determination of air flow rates in buildings including infiltration*. La norma descrive il metodo per calcolare le portate d'aria negli edifici da utilizzarsi per applicazioni quali il calcolo dell'energia, il calcolo del carico termico di riscaldamento e raffrescamento, il benessere estivo e la valutazione della qualità dell'aria degli ambienti interni. Per diverse applicazioni si utilizza lo stesso metodo iterativo ma i parametri in entrata devono essere scelti secondo lo scopo e il campo di applicazione. La versione attualmente in vigore è del 7 febbraio 2008 ed è il recepimento della norma europea EN 15242 [88].

UNI EN 15241 - *Ventilation for buildings - Calculation methods for energy losses due to ventilation and infiltration in commercial buildings*. La norma, aggiornata a febbraio 2011, è la versione ufficiale della norma europea EN 15241 [80]. Essa descrive il metodo per calcolare l'impatto energetico degli impianti di ventilazione (compreso il ricircolo dell'aria) negli edifici. Allo scopo essa definisce come calcolare le caratteristiche dell'aria in entrata negli edifici e il fabbisogno energetico per il trattamento di tale aria, nonché l'energia necessaria agli ausiliari elettrici. La norma può anche essere utilizzata per gli impianti di riscaldamento e raffrescamento ad aria ove questi assicurano la ventilazione.

UNI EN 15232 - *Energy performance of buildings - Impact of Building Automation, Controls and Building Management*. La norma specifica le funzioni di regolazione, automazione e gestione tecnica degli edifici che hanno un'incidenza sulla prestazione energetica degli stessi e stabilisce un metodo per definirne i requisiti minimi. Essa inoltre introduce una classificazione in 4 classi di efficienza energetica delle funzioni di controllo degli impianti tecnici degli edifici, nonché due metodi di calcolo (uno dettagliato ed uno semplificato) per stimare l'impatto dei sistemi di automazione e

controllo sulle prestazioni energetiche degli edifici. La norma aggiornata e pubblicata il 15 febbraio 2012 recepisce lo standard EN 15232 [82].

Oltre agli standard tecnici citati, negli ultimi anni il CEN ha rivisto, con alcune modifiche sostanziali, anche una serie di altre norme accessorie. In particolare, con riferimento alle prestazioni energetiche del sistema edificio/impianto, si ritiene di citare le norme di seguito brevemente sintetizzate nei loro obiettivi principali e recepite da parte dell' UNI (Ente Nazionale Italiano di Unificazione).

UNI EN 13789 - *Thermal performance of buildings - Transmission and ventilation heat transfer coefficients - Calculation method*. Questa norma recepisce la EN ISO 13789 [89] e descrive il metodo e le convenzioni per il calcolo del coefficiente di perdita di calore per trasmissione e ventilazione in regime stazionario di un intero edificio o di parti di edificio.

UNI EN 13363-1- *Solar protection devices combined with glazing - Calculation of solar and light transmittance - Part 1: Simplified method*. La norma, con errata corrige del 2010, specifica un metodo semplificato per determinare la trasmittanza totale di energia solare di un dispositivo di protezione solare abbinato a una vetrata [90].

UNI EN 15239 - *Ventilation for buildings - Energy performance of buildings - Guidelines for inspection of ventilation systems*. La norma, come lo standard EN 15239 [84], descrive la metodologia richiesta per l'ispezione dei sistemi di ventilazione meccanica e naturale con riferimento al consumo di energia, sia per gli edifici residenziali che non residenziali. Questa non ha lo scopo di fornire una verifica completa del sistema, ma di valutare il funzionamento dei sistemi di ventilazione ed il loro impatto sul consumo di energia, e include raccomandazioni per eventuali miglioramenti da apportare al sistema.

UNI EN 15251 - *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*. La norma specifica le modalità per definire i parametri di input relativi all' ambiente interno per la valutazione dell' edificio (inteso come sistema) e per i calcoli della prestazione energetica e i metodi per la valutazione a lungo termine dell' ambiente interno ottenuta a partire dal calcolo o da risultati di misure. Inoltre, essa definisce i criteri di misurazione che potrebbero essere utilizzati per valutare la conformità per mezzo di un'ispezione. La norma si applica essenzialmente agli edifici

non industriali per cui i criteri relativi all' ambiente interno sono definiti dall' occupazione umana, in cui l'attività produttiva o di processo non abbia un impatto sostanziale sull' ambiente interno. La norma è applicabile ai tipi di edificio seguenti: abitazioni individuali, condomini, uffici, scuole, ospedali, alberghi e ristoranti, impianti sportivi, edifici ad uso commerciale all' ingrosso e al dettaglio. La norma è la versione ufficiale in lingua inglese della norma europea EN 15251 [91].

UNI EN ISO 6946 - *Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method*. La norma fornisce il metodo per il calcolo della resistenza termica e della trasmittanza termica dei componenti e degli elementi per edilizia, escluse le porte, le finestre e altre parti vetrate, le facciate continue, i componenti che implicano uno scambio termico con il terreno ed i componenti percorsi dall' aria di ventilazione. Essa è la versione ufficiale della norma europea EN ISO 6946 [92].

UNI EN ISO 13786 - *Thermal performance of building components - Dynamic thermal characteristics - Calculation methods*. La norma, con Errata Corrige in vigore dal 15 marzo 2011 è la versione ufficiale della norma europea EN ISO 13786 [93]. La norma definisce metodi per il calcolo del comportamento termico in regime dinamico di componenti edilizi completi, specificando quali siano le informazioni sul componente edilizio necessarie per il calcolo. Nelle appendici sono forniti metodi semplificati per la stima delle capacità termiche, informazioni per informatizzare il metodo di calcolo, esempi di applicazione.

UNI EN ISO 10456 - *Building materials and products - Hygrothermal properties - Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values*. La norma, nella versione in vigore a partire dal 7 Ottobre 2010, è la versione ufficiale della norma europea EN ISO 10456 [94]. Essa specifica i metodi per la determinazione dei valori termici dichiarati e di progetto per materiali e prodotti per l' edilizia termicamente omogenei e fornisce inoltre i procedimenti per convertire i valori ottenuti per un insieme di condizioni in quelli validi per un altro insieme di condizioni. Questi procedimenti sono validi per temperature ambiente di progetto comprese tra -30 e +60 °C.

UNI EN ISO 10077-1 - *Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance - Part 1: General*. La norma (con errata corrige del 2012) specifica i metodi di calcolo della trasmittanza termica di finestre e porte

costituite da vetrate o pannelli opachi inseriti in telai con o senza chiusure oscuranti, come nello standard EN ISO 10077-1 [95].

UNI EN ISO 13370 - *Thermal performance of buildings - Heat transfer via the ground - Calculation methods*. La norma trasferisce i contenuti dello standard EN ISO 13370 [96] e fornisce i metodi di calcolo dei coefficienti di trasferimento del calore e dei flussi termici degli elementi di edifici in contatto con il terreno, compresi le solette appoggiate al terreno, le solette su vespaio e i piani interrati. La norma include il calcolo della parte di trasferimento termico in regime stazionario (flusso termico medio annuale) e la parte dovuta alle variazioni periodiche annuali della temperatura (variazione stagionale del flusso di calore rispetto alla media annuale).

UNI EN ISO 10211 - *Thermal bridges in building construction - Heat flows and surface temperatures - Detailed calculations*. La norma definisce le specifiche dei modelli geometrici 3-D e 2-D di un ponte termico, ai fini del calcolo numerico dei flussi termici, per determinare le dispersioni termiche totali di un edificio o di una sua parte e delle temperature minime superficiali, ai fini di valutare il rischio di condensazione superficiale. La norma include i limiti del modello geometrico e le sue suddivisioni, le condizioni limite ed i valori da utilizzare come richiesto dalla EN ISO 10211 [97].

UNI EN ISO 14683 - *Thermal bridges in building construction - Linear thermal transmittance - Simplified methods and default values*. La norma specifica dei metodi semplificati per la determinazione del flusso di calore attraverso i ponti termici lineari, in recepimento alla EN ISO 14683 [98].

UNI EN ISO 13779 - *Ventilation for non-residential buildings - Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems*. La norma si applica alla progettazione e alla realizzazione dei sistemi di ventilazione e climatizzazione per gli edifici non residenziali caratterizzati dall'occupazione umana, ad esclusione delle applicazioni in processi industriali come espresso dallo standard EN 13779 [99].

UNI EN 1264 - *Water based surface embedded heating and cooling systems*. La norma, relativa ai sistemi radianti alimentati ad acqua per il riscaldamento e il raffrescamento integrati nelle strutture, è divisa in cinque parti come lo standard EN 1264 [100, 101, 102, 103,104].

- *Part 1 - Definitions and symbols*: fornisce le definizioni e i simboli relativi ai sistemi radianti alimentati ad acqua per il riscaldamento e il raffrescamento ambientale, integrati nelle strutture.
- *Part 2- Floor heating: Prove methods for the determination of the thermal output using calculation and test methods*: specifica le condizioni al contorno e i metodi per la determinazione della potenza termica dei sistemi radianti a pavimento, alimentati con acqua calda, in funzione della differenza tra la temperatura media di riscaldamento e la temperatura ambiente. La potenza termica è determinata mediante metodo di calcolo e metodo di prova.
- *Part 3 - Dimensioning* : descrive l'utilizzo dei risultati ottenuti dalle UNI EN 1264-2 e UNI EN 1264-5 ai fini del dimensionamento dell'impianto per sistemi a pavimento, a soffitto e a parete.
- *Part 4 – Installation*: specifica i requisiti per la progettazione e la realizzazione di sistemi riscaldanti/raffrescanti a pavimento, a soffitto e a parete, per garantire che tali sistemi siano idonei alla specifica applicazione. La norma si applica solamente ai componenti che costituiscono il sistema radiante di riscaldamento/raffrescamento; non è applicabile agli altri elementi che compongono la struttura di pavimenti, soffitti e pareti.
- *Part 5 - Heating and cooling surfaces embedded in floors, ceilings and walls - Determination of the thermal output*: il metodo di ricalcolo descritto nella norma consente di ricavare, partendo dai calcoli e dai risultati di prova della parte 2, i risultati per le altre superfici (soffitti e pareti) e per le applicazioni in raffrescamento (pavimenti, soffitti e pareti).

UNI EN ISO 13791 - *Thermal performance of buildings - Calculation of internal temperatures of a room in summer without mechanical cooling- General criteria and validation procedures*. Questa norma specifica le assunzioni, le condizioni al contorno, le equazioni e le modalità di validazione per le procedure di calcolo, in regime transitorio, della temperatura interna estiva (dell'aria e operante), di un singolo locale in cui non siano in funzione impianti di climatizzazione. Tale norma aggiornata e in vigore dal 17 maggio 2012, recepisce lo standard EN ISO 13791 [105].

UNI EN ISO15927-4 -*Hygrothermal performance of buildings - Calculation and presentation of climatic data - Part 4: Hourly data for assessing the annual energy use for heating and cooling*. La norma è la versione ufficiale in lingua inglese della norma europea EN ISO 15927-4 [106] e specifica un metodo per ricavare i valori orari

dell'anno tipo dei dati climatici necessari per il calcolo del fabbisogno medio annuale di energia per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici.

2.1.3 Il recasting della EPBD e il ruolo del mandato M/480

Nel biennio 2012-2013 sono proseguiti i lavori relativi al Mandato M/480 [56] che cura la revisione del pacchetto di norme a supporto della Direttiva 2010/31/UE (EPBD recast), in modo da renderle più facilmente utilizzabili come riferimento diretto nelle varie legislazioni nazionali.

E' stata pertanto formalizzata una maggiore collaborazione tra il CEN/TC 371 - *Project Committee on Energy Performance of Buildings* (incaricato della stesura del mandato), l'EDMC - *Energy Demand Management Committee*, il comitato dei rappresentanti degli Stati Membri e la Concerted Action III. All'interno dell'EDMC è stato costituito un apposito *Liaison Committee* (LC), composto da cinque membri, tra cui in rappresentanza dell'Italia c'è il Direttore Generale CTI - *Italian Thermotechnical Committee Energy and Environment*.

In sintesi, l'attività per la revisione del pacchetto normativo EPBD recast è suddivisa in due fasi:

Fase 1 (2012-inizio 2013): definizione in ambito CEN/TC 371 di una serie di documenti tecnici per regolamentare tutta l'attività di revisione del pacchetto. In tale ambito, il CEN/TC 371 ha predisposto i seguenti documenti:

- la specifica tecnica CEN/TS 16628 - *Energy Performance of Buildings - Basic principles for the set of EPBD standards* - che fornisce i principi base da seguire nella revisione di tutte le norme a supporto della Direttiva EPBD recast;
- la specifica tecnica CEN/TC 16629 - *Energy Performance of Buildings - Detailed Technical Rules for the set of EPBD standards* - che fornisce le regole tecniche per la revisione di ciascuna norma, definendo un format comune per gli eventuali allegati nazionali. In essa si trova una chiara indicazione di quali dati possano essere forniti a livello nazionale, lo schema di rapporto tecnico che dovrà accompagnare ciascuna norma, esempi e/o fogli di calcolo per la verifica degli algoritmi;
- la norma EN 15603 - *Energy performance of buildings - Overarching standard EPBD* - che costituisce il quadro generale di riferimento sulla prestazione energetica degli edifici al fine di garantire la coerenza tra tutte le norme del pacchetto. Quest'ultimo documento, che di fatto costituisce la revisione della EN 15603 del 2008 [57], riveste particolare importanza nel

quadro generale di aggiornamento delle norme sia a livello europeo che nazionale, in quanto oltre ad uniformare terminologia e simboli tra le diverse norme, definisce le modalità con cui determinare i confini del sistema edificio-impianto (Figura 2.3) e fornisce le equazioni generali per costruire il bilancio energetico in funzione dell'energia richiesta, consegnata ed eventualmente prodotta/esportata all'interno dei confini del sistema o al di fuori di esso.

I documenti citati sono ad oggi (gennaio 2014) in fase avanzata di redazione.

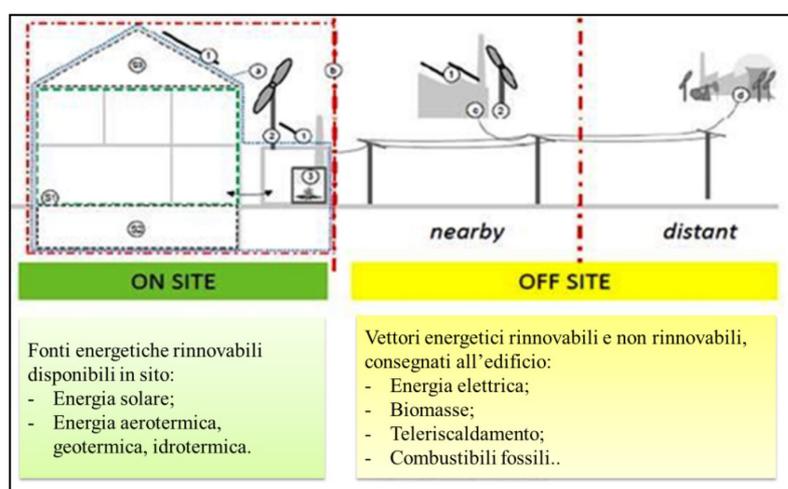


Figura 2.3: Definizione di confine dell'edificio per l'applicazione della definizione di nZEB.

Fase 2 (2013-2015): revisione del pacchetto EPBD sviluppato con il primo mandato ed inserimento di norme di completamento. Sulla base dei documenti predisposti dal CEN/TC 371 si apriranno i lavori della fase 2, per la quale saranno individuati esperti di diversi comitati tecnici che avranno l'incarico di redigere i singoli progetti di norma. Questa seconda fase è incentrata sul miglioramento e l'estensione dell'attuale set di norme, sulla base dei principi generali fissati dai nuovi obiettivi fissati dalla EPBD recast, con particolare attenzione alla necessità di:

- fornire modelli e dati di input che possano adattarsi meglio agli edifici esistenti;
- approfondire la trattazione delle tecniche di raffrescamento passivo e della dichiarazione della prestazione energetica dei sistemi di raffrescamento;
- integrare le norme per l'ispezione degli impianti di riscaldamento, raffrescamento e ventilazione;
- definire procedure specifiche per i Nearly Zero Energy Building e l'utilizzo di energie rinnovabili;

- fornire un approccio integrato per fissare i requisiti minimi di prestazione specifici per diversi sistemi tecnici dell'edificio e per l'involucro.

2.2 Le procedure di calcolo europee ed italiane

In attesa dei decreti attuativi del decreto legge n. 63, del 4 giugno 2013, e delle revisioni in accordo al documento M/480, le metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche, in Italia, sono quelle riconosciute dal Decreto del Presidente della Repubblica, 2 aprile 2009, n. 59 - *Regolamento di attuazione dell'art. 4, comma 1, lett. a) e b), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia* - in vigore dal 25 giugno 2009:

- **UNI/TS 11300: 2008** (con Errata corrige del 2010) – Parte I: Prestazioni energetiche degli edifici -Determinazione del fabbisogno di energia dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale [33];
- **UNI/TS 11300: 2008** (con Errata corrige del 2010) – Parte II: Prestazioni energetiche degli edifici -Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria [34].

A completare il quadro procedurale, negli anni successivi sono state menata anche le parti III e IV:

- **UNI/TS 11300: 2010** – Parte III: Prestazioni energetiche degli edifici - Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva [35];
- **UNI/TS 11300: 2012** – Parte IV: Prestazioni energetiche degli edifici - Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per riscaldamento di ambienti e produzione di acqua calda sanitaria [36].

Tali Specifiche Tecniche (TS) definiscono le modalità per l'applicazione nazionale degli standard europei, in primo luogo la UNI EN ISO 13790- *Prestazione energetica degli edifici: calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e raffrescamento* - con riferimento al metodo mensile per il calcolo dei fabbisogni di energia termica per riscaldamento e per raffrescamento.

Le UNI/TS nascono anche dalla necessità di superare la barriera linguistica costituita dal complesso di norme del settore pubblicate dal CEN e da UNI, solo in lingua inglese, in modo da facilitare la consultazione da parte degli utenti, ma anche per fornire univocità di valori e di metodi per consentire la riproducibilità e

confrontabilità dei risultati ed ottemperare alle condizioni richieste dai documenti prodotti con il mandato M/343. Oltre a rappresentare un dettagliato e funzionale documento di consultazione per le pratiche di certificazione energetica armonizzato con i contenuti dei documenti normativi emanati in sede comunitaria, queste sono divenute le norme tecniche nazionali che il D.Lgs 115/2008 [107] richiama espressamente come metodologie da adottare per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici ai fini della diagnosi energetica degli edifici

Come documenti di riferimento per la diagnosi energetica, a completare la serie delle UNI/TS 11300, c'è la Raccomandazione Tecnica CTI 14/2013: *Prestazioni energetiche degli edifici – Determinazione della prestazione energetica per la classificazione dell'edifici* [41]. Questo documento completa la serie delle specifiche tecniche UNI/TS 11300 ai fini della determinazione della prestazione energetica per la classificazione degli edifici e fornisce precisazioni e metodi di calcolo per determinare il fabbisogno di energia primaria degli edifici in modo univoco e riproducibile applicando la normativa tecnica citata nei riferimenti normativi.

Tali precisazioni e metodi di calcolo riguardano, in particolare:

- le modalità di valutazione dell'apporto di energia rinnovabile nel bilancio energetico;
- la valutazione dell'energia elettrica esportata;
- la definizione delle modalità di compensazione dei fabbisogni con energia elettrica attraverso energia elettrica prodotta da rinnovabili;
- la valutazione dell'energia elettrica prodotta da unità cogenerative.

La raccomandazione definisce il metodo di calcolo della prestazione energetica degli edifici espressa in energia primaria non rinnovabile e si applica ai seguenti servizi energetici:

- climatizzazione invernale;
- climatizzazione estiva;
- acqua calda sanitaria;
- ventilazione meccanica;
- illuminazione.

Nello schema in Figura 2.4, viene riassunto il legame reciproco tra le normative nazionali ed europee, che hanno portato alle specifiche tecniche di cui verrà fatta una breve sintesi nel seguito.

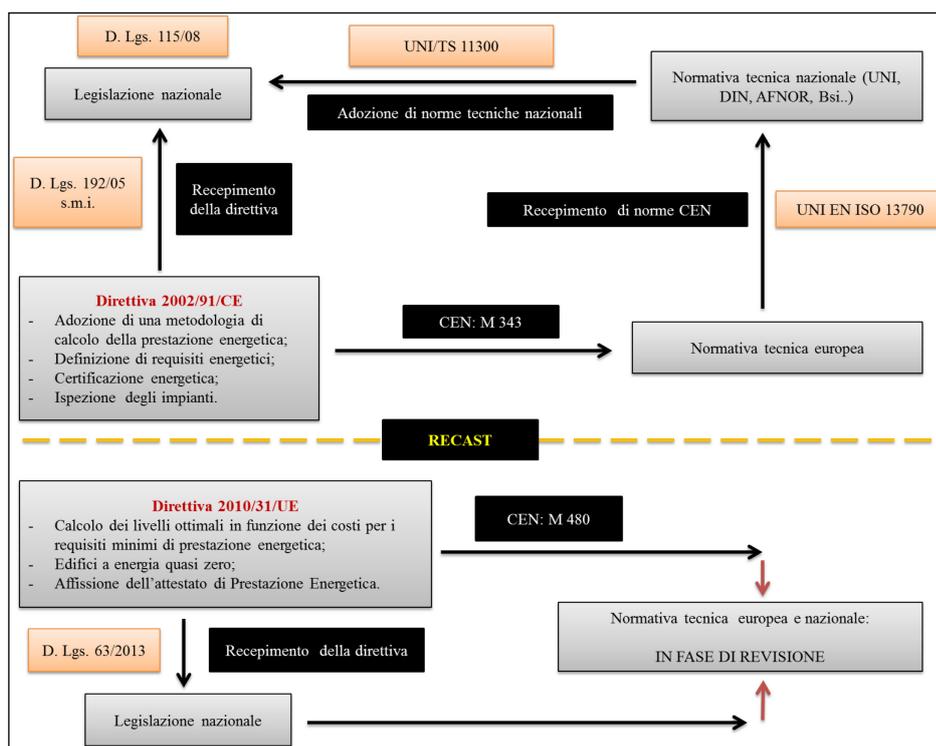


Figura 2.4: Relazione tra legislazione e normativa tecnica.

Si tenga conto che, al mese di Gennaio 2014, entrambe le parti I e II (le sole ad oggi richiamate esplicitamente dalla normativa nazionale in materia di certificazione energetica degli edifici) sono in revisione da parte dell'UNI. Ancora, è in revisione anche la parte III (sui rendimenti degli impianti per la climatizzazione estiva), mentre risulta non in fase di modifica la parte IV (relativa alle prestazioni degli impianti da fonte rinnovabile). Nella parte conclusiva di questa sezione saranno poi richiamate le principali modifiche alle norme tecniche in corso di elaborazione in accordo al mandato M/480.

2.2.1 Norma UNI/TS 11300: Parte I

La prima parte della specifica tecnica analizzata, *“Prestazione energetica degli edifici- Determinazione del fabbisogno di energia dell’edificio per la climatizzazione estiva ed invernale”*, fornisce la procedura di calcolo e i dati d’ingresso, per calcolare:

- lo scambio termico per trasmissione e ventilazione dell’edificio, quando viene riscaldato o raffrescato a temperatura interna costante;
- il contributo, al bilancio termico dell’edificio, delle sorgenti di energia interne e solari;
- i fabbisogni annui di energia per il riscaldamento e il raffrescamento, al fine di mantenere le temperature prefissate di regolazione all’interno dell’edificio.

Nella sostanza, la Parte I fornisce l'applicazione nazionale della UNI EN ISO 13790:2008 per il calcolo dei fabbisogni (netti) di energia termica per riscaldamento e per raffrescamento (sensibile) con riferimento al metodo mensile ed è quindi rivolta a tutte le possibili applicazioni previste dalla norma stessa e riportate in Tabella 2.1. In particolare per le procedure del tipo "asset rating" e "design rating", si considerano temperature interne fisse in relazione alla categoria d'edificio:

- × stagione invernale: 20°C per le abitazioni, 28°C per piscine e saune, 18°C per palestre ed assimilabili o edifici adibiti ad attività industriali ed artigianali. Gli edifici confinanti abitati sono supposti a 20°C;
- × stagione estiva: 26°C per le abitazioni, 28°C per piscine e saune, 24°C per palestre o edifici industriali.

Anche per gli apporti interni si assumono valori in relazione alla categoria di edificio: 6 W/m² per edifici adibiti ad alberghi, uffici ed attività industriali; 8 W/m² per ospedali, musei, case di cura ed edifici adibiti ad attività commerciali; 10 W/m² per bar, ristoranti, sale da ballo e piscine.

La procedura di calcolo prevede cinque passi fondamentali:

- definizione dei confini dell'insieme degli ambienti climatizzati e non dell'edificio;
- definizione dei confini delle diverse zone di calcolo, se richiesta;
- definizione delle condizioni climatiche esterne e delle temperature interne;
- calcolo, per ogni mese e per ogni zona dell'edificio, dei fabbisogni netti di energia per il riscaldamento e raffrescamento;
- aggregazione dei risultati relativi ai diversi mesi ed alle diverse zone servite dagli stessi impianti.

Per ogni zona dell'edificio, e per ogni mese, i fabbisogni di energia termica per il riscaldamento ($Q_{H,nd}$) e per il raffrescamento ($Q_{C,nd}$), si calcolano secondo il seguente bilancio termico:

$$Q_{H,nd} = Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} \cdot Q_{gn} = (Q_{H,tr} + Q_{H,ve}) - \eta_{H,gn} \cdot (Q_{sol} + Q_{int}) \quad \text{eq 2.1}$$

$$Q_{C,nd} = Q_{gn} - \eta_{C,ls} \cdot Q_{C,ht} = (Q_{int} + Q_{sol}) - \eta_{C,ls} \cdot (Q_{C,tr} + Q_{C,ve}) \quad \text{eq 2.2}$$

con:

- $Q_{H,ht}$: scambio termico totale per il riscaldamento;

- Q_{gn} : apporti termici totali;
- $\eta_{H,gn}$: fattore di utilizzazione degli apporti termici;
- $Q_{H,tr}$, $Q_{C,tr}$ e $Q_{H,ve}$, $Q_{C,ve}$: scambi termici per trasmissione e ventilazione;
- Q_{int} : apporti termici interni;
- Q_{sol} : apporti termici solari;
- $Q_{C,ht}$: scambio termico totale per il raffrescamento;
- $\eta_{C,ls}$: fattore di utilizzazione delle dispersioni termiche.

Le dispersioni e rientrate termiche per trasmissione e ventilazione si possono calcolare come espresso nelle seguenti equazioni:

$$Q_{H,tr} = H_{tr,adj} \cdot (\theta_{int,set,H} - \theta_e) \cdot t + \left(\sum_k F_{r,k} \cdot \Phi_{r,mn,k} \right) \cdot t \quad \text{eq 2.3}$$

$$Q_{H,ve} = H_{ve,adj} \cdot (\theta_{int,set,H} - \theta_e) \cdot t \quad \text{eq 2.4}$$

$$Q_{C,tr} = H_{tr,adj} \cdot (\theta_{int,set,C} - \theta_e) \cdot t + \left(\sum_k F_{r,k} \cdot \Phi_{r,mn,k} \right) \cdot t \quad \text{eq 2.5}$$

$$Q_{C,ve} = H_{ve,adj} \cdot (\theta_{int,set,C} - \theta_e) \cdot t \quad \text{eq 2.6}$$

Con:

- $\theta_{int,set,H}$ e $\theta_{int,set,C}$: temperature interne di regolazione rispettivamente per il riscaldamento e il raffrescamento della zona considerata;
- θ_e : temperatura media mensile dell'ambiente esterno;
- $F_{r,k}$: fattore di forma tra il componente edilizio k-esimo e la volta celeste;
- t : durata del mese considerato;
- $\phi_{r,mn,k}$: extra flusso termico dovuto alla radiazione infrarossa scambiata con la volta celeste dal componente k-esimo, mediato nel tempo;
- $H_{tr,adj}$ e $H_{ve,adj}$: coefficienti globali di scambio termico per trasmissione e ventilazione della zona considerata;
- $\Phi_{int,mn,k}$: flusso termico prodotto dalla k-esima sorgente di calore interna, mediato sul tempo;
- $\Phi_{sol,mn,k}$: flusso termico k-esimo di origine solare, mediato sul tempo;
- $\Phi_{sol,k}$: flusso termico k-esimo di origine solare calcolato come prodotto tra il fattore di riduzione per ombreggiatura, l'area di captazione solare effettiva e l'irradiazione solare media mensile.

Per valutare lo scambio termico verso gli ambienti non climatizzati, è necessario introdurre il coefficiente di scambio termico per trasmissione tra il volume climatizzato e gli ambienti esterni, attraverso gli ambienti non climatizzati, come prodotto tra il coefficiente globale di scambio termico tra ambiente climatizzato e non, e un fattore di correzione i cui valori si possono ricavare dal prospetto V della norma stessa, in funzione del tipo di ambiente confinante.

Gli apporti termici per ogni zona dell'edificio e per ogni mese, trascurando per semplicità l'addendo relativo ai flussi termici verso l'ambiente non climatizzato adiacente, si calcolano con le equazioni 2.7 e 2.8.

$$Q_{\text{int}} = \left(\sum_k \Phi_{\text{int},mn,k} \right) \cdot t \quad \text{eq 2.7}$$

$$Q_{\text{sol}} = \left(\sum_k \Phi_{\text{sol},mn,k} \right) \cdot t \quad \text{eq 2.8}$$

In cui:

- $\Phi_{\text{int},mn,k}$ è il flusso termico prodotto dalla k-esima sorgente di calore interna, mediato sul tempo;
- $\Phi_{\text{sol},mn,k}$ è il flusso termico k-esimo di origine solare, mediato sul tempo;
- $\Phi_{\text{sol},k}$ è il flusso termico k-esimo di origine solare calcolato come prodotto tra il fattore di riduzione per ombreggiatura, l'area di captazione solare effettiva e l'irradiazione solare media mensile.

I dati d'ingresso per effettuare i calcoli, tengono conto di diversi fattori che si possono raccogliere in quattro categorie principali:

- ✓ **caratteristiche tipologiche dell'edificio:** volume lordo e volume netto dell'ambiente climatizzato, superfici di tutti i componenti dell'involucro, tipologie e dimensioni dei ponti termici, orientamento di tutti i componenti dell'involucro edilizio, fattori di ombreggiatura di tutti i componenti trasparenti;
- ✓ **caratteristiche termofisiche e costruttive dell'edificio:** trasmittanza termica dei componenti dell'involucro edilizio, capacità termica areica dei componenti della struttura dell'edificio, trasmittanza di energia solare totale dei componenti trasparenti, fattori di riduzione dovuti al telaio dei componenti trasparenti, coefficienti di trasmissione lineare dei ponti termici;
- ✓ **dati climatici:** medie mensili di temperatura esterna e irradianza solare totale media;

- ✓ **dati relativi alle modalità di occupazione e di utilizzo dell'edificio:** temperature interna di regolazione, numero di ricambi d'aria, durata dei periodi di raffrescamento e riscaldamento, regime di funzionamento dell'impianto, modalità di gestione degli schermi, tipo di ventilazione, apporti interni.

Il sistema edificio/impianti, a seconda della situazione, si può considerare costituito da uno o più unità (fabbricato) o da porzioni di edificio, climatizzati attraverso un unico sistema di generazione ad essi asservito. Ogni porzione di edificio, climatizzata ad una determinata temperatura, con identiche modalità di regolazione, costituisce una zona termica. La Figura 2.5 schematizza le possibili situazioni di calcolo.

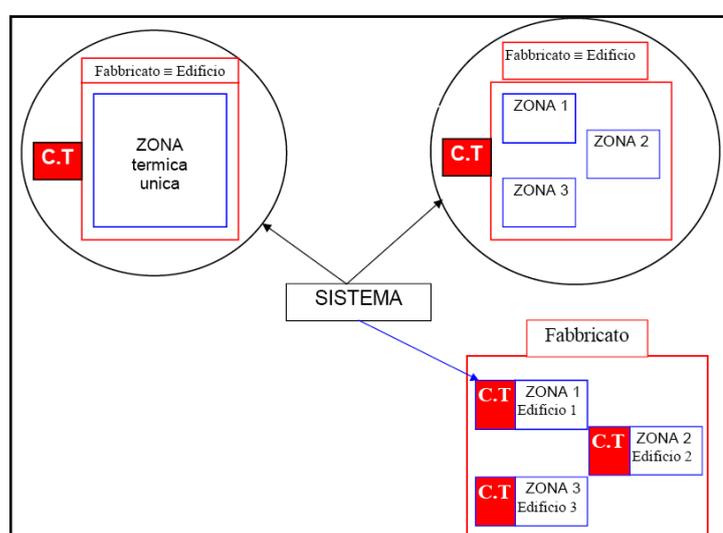


Figura 2.5: Determinazione del sistema edificio/impianto.

La zonizzazione non è richiesta se si verificano le seguenti condizioni:

- ✗ le temperature interne di regolazione per il riscaldamento differiscono di non oltre 4 K;
- ✗ gli ambienti non sono raffrescati o comunque le temperature interne di regolazione per il raffrescamento differiscono di non oltre 4 K;
- ✗ gli ambienti sono serviti dallo stesso impianto di riscaldamento;
- ✗ se vi è un impianto di ventilazione meccanica, almeno l'80% dell'area climatizzata è servita dallo stesso impianto di ventilazione con tassi di ventilazione nei diversi ambienti che non differiscono di un fattore superiore a 4.

Per quanto riguarda la ventilazione, la norma, nel caso di ventilazione naturale, per gli edifici residenziali, assume un tasso di ricambio d'aria pari a 0.3 vol/h mentre per

tutti gli altri edifici si assumono i tassi di ricambio d'aria riportati nella UNI 10339 - *Impianti aeraulici al fini di benessere* [108].

In tal caso, i valori degli indici di affollamento sono assunti pari al 60% di quelli riportati nella suddetta norma ai fini della determinazione della portata di progetto.

Per gli edifici dotati di sistemi di ventilazione meccanica a singolo flusso (aspirazione) la portata di ricambio si calcola come:

$$q_{ve} = k \cdot q_{ve,des} \quad \text{eq 2.9}$$

dove

- $q_{ve,des}$ è la portata d'aria di progetto;
- k è un coefficiente di contemporaneità di utilizzo delle bocchette aspiranti. In assenza di dati di progetto attendibili o di informazioni più precise, si può assumere $k = 1$ per sistemi a portata fissa.

Per gli edifici dotati di sistemi di ventilazione meccanica a doppio flusso, indicando con η_{ve} l'efficienza dell'eventuale recuperatore di calore dell'aria, la portata di ricambio si calcola come:

$$q_{ve} = (1 - \eta_{ve}) \cdot q_{ve,des} \quad \text{eq 2.10}$$

L'opzione della ventilazione notturna può essere considerata solo in presenza di ventilazione meccanica, e per tutti i giorni del periodo di raffrescamento.

Gli apporti solari invece sono considerati mediante incremento dello scambio termico per trasmissione e si distinguono a seconda dei componenti:

- × componenti opachi: in assenza di dati di progetto attendibili o comunque di informazioni più precise, il fattore di assorbimento solare di un componente opaco può essere assunto pari a 0.3 per colore chiaro della superficie esterna, 0.6 per colore medio e 0.9 per colore scuro;
- × componenti trasparenti: i valori della trasmittanza di energia solare totale degli elementi vetrati possono essere ricavati moltiplicando i valori di trasmittanza di energia solare totale per incidenza normale (g) per un fattore di esposizione assunto pari a 0.9, mentre in assenza di dati si ricorre al prospetto 13 della norma (Tabella 2.2).

Tipo di vetro	g
Vetro singolo	0.85
Doppio vetro normale	0.75
Doppio vetro basso emissivo	0.67
Triplo vetro normale	0.70
Triplo vetro basso emissivo	0.50
Doppia finestra	0.75

Tabella 2.2: Trasmittanza di energia solare totale per incidenza normale.
Fonte: Prospetto 13 della UNI/TS-Parte I

Nella valutazione di tali contributi, deve essere tenuto in conto l'effetto di schermature mobili (solo se integrate nella struttura). In assenza di dati di progetto attendibili o comunque di informazioni più precise, l'effetto di schermature mobili può essere valutato attraverso i fattori di riduzione (riportati al prospetto 14 della norma) dati dal rapporto tra i valori di trasmittanza di energia solare totale della finestra con e senza schermatura.

L'ombreggiamento viene calcolato come prodotto dei fattori di ombreggiatura relativi ad ostruzioni esterne, ad oggetti orizzontali e verticali. I valori di tali fattori dipendono dalla latitudine, dall'orientamento dell'elemento ombreggiato, dal clima, dal periodo considerato e dalle caratteristiche geometriche degli elementi ombreggianti (Figura 2.6).

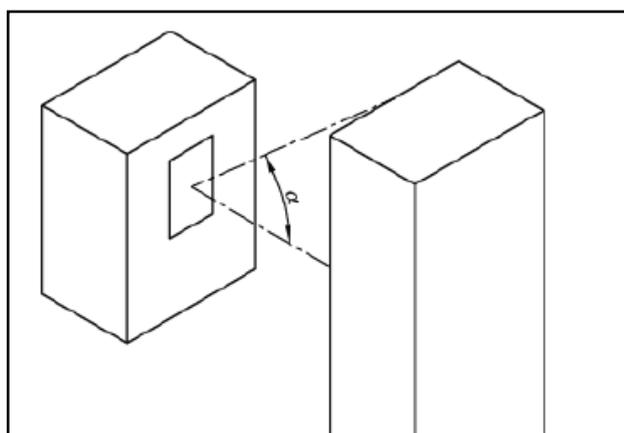


Figura 2.6: Esempio di angolo dell'orizzonte ombreggiato da un'ostruzione esterna

Per considerare in modo adeguato gli effetti indotti dai guadagni gratuiti invernali, ovvero dalle dispersioni favorevoli in regime estivo, tali contributi devono essere moltiplicati per coefficienti riduttivi che tengano conto dell'inerzia dell'edificio. Si devono dunque calcolare i seguenti parametri:

- fattore di utilizzazione degli apporti termici per il calcolo del fabbisogno di riscaldamento, $\eta_{H,gn}$;
- fattore di utilizzazione dello scambio termico per il calcolo del fabbisogno di raffrescamento, $\eta_{C,dis}$;
- capacità termica interna (per gli edifici esistenti c'è una procedura semplificata);
- intermittenza e attenuazione, assunta inesistente per le valutazioni di progetto e standard.

Come ultima osservazione, si sottolinea che nelle appendici della specifica tecnica viene riportato un abaco delle strutture murarie utilizzate in Italia in edifici esistenti (da usare solo in mancanza di dati di progetto, esempio in Figura 2.7), la determinazione semplificata della trasmittanza termica dei componenti opachi in edifici esistenti, la determinazione semplificata della trasmittanza termica dei componenti trasparenti, i fattori di ombreggiatura.

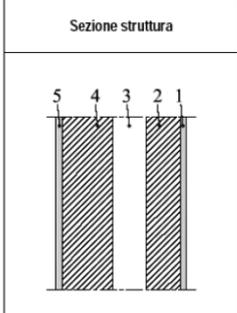
STRUTTURA N. 9		DESCRIZIONE Muratura a cassa vuota		
Sezione struttura				
				
Rif.	Materiali	Massa volumica (kg/m³)	Spessore (cm)	Conduktivita (W/(m K))
1	Intonaco interno (calce e gesso)	1 400	2	0,70
2	Mattoni forati	800	8	0,30
3	Intercapedine d'aria	-	6 - 12	
4	Mattoni forati	800	25	0,30
5	Intonaco esterno	1 800	2	0,90
6				
7				
8				
9				
10				

Figura 2.7: Esempio di trasmittanza per una muratura a cassa vuota.
Fonte: Appendice B della UNI/TS 11300 – Parte I

2.2.2 Norma UNI/TS 11300: Parte II

La seconda parte della specifica tecnica analizzata, "Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria", fornisce dati e metodi per la determinazione di:

- fabbisogno di energia utile per acqua calda sanitaria;
- rendimento dei sottosistemi dell' impianto;
- rendimento globale medio stagionale;
- fabbisogno annuo di energia primaria per la climatizzazione invernale e per la preparazione di acqua calda sanitaria.

La specifica tecnica si applica a sistemi di nuova progettazione, ristrutturati o esistenti sia se per il solo riscaldamento o per la sola produzione di acqua calda per usi igienico-sanitari, sia per sistemi misti o combinati per riscaldamento e produzione acqua calda sanitaria.

Le suddette applicazioni trovano riscontro in diversi tipi di valutazione energetica: a) valutazione di calcolo; b) valutazione di progetto.

La valutazione da calcolo prevede il calcolo del fabbisogno energetico e si differenzia in:

- × **valutazione di progetto**: il calcolo viene effettuato sulla base dei dati di progetto. Per le modalità di occupazione e di utilizzo dell'edificio e dell'impianto si assumono valori convenzionali di riferimento. Questa valutazione è eseguita in regime di funzionamento continuo;
- × **valutazione standard**: il calcolo viene effettuato sulla base dei dati relativi all'edificio e all'impianto reale, come costruito. Per le modalità di occupazione e di utilizzo dell'edificio e dell'impianto si assumono valori convenzionali di riferimento. Questa valutazione è eseguita in regime di funzionamento continuo;
- × **valutazione in condizioni effettive di utilizzo**: il calcolo viene effettuato sulla base dei dati relativi all'edificio e all'impianto reale, come costruito. Per le modalità di occupazione e di utilizzo dell'edificio e dell'impianto si assumono valori effettivi di funzionamento. Questa valutazione è eseguita nelle condizioni effettive di intermittenza dell'impianto.

La valutazione di progetto invece è una valutazione basata sul rilievo dei consumi con modalità standard.

Ai fini di diagnosi energetica si può procedere con la valutazione in condizioni effettive di utilizzo integrata con il rilievo dei consumi. Affinché i dati di consumo rilevati possano essere correttamente utilizzati come dati di confronto, è necessario definire dei criteri unificati per attribuire i consumi al periodo di tempo prefissato e modalità, anch'esse unificate, per convertire i consumi in portate volumetriche o di massa - abbinate a livelli termici - negli equivalenti energetici.

La specifica tecnica considera i seguenti fabbisogni di energia termica utile:

- fabbisogno di energia termica utile per il riscaldamento e la ventilazione dell'edificio: Q_h ;

- fabbisogno di energia termica utile per acqua calda sanitaria: $Q_{h,w}$;

- fabbisogno di energia primaria per usi di condotta: Q_{oth} .

I primi due termini sono utilizzati per il calcolo dei fabbisogni di energia primaria, e sono calcolati al netto di eventuali apporti da perdite recuperabili e dei contributi da energie rinnovabili o sistemi alternativi.

In particolare, relativamente al calcolo del fabbisogno per l'acqua calda sanitaria, la norma aggiorna i criteri della *Raccomandazione CTI 03/03* per l'individuazione del fabbisogno energia utile per l'acqua calda sanitaria, che dalle esperienze condotte sul campo sovrastimava tale fabbisogno rispetto alle condizioni reali di utilizzo dell'edificio. Questo aspetto assume grande rilevanza per il corretto dimensionamento degli impianti solari, poiché costituisce il punto di partenza per la verifica della copertura minima del fabbisogno energetico per tale utilizzo, come imposto dalle normative nazionali e/o regionali, tra cui, ad esempio, il D.Lgs 28/2011.

Nel caso particolare di analisi di edifici ad uso residenziale, la valutazione viene condotta in relazione alle dimensioni dell'immobile, ma a differenza del suddetto documento del CTI, viene mantenuta come condizione al contorno una differenza tra la temperatura dell'acqua in ingresso nell'impianto dalla rete e quella convenzionale di erogazione pari a 25°C. La UNI/TS 11300 parte II modifica il criterio di valutazione facendo riferimento non più alla superficie lorda dell'abitazione, bensì a quella utile, venendo così parzialmente a correggere il sovradimensionamento che derivava dall'applicazione del precedente testo.

Il terzo termine è costituito da valori convenzionali forniti allo scopo di depurare, in modo unificato, i consumi promiscui di energia primaria da quelli derivanti da usi diversi dal riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria.

Ai fini del calcolo delle prestazioni energetiche, gli impianti di climatizzazione si considerano suddivisi in sottosistemi, ciascuno dei quali caratterizzato da un rendimento, da perdite e dispersioni ed eventuali richieste per il funzionamento degli ausiliari. In particolare, la norma contempla "almeno" i seguenti sottosistemi, ciascuno dei quali caratterizzato da uno specifico rendimento:

- sistema di regolazione: η_{rg} rendimento di regolazione;
- sistema di distribuzione: η_d rendimento di distribuzione;
- sistema di generazione: η_p rendimento di produzione;
- sistema di emissione: η_e rendimento di emissione.

Per eventuali sistemi di accumulo, le perdite si calcolano in funzione delle caratteristiche geometriche e termo-fisiche dell'accumulatore e dei livelli termici del fluido termovettore.

Senza entrare ulteriormente nel merito della norma tecnica - che ai fini degli studi riportati in questa Tesi, non sarà utilizzata - si riportano solo i principi secondo i quali la norma è redatta, e quindi la valutazione del fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento e la climatizzazione invernale:

$$Q_{p,H,W} = \sum Q_{H,c,i} \cdot f_{p,i} + \sum Q_{W,c,i} \cdot f_{p,j} + (Q_{H,aux} + Q_{W,aux} + Q_{INT,aux} + Q_{el,aux}) \cdot f_{p,el} \quad \text{eq 2.11}$$

dove:

$Q_{p,H,W}$: fabbisogno globale totale di energia primaria;

$Q_{H,c,i}$: fabbisogno di energia per riscaldamento, secondo ciascun vettore energetico "i";

$Q_{W,c,j}$: fabbisogno di energia per acqua calda sanitaria ottenuto da ciascun vettore energetico "j";

$Q_{H,aux}$: fabbisogno di energia elettrica per gli ausiliari degli impianti di riscaldamento;

$Q_{W,aux}$: fabbisogno di energia elettrica per gli ausiliari degli impianti di produzione acqua calda sanitaria;

$Q_{INT,aux}$: fabbisogno di energia elettrica per ausiliari di eventuali sistemi che utilizzano energie rinnovabili e di cogenerazione;

$Q_{el,exp}$: energia elettrica esportata dal sistema;

$f_{p,i}$: fattore di conversione in energia primaria del combustibile "i";

$f_{p,j}$: fattore di conversione in energia primaria del combustibile "j";

$f_{p,el}$: fattore di conversione in energia primaria dell'energia elettrica.

Con riferimento al solo riscaldamento ambientale, il rendimento medio stagionale $\eta_{g,H}$ dell'impianto di riscaldamento è dato dall'espressione:

$$\eta_{g,H} = \frac{Q_h}{Q_{p,H}} \quad \text{eq 2.12}$$

in cui:

$Q_{p,H}$: fabbisogno di energia primaria per il solo riscaldamento (eq 2.11);

Q_h : fabbisogno di energia termica utile per riscaldamento (eq 2.1).

In caso di unità immobiliare in edificio condominiale, il fabbisogno di energia termica utile per il riscaldamento e la ventilazione dell'edificio, il rendimento di emissione e il

rendimento di regolazione sono attribuibili all'unità immobiliare in esame, mentre i rendimenti di distribuzione e di generazione sono da attribuire a parti comuni del condominio, in comproprietà delle unità immobiliari condominiali (Figura 2.8). Ciò equivale a considerare che le singole unità immobiliari prelevino energia termica utile dalla rete condominiale con perdite di distribuzione e di generazione determinate dal sistema di fornitura del calore dalla rete condominiale.

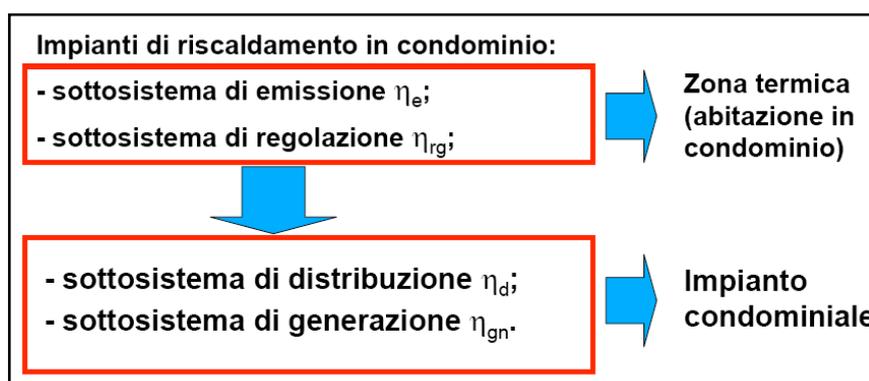


Figura 2.8: Catena di conversione energetica per impianti di riscaldamento in condominio.

Come nota finale, è importante sottolineare che la UNI/TS 11300-Parte II, unitamente alla UNI EN 15316-Parti 2-3:2008, "Impianti di riscaldamento degli edifici - Metodo per il calcolo dei requisiti energetici e dei rendimenti dell'impianto - Sistemi di distribuzione del calore negli ambienti" [67-71], sostituisce la UNI 10347:1993, "Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Energia termica scambiata tra una tubazione e l'ambiente circostante - Metodo di calcolo". Ancora, la medesima specifica tecnica, unitamente alla UNI EN 15316-Parte 1:2008, "Impianti di riscaldamento degli edifici - Metodo per il calcolo dei requisiti energetici e dei rendimenti dell'impianto" [66], e alla UNI EN 15316-2-Parte 1:2008, "Impianti di riscaldamento degli edifici - Metodo per il calcolo dei requisiti energetici e dei rendimenti dell'impianto" [67,68], sostituisce la UNI 10348:1993, "Riscaldamento degli edifici - Rendimenti dei sistemi di riscaldamento - Metodo di calcolo".

Le principali differenze consistono nel:

- metodo di calcolo per caldaie certificate dal produttore secondo la direttiva 94/42/CEE, in aggiunta al metodo analitico;
- l'introduzione di caldaie a condensazione;
- il calcolo di consumi di acqua calda sanitaria;
- maggior dettaglio per i consumi elettrici degli ausiliari.

2.2.3 Norma UNI/TS 11300: Parte III

La Specifica Tecnica UNI TS 11300 - Parte III, “*Prestazioni energetiche degli edifici - Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva*” fornisce dati e metodi per la determinazione dei rendimenti e dei fabbisogni di energia dei sistemi di climatizzazione estiva, nonché dei fabbisogni di energia primaria per la climatizzazione estiva.

Questa si applica unicamente agli impianti di climatizzazione estiva (non ai singoli componenti di sistema per i quali vigono le specifiche norme di prodotto) di tipo fisso con macchine frigorifere azionate elettricamente o ad assorbimento. Tali sistemi possono essere di nuova progettazione, ristrutturati o esistenti. In particolare, gli impianti per i quali la specifica tecnica consente l'esame delle prestazioni possono essere destinati al solo raffrescamento, oppure tener conto anche degli effetti derivanti dal trattamento dell'aria.

Il metodo introdotto consente di calcolare il rendimento di impianto e il relativo fabbisogno energetico procedendo analogamente a quanto già avviene per l'analisi degli impianti di riscaldamento, e quindi suddividendo il sistema nei diversi sottosistemi di impianto, con particolare attenzione a quello di generazione. La procedura principale è basata su condizioni di calcolo standardizzate (dati climatici e ambientali, etc.). Specifiche appendici introducono metodologie semplificate per la conversione dei risultati di calcolo ottenuti ipotizzando condizioni standard di funzionamento delle macchine, con condizioni al contorno personalizzate.

In dettaglio, il metodo considera:

- ✗ gli eventuali risparmi dovuti a recuperi di calore, free-cooling, o altro;
- ✗ la configurazione impiantistica adottata includendo nel calcolo anche il consumo energetico delle apparecchiature per la distribuzione dei fluidi termovettori (pompe e ventilatori) e l'eventuale presenza di altri accessori (post-riscaldatori elettrici, umidificatori, ventilatori per il ricambio igienico dell'aria, etc.);
- ✗ il fattore di carico per l'individuazione delle condizioni a carico parziale delle macchine in relazione al comportamento del sistema edificio/impianti.

Il fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione estiva viene determinato come somma dei contributi (corretti per il fattore di conversione da energia elettrica ad energia primaria) dei fabbisogni di energia elettrica degli ausiliari e di quelli di energia effettiva per raffrescamento e per trattamenti dell'aria secondo quanto riportato nell'equazione 2.13.

$$Q_{C,P} = \left(\sum_k Q_{aux,k} + \frac{Q_{Cr,k} + Q_{v,k}}{\eta_{mm,k}} \right) \cdot f_{p,el} \quad \text{eq 2.13}$$

Nell'equazione 2.13:

- Q_{aux} è il fabbisogno di energia elettrica per ausiliari degli impianti di climatizzazione [kWh];
- Q_{Cr} è il fabbisogno effettivo per raffrescamento [kWh];
- Q_v è il fabbisogno per trattamenti dell'aria [kWh];
- η_{mm} è il coefficiente di prestazione medio mensile del sistema di produzione dell'energia frigorifera;
- $f_{p,el}$ è il fattore di conversione da energia elettrica ad energia primaria, determinato secondo la UNI/TS 11300 - Parte II;
- k è il mese k -esimo della stagione di climatizzazione estiva, determinata secondo la UNI/TS 11300 - Parte I.

Il rendimento globale medio stagionale η_{glo} del sistema edificio-impianto è quindi determinato da:

$$\eta_{glo} = \frac{\sum(Q_{C,nd} + Q_{v,k})}{Q_{C,P}} \quad \text{eq 2.14}$$

dove:

- $Q_{C,nd}$ è il fabbisogno ideale per raffrescamento [kWh];
- Q_v è il fabbisogno per trattamenti dell'aria [kWh];
- k è il mese k -esimo della stagione di climatizzazione estiva, determinata secondo la UNI/TS 11300 - Parte I.

Il coefficiente medio di prestazione mensile del sistema di produzione dell'energia frigorifera η_{mm} viene determinato applicando la seguente formula di calcolo, da ripetersi per tutti i mesi della stagione di climatizzazione estiva:

$$\eta_{mm,k} = EER(F_k) \cdot \eta_1(F_k) \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot \eta_5 \cdot \eta_6 \cdot \eta_7 \quad \text{eq 2.15}$$

dove per il mese k -esimo:

- F_k è il fattore di carico medio mensile, calcolato come rapporto tra la quantità di energia termica richiesta per il raffreddamento e la ventilazione ($Q_{Cr} + Q_v$) nel mese k -esimo ed il valore massimo dell'energia erogabile dalla macchina frigorifera nello

stesso mese (ovvero: $h \times \Phi_n$, dove h è il numero di ore mensili e Φ_n la potenza nominale della macchina frigorifera);

- $\eta_1(F_k)$ è il coefficiente correttivo ottenuto in corrispondenza del fattore di carico F_k , e ricavabile per doppia interpolazione dai prospetti nell'Appendice C della specifica tecnica;

- $\eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5, \eta_6, \eta_7$ sono i coefficienti correttivi ricavabili dai prospetti riportati nell'appendice D della specifica tecnica.

Nel caso di centrali frigorifere dotate di più di un gruppo frigorifero, il fattore di carico F_k ed il coefficiente di prestazione medio mensile η_{mm} devono essere calcolati in funzione della logica di inserimento dei gruppi.

Un approfondimento è necessario per $EER(F_k)$, che rappresenta il rapporto di efficienza energetica ottenuto in corrispondenza del fattore di carico F_k , e ricavabile per interpolazione dalle curve degli EER costruite secondo quanto indicato nella stessa specifica tecnica.

Le prestazioni delle macchine frigorifere dipendono non solo dai livelli termici operativi (condensazione ed evaporazione) e della configurazione impiantistica scelta, ma anche dall'andamento del fabbisogno dell'edificio. Per tener conto della variazione degli assorbimenti elettrici in funzione delle variazioni climatiche e/o delle condizioni al contorno e del grado di parzializzazione della macchina, si fa riferimento alla norma EN 14825:2008 [109], che stabilisce che i costruttori forniscano i coefficienti di prestazione (Energy Efficiency Ratio- EER) delle macchine in condizioni di riferimento. Conoscendo i valori di EER forniti dai costruttori, si costruisce la curva di funzionamento della macchina a carichi parziali (un esempio è riportato in Figura 2.9), ovvero la curva che descrive l'andamento dei valori di EER di una macchina frigorifera in funzione del fattore di carico F . La norma definisce anche le condizioni per calcolare i valori di EER per fattori di carico inferiori al 25% (1%, 2%, 5%, 10%, 15% e 20%).

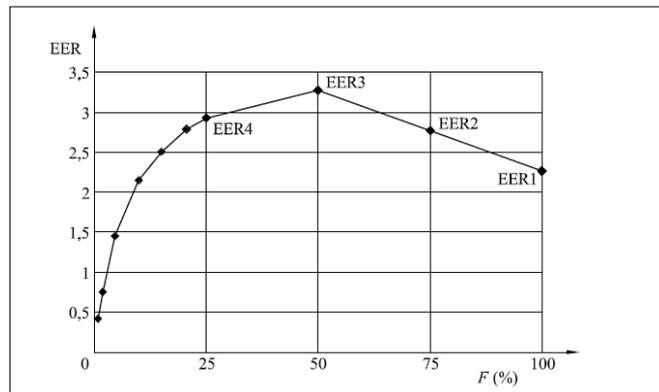


Figura 2.9: Esempio di andamento dei valori di EER di una macchina frigorifera in funzione del fattore di carico.

La curva così ottenuta è utilizzata per ottenere valori di EER corrispondenti a fattori di carico diversi da quelli di riferimento (100%, 75%, 50%, 25%), da utilizzare per il calcolo del coefficiente di prestazione medio mensile η_{mm} .

Qualora le macchine frigorifere non possano operare con gradi di parzializzazione corrispondenti alle condizioni di riferimento, oppure per macchine già installate di cui non sia possibile conoscere i valori di EER a carico parziale, ai fini del calcolo del coefficiente di prestazione medio mensile η_{mm} si utilizzano i valori ottenuti a pieno carico (forniti dai costruttori secondo la parte pertinente della serie UNI EN 14511 [110-113]) opportunamente corretti con i coefficienti di correzione $\eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5, \eta_6, \eta_7$.

Nell'appendice G infine, si riporta il metodo per calcolare il *Seasonal Energy Efficiency Ratio* (SEER). A tal proposito si ritiene utile specificare che, le macchine frigorifere sono normalmente dimensionate per il carico di picco e quindi durante la stagione funzionano quasi sempre a potenza ridotta. La variazione prestazionale della macchina è funzione non solo dei parametri termici operativi (legati alle condizioni di ciclo di condensazione ed evaporazione) e della configurazione impiantistica, ma anche e soprattutto della variazione nel tempo del fabbisogno dell'edificio.

Il limite nell'utilizzo dell'EER è rappresentato dal fatto che, come espressione istante per istante dello stato di funzionamento del sistema, non rappresenta un descrittore sufficientemente accurato per esprimere una valutazione indicativa dell'intero arco stagionale di funzionamento.

Per tener conto della variazione degli assorbimenti elettrici in funzione delle variazioni climatiche e/o delle condizioni al contorno e del grado di parzializzazione della macchina, viene quindi valutato l'indice SEER, facendo riferimento alla EN 14825 [109].

L'indice SEER, *Seasonal Energy Efficiency Ratio*, definito come indice di prestazione energetica stagionale di una macchina frigorifera determinato in condizioni standard di riferimento (condizioni medie valide per l'Europa), integra per tutto il periodo di funzionamento stagionale (o meglio, mensile), l'indice EER.

Dato che EER non è funzione del tempo, il corrispettivo indice SEER viene valutato come media pesata dei valori dei singoli EER a diverse condizioni operative, utilizzando pesi e tempi di funzionamento definiti su base convenzionale, in funzione della tipologia della macchina.

In base alla tipologia di macchina considerata, l'indice SEER viene calcolato con l'equazione 2.16:

$$SEER = \frac{1}{\frac{a}{EER1} + \frac{b}{EER2} + \frac{c}{EER3} + \frac{d}{EER4}} \quad \text{eq 2.16}$$

dove:

- a, b, c, d sono i tempi di funzionamento convenzionalmente fissati per i diversi carichi della macchina frigorifera;
- EER1, EER2, EER3, EER4 sono gli indici di efficienza misurati alle condizioni operative 1, 2, 3 e 4.

Prova	Carico parziale	Tipologia			
		Aria-aria	Acqua-aria	Aria-acqua	Acqua-acqua
a	100%	4%	4%	3%	3%
b	75%	26%	26%	33%	33%
c	50%	40%	40%	41%	41%
d	25%	30%	30%	23%	23%

Tabella 2.3: Condizioni di riferimento per determinare l'indice EER in diverse condizioni di carico parziale delle macchine frigorifere.

Il SEER di riferimento calcolato è un utile strumento per il confronto energetico tra macchine diverse.

2.2.4 Norma UNI/TS 11300: Parte IV

La quarta parte delle specifiche tecniche UNI/TS 11300 riguarda il calcolo del fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione invernale e la produzione di acqua calda sanitaria nel caso vi siano sottosistemi di generazione che forniscono energia termica utile da energie rinnovabili o con metodi di generazione diversi dalla combustione a fiamma di combustibili fossili (metodi trattati nella UNI/TS 11300 - Parte II).

In particolare vengono considerate, tra le fonti rinnovabili per la produzione di energia termica utile: il solare termico, le biomasse, le fonti aerauliche, geotermiche e idrauliche nel caso di pompe di calore per la quota considerata rinnovabile. Per la produzione di energia elettrica invece si considera il solare fotovoltaico.

Per quanto riguarda la generazione con processi diversi dalla combustione a fiamma si considerano:

- ✓ sistemi che convertono l'energia chimica di combustibili fossili per produzione combinata di energia elettrica ed energia termica (cogenerazione);
- ✓ sistemi che riqualificano energia termica a bassa temperatura in energia termica a più elevata temperatura mediante cicli termodinamici alimentati da energia elettrica o da combustibili fossili (pompe di calore);
- ✓ sistemi che impiegano energia termica utile derivante da generazione remota esterna al confine energetico dell'edificio (teleriscaldamento).

Vista la natura di questa trattazione, senza la pretesa di dare una descrizione esaustiva della norma, si riportano i concetti principali per la sua applicazione.

La UNI/TS 11300 Parte IV considera confine dell'edificio quello comprendente tutte le aree dell'edificio nelle quali viene utilizzata o prodotta energia termica utile o energia elettrica. Tale confine può coincidere con quello definito dal fabbricato o essere esteso a zone esterne di pertinenza dell'edificio. Per esempio, se una parte di un impianto tecnologico è situata all'esterno del fabbricato ma costituisce parte degli usi energetici considerati, si considera compresa nel confine energetico dell'edificio. All'interno di tale confine, le perdite dei sottosistemi sono considerate nel calcolo. Nel caso in cui all'edificio venga fornita energia prodotta con impianti esterni al confine, si devono considerare nel fattore di conversione in energia primaria dell'energia fornita, le perdite di produzione e di distribuzione sino al confine dell'edificio stesso.

Attraverso il confine dell'edificio può transitare, come indicato in Figura 2.10, a seconda dei casi:

- ✓ energia fornita dall'esterno con combustibili fossili (4), per subire processi di trasformazione mediante gli impianti tecnologici compresi nel confine energetico dell'edificio;
- ✓ energia termica utile, prodotta all'esterno con vettori energetici diversi, fornita all'edificio da rete di teleriscaldamento (9);
- ✓ energia elettrica fornita da rete (5);
- ✓ energia utile (10) o energia elettrica auto-prodotta all'interno dell'edificio (12) e (13) ed esportata all'esterno (energia termica a utenze esterne al confine dell'edificio ed energia elettrica immessa in rete).

La radiazione solare incidente sui collettori solari non è considerata nel bilancio energetico dell'edificio, ma si considera solo l'energia termica utile fornita dal sistema solare termico e l'energia ausiliaria spesa per trasferirla dai collettori all'edificio.

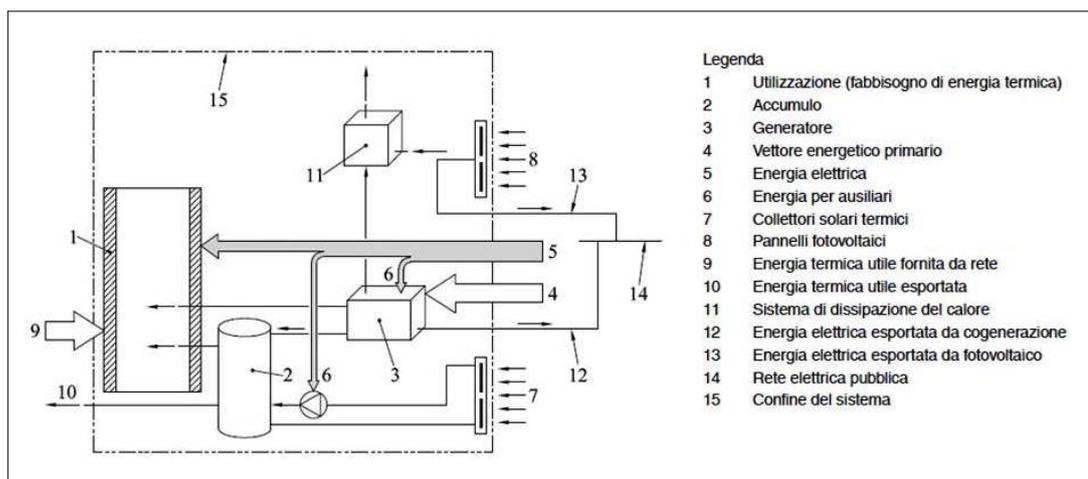


Figura 2.10: Confine del sistema edificio.
Fonte: UNI/TS 11300 –Parte IV

Con riferimento alla Figura 2.10, si tenga conto che il generatore (3) può essere un sistema a combustione a fiamma o una pompa di calore o un cogeneratore, mentre eventuali dispositivi ausiliari possono essere unità ad assorbimento o torri evaporative. Inoltre, l'energia termica utile da rete (9) può essere sostitutiva di quella prodotta nell'edificio (3) e può essere immessa direttamente nel sottosistema di distribuzione, mentre quella esportata (10) può provenire da accumulo o direttamente dal generatore (3).

Definito il volume di controllo cui applicare le disposizioni previste nella specifica, si riassume la procedura nei suoi passi generali.

I parametri di valutazione delle prestazioni energetiche dell'edificio previsti per il calcolo dei requisiti energetici e dei rendimenti dell'impianto per i sistemi diversi dal tradizionale generatore di calore alimentato a gas o a gasolio, sono:

- ✓ fabbisogno di energia primaria;
- ✓ contributo in energia primaria di ciascun vettore energetico;
- ✓ produzione di CO₂ globale;
- ✓ produzione di CO₂ di ciascun vettore energetico.

Questi dati devono essere indicati separatamente per vettore energetico e per tipo di servizio su base mensile ed annuale.

Relativamente alla procedura di calcolo definita, questa riguarda sistemi che utilizzano energia termica fornita sia con un unico metodo di generazione diverso dalla combustione a fiamma, sia con diversi metodi di generazione e/o vettori energetici. Nel caso di sistemi polivalenti, il fabbisogno di energia utile $Q_{d,in}$ richiesto dall'edificio nel

periodo di calcolo considerato può essere coperto da due o più generatori di diverse tipologie di generazione e/o vettori energetici.

La Figura 2.11 mostra un esempio di schema di sistema polivalente e pluri-energetico, in cui l'energia termica utile prodotta dai vari sottosistemi di generazione viene riversata in un punto di connessione tra distribuzione e generazione (serbatoio di accumulo o collettore di distribuzione).

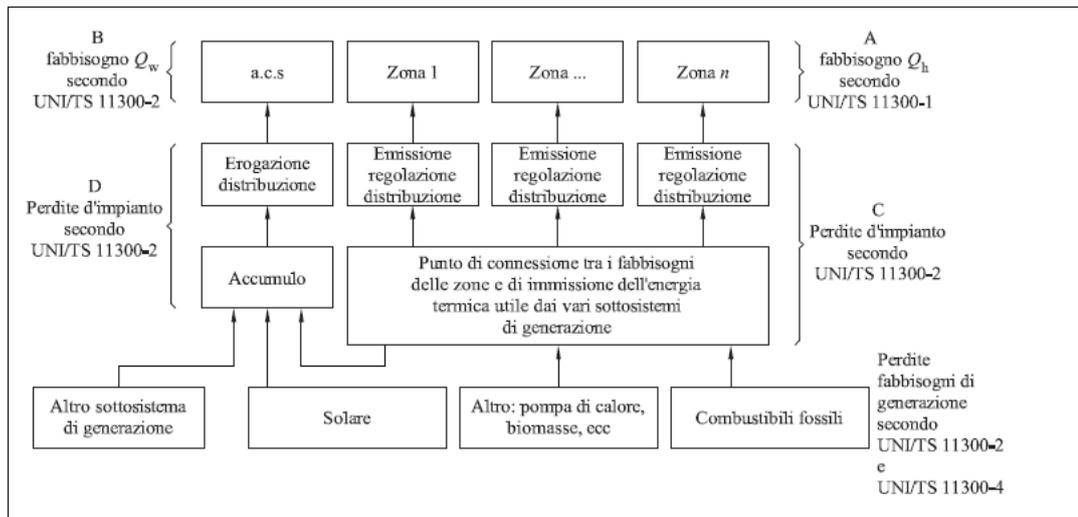


Figura 2.11: Schema esemplificativo di sistema polivalente o pluri-energetico.

Fonte: UNI/TS 11300 – Parte IV

Come riassunto nello schema, i fabbisogni di energia termica utile si calcolano in accordo alla UNI/TS 11300 – Parte I per i fabbisogni di riscaldamento (Q_h) e alla UNI/TS 11300 – Parte II per i fabbisogni di acqua calda sanitaria (Q_w). Le perdite d'impianto sino alla distribuzione o all'accumulo inclusi sia per il riscaldamento che per l'acqua calda sanitaria si calcolano in accordo alla UNI/TS 11300 – Parte II.

Il fabbisogno mensile globale richiesto dalla distribuzione ($Q_{d,in,mese}$) ossia il fabbisogno $Q_{gn,out,mese}$ che deve essere fornito dai sottosistemi di generazione dell'edificio e/o da energia utile da rete esterna (teleriscaldamento), è dato dalla somma dei contributi di energia termica utile dei sottosistemi di generazione nel periodo di calcolo ($Q_{HW,gn,out,i}$):

$$\sum Q_{hw,gn,out,i,mese} = \sum Q_{hw,d,in,j,mese} \quad \text{eq 2.17}$$

Passando ai sottosistemi di generazione, nel caso di sistemi multipli che comprendono produzione di energia termica utile da energie rinnovabili e da altri sottosistemi di generazione (pompe di calore, cogenerazione, combustione a fiamma

con vettori energetici non rinnovabili), la ripartizione del carico tra i generatori deve essere effettuata secondo un ordine di priorità, definito nel progetto, in modo da ottimizzare il fabbisogno di energia primaria, tenendo conto dei vettori energetici, dei rendimenti e delle caratteristiche dei singoli generatori. In mancanza di condizioni specificate nel progetto, la norma prevede l'ordine riportato nella Tabella 2.4.

Priorità	Sottosistema di generazione	Produzione di energia
1	Solare termico	Termica
2	Cogenerazione	Elettrica - termica cogenerata
3	Combustione di biomasse	Termica
4	Pompa di calore	Termica o frigorifera
5	Generatori di calore a combustibili fossili	Termica

Tabella 2.4: Priorità dei generatori.
Fonte: UNI/TS 11300 –Parte IV

Con riferimento all'ordine delle priorità in Tabella 2.4, qualora il sistema preveda l'utilizzo di energia termica utile da rete (teleriscaldamento) e di energia solare, a quest'ultima viene assegnata priorità 1. Per la produzione cogenerativa, la specifica si applica a sistemi cogenerativi "a carico termico a seguire" ossia regolati in funzione del carico termico.

Relativamente ai metodi di calcolo dei sottosistemi di generazione, nel caso di generatori a fiamma alimentati con combustibili liquidi e gassosi destinati ad integrazione termica in sistemi polivalenti, escluse le pompe di calore ad assorbimento a fiamma diretta, si opera secondo quanto prescritto dalla UNI/TS 11300 –Parte II. Negli altri casi si fa riferimento a quanto prescritto nella specifica tecnica in oggetto, cui si rimanda per una trattazione approfondita.

2.2.5 L'aggiornamento delle normative nel biennio 2013-2014

Per l'Italia, l'attività prevista del mandato M/480 è seguita dai gruppi di lavoro CTI, GL 102 - *Isolanti e isolamento. Metodi di calcolo e di prova*, GL 501 - *Impianti di raffrescamento: ventilazione e condizionamento* e GL 601 - *Impianti di riscaldamento. Progettazione, fabbisogni di energia e sicurezza*.

La revisione e l'armonizzazione delle norme europee nel settore della prestazione energetica degli edifici dovranno essere completate entro il 2014. Di seguito si ritiene interessante riassumere i principali provvedimenti attesi dai diversi gruppi di lavoro, come ricavato dal documento [114].

Competenze del GL 102 - Isolanti e isolamento. Metodi di calcolo e di prova

A livello nazionale, il gruppo di lavoro GL 102 sta completando la revisione della norma UNI 10349 [115] - *Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici* - che si prevede sia suddivisa in tre parti:

- UNI 10349-1 “Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Medie mensili (e dati orari) per la valutazione della prestazione termo-energetica dell'edificio”.
- UNI 10349-2 “Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati di progetto. Contiene i dati rappresentativi delle condizioni climatiche limite, da utilizzare per il dimensionamento degli impianti tecnici per la climatizzazione estiva ed invernale e per valutare il rischio di surriscaldamento”.
- UNI 10349-3 “Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Differenze di temperatura cumulate (gradi giorno)”.

Ad oggi il CTI ha elaborato gli anni tipo climatici di tutte le Regioni italiane (uno per capoluogo di Provincia). L'anno tipo climatico comprende i valori orari di diverse variabili meteorologiche (irradianza solare globale su piano orizzontale, temperatura, velocità del vento ed umidità relativa). Attualmente il GL 102, sta verificando i risultati ottenuti al fine di procedere con la pubblicazione della UNI 10349-1.

Relativamente alla specifica tecnica UNI/TS 11300 – Parte I, proseguono i lavori di revisione che condurranno alla pubblicazione di una versione aggiornata della norma, mentre sono terminati i lavori relativi al progetto di Raccomandazione tecnica CTI - *Abaco delle strutture costituenti l'involucro opaco degli edifici* - che sostituirà le appendici informative A e B della UNI/TS 11300-1:2008.

Inoltre è competenza del GL 102 la revisione della norma UNI 10351:1994 - *Materiali da costruzione - Caratteristiche termoigrometriche dei materiali* [116]. Tale norma fornisce il metodo per il reperimento dei valori di riferimento per conduttività termica, resistenza al passaggio del vapore e calore specifico dei materiali da costruzione in base all'epoca di installazione. La norma integra quanto non presente nella UNI EN ISO 10456 [94], con particolare riferimento ai materiali isolanti per l'edilizia, e precisa i campi di applicazione e i differenti metodi di valutazione dei valori di conduttività termica, di resistenza al passaggio del vapore e delle correzioni dei parametri termici da utilizzare in base all'epoca di installazione dei materiali.

Il sottogruppo GL 102/SG 06 - *Calcolo del comportamento degli edifici in regime termico non stazionario* – sta lavorando al progetto di specifica tecnica concernente la definizione di assunzioni di base, condizioni al contorno, profili dei carichi per la corretta applicazione e per la validazione di metodi per il calcolo sia delle prestazioni

energetiche in regime termico dinamico degli edifici che della definizione dei carichi termici di progetto estivi e invernali.

Si segnala infine la pubblicazione, il 20 giugno 2013, della UNI EN ISO 13788: *Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia - Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e la condensazione interstiziale - Metodi di calcolo*. Questa è la versione ufficiale in lingua italiana della norma europea EN ISO 13788[118], e fornisce metodi di calcolo per determinare:

- ✘ la temperatura superficiale interna di componenti o elementi edilizi al di sotto della quale è probabile la crescita di muffe, in funzione della temperatura e dell'umidità relative interne;
- ✘ la valutazione del rischio di condensazione interstiziale dovuta alla diffusione del vapore acqueo;
- ✘ il tempo che l'acqua, contenuta in uno strato compreso tra due strati con elevata resistenza al passaggio del vapore, impiega ad asciugare, nonché il rischio di condensazione che può verificarsi in altri strati del componente durante il processo di asciugatura.

Competenze del GL 601 - Impianti di riscaldamento: Progettazione, fabbisogni di energia e sicurezza

Il principale obiettivo del gruppo GL 106 è la revisione della UNI/TS 11300 - Parte II. Come si legge sul sito ufficiale dell'UNI, diverse sono le novità che dovrebbe la versione aggiornata della specifica tecnica, tra le quali il riferimento alla norma europea UNI EN 15193 [42], e dunque la tendenza verso una valutazione semplificata dei fabbisogni di illuminazione artificiale, in accordo con lo spirito e le finalità delle certificazioni energetiche.

Per quanto concerne invece la ventilazione, il calcolo dell'energia termica necessaria per la compensazione delle dispersioni dovute al ricambio dell'aria dovrebbe essere incluso nel fabbisogno per la climatizzazione invernale o estiva. Nell'impostazione generale della UNI/TS 11300 si è infatti deciso di considerare nel fabbisogno energetico per ventilazione solamente quello dovuto alla movimentazione dell'aria nel caso di impianto di pura ventilazione senza trattamenti a carico di unità dedicata o altri generatori di calore, siano essi centralizzati o localizzati. Qualora vi sia quindi un trattamento d'aria, l'impianto è considerato di climatizzazione. Nella revisione della UNI/TS 11300-2, con l'aggiunta del calcolo delle perdite e dei fabbisogni degli impianti di climatizzazione invernale con fluido termo-vettore aria, sarà inoltre evidenziata la connessione tra i fabbisogni del fabbricato e i carichi assegnati ai sistemi

impiantistici che, nella generalità dei casi, possono comprendere più reti e circuiti, sia idronici sia aeraulici.

Alcune modifiche apportate alla futura UNI/TS 11300-2 dovrebbero riguardare i sottosistemi di distribuzione di riscaldamento e di acqua calda sanitaria, con l'inserimento di precisazioni nel caso di reti di ricircolo dell'acqua calda sanitaria e sui regimi di funzionamento per i generatori di calore combinati per il riscaldamento e l'acqua calda sanitaria.

Competenze del GL 602 - Impianti di riscaldamento: Esercizio, conduzione, manutenzione, misure in campo e ispezioni

Nel corso del 2012 il gruppo ha proseguito l'attività relativa allo sviluppo di documenti tecnici a supporto del Ministero dello Sviluppo Economico per la revisione del DPR 59/09 e, in particolare, per la predisposizione di una nuova proposta di decreto relativo all'esercizio, conduzione, manutenzione ed ispezione degli impianti termici. In particolare, il tema delle ispezioni degli impianti di condizionamento ha assunto particolare urgenza a seguito di un parere motivato trasmesso dalla Commissione Europea all'Italia in merito alla non integrale osservanza delle disposizioni europee in materia. A livello ministeriale si è pertanto deciso di pubblicare separatamente il decreto relativo alle ispezioni degli impianti, scorporandolo dalla revisione complessiva del DPR 59 e dal recepimento della Direttiva 2010/31 UE. Pertanto il 25 Giugno 2013 è stato pubblicato sul n.149 della Gazzetta Ufficiale il Decreto del presidente della repubblica 16 aprile 2013, n. 74 - *Regolamento recante definizione dei criteri generali in materia di esercizio, conduzione, controllo, manutenzione e ispezione degli impianti termici per la climatizzazione invernale ed estiva degli edifici e per la preparazione dell'acqua calda per usi igienici sanitari, a norma dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e c), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192*[119].

2.3 Strumenti e metodi per la simulazione energetica degli edifici

Per il calcolo del fabbisogno energetico di un edificio, possono essere adoperati due approcci. Il primo come visto nel paragrafo precedente, si basa su un set di equazioni algebriche che analizzano dal punto di vista macroscopico l'interazione tra l'edificio e l'ambiente esterno e può per questo essere definito *semplificato o anche semi-stazionario*. Il secondo approccio è quello della simulazione termo-energetica dinamica, con cui si tiene conto di tutti quei fenomeni transitori che influenzano notevolmente le prestazioni del sistema edificio/impianti (condizioni climatiche esterne,

affollamento, sistema di illuminazione, inerzia termica dell'involucro edilizio, prestazioni degli impianti di climatizzazione in condizioni di carico parziale, regolazione...).

Le metodologie di calcolo *semplificate o semi-stazionarie*, hanno diversi vantaggi rispetto ad una simulazione dinamica del comportamento del sistema edificio/impianti, tra cui: il numero relativamente minore di dati di input necessari, regole di calcolo facilmente comprensibili, l'identificazione intuitiva e facile correlazione tra ingressi ed uscite. Tuttavia, un tale approccio è considerato insufficiente per descrivere il comportamento di sistemi edificio/impianti più complessi, per i quali dunque si ricorre a strumenti di simulazione dinamica (ad esempio EnergyPlus, ESP-r, TRNSYS, ecc). In sintesi, l'approccio dinamico consente di valutare in regime transitorio i fenomeni di interazione termica tra l'edificio e l'ambiente interno ed esterno nonché di investigare il comportamento di soluzioni innovative, per i quali l'approccio semplificato non è sufficiente.

Le potenzialità della simulazione termo-energetica dinamica dunque sono molteplici e l'elenco seguente è una sintesi dei principali risultati che si possono ottenere con un modello di simulazione dinamica, di norma gestito con passo temporale sub-orario:

- determinazione dei carichi termici e frigoriferi di vari ambienti e di un edificio per il progetto degli impianti di climatizzazione (calcolo di progetto);
- determinazione delle richieste energetiche per riscaldamento e raffrescamento degli edifici per il rispetto di valori prestazionali imposti dalla legislazione e dei valori prestazionali da attribuire all'interno di protocolli di valutazione della sostenibilità (calcolo di stima dei consumi);
- studio dell'andamento orario della temperatura e dell'umidità relativa dell'aria ambiente in assenza di controllo climatico (ambiente in free running);
- analisi delle condizioni di comfort termico e di qualità dell'aria all'interno degli ambienti, in relazione alle richieste energetiche;
- determinazione della richiesta elettrica per l'illuminazione artificiale, che è legata alle caratteristiche dell'edificio, allo sfruttamento degli apporti solari gratuiti e all'efficienza dei sistemi;
- determinazione delle emissioni inquinanti, prodotte dall'esercizio dei sistemi energetici di cui è dotato l'edificio;
- analisi delle prestazioni di impianti alimentati da fonti rinnovabili.

Le principali sfide per il futuro riguardano le variabili d'ingresso: la termo-fisica dell'edificio è studiata a partire da dati di ingresso misurati o stimati con una determinata incertezza, ma è evidente che tale incertezza si ripercuote sull'attendibilità dei dati di output della simulazione. Inoltre, spesso accade che nel confrontare i valori

delle richieste energetiche risultanti dalle simulazioni con quelle misurate ci siano scostamenti anche superiori al 50% o più. Tale divergenza è connessa alla modellazione del comportamento degli occupanti, ad esempio, per cui è opportuno impostare nella simulazione il reale comportamento dell'occupante per quanto attiene l'occupazione dei locali, il profilo di gestione dei set-point di temperatura o all'apertura e chiusura delle finestre.

Nel caso di edifici esistenti, si rende necessario adottare pratiche di simulazione "calibrata", in cui il modello di simulazione non si riferisce ad un edificio virtuale bensì all'edificio reale in cui la calibrazione si fa sulla base di dati misurati. In quest'ottica, il modello di simulazione energetica può essere utilizzato per gli scopi più diversi durante la vita utile dell'edificio, come la previsione dei consumi che si avranno nel futuro in relazione ad interventi di riqualificazione energetica di carattere edilizio o impiantistico, alla modifica del comportamento degli occupanti o alle variazioni delle condizioni meteorologiche.

Altri aspetti di particolare rilevanza, riguardano la standardizzazione dei modelli di simulazione, al fine di migliorare compatibilità e integrazione dei software di simulazione *thermo-energetica* e di migliorare la qualità delle interfacce utente dei software. Inoltre, la simulazione dei sistemi impiantistici per la climatizzazione risulta ancora caratterizzata da notevole complessità e viene quindi affrontata in pochi casi, se non per sudi di dettaglio. Ancora più marginale è l'impiego della simulazione dei sistemi di generazione di energia elettrica distribuita, per i quali invece continuano ad ottenere maggiore consenso software dedicati, quali ad esempio HOMER, MERIT, e RETScreen.

In questo lavoro di tesi di dottorato, per simulare il comportamento energetico del sistema edificio/impianti dei casi studio proposti nei capitoli successivi, è stato utilizzato EnergyPlus v.8.1.0 [60], motore di simulazione che si basa sul metodo delle funzioni di trasferimento e possiede una struttura modulare codificata in Fortran 90, evoluzione della sinergia fra le distinte basi tecniche DOE-2 [121] e BLAST [122] elaborati rispettivamente dal Ministero dell'Energia (Department of Energy, DOE) e dal Ministero della difesa (Department of Defence, DOD) degli Stati Uniti, con il contributo dell'ASHRAE (Technical Committee 4.7 Energy calculation).

Di seguito saranno quindi descritte le caratteristiche principali di EnergyPlus, e le principali tematiche relative alle ipotesi alla base dei modelli matematici risolti dai simulatori come quello utilizzato.

2.3.1 BEPS: Building Energy Performance Simulation

Nelle simulazioni energetiche avanzate sono utilizzati vari codici BEPS - *Building Energy Performance Simulations*- e simulatori, la gran parte di questi è però organizzata su architetture sostanzialmente simili. Di solito, in una prima sezione viene richiesta la creazione del modello, necessaria per la definizione delle proprietà termofisiche dell'edificio, attraverso la caratterizzazione delle superfici opache e di quelle trasparenti, la programmazione dei carichi endogeni (persone, luci e apparecchiature installate), la costruzione dell'impianto asservito all'edificio e dei relativi componenti. In questa stessa fase, avviene anche il caricamento dei dati meteo, che generalmente sono file climatici TRY [123], IWEK [124] o TMY2 [125].

L'algoritmo di risoluzione più comunemente adottato nei codici BEPS è basato sulle funzioni di trasferimento della conduzione (CTF), che rendono possibile la valutazione dei carichi termici che caratterizzano l'edificio, dell'energia richiesta dal sistema HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*) e delle condizioni di comfort realizzabili all'interno. Alcuni simulatori di energia rendono disponibili invece algoritmi basati sul metodo delle differenze finite (tra questi EnergyPlus) consentendo due o più opzioni di calcolo.

Il metodo delle funzioni di trasferimento, proposto per la prima volta da Mitalas nel 1983, si basa sulle Z-trasformate, adatte a descrivere fenomeni con un insieme di dati di tipo discreto [126]. Mitalas dimostrò che, per i sistemi termici, i coefficienti che servono a descrivere il sistema tendono ad annullarsi velocemente e permettono di scrivere una funzione molto semplice e tale da semplificare il calcolo usando un processo iterativo.

Sostanzialmente, dunque, i codici numerici di simulazione dinamica, valutano carichi e fabbisogni risolvendo delle funzioni di trasferimento, che descrivono i fenomeni fisici come l'interrelazione tra variabili d'ingresso (cause) e uscita (effetti).

Bisogna sottolineare che, sebbene l'analisi numerica rappresenti un utile strumento per un'immediata comprensione dell'efficacia delle soluzioni adottate, sia a livello di involucro edilizio che di gestione e progettazione degli impianti, il limite dei codici per le simulazioni energetiche degli edifici è quello di rappresentare tutto l'ambiente esaminato come un singolo nodo, con un'ipotesi forte di ventilazione a perfetta miscelazione (*valutazione zero-dimensionale*). In applicazioni particolari, per esempio quando i fenomeni quali le stratificazioni termiche non sono trascurabili, questo tipo di studio numerico non può dare risultati esaustivi e affidabili. In particolare, questo avviene, per esempio, simulando spazi interni caratterizzati da elevate altezze interne, o quando particolari strategie di diffusione dell'aria - come la ventilazione a dislocamento - sono progettate in modo che una mancanza di uniformità è assegnata

volutamente all'interno dell'ambiente interno, con notevoli differenze per quanto riguarda le condizioni microclimatiche.

In merito a ciò, Drury B. Crawley, uno dei principali sviluppatori di EnergyPlus, ha affermato che *“anche se questo non riflette la realtà fisica, l'unica alternativa attuale è la fluidodinamica computazionale , cioè una simulazione del movimento del fluido (in questo caso aria) complessa e intensiva dal punto di vista computazionale”*.

I codici BEPS implementano i bilanci energetici attraverso una serie di equazioni matematiche che possono essere suddivise in due gruppi principali: il primo, equazione 2.18, contiene la risoluzione di algoritmi relativi alle superfici che delimitano l'edificio (pareti, tetto, finestre, e, in generale, tutte le superfici che compongono l'involucro dell'edificio), il secondo, equazione 2.19, contiene la risoluzione di algoritmi relativi alle condizioni dell'aria indoor [127].

$$q_{i,cond} + q_{i,s-rad} = \sum_{k=1}^N q_{ik,rad} + q_{i,conv} \quad \text{eq 2.18}$$

con:

- $q_{i,cond}$: flusso termico conduttivo che interessa la j-esima superficie;
- $q_{j,s-rad}$: flusso termico tra la j-esima superficie ed una fonte di calore interna o solare;
- $q_{jk,rad}$: flusso termico radiativo tra la superficie j ed una k;
- $q_{j,conv}$: flusso termico convettivo sulla j-esima superficie.

$$\sum_{i=1}^N q_{i,conv} \cdot A_i + Q_{other} - Q_{extract} = (\rho \cdot V_{room} \cdot c_p \cdot \Delta T_{room}) / \Delta t \quad \text{eq 2.19}$$

in cui:

- $\sum_{j=1}^N q_{j,conv}$: scambio termico convettivo tra la j-esima, di area A_j , e l'aria interna;
- $\frac{\rho V_{room} c_p \Delta T_{room}}{\Delta t}$: scambio termico relativo all'aria indoor;
- ρ : densità dell'aria;
- c_p : calore specifico per unità di massa;
- Q_{endo} : guadagni termici dovuti alla presenza di persone, attrezzature, luci artificiali, ecc.;

- Q: carico termico totale che deve essere bilanciato;
- ΔT_{room} : differenza di temperatura rispetto all'aria interna;
- Δt : intervallo di tempo.

La soluzione dell'equazione 2.18 fornisce le temperature delle superfici interne e la quantificazione degli scambi convettivi di energia che coinvolgono quest'ultime, attraverso i quali possono essere valutate, con l'ausilio delle equazioni 2.20 e 2.21, le temperature medie dell'aria interna, così come il carico termico totale che deve essere bilanciato.

$$q_{ik,rad} = h_{ik,rad} \cdot (T_i - T_k) \quad \text{eq 2.20}$$

$$q_{i,conv} = h_{i,conv} \cdot (T_i - T_{i,air}) \quad \text{eq 2.21}$$

dove:

- × $h_{i,rad}$: coefficiente linearizzato di scambio termico radiante;
- × T_i : temperatura della superficie interna I;
- × T_k : temperatura della superficie interna k;
- × $T_{i,aria}$: temperatura dell'aria interna vicino alla superficie k;
- × $h_{i,conv}$: coefficiente di scambio termico convettivo.

Di solito, il coefficiente di $h_{i,conv}$ non è noto e viene stimato attraverso equazioni empiriche o assunto come una costante. Anche per questi motivi, risulta utile un'analisi accoppiata, mediante simulazioni dinamica energetica dell'edificio e studi di fluidodinamica computazionale (CFD) relativo all'ambiente interno.

2.3.2 Introduzione alla simulazione dinamica con il software EnergyPlus

Come precedentemente accennato, uno dei codici BEPS maggiormente utilizzati è EnergyPlus, nato come risposta alle lacune dei software BLAST e DOE-2. I successivi aggiornamenti di questi programmi avevano portato infatti a centinaia di subroutines difficili da gestire nell'implementazione di nuovi algoritmi, creando una confusione sul flusso di informazioni all'interno degli stessi quando i dati venivano o dovevano essere modificati. Inoltre, tali programmi non consentivano di gestire correttamente i feedback da parte del sistema HVAC né di seguire lo sviluppo tecnologico in questo settore.

EnergyPlus è un motore di simulazione, in cui sia i dati di input che quelli di output sono forniti come file di testo ASCII. In particolare, per la creazione dei file di input è disponibile un'interfaccia utente, l'IDF Editor, mentre i file output vengono convertiti dal software stesso in file.csv (comma separate value).

I bilanci energetici, la temperatura interna e le previsioni sulle condizioni di comfort sono ottenuti per mezzo di un algoritmo di risoluzione e di complesse procedure, sulla base di un'analisi integrata e simultanea della costruzione e dei sistemi tecnici. In particolare, EnergyPlus è costituito da un sistema complesso di vari moduli e risolutori numerici, che cooperano per valutare l'energia necessaria per il riscaldamento, la ventilazione ed il raffrescamento degli edifici, sia se prodotta da sistemi tradizionali sia se prodotta da sistemi e fonti energetiche rinnovabili, risolvendo i bilanci di energia quando il sistema è esposto a diverse condizioni ambientali e di funzionamento. La procedura iterativa prevede un continuo scambio di informazioni tra i diversi moduli in parallelo, in modo che i carichi calcolati, in riferimento agli intervalli di tempo specificati dall'utente, siano trasferiti al modulo di simulazione del sistema edificio, in riferimento allo stesso intervallo di tempo.

L'approccio della simulazione integrata rende possibile anche studi più affidabili per quanto riguarda le soluzioni per una migliore regolazione, l'indagine sull'assorbimento o sul desorbimento dell'umidità con riferimento ai componenti per l'edilizia, le potenzialità degli impianti di riscaldamento e raffrescamento radiante e così via.

A differenza dei programmi precedenti, in cui l'informazione sui carichi termici determinati in ambiente veniva inviata in cascata ai componenti impiantistici (Figura 2.12), nella simulazione integrata dell'ambiente e dell'impianto di climatizzazione, l'informazione relativa al carico che l'impianto è effettivamente in grado di bilanciare viene utilizzata per determinare le condizioni di temperatura in ambiente seguendo con ciò un processo iterativo.

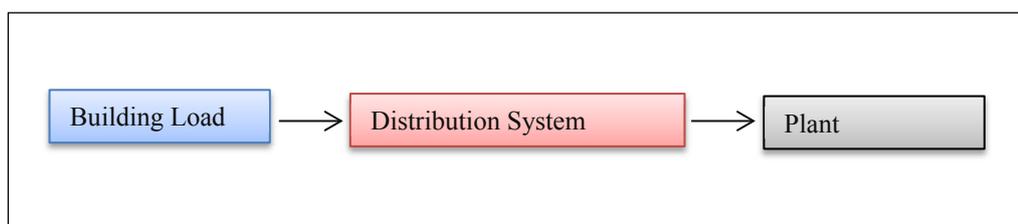


Figura 2.12: Successione dei processi in una simulazione termo-energetica non integrata.

L'architettura del software può essere descritta come l'interazione di tre moduli principali (Figura 2.13):

- × *Surface Heat Balance Manager*: risolve il bilancio termico in corrispondenza di ciascuna parete:
- × *Air Heat Balance Manager*: risolve il bilancio dell'ambiente attraverso la simulazione simultanea degli scambi termici radianti e convettivi;
- × *Building Systems Simulation Manager*: conduce la simulazione dei componenti impiantistici.

Questi moduli principali interagiscono con altri secondari e sono contenuti all'interno dell'*Integrated Solution Manager* che li gestisce simultaneamente e non in cascata. È evidente, dunque, che per ottenere risultati attendibili è necessaria una definizione dettagliata di tutte le condizioni al contorno, in quanto l'architettura interattiva risulta piuttosto complessa.

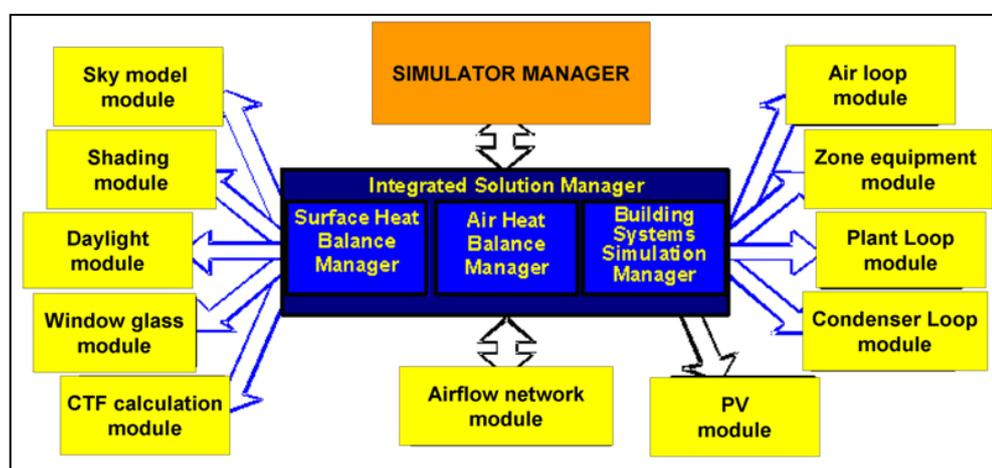


Figura 2.13: Architettura del codice EnergyPlus.
Fonte: Energy Plus Documentation

Il coordinamento tra i moduli avviene attraverso il *Simulation Manager*. Il gestore della simulazione consiste nella sezione di supervisione del codice numerico, che stabilisce e controlla le interazioni simultanee tra gli altri strumenti di simulazione. Questo modulo guida lo scambio di dati tra il risolutore del bilancio termico e i vari sotto-moduli relativi alle simulazioni del sistema HVAC (cioè caldaie, refrigeratori, pompe, ventilatori e tutti gli ausiliari), e amministra le attività del risolutore, fornendo e gestendo le condizioni al contorno in ingresso, nonché i dati in uscita.

L'interazione dei moduli richiede due time-step: uno è quello per l'analisi dell'interazione tra le zone termiche e l'ambiente esterno, che viene definito dall'utente; l'altro variabile e non direttamente modificabile dall'utente è quello per l'analisi dei sistemi di climatizzazione (System time-step).

Il software procede secondo successive iterazioni tra la domanda di energia dell'edificio e l'offerta di energia dell'impianto di climatizzazione: alla prima iterazione si

stima il carico termico dell'ambiente, avendo fissato la temperatura interna pari a quella di set-point. Una volta assunto questo carico termico come potenza richiesta all'impianto, viene simulato il comportamento dell'impianto di climatizzazione e viene stimata l'effettiva potenza termica che questo è in grado di fornire a quell'istante temporale; con questa potenza termica viene determinata l'effettiva temperatura della zona termica avendo approssimato la derivata temporale della temperatura dell'aria, nel termine che rappresenta la variazione di energia interna del sistema, attraverso una differenza finita del terzo ordine. Questa procedura è nota come *predictor/corrector method*.

Le condizioni meteorologiche sono inserite attraverso specifici giorni di progetto definiti dall'utente (allorquando si voglia un calcolo di dimensionamento) oppure sono inserite attraverso un file.epw (EnergyPlus Weather data file) per le simulazioni in condizioni di esercizio. Tali file oltre alle principali grandezze climatiche dell'anno (temperatura, umidità), contengono dati sull'irradianza diretta normale, impiegata nel calcolo della quota diretta della radiazione solare su una superficie comunque orientata avendo assunto un modello di cielo anisotropo. Rispetto ad altri codici di simulazione energetica degli edifici, infatti, una delle caratteristiche di EnergyPlus è la grande attenzione nei confronti delle valutazioni della luce diurna, che viene fatta sulla base del modello *split-flux interreflection* e su un modello di cielo anisotropo.

Il modello di cielo è molto ben costruito, attraverso i dati che riguardano la posizione del sole e la copertura delle nubi. Questa distribuzione non uniforme della radiazione consente il calcolo preciso della radiazione solare diffusa che interessa ogni tipo di superficie dell'edificio esposta al sole. A tal riguardo, il software fornisce modelli dettagliati di luce diurna in modo da rendere valutabili, per mezzo di una sezione specifica di calcolo (modulo di luce diurna), l'illuminazione naturale degli ambienti, fenomeni di abbagliamento attraverso le finestre, l'integrazione di illuminazione artificiale, con le ovvie richieste di energia ad essa collegate e i relativi guadagni termici.

Nelle versioni recenti di EnergyPlus (a partire dalla versione 2.0), viene fornito anche un altro modulo basato su metodi di calcolo *radiosity interreflection*. Questo nuovo modulo è stato introdotto per poter valutare gli effetti radiativi anche in caso di finestre e sistemi complessi di superfici trasparenti, caratterizzati da fenomeni di trasmissione multi direzionale.

2.3.3 Struttura del software EnergyPlus e procedura di simulazione

Al fine di condurre le simulazioni *thermo-energetiche*, come precedentemente accennato, EnergyPlus ha tre componenti: un modulo di simulazione del

comportamento della struttura, un modulo di simulazione dei bilanci di massa e di energia e un modulo di controllo che sovrintende l'intero processo di simulazione (Figura 2.14). Relativamente ai suddetti moduli, nel seguito sono descritte le specifiche funzionalità.

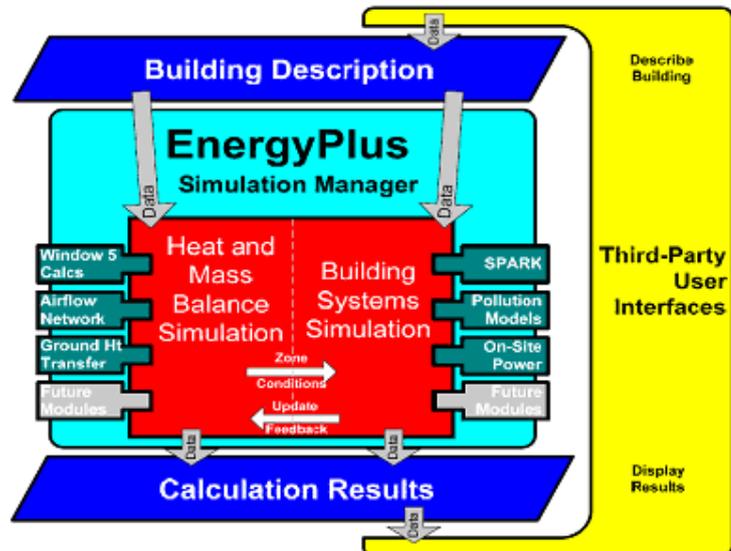


Figura 2.14: Struttura, moduli di calcolo e logica operativa di EnergyPlus.

a) Heat and Mass Balance Simulation

L' Heat and Mass Balance Simulation controlla la simulazione delle zone termiche dell'edificio, nell'ipotesi che in ciascuna zona termica l'aria interna possa essere considerata a temperatura uniforme (*modello zero-dimensionale*). Le altre ipotesi semplificative, relativamente ai modelli di bilancio termico, sono quelle di considerare che le superfici di ogni ambiente abbiano livelli termici uniformi, conduzione in regime monodimensionale, irraggiamento uniforme ad alta e a bassa lunghezza d'onda e superfici uniformemente diffondenti. Come mostrato nella Figura 2.19, il modulo del bilancio di energia e di massa funziona attraverso l'applicazione di strumenti di calcolo diversi:

- Comis: strumento di calcolo flussi d'aria multi-zona, infiltrazioni, aria di ventilazione e di contaminazione;
- Window 5: comprende strumenti di calcolo per i corpi finestrati e modulo del cielo anisotropo;
- Modulo della luce diurna: valuta l'illuminamento interno, l'abbagliamento eventualmente indotto attraverso corpi finestrati ed i sistemi per il controllo dell'abbagliamento accoppiati con i sistemi di controllo per l'illuminazione elettrica;

- Ground Heat Transfer: modulo per il calcolo del profilo di temperatura sotto il suolo e la valutazione delle potenzialità del terreno in pre-riscaldamento e pre-raffreddamento.

Tutti questi moduli rendono possibile, oltre ad un calcolo integrato, la valutazione e la simulazione di diverse soluzioni tecniche. Ad esempio, il modulo Window 5, attraverso precisi risolutori per la trasmissione, la riflessione e l'assorbimento della radiazione solare visibile, consente l'analisi di diversi e complessi sistemi di superfici trasparenti, le persiane, i sistemi di controllo solare e i sistemi di schermatura interni ed esterni, le finestre interne ed esterne con vetri sfumati e elettrocromici.

Per quanto riguarda i calcoli del bilancio di massa e di energia, questi si basano su un'evoluto procedura del BLAST: vale a dire la I-BLAST, che fornisce l'integrazione delle simulazioni del sistema edificio/impianti. Il modulo del bilancio termico gestisce i sotto-moduli per i bilanci di energia, in riferimento all'aria interna e alle superfici dell'involucro edilizio, agendo come un ponte tra il bilancio termico e il gestore della simulazione del sistema edificio.

La costruzione del modello di calcolo dell'edificio avviene attraverso la suddivisione delle zone termiche che lo definiscono. Per ogni parete, sono operati bilanci sul nodo superficiale esterno della parete (bilancio termico superficie esterna) e quello sul nodo superficiale interno della parete (bilancio termico superficie interna) e tra il nodo interno ed esterno viene valutato il flusso termico per conduzione trasmesso all'interno della parete (conduzione attraverso la parete). Sul nodo esterno il bilancio considera la radiazione solare incidente assorbita, la convezione con l'aria esterna, la radiazione ad alta lunghezza d'onda, la conduzione in parete. Sul nodo interno della parete, il bilancio è composto dalle quote relative alla radiazione a bassa lunghezza d'onda, la radiazione solare trasmessa all'interno dell'ambiente attraverso i componenti trasparenti e distribuita sulle varie pareti, la convezione con l'aria interna; radiazione ad alta lunghezza d'onda emessa dalle altre superfici dell'ambiente, la conduzione attraverso la parete.

Il modulo del bilancio di energia risolve lo scambio energetico tra le superfici esterne ed interne dei componenti dell'involucro edilizio, elaborando gli algoritmi di calcolo (*Conduction Transfer Functions CTF* o *Conduction Finite Difference CFD*) rispetto a tutte le condizioni al contorno assegnate, e considerando i contributi convettivi, conduttivi, radiativi. I flussi termici scambiati attraverso i componenti d'involucro sono determinati attraverso una funzione di trasferimento, algoritmo in grado di legare la sollecitazione indotta sul sistema fisico parete con la risposta del sistema. I coefficienti numerici della funzione di trasferimento, di tipo lineare, sono detti fattori di risposta

(*response factor*) e sono raggruppati in quattro serie che vanno a moltiplicare i valori della temperatura superficiale interna, esterna (all'istante considerato e in un certo numero di istanti precedenti) e del flusso termico sulla faccia di interesse (ad un certo numero di istanti precedenti).

Un esempio di CTF è riportato nelle equazioni 2.22e 2.23 nella loro definizione più generica, con riferimento ai flussi che interessano, rispettivamente, le superfici interne e le superfici esterne di un elemento dell'involucro edilizio.

$$q''_{ki}(t) = -Z_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{i,t-j\delta} + Y_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ki,t-j\delta}$$

eq 2.22

$$q''_{ko}(t) = -Y_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + X_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ko,t-j\delta}$$

eq 2.23

Nelle equazioni 2.22 e 2.23 sono presenti i seguenti termini:

- $q''_{ki}(t)$: flusso sulla superficie interna;
- $q''_{ko}(t)$: flusso sulla superficie esterna;
- T_i : temperatura della superficie interna;
- T_o : temperatura della superficie esterna;
- t : intervallo di tempo corrente;
- Z : coefficiente CTF all'interno;
- X : coefficiente CTF all'esterno;
- Y : coefficiente CTF trasversale;
- Φ : coefficiente CTF di flusso.

La serie dei coefficienti dell'equazione lineare, costanti nel tempo, sono i fattori di risposta Z detti *inside CTF coefficients*, Y detti *cross CTF coefficients* e Φ chiamati *flux CTF coefficients*. La serie dei coefficienti X , *outside CTF coefficients*, si impiega nella combinazione lineare per la determinazione del flusso termico in corrispondenza del nodo esterno della parete e va a moltiplicare i valori di temperatura della faccia esterna della parete. I numeri nz ed nq dei fattori di risposta dipendono dal passo di tempo di calcolo considerato e dalla composizione della parete. La determinazione di questi coefficienti può essere fatta con diversi metodi. EnergyPlus adotta la procedura

denominata *state space method* già sviluppata dal software I-BLAST. È evidente che poiché temperatura e flusso sono noti solo sulle superfici, il metodo non fornisce informazioni su quello che accade sugli strati interni della parete.

Le funzioni di trasferimento della conduzione si possono considerare un efficace metodo per valutare gli scambi energetici, poiché legano linearmente i flussi di energia (che interessano ogni faccia del muro) ai livelli di temperatura, attuali e precedenti, e ai fenomeni di scambio termico, in modo da rendere possibile la valutazione dei fenomeni di accumulo termico. Tuttavia, tale metodo numerico di risoluzione, sebbene molto potente, diventa progressivamente più instabile se diminuisce il numero di intervalli di tempo, per cui devono essere garantiti almeno 10-15 bilanci per per ogni ora, il che significa un bilancio di energia ogni cinque minuti per l'intero arco dell'anno.

Rispetto all'Air Heat Balance implementato nel software BLAST, EnergyPlus può simulare anche sistemi di riscaldamento e raffrescamento radianti, attraverso la modellazione di un circuito di acqua calda o refrigerata annegato all'interno di un componente d'involucro: il circuito rappresenta la generazione o sottrazione di calore interna al componente e viene inserito all'interno dello scambio monodimensionale valutato attraverso il metodo delle funzioni di trasferimento.

Ancora con EnergyPlus è possibile adottare modelli di distribuzione dell'aria in ambiente alternativi rispetto a quello della perfetta miscelazione ad esempio quando si vogliono studiare strategie di ventilazione a dislocamento o dal basso, del tipo UFAD (Under Floor Air Distribution).

b) Building System Simulation Manager

Il modulo del bilancio di massa e di energia, come prima descritto, trasmette i risultati di ogni step di simulazione al gestore del sistema di simulazione dell'edificio. Il modulo di simulazione del comportamento della struttura controlla le simulazioni del sistema HVAC, del sistema elettrico, di componenti e dispositivi e delle condizioni delle zone termiche fino al momento dell'inizializzazione, aggiornando le condizioni della zona per quanto riguarda il controllo del microclima indoor (Figura 2.15).

I risultati sono poi ritrasmessi al modulo del bilancio di massa e di energia, in modo che gli effetti dei sistemi HVAC possano essere calcolati nel nuovo bilancio della zona termica. Questa sezione rappresenta una delle principali caratteristiche e peculiarità di EnergyPlus: essa consiste in un metodo di simulazione non-sequenziale, che caratterizza invece tutti i precedenti motori di simulazione energetica di un edificio, in modo da rendere possibile una simulazione pienamente integrata dei carichi, dei sistemi e dei dispositivi energeticamente attivi.

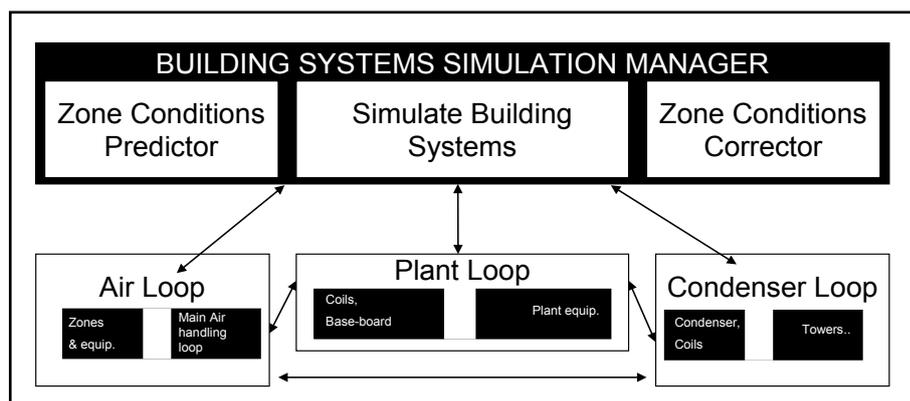


Figura 2.15: Struttura, moduli di calcolo e logica operativa di EnergyPlus.

Il Building System Simulation Manager è basato sulla scomposizione dei componenti di un impianto in tre sotto-sistemi: l'*air loop*, il *plant loop*, il *condenser loop*. L'*air loop* serve a modellare le reti aeruliche e quindi simula i fenomeni di trasporto aereo, l'aria climatizzata e la mandata ed il ritorno di questa attraverso i ventilatori, il riscaldamento e il raffreddamento centralizzato, i dispositivi per il recupero di calore e gli economizzatori per il free-cooling. Sono forniti diverse attrezzature di zona, come ad esempio diffusori, regolatori per la miscelazione, VAV box (Variable Air Volume), unità locali (ventilconvettori, bocchette dell'aria condizionata, unità radianti/convettive ad alta temperatura). Tutti questi dispositivi possono essere definiti in modi diversi e modellati per ciascuna zona termica dell'edificio, o a livello centralizzato.

Il *plant loop* e il *condenser loop* modellano le reti idroniche ed i circuiti di condensazione. Per quanto riguarda il circuito dell'acqua calda e refrigerata, il metodo di soluzione è iterativo. In questa logica, tutti i componenti di rete sono contemporaneamente simulati e quindi le equazioni di controllo sono aggiornate mediante esplicite differenze finite. Questa procedura continua fino a quando non si ottiene la convergenza dei risultati.

La versione attuale (8.1.0) consente di simulare un gran numero di soluzioni per il sistema HVAC e inoltre se ne possono sviluppare di nuove, aggiungendo o rimuovendo componenti specifici.

In linea di principio, l'approccio utilizzato ha un grado di dettaglio inferiore a quello necessario per la simulazione dettagliata di tutti i componenti basata su leggi fisiche, ma questo si può ritenere efficace rispetto a quelli che sono gli obiettivi della simulazione. Ad esempio, usualmente l'efficienza energetica dei sistemi di generazione in condizioni nominali è inserita dall'utente, mentre le prestazioni nelle altre condizioni operative sono determinate attraverso una correlazione funzione del Part Load Ratio (PLR) cioè il rapporto tra la potenza richiesta a carico parziale e la potenza nominale. È possibile inserire correlazioni sotto forma di funzioni polinomiali lineari, quadratiche,

cubiche, biquadratiche, bicubiche, o triquadratiche o funzioni esponenziali. Più in generale, il PLR non è l'unico argomento delle correlazioni. Ad esempio, per i gruppi frigoriferi sono necessari i valori di efficienza a carico totale con le relative condizioni di riferimento e le curve della variazione della potenza frigorifera in funzione delle temperature di lavoro e delle variazioni dell'efficienza in funzione del carico parziale. Nel caso di sonde geotermiche, invece, si procede attraverso il metodo del fattore di risposta del terreno a variazioni di carico di lunga e breve durata [128].

2.3.4 Evoluzione e limiti del software EnergyPlus

Per quanto riguarda il potenziale offerto da EnergyPlus, una delle migliori caratteristiche di questo motore consiste nella possibilità di aggiungere nuove funzionalità e moduli, con una flessibilità molto estesa. Un nuovo modulo può essere aggiunto, implementando dei nuovi risolutori fisici e inserendo questi nelle strutture cicliche, al fine di estendere gli strumenti dei sottoprogrammi.

Nelle ultime versioni quindi EnergyPlus è stato completamente ristrutturato, in modo da avere nuove e innovative capacità di simulazione come:

- simulazione di accumuli di energia sotto forma di ghiaccio;
- modello di Energy Management System che consente di simulare numerose nuove strategie di controllo e regolazione;
- earth tubes, scambiatori di calore interrati in cui circola aria che viene preriscaldata o preraffreddata ;
- sistemi di climatizzazione a volume di refrigerante variabile;
- tetti verdi che considerano non solo le proprietà termofisiche dello strato di coltura ma anche le caratteristiche della vegetazione;
- modello alle differenze finite in aggiunta a quello basato sulle funzioni di trasferimento.

Da quanto riportato emerge, che attualmente EnergyPlus risulta uno dei codici più adatti al fine di simulare il comportamento energetico in transitorio di edifici e impianti, sia per quanto riguarda le condizioni microclimatiche realizzabili che le richieste di energia. Naturalmente, tutti i risultati si riferiscono ad un singolo nodo che rappresenta tutta la zona termica (approccio zero-dimensionale). Così, quando è richiesta un'analisi non nel dominio del tempo, ma nel dominio spaziale, l'uso della fluidodinamica computazionale rimane l'unico metodo di analisi per una simulazione affidabile.

Nessun programma è in grado di gestire ogni possibile situazione di simulazione. Ciò nonostante, l'intento di EnergyPlus è quello di trattare molte opzioni di progettazione degli edifici e dei sistemi HVAC sia direttamente che indirettamente,

attraverso collegamenti con altri programmi per il calcolo dei carichi termici e/o di energia richiesta per la climatizzazione invernale ed estiva.

2.3.5 Confronto tra modelli dinamici e stazionari

Diversi studi in letteratura riportano il confronto deterministico tra l'approccio stazionario e quello dinamico. Beccali et al. [129], Corrado e Fabrizio [130], Jokisalo e Kurnitski [131], Kokogiannakis et al. [132] utilizzando rispettivamente TRNSYS, IDA-ICE, EnergyPlus, ed ESP-r, hanno dimostrato che c'è una differenza di risultati significativa rispetto all'approccio previsto dalle metodologie in semi-stazionario basate sugli standard CEN centrati sulla EN 13790 [58]. Secondo questi studi, tale differenza è causata dal valore utilizzato per i fattori di utilizzazione del flusso di calore e del trasporto di massa. La conclusione di tali studi è stata che, calibrando opportunamente tali fattori di utilizzazione, l'approccio semi-stazionario potrebbe convergere ai risultati di quello dinamico, anche se tale calibrazione non è immediata e soprattutto di difficile generalizzazione rispetto ai molteplici sistemi edificio/impianti che si potrebbe essere interessati ad analizzare. Dijk et al. [133] hanno presentato risultati opposti e cioè che l'approccio stazionario portava a fabbisogni energetici quasi identici a quelli ottenuti con una simulazione in EnergyPlus. In particolare, questi autori riscontrano una differenza nel valore del fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento che potrebbe variare rispettivamente dal 3% al 10% e dal 6% all'8%. Tuttavia, si deve precisare che tale studio è basato su un confronto deterministico tra i due approcci e pertanto, come nella natura di tali tipi di confronto, il risultato è fortemente influenzato dalle variabili di ingresso scelte. Infatti quando le variabili d'ingresso coinvolte nell'analisi possono variare in un ampio range di valori è necessario applicare un approccio stocastico e considerare per le variabili di input una distribuzione di probabilità.

Recentemente Kim et al. [134] hanno proposto un confronto stocastico tra l'approccio stazionario e dinamico per il calcolo delle prestazioni del sistema edificio/impianti, arrivando alla conclusione che solo un'opportuna calibrazione delle equazioni del modello stazionario consente di ottenere risultati convergenti con quelli delle simulazioni dinamiche.

2.4 Dallo studio degli edifici a quello di quartieri e città: Mappe Energetiche Urbane

Come accennato nella premessa di questo capitolo, per perseguire obiettivi di risparmio energetico globali, sono necessari strumenti per la pianificazione energetica a livello di distretto o di comparto urbano. Caratterizzare le prestazioni energetiche di

un gran numero di edifici in tempi veloci, per avere un'idea anche qualitativa dell'efficienza di un centro urbano, richiede evidentemente una metodologia differente rispetto allo studio di dettaglio sul singolo edificio.

Facendo riferimento alla teoria eco-urbanistica [135] e alla logica sistemica [136], una città può essere interpretata come un sistema dinamicamente complesso [137] in cui è possibile individuare, tra gli altri, un certo numero di sottosistemi: il sistema fisico composto dagli spazi, dai contenitori edilizi e dai canali di connessione fra essi ed il sistema funzionale strutturato dalle attività urbane allocate negli spazi o che si trasferiscono lungo i canali. L'interpretazione sistemica per lo studio dei fenomeni urbani rende disponibili gli elementi di base per la costruzione di un ambiente di rappresentazione e sviluppo della conoscenza. Il GIS (*Geographical Information System*) rappresenta, in tal senso, il supporto cognitivo ideale per strutturare un "modello" della città all'interno del quale, i contenitori edilizi, costituiscono le entità di base alle quali agganciare le informazioni [138]. Approfondendo le tematiche relative all'urbanistica e alle tecniche di gestione e pianificazione territoriale, emerge il potenziale elevato insito nei Sistemi Informativi Geografici, che possono fungere utilmente da "ambiente operativo" all'interno del quale è possibile sviluppare nuova conoscenza territoriale e mettere a punto strumenti di gestione e di supporto alle decisioni per l'analisi ed il governo delle trasformazioni territoriali.

Il seguito di questo paragrafo quindi introduce una procedura di analisi che, applicata al trinomio edificio-città-territorio, sfruttando le potenzialità di un Sistema Informativo Territoriale, consente la caratterizzazione energetica del patrimonio edilizio di ampi contesti urbani. La trattazione, oltre a descrivere un nuovo approccio metodologico alla comprensione delle prestazioni energetiche di un territorio urbanizzato, presenta anche l'applicazione della metodologia al centro storico della città di Benevento, per il quale è presentato un modello georeferenziato, attraverso cui determinare i consumi energetici di ciascun edificio.

L'utilizzo del Sistema Informativo Territoriale e un'accurata indagine censuaria hanno permesso l'acquisizione, l'archiviazione, l'analisi e la visualizzazione georeferenziata di dati relativi alle caratteristiche geometriche e termo-fisiche di ciascun edificio, alla destinazione d'uso, all'epoca costruttiva e allo stato abitativo. La domanda di energia, per ogni architettura, è stata determinata incrociando i dati acquisiti con le informazioni ricavabili dalle indagini censuarie (ISTAT / ENEA) e i risultati di correlazioni fisiche predittive, partendo, ad esempio, dall'incidenza della compattezza di un edificio rispetto alla sua domanda di energia per il riscaldamento e la climatizzazione.

Il metodo, i risultati, e la loro affidabilità hanno portato all'elaborazione di “mappe energetiche urbane”, (MEU), che costituiscono uno strumento importante per un'evoluita pianificazione energetica a livello di distretto, sia in termini di controllo del territorio che di valutazione delle potenzialità di riqualificazione. Poter disporre di supporti informativi integrati, quali le MEU, rappresenta un'ulteriore possibilità per i decisori di mettere a punto opportune politiche di governo del “sistema città” improntate al risparmio energetico e ispirate al più generale obiettivo dello sviluppo urbano sostenibile.

2.4.1 Il GIS come strumento di visualizzazione e supporto alla determinazione delle prestazioni energetiche degli edifici

Dal punto di vista semantico, GIS è l'acronimo dell'inglese *Geographical Information System*, traducibile in italiano come Sistema Informativo Geografico (SIG) o Territoriale (SIT). Tale applicativo si configura come un insieme di parti interagenti per produrre informazioni riferibili al territorio e quindi georeferenziate [138].

La georeferenziazione è “il processo attraverso il quale un dato oggetto è posizionato su una carta secondo un sistema di coordinate”. Tale operazione avviene mediante associazione di informazioni ad un'entità geometrica (punto, linea o poligono), idonea alla rappresentazione e posizionata tramite assegnazione di un opportuno sistema di coordinate [139].

Non è semplice riuscire a fornire una definizione univoca ed onnicomprensiva di GIS, ma allo scopo è comunque opportuno operare, preliminarmente, una differenziazione fra il *software GIS (ossia la tecnologia)*, e la *soluzione GIS*, che presuppone l'integrazione di diverse componenti, tecnologiche ed umane.

Per quanto concerne la prima accezione, i *software GIS* si fondano sull'integrazione fra grafica e cartografia computerizzata da una parte, e tecniche di gestione delle banche dati alfanumeriche dall'altra. Questi sono concepiti come pacchetti contenenti vari moduli operativi, autonomi ed interagenti, in grado di gestire tutte le fasi di un processo di lavoro su elementi spaziali, dall'acquisizione del dato (funzioni di input) alla sua restituzione (funzioni di output), passando per le operazioni d'archiviazione, trattamento ed elaborazione delle informazioni. Si tratta dunque di una tecnologia modulare, le cui varie parti sono utilizzate secondo le esigenze e le finalità dell'utenza interessata. Il GIS memorizza le informazioni geografiche come una collezione di layers (strati) tematici che possono essere tra loro relazionati tramite collegamento e sovrapposizione geografica. Ad ogni oggetto grafico spazialmente definito sono associati degli attributi, ossia delle informazioni descrittive necessarie a caratterizzarlo. Si tratta in genere di caratteristiche non grafiche: ad esempio per un elemento puntuale

come un edificio può essere utile conoscere se è adibito a residenza o ad attività produttiva.

La *soluzione GIS*, invece, viene definita da A. Favretto come: un sistema di software, hardware, dati, persone, organizzazioni e accordi istituzionali per raccogliere, registrare, analizzare e distribuire informazioni sulle aree del pianeta terra [139].

Per gestire le informazioni mediante la tecnologia GIS è necessario far precedere la raccolta dei dati, dall'elaborazione di un modello concettuale sufficientemente ampio da comprendere tutti gli oggetti esistenti nell'area da descrivere funzionali allo scopo della ricerca, e sufficientemente elastico da adattarsi alle possibili combinazioni occorrenti nella realtà. Si tratterà, inizialmente, di un modello informale che andrà in seguito ordinato, per quanto possibile, mediante strumenti formali quali equazioni matematiche, modelli analitici e algoritmi.

Rispetto ad una rappresentazione puramente geometrica degli oggetti presenti nella realtà, ad un GIS viene richiesto di mantenere e gestire tutte le informazioni che riguardano le mutue relazioni spaziali tra i diversi elementi, come la connessione, l'adiacenza o l'inclusione, cioè di strutturare i dati definendone anche la topologia. Il modello dati deve essere così elaborato creando categorie di dati secondo coerenza logica e geometrica. Il GIS ha inoltre la capacità di definire la posizione reale di ogni singolo oggetto inserito attraverso l'assegnazione di coordinate di un predefinito sistema di riferimento (o mediante i gradi di latitudine e longitudine utilizzando il sistema geografico) e nelle reali dimensioni e rapporti; le coordinate sono quindi memorizzate senza conversione di scala. E' possibile effettuare conversioni di proiezioni cartografiche e di sistemi di riferimento dei dati, consentendo l'utilizzo contemporaneo di cartografia redatta in paesi diversi o semplicemente con criteri tra loro differenti. Ciò significa poter visualizzare i dati a qualsiasi scala, combinando nello stesso spazio informazioni ricavate anche da carte a differenti scale d'acquisizione; quest'ultima diventa dunque solo un parametro per stabilire il grado di dettaglio della rappresentazione.

Una volta definito il sistema di riferimento ed il modello dei dati, l'archiviazione degli stessi avviene normalmente utilizzando due formati: il formato vettoriale ed il formato raster. Per dati vettoriali si intendono dati geometrici memorizzati attraverso le coordinate dei punti significativi degli elementi stessi; per raster si intendono invece dati memorizzati tramite la creazione di una griglia regolare in cui ad ogni cella viene assegnato un valore alfanumerico che ne rappresenta un attributo. Nelle immagini vettoriali gli oggetti rappresentati possono essere modificati direttamente dall'utente, georeferenziati senza difficoltà ed essere legati attraverso indicatori univoci ad

applicazioni esterne; le immagini raster sono invece un insieme unico nel quale non possono essere modificati gli elementi in esso rappresentati.

Un' ulteriore caratteristica dei GIS, rispetto ai software di cartografia numerica, riguarda la possibilità di elaborare i dati geografici attraverso algoritmi matematici, la cui disponibilità risulta un parametro molto importante per valutare le potenzialità di uno strumento GIS.

I Sistemi Informativi pertanto possono essere utilizzati per molteplici applicazioni, privilegiando, a seconda dei casi, l'uso delle funzioni più idonee alla loro realizzazione, comprendendo una vasta gamma di operazioni, finalizzate a favorire le capacità interpretative, gestionali, critiche e decisionali dell'utenza; tra le tante possiamo indicare:

- × applicazioni per la redazione di cartografia numerica;
- × applicazioni per il monitoraggio ecologico e la pianificazione ambientale;
- × applicazioni per la pianificazione politico-territoriale e la programmazione economico-produttiva;
- × applicazioni per la modellazione di sistemi e loro simulazione o proiezione nel tempo e nello spazio.

Per quanto riguarda, infine, le funzioni operative di un GIS, possiamo classificarne alcune sottolineando che le funzioni stesse rispecchiano la struttura del GIS e prevedono una gamma di operazioni e comandi funzionali al genere di applicazione richiesta. Le principali sono le seguenti:

- × funzioni di acquisizione dei dati;
- × funzioni di interrogazione dei dati;
- × funzioni di analisi e processamento dei dati;
- × funzioni di visualizzazione e presentazione dei dati.

È evidente che un modello così strutturato diviene l'ambiente ideale per l'analisi, la gestione e la pianificazione della città e di un comparto urbano in senso lato. Infatti, la creazione di un Sistema Informativo Territoriale (SIT) che raccolga tutti i dati territoriali (in forma grafica e alfanumerica) e ne consenta l'elaborazione integrata, è uno strumento indispensabile per programmare uno sviluppo armonico e razionale del territorio e per gestirne le criticità [140]. Inoltre, tale ambiente appare particolarmente idoneo per l'archiviazione di dati specifici delle singole unità edilizie e la conseguente determinazione delle prestazioni energetiche degli edifici. Pertanto, attraverso la georeferenziazione e sfruttando le potenzialità della cartografia digitale, è possibile

seguire le trasformazioni della complessa realtà urbana e costruire “scenari” realistici di modificazioni indotte da scelte programmate.

2.4.2 Valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici alla scala urbana: metodologia e applicazione al centro storico di Benevento

Da quanto già esposto, si desume che un SIT permette l’acquisizione, la registrazione, l’analisi e la visualizzazione georeferenziata di un certo numero di livelli informativi all’interno dei quali è possibile relazionare i dati ritenuti necessari per la caratterizzazione del territorio urbano, individuando i punti di maggiore criticità e le potenzialità di interventi di riqualificazione energetica mirati e specifici.

Sfruttando tali potenzialità, in questa Tesi di Dottorato si riporta la caratterizzazione energetica di oltre 500 edifici del centro storico della città campana di Benevento. Tale lavoro è stato oggetto di diverse pubblicazioni internazionali riportate in bibliografia [141], [142], [143].

La metodologia introdotta sarà descritta quindi con riferimento alla sua applicazione; in particolare questa può suddividersi in tre fasi: censimento del centro storico e determinazione dei tipi edilizi (a); calcolo dei fabbisogni energetici per la climatizzazione invernale (b) ed estiva (c) di ciascun edificio; determinazione delle classi di prestazione in regime invernale ed estivo (d).

a. Censimento del centro storico e caratterizzazione dei tipi edilizi

Il livello di approfondimento delle diagnosi energetiche, alla base di una pianificazione urbana orientata alla riqualificazione del patrimonio esistente, è funzione del numero e della qualità di dati caratterizzanti l’edificio. Pertanto la prima fase del lavoro è stata la rilevazione diretta mediante censimento delle principali caratteristiche degli edifici del centro storico in modo da poter ricreare il database da associare alla cartografia digitale. Evidentemente tali informazioni potrebbero essere rese disponibili attraverso la compilazioni di questionari, come quelli dei tradizionalmente distribuiti ed elaborati dall’ ISTAT, oppure creando una piattaforma digitale per implementare un catasto energetico fruibile sia dagli enti di ricerca che dai cittadini. La metodologia di analisi di dati su macro-scala, sviluppata nel seguito di questi paragrafi, consente di dimostrare come potrebbero essere elaborati tali dati per una pianificazione energetica territoriale.

Le principali informazioni che per ciascun edificio si è ritenuto dover rilevare e inserire in un foglio di calcolo elettronico per le successive elaborazione sono i seguenti:

- destinazione d’uso;

- numero di piani;
- epoca di costruzione;
- stato abitativo;
- numero di appartamenti per piano;
- numero di edifici limitrofi;
- indice di contiguità tra gli edifici;
- tipo di schermature se presenti.

In Figura 2.16 si riporta la suddivisione percentuale rispetto al numero di piani degli edifici e si osserva che poiché si tratta di un centro storico, le altezze sono abbastanza proporzionate e circa l'80% degli edifici ha tra due e tre piani.

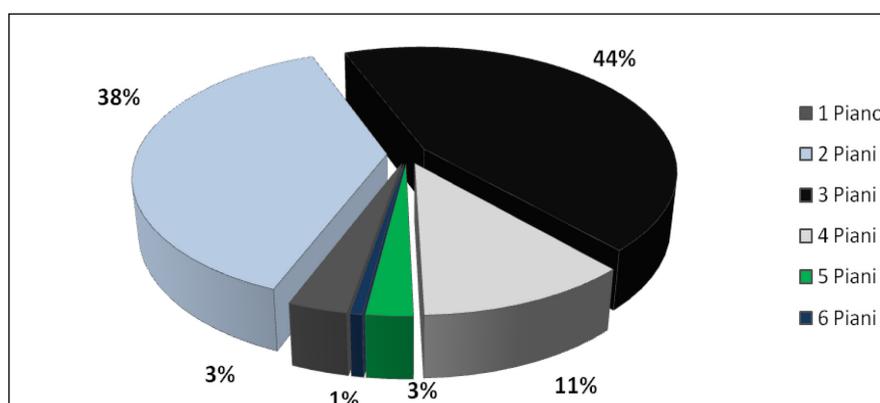


Figura 2.16: Percentuale per numero di piani degli edifici del centro storico di Benevento.

Dai dati raccolti è risultato che il 95% degli edifici sono stati realizzati in muratura portante mentre i restanti in calcestruzzo armato. Questa stima risulta fondamentale per determinare struttura e composizione dell'involucro esterno e l'altezza media di interpiano e totale. Infatti, facendo riferimento ai dati pubblicati nel Bollettino Ufficiale della Regione Campania numero 27 [144] - *Proposta di Piano Energetico Ambientale Regionale della Campania e avvio delle attività di consultazione, di valutazione ambientale, e di stesura del Piano d'azione per l'Energia e l'Ambiente*- l'altezza media per abitazione è stata assunta per gli edifici in muratura di 4 metri e per quelli in cemento armato di 3 metri. Incrociando le tipologie edilizie più comuni nella regione, come ricavate dall'elaborazione dei dati sulla vulnerabilità sismica delle Regioni del Mezzogiorno ed i dati censiti, si assume per gli edifici in muratura di tufo un valore di trasmittanza termica dell'involucro verticale opaco di $0.75 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, mentre per gli edifici in cemento armato di $0.94 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Inoltre, considerando la tipologia edilizia e l'epoca di costruzione rilevata, si è assunto che la maggior parte degli edifici abbia solai in calcestruzzo armato con travetti e tabelle, e la loro trasmittanza è stata assunta

pari a $1.04 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Dalle valutazioni riportate nel PEAR si evince che nella quasi totalità degli edifici si sono sostituiti infissi con vetrocamera semplice in luogo del vetro monolitico per cui il valore assunto per la trasmittanza è stato $3.0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ [144].

La dispersione per ponti termici nelle strutture in muratura portante è stata posta pari al 10% delle dispersioni per trasmissione attraverso l'involucro, mentre per le strutture in calcestruzzo armato il coefficiente maggiorato è stato del 20%.

Il perimetro di ciascun edificio, considerando una geometria poligonale media statistica, è stato ricavato dalla conoscenza dei dati del censimento ISTAT 2001 [145]. Noti perciò il numero di piani è stata ricavata la superficie totale, il volume lordo condizionato e la superficie opaca verticale di ciascun edificio. Per la superficie trasparente, si è considerato un valore medio del 12% di quella totale. Il dato è stato ricavato in funzione del numero di finestre censite per ciascun edificio.

Relativamente al carico di ventilazione, il numero di ricambi orari (ACH, h^{-1}) è stato scelto in funzione della destinazione d'uso conformemente a quanto prescritto dalla UNI/TS 11300 – Parte I. Facendo riferimento al prospetto 8 della stessa specifica tecnica, attraverso opportune medie, si è determinato il carico interno, somma del carico relativo alle persone ai macchinari e all'illuminazione, in funzione della destinazione d'uso. I valori usati sono riassunti in Tabella 2.5 con l'indicazione percentuale delle destinazioni d'uso censite.

Destinazione d'uso	Distribuzione [%]	ACH [h^{-1}]	Carico interno [W/m^2]
Monumenti	4.0	0.4	4.0
Edifici residenziali	52.0	0.3	8.0
Edifici pubblici/commerciali	21.0	1.0	7.0
Edifici commerciali/residenziali	23.0	0.7	6.0

Tabella 2.5: Distribuzione percentuale delle destinazioni d'uso e correlati tassi di rinnovo e carico interno.

Data la sua importanza, sul bilancio energetico, particolarmente accurata è stata la determinazione del rapporto di forma superficie disperdente e volume lordo riscaldato (S/V). Il valore assegnato a ciascun edificio censito tiene conto del numero di piani e del numero di contiguità effettivamente rilevate a cui è associata l'informazione sul numero di piani degli edifici adiacenti.

Da una geometrica scomposizione (Figura 2.17) delle superfici verticali di ciascun edificio si determina la superficie laterale totale per esposizione. Avendo a disposizione il numero di contiguità e potendo determinare dalla cartografia l'identificativo degli edifici contigui, si risale all'effettiva superficie laterale disperdente, attraverso una

riduzione percentuale mediante un coefficiente che contiene l'informazione sul numero di piani e sull'altezza degli edifici adiacenti.

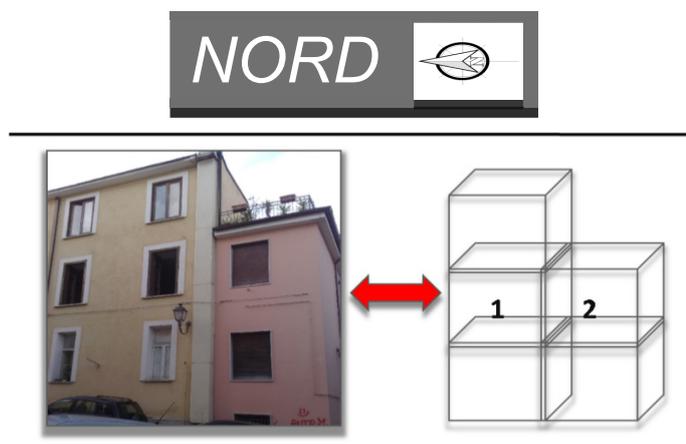


Figura 2.17: Immagine reale e schema semplificato di due edifici contigui Benevento.

Si riporta un calcolo d'esempio per due costruzioni contigue (Figura 2.17) definite genericamente "edificio1" (3 piani, altezza 12 m) e "edificio2" (2 piani, altezza 8 m). La superficie è calcolata come:

$$S_D = (2 * S_{S-P}) + \sum_i (C_c * S_i) \quad \text{eq 2.24}$$

Dove:

- ✓ $2 * S_{S-P}$ è la somma delle superfici rappresentanti il soffitto ed il pavimento;
- ✓ S_i è la superficie laterale dell'i-sima esposizione;
- ✓ C_c è il coefficiente di contiguità.

I coefficienti di contiguità per l'edificio2 sono: "0" a nord; "1" a sud, est e ovest; per l'edificio1 sono: "1" a nord, est e ovest, "2/3" a sud.

Tale procedimento è stato applicato a tutti gli edifici censiti. La superficie disperdente totale è stata utilizzata per calcolare il rapporto di forma (S/V), mentre i valori relativi alla superficie laterale, suddivisi per esposizione, sono stati utilizzati per i bilanci di potenza in regime estivo come sarà spiegato in seguito.

b. Determinazione del fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento

Relativamente al fabbisogno energetico in climatizzazione invernale, poiché l'obiettivo è quello di individuare la classe energetica degli edifici. La procedura adottata si basa sul metodo di calcolo in condizioni standard come previsto dalle UNI/TS 11300, assumendo una temperatura interna costante di 20°C e una durata

della stagione di riscaldamento funzione della zona climatica. In particolare in Tabella 2.6 sono riportati i dati relativi alla città di Benevento.

Zona climatica	Gradi giorno	Ore giornaliere di riscaldamento	Periodo di funzionamento
C	1.316	10	Dal 15/11 al 31/03

Tabella 2.6: Zona climatica, gradi giorno, ore giornaliere di riscaldamento e periodo di riscaldamento per la città di Benevento (D.P.R 412/93).

L'Equazione adoperata è la 2.1, in cui il fattore di utilizzazione degli apporti gratuiti ($\eta_{H,GN}$) è stato posto pari 0.80. Tale valore utilizzato può considerarsi affidabile rispetto alle condizioni al contorno applicate con riferimento ai guadagni interni e alle caratteristiche termofisiche utilizzate. Infatti, sebbene per una valutazione rigorosa tale coefficiente deve essere calcolato come definito precedentemente, quando l'obiettivo è un'analisi su macro-scala è necessario considerare valori medi in funzione delle assunzioni fatte.

Invece, con riferimento ai guadagni solari, questi dipendono dall'esposizione, dall'area e dalle caratteristiche termofisiche del componente finestrato. Con l'approccio proposto, gli apporti termici solari per ogni mese della stagione di riscaldamento e per ciascun elemento finestrato censito, sono stati valutati attraverso l'equazione 2.25.

$$Q_{SOL} = \sum_{mese} \sum_i R_i \cdot g \cdot S_{f,i} \quad \text{eq 2.25}$$

In quest'espressione, R_i rappresenta l'irradiazione solare globale mensile su superficie verticale per esposizione come riportata in Tabella 2.7 [117], "g" è la trasmittanza di energia solare pari a 0.75 per un doppio vetro chiaro [33] e $S_{f,i}$ è la superficie finestrata dell'i-sima esposizione.

	Irradiazione solare globale mensile [MJ/m ²]			
	Nord	Sud	Est	Ovest
Gennaio	2.00	8.80	4.30	4.30
Febbraio	2.90	10.70	6.40	6.40
Marzo	4.00	11.40	9.10	9.10
Novembre	2.30	9.70	5.00	5.00
Dicembre	1.80	7.70	3.70	3.70

Tabella 2.7: Irradiazione solare globale mensile su superficie verticale per Benevento.

Secondo quanto previsto dallo standard UNI/TS 11300-Parte II [34], il rendimento dell'impianto di riscaldamento è stato valutato, in maniera semplificata, come prodotto del rendimento dei sottosistemi in cui si può suddividere l'impianto. Considerando che circa il 50% degli impianti esistenti ha subito una ristrutturazione, i rendimenti considerati per i vari sottosistemi sono riportati in Tabella 2.8.

Per quanto assunto sulla percentuale di ristrutturazione, il rendimento globale medio stagionale dell'impianto, mediato per il singolo edificio, risulta di 0.75. Noto questo si può calcolare per ciascun edificio il fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento come rapporto tra il fabbisogno di energia termica per il riscaldamento e il rendimento globale dell'impianto di riscaldamento.

Sottosistema	Impianti non ristrutturati (50%)	Impianti ristrutturati (50%)
Emissione	0.95	0.93
Regolazione	0.93	0.93
Distribuzione	0.88	0.99
Generazione	0.90	0.93

Tabella 2.8: Sintesi dei valori utilizzati per i rendimenti dei sottosistemi.

Per stimare l'attendibilità dei risultati ottenuti si è confrontato il valor medio ottenuto di fabbisogno con quello ricavabile dai dati ISTAT [145]. Pertanto, valutando il peso che la provincia di Benevento ha sui consumi regionali, attraverso i dati contenuti nel PEAR [144] e nei bilanci ENEA [146] si ottiene un fabbisogno medio provinciale di 83.2 kWh/(m² anno). Poiché il fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione invernale medio, ricavato applicando la metodologia precedentemente esposta a tutti gli edifici del centro storico di Benevento, è risultato essere pari a 87.7 kWh/(m²anno) si ha uno scostamento in termini globali del 5%. Tale valore esalta la coerenza dell'analisi effettuata.

Come ulteriore verifica il valore del fabbisogno calcolato è stato confrontato con quello reale di cinque edifici interessati da studi di settore dettagliati [147] e/o per i quali si disponeva dei dati delle fatture energetiche. Lo scostamento percentuale riassunto in Tabella 2.9 mostra che c'è un'ottima convergenza dei risultati.

Dal confronto si evince che per quattro edifici si ha un'ottima convergenza. Ancora, l'edificio con il maggiore scostamento (Palazzo San Domenico) consente di evidenziare che metodologie globali e semplificate, come quella proposta, non riescono a tener conto di condizioni particolari presenti sia nella struttura che nella distribuzione della destinazione d'uso degli edifici, e che spesso il profilo di utilizzo reale degli impianti è molto differente da quello prescritto per un calcolo in condizioni standard.

	EP _i calcolato [kWh/(m ² anno)]	EP _i bolletta [kWh/(m ² anno)]	Scostamento [%]
R-cost	102.8	95.4	≈ 7%
Palazzo San Domenico	115.5	167.0	≈ 44%
Palazzo Bosco Lucarelli	121.6	130.1	≈ 6%
Palazzo Giannone	130.1	142.1	≈ 8%
Palazzo Ex-Inps	127.7	134.2	≈ 5%

Tabella 2.9: Confronto tra l'indice di prestazione calcolato e desunto da bolletta.

Un'ultima validazione è stata fatta confrontando i risultati calcolati con quelli ricavati da simulazione dinamica con EnergyPlus. Il confronto è stato fatto per tre tipologie di edifici e dunque destinazioni d'uso:

- un edificio storico adibito ad uffici (Palazzo Bosco Lucarelli) [147];
- un edificio residenziale con struttura in cemento armato tipica della seconda metà del 1900 e qui indicata come "Y-70 building";
- un edificio residenziale costruito secondo gli standard imposti dalla normativa vigente in materia di efficienza energetica (Y-2010 Building).

Anche questo confronto, riportato in Tabella 2.10, mostra una buona convergenza dei risultati.

Edificio	EP _i calcolato	EP _i simulato	Scostamento
	[kWh/(m ² anno)]	[kWh/(m ² anno)]	[%]
Palazzo "Bosco Lucarelli"	124.6	130.1	≈ 4%
Y_70 building	75.6	80.4	≈ 6%
Y_2010 building	29.8	32.9	≈ 10%

Tabella 2.10: Confronto tra l'indice di prestazione calcolato e quello determinato attraverso la simulazione dinamica.

c. Determinazione del fabbisogno di energia primaria per il raffrescamento

In Italia, ancora frammentaria e incompleta è la normativa relativa al risparmio energetico in regime estivo, di prioritaria importanza nei climi mediterranei. In merito, si è già scritto che la specifica tecnica UNI/TS 11300– Parte III è ancora in fase di revisione e non risulta citata nel D.P.R. 59/2009. D'altra parte però, soprattutto nelle regioni del Sud Italia, i fabbisogni per la climatizzazione estiva possono essere comparabili se non maggiori di quelli per la climatizzazione estiva. In questa analisi, pertanto, si presenta una metodologia semplificata ma affidabile per determinare i fabbisogni per la climatizzazione estiva.

In particolare, con la procedura proposta e applicata al centro storico di Benevento, il fabbisogno termico per la climatizzazione estiva viene valutato a partire dal calcolo del carico termico estivo (L_C) come somma algebrica delle seguenti potenze termiche (eq2.26):

$$L_C = \left(L_{C,TR} + L_{C,WINDOWS} \right) \cdot \gamma_C + L_{C,GROUND} + L_{C,SOL} + L_{C,END} + L_{C,VE} \quad \text{eq 2.26}$$

In cui:

- $L_{C,TR}$: potenza termica attraverso le superfici opache;
- $L_{C,WINDOWS}$: potenza termica attraverso le superfici trasparenti per conduzione e convezione;
- $L_{C,GROUND}$: potenza termica attraverso lo scambio termico con il terreno;
- $L_{C,SOL}$: potenza termica attraverso le superfici trasparenti per irraggiamento;
- $L_{C,VE}$: potenza termica dovuta all'infiltrazione di aria esterna o ricambi gestiti dall'impianto;
- $L_{C,END}$: potenza termica dovuta ai carichi interni.

In particolare, la potenza termica per trasmissione attraverso le strutture opache è calcolata per ciascuna delle pareti disperdenti che delimitano l'edificio come nell'equazione 2.27, in cui S indica la superficie opaca considerata e U la trasmittanza termica dell'elemento.

$$L_{C,TR} = U_{WALL} \cdot S_{WALL} \cdot \Delta T_{EQ} \quad \text{eq 2.27}$$

Alla determinazione del carico termico dovuto alle pareti esterne e il tetto concorre non solo la trasmissione dovuta alla differenza di temperatura tra l'aria che lambisce la superficie esterna ed interna, ma anche l'azione della radiazione solare sulla superficie esterna della struttura. Per conoscere il flusso di calore attraverso le strutture opache, si ricorre al concetto di differenza di temperatura equivalente (ΔT_{EQ}). Idealmente, si tratta della differenza che determina, attraverso il muro esterno o il tetto, un flusso di calore pari a quello indotto dalla radiazione solare e dalla differenza di temperatura reale tra l'esterno e l'interno, considerando anche la massa della parete e quindi la sua capacità termica, che attenua e sfasa la trasmissione del calore.

Il ΔT_{EQ} pertanto tiene conto di: a) massa inerziale della parte, b) escursione giornaliera della temperature; c) colore della superficie esterna (da cui dipende il coefficiente di assorbimento); d) latitudine e mese considerato [149].

La Tabella 2.11 riporta il valore del ΔT_{EQ} del mese di Luglio per le pareti verticali opache (muri di colore scuro) e il solaio di copertura, con riferimento ad un' escursione termica giornaliera di 11°C e 40° di latitudine Nord. La determinazione della massa frontale presuppone la conoscenza esatta degli strati e degli spessori costituenti l'involucro edilizio; non avendo tali dati, si riferiscono alle ipotesi esemplificative contenute nella normativa tecnica. Infine, si ricava il valore delle correzioni da apportare a ΔT_{EQ} in base all'escursione termica giornaliera e alla differenza tra temperatura esterna massima e la temperatura interna. Per Benevento queste sono rispettivamente 13°C e 6°C per cui la correzione da apportare è -3, secondo il metodo Pizzetti-Carrier.

Building Structure	ΔT_{EQ} alle ore 15.00 [°C]			
	Nord	Sud	Est	Ovest
Edifici in muratura ($\approx 300 \text{ kg/m}^2$)	1.2	13.6	6.9	10.2
Edifici in cemento armato ($\approx 700 \text{ kg/m}^2$)	0.2	3.6	10.8	5.3
Solaio di copertura ($\approx 300 \text{ kg/m}^2$)	16.9	16.9	16.9	16.9

Tabella 2.11: Differenza di temperatura equivalente per pareti verticali opache e solaio di copertura.

La potenza termica entrante attraverso le superfici trasparenti è somma di due contributi: radiativo e conduttivo-convettivo legato alla differenza di temperatura fra esterno e interno. Il flusso termico dovuto alla differenza di temperatura tra l'ambiente interno e l'esterno viene calcolato (eq 2.28) attraverso l'espressione della trasmissione del flusso termico relativa al regime stazionario:

$$L_{C,WINDOWS} = U_{WINDOWS} \cdot S_{WINDOWS} \cdot (T_{EXT} - T_{INT}) \quad \text{eq 2.28}$$

Nell' equazione S ed U rappresentano rispettivamente l'area e la trasmittanza del component finestrato. Per il calcolo del carico di picco, si considera la temperatura esterna pari a 32°C e una temperatura interna costante e pari a 26°C [33]. Il totale del carico termico per trasmissione è incrementato del 15% per tener conto dei ponti termici (γ_C).

Il contributo radiativo invece viene calcolato come nel caso invernale attraverso l'equazione 2.25, in cui però R è il valore dell'irradianza solare massima estiva incidente così come ricavata dal Prospetto XVII della norma UNI 10349 in funzione della latitudine (Tabella 2.12).

La potenza termica dovuta allo scambio termico con il terreno è stata calcolata mediante l'equazione 2.29 in cui S ed U sono l'area e la trasmittanza del solaio di terra.

Irradianza solare su superficie verticale alle ore 15:00 [W/m ²]			
Nord	Sud	Est	Ovest
126.5	267.5	122.0	718.0

Tabella 2.12: Irradianza solare massima estiva incidente su superfici verticali.

Per stimare lo scambio termico con il terreno si considera una temperatura del terreno (T_{GROUND}) costante pari a 13°C.

$$L_{C,GROUND} = U_{BAS} \cdot S_{BAS} \cdot (T_{GROUND} - T_{INT}) \quad \text{eq 2.29}$$

Infine, per la potenza termica dovuta ai carichi interni (dispositivi di illuminazione, dispositivi elettrici, contributo dovuto alle persone) e la potenza termica dovuta all'infiltrazione di aria esterna o ai ricambi gestiti dall'impianto, valgono le scelte fatte nel calcolo per il regime invernale.

Nella metodologia proposta si considerano solo gli scambi termici sensibili. Anche se il trascurare di carico latente potrebbe essere piuttosto limitativo, il tipo di impianti di condizionamento comunemente utilizzati per le applicazioni commerciali/residenziali (come quelli analizzati) consentono il controllo solo della temperatura, senza permettere regolazione dei parametri igrometrici interni. Da questo punto di vista il metodo è conforme a quello dello standard EN 13790 [58].

Il bilancio di potenza è stato scritto in più ore del giorno per determinare la condizione di carico maggiore, che è risultata, mediamente per tutto il centro storico alle ore 15.00. Nel seguito, si presenteranno i risultati che fanno riferimento all'ora solare indicata.

Il passaggio da potenza termica a fabbisogno termico avviene considerando un numero di ore di funzionamento dell'impianto per la stagione estiva funzione del contesto climatico (a Benevento, dal primo Giugno al trenta Settembre). Si ricava, in questo modo, una energia stagionale fittizia ($Q_{FICTIOUS-TOTAL}$). Tale valore può essere considerata come somma di due contributi:

- un'aliquota funzione della temperatura $Q_{FICTIOUS-F(T)}$,
- un'aliquota funzione della irradiazione solare $Q_{FICTIOUS-F(I)}$.

Poiché uno degli obiettivi nello sviluppo della ricerca è quello di definire un metodo di calcolo ripetibile, si possono introdurre dei coefficienti correttivi in termini di percentuali di riduzione di fabbisogno attraverso un'analisi parametrica con modelli di simulazione dinamici.

Dato un “edificio - campione”, rappresentativo della realtà urbana in termini di tipologia costruttiva, si studia la variazione del carico termico durante la giornata in funzione della presenza nonché della distanza di edifici nell’intorno. Il numero di simulazioni è proporzionale alle distanze che si ritengono significative rispetto al contesto analizzato. In questo lavoro, la simulazione dinamica è stata fatta con EnergyPlus mediante l’interfaccia grafica Design Builder.

In base a queste stime, per il centro storico di Benevento $Q_{\text{FICTIOUS-F(T)}}$ è il 20% dell’energia totale e $Q_{\text{FICTIOUS-F(I)}}$ è il restante 80%. Queste due aliquote devono essere opportunamente mediate prima di essere sommate per ottenere il fabbisogno termico totale per la stagione estiva ($Q_{\text{C,DRAFT}}$).

Tale correzione può essere fatta per la prima aliquota pesando la temperatura sole-aria media (T_{AVERAGE}) nella stagione di riferimento rispetto alla temperatura sole-aria²⁴ di picco (T_{PEAK}) nella stessa stagione; la seconda correzione può essere effettuata pesando l’irradianza solare media mensile (I_{AVERAGE}) dei mesi considerati rispetto all’irradianza solare massima estiva (I_{PEAK}), come indicato nell’equazione 2.30.

$$Q_{\text{C,DRAFT}} = \left(Q_{\text{FICTIOUS-F(T)}} \cdot \frac{T_{\text{AVERAGE}}}{T_{\text{PEAK}}} \right) + \left(Q_{\text{FICTIOUS-F(I)}} \cdot \frac{I_{\text{AVERAGE}}}{I_{\text{PEAK}}} \right) \quad \text{eq 2.30}$$

Per la città di Benevento, utilizzando i prospetti VI, VII e XVII della UNI 10349, si ricavano i valori in Tabella 2.13.

T_{AVERAGE}	T_{PEAK}	I_{AVERAGE}	I_{PEAK}
26.1°C	48.7 °C	262 W/m ²	941 W/m ²

Tabella 2.13: Temperatura sole aria e irradianza per Benevento.

Evidentemente il valore indicato con $Q_{\text{C,DRAFT}}$ non rappresenta il fabbisogno reale, poiché non si è tenuto conto dell’effetto di ombreggiamento indotto da vegetazione ed edifici limitrofi. Nel concreto, si individuano le situazioni statisticamente più ricorrenti nella geografia del territorio e, riducendo ad un certo numero di “distanze significative” l’influenza di edifici limitrofi indipendentemente dall’esposizione su cui vanno ad influire, si ricavano le percentuali con cui correggere il valore del fabbisogno rispetto al caso ritenuto “edificio-base” in termini di tipologia costruttiva, destinazione d’uso e numero di piani. In particolare, per il centro storico di Benevento Facendo si hanno in totale 16 casi possibili per i quali sono stati costruiti i modelli simulati con EnergyPlus.

²⁴ La temperature sole aria è un numero fittizio che definisce una temperature dell’aria esterna che in assenza di scambio radiativo causerebbe lo stesso flusso termico attraverso la superficie esterna causato dalla combinazione di differenza di temperatura e irradiazione.

In particolare, considerando la particolare caratteristica del centro storico, contiguità e distanza sono riassunte in tre situazioni tipo:

- l'ombreggiamento dovuto ad un edificio limitrofo equivale al caso di ombre proiettate da una distanza maggiore di 10 m;
- l'ombreggiamento dovuto a due edifici limitrofi equivale al caso di ombre proiettate da distanza compresa tra i 4 e 10m;
- l'ombreggiamento dovuto a tre edifici limitrofi equivale al caso di ombre proiettate da distanza minore di 4 m.

La figura seguente mostra il caso di un edificio di quattro piani e uno di un solo piano con tre edifici limitrofi.

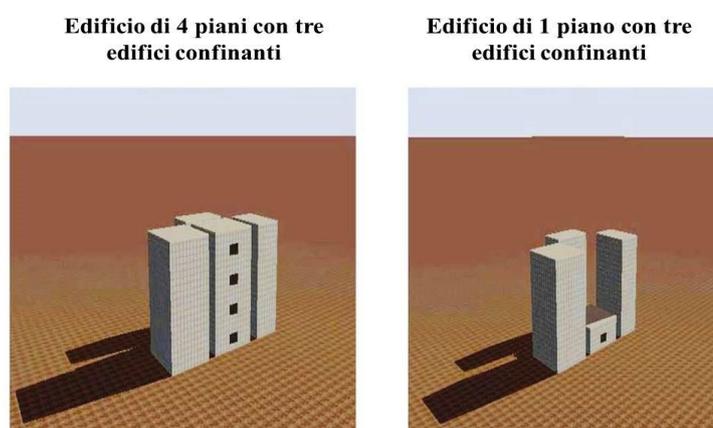


Figura 2.18: Modelli di simulazione per l'ombreggiamento.

La Tabella 2.14 riassume, con riferimento alle 16 combinazioni individuate, la riduzione percentuale da applicare rispetto al caso base (edificio senza ombre proiettate da edifici confinanti).

Utilizzando le percentuali ricavate, è stato corretto il valore del fabbisogno come riportato nell'equazione 2.31:

$$Q_C = Q_{C,DRAFT} \cdot \% REDUCTION \quad \text{eq 2.31}$$

Infine, per determinare la qualità del centro storico, si assume che il fabbisogno calcolato come descritto, stimi l'indice di prestazione termica dell'edificio per il raffrescamento ($EP_{e,inv}$), espresso in kWh/(m²anno) e utilizzando il sistema di classificazione per il regime estivo indicato nelle Linee Guida del 26/06/2009, si ottiene la qualità energetiche dell'insieme di edifici.

CASO	Numero di edifici limitrofi	Numero di piani	Riduzione rispetto al caso base [%]
A	3	4	34.9
B	2	4	28.2
C	1	4	14.2
D	0	4	0.0 (Base-building 1)
E	3	3	37.1
F	2	3	30.8
G	1	3	15.5
H	0	3	0.0 (Base-building 2)
I	3	2	39.0
L	2	2	33.1
M	1	2	18.0
N	0	2	0.0 (Base-building 3)
O	3	1	41.7
P	2	1	35.2
Q	1	1	18.7
R	0	1	0.0 (Base-building 4)

Tabella 2.14: Effetto dell'ombreggiamento: riduzione del carico di raffreddamento rispetto al caso base (edificio senza edifici confinanti).

Per quanto riguarda il fabbisogno estivo, non solo non ci sono dati medi pubblicati con cui poter tarare le metodologie di calcolo in studio, ma risulta complesso anche utilizzare le bollette energetiche. Infatti i dispositivi installati per il raffrescamento estivo sono spesso ad alimentazione elettrica, per cui bisognerebbe poter disaggregare il dato relativo alle macchine per il condizionamento da quello delle altre utenze elettriche. Si dovrebbero, quindi, elaborare dei modelli che permettano di attribuire ai diversi carichi il relativo contributo al consumo totale, attraverso le informazioni sulle modalità di utilizzo delle varie apparecchiature. Questi limiti consentono di evidenziare l'assoluta novità della metodologia proposta. È stato possibile, infatti, ricostruire il fabbisogno per il raffrescamento di un elevato numero di edifici che si possono considerare rappresentativi del building stock dei centri storici italiani. Tali valori possono essere usati in altre pubblicazioni scientifiche come dato di confronto o di partenza.

Per stabilire la veridicità dei risultati ottenuti, è stato utilizzato lo stesso metodo già esposto per il caso invernale e quindi la comparazione con i dati resi disponibili da studi di dettaglio o attraverso modelli simulati in EnergyPlus. In particolare la Tabella 2.15 mostra lo scostamento percentuale rispetto ai valori ottenuti per gli edifici di cui si disponevano i dati per stimare il fabbisogno, mentre la Tabella 2.16 mostra, come nel

caso invernale, lo scostamento che si avrebbe con studi di dettaglio attraverso la simulazione termo-energetica dinamica.

	EP _{e,inv} calcolato [kWh/(m ² anno)]	EP _{e,inv} bolletta [kWh/(m ² anno)]	Scostamento [%]
R-cost	34.6	32.1	≈ 7%
Palazzo Bosco Lucarelli	20.5	19.1	≈ 7%
Palazzo Giannone	25.6	23.3	≈ 9%
Palazzo Ex-Inps	27.3	25.7	≈ 7%

Tabella 2.15: Confronto tra l'indice di prestazione calcolato e desunto da bolletta.

Edificio	EP _{e,inv} calcolato [kWh/(m ² anno)]	EP _{e,inv} simulato [kWh/(m ² anno)]	Scostamento [%]
Palazzo "Bosco Lucarelli"	20.5	22.1	≈ 8%
Y_70 building	19.2	17.3	≈ 10 %
Y_2010 building	16.8	15.6	≈ 7 %

Tabella 2.16: Confronto tra il fabbisogno per la climatizzazione estiva calcolato e quello determinato attraverso la simulazione dinamica

I risultati ottenuti confermano l'attendibilità della metodologia anche per la valutazione del fabbisogno estivo.

d. Risultati della metodologia: qualità energetica del centro storico di Benevento

A valle della verifica della soddisfacente consistenza della procedura di calcolo e delle semplificazioni introdotte, attraverso i fabbisogni ricavati si è determinata la classe di prestazione energetica per ciascun edificio, ove le classi di riferimento sono state determinate in accordo alle Linee Guida sulla Certificazione energetica [37]. In Figura 2.19 si riporta il risultato della classificazione.

Tutti gli edifici hanno prestazioni in regime estivo decisamente scadenti, una situazione d'inefficienza specchio di una realtà non dissimile su scala nazionale. Relativamente alle prestazioni estive, 73 edifici (13%) hanno una qualità prestazionale "buona" e questi sono generalmente chiese ed edifici monumentali caratterizzati da involucro con elevata massa termica e superfici finestrate ridotte. Da questi grafici e soprattutto dalla mappatura che ne segue, si possono studiare opportuni scenari di intervento e valutare quali siano i benefici conseguibili anche come classe energetica. Infatti, la visualizzazione georeferenziata consente di individuare subito l'identificativo e la posizione degli edifici caratterizzati dai fabbisogni più elevati, nonché la relativa classificazione, in modo da delineare opportune strategie d'intervento.

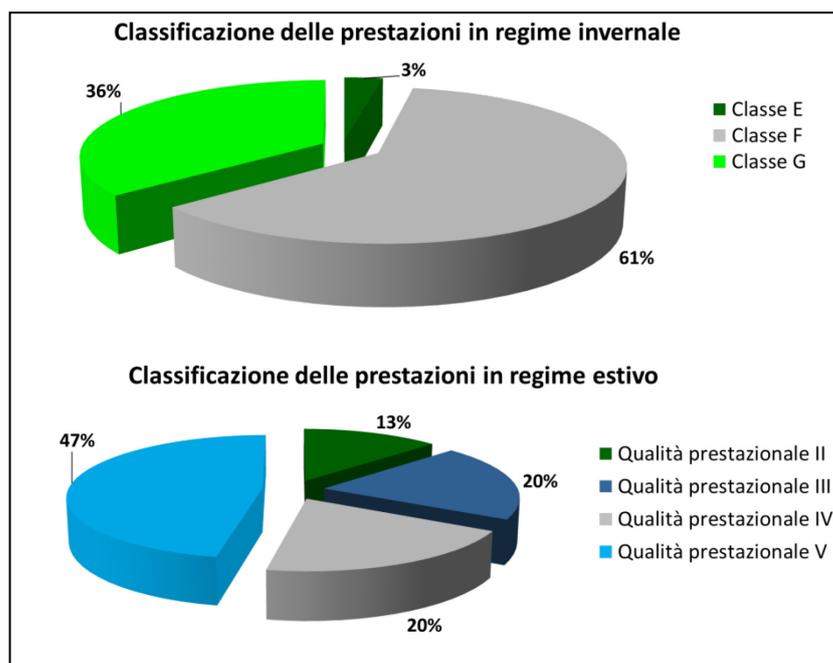


Figura 2.19: Classificazione delle prestazioni energetiche del centro storico di Benevento.

2.4.3 Le Mappe Energetiche Urbane: elementi innovativi di gestione del patrimonio edilizio

Le mappe energetiche urbane (MEU), create attraverso opportune elaborazioni sul GIS, il cui database è stato strutturato attraverso le caratteristiche rilevate e i parametri energetici calcolati, rappresentano un valido supporto informatico per un'accurata pianificazione energetica e gestione degli edifici.

Per mettere a punto MEU del centro storico di Benevento, dopo aver costruito la cartografia digitale degli edifici, è stato necessario connettere la tabella dei dati elaborati con il database delle entità georeferenziate. In tal modo è successivamente possibile ottenere, attraverso opportune interrogazioni (query) del sistema, le mappe relative alla classificazione energetica ma anche con riferimento ai parametri d'interesse, precedentemente elaborati e di cui si intende controllare la distribuzione sul territorio.

Si riportano, come esempio, le cartografie relative alle classi energetiche degli edifici.

Poiché il database creato è molto ricco di informazioni, mappe simili potrebbero costruirsi anche con i fabbisogni e le caratteristiche termo-fisiche o demografiche di ciascun edificio. Le mappe, infatti, consentono un'immediata interpretazione delle caratteristiche geometriche, della qualità energetica del centro storico e della distribuzione delle inefficienze e di tutte le caratteristiche che si ha interesse a controllare nonché a stabilire le priorità d'intervento.



Figura 2.20: Mappa delle prestazioni invernali del centro storico di Benevento.

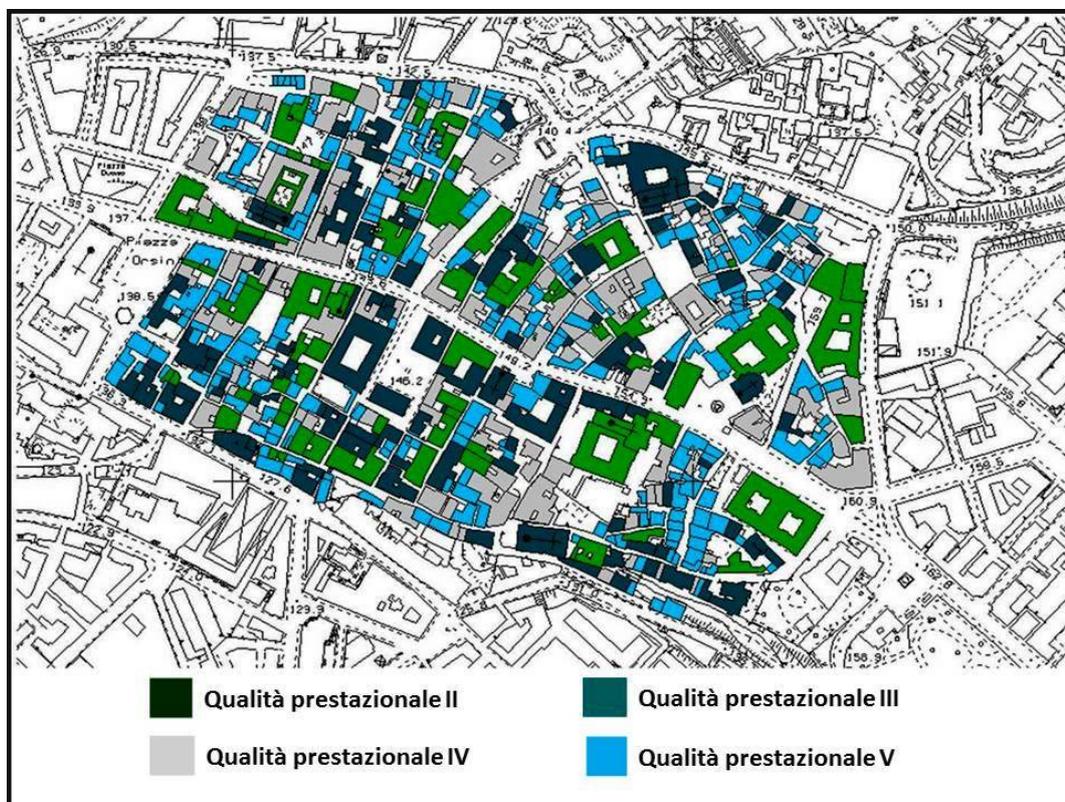


Figura 2.21: Mappa delle prestazioni estive del centro storico di Benevento.

Risultano evidenti i vantaggi derivanti dalla gestione del patrimonio edilizio con tale strumento; tra questi si citano:

- ✓ la possibilità di verificare in maniera semplice, veloce ed in tempo reale le caratteristiche degli edifici;
- ✓ la valutazione selettiva di diversi aspetti degli edifici con l'individuazione tempestiva dell'unità edilizia critica per la quale eventualmente definire una priorità di intervento;
- ✓ la possibilità per le amministrazioni di identificare e controllare strategie di risparmio energetico nonché di informare i cittadini delle prestazioni energetiche del proprio edificio e avviare campagne di responsabilizzazione;
- ✓ la possibilità di analizzare più aspetti di uno stesso edificio interrogando il sistema e mettendo insieme tra loro più variabili.

Capitolo 3

Definizione di un modello di diagnosi energetica per gli edifici del terziario

Alla base della valutazione delle prestazioni energetiche di un edificio esistente, a meno che l'obiettivo non sia un mero calcolo in condizioni convenzionali mirato alla semplice certificazione energetica, è necessaria un'accurata diagnosi energetica, cioè un'individuazione critica e documentata degli usi finali e dei consumi dell'edificio oggetto di studio, volta ad individuare e quantificare le opportunità di risparmio, quale vero e proprio studio di fattibilità di specifici interventi di riqualificazione.

Lo scopo della diagnosi energetica è quello di riconoscere tipologie e prestazioni energetiche degli impianti, dell'involucro edilizio e delle apparecchiature elettriche, nonché di riconoscere quali sono le modalità di utilizzo delle tecnologie stesse, al fine di ricostruire un bilancio in usi finali (termici ed elettrici) dell'edificio, prevedendo, inoltre, la valutazione energetica, economica ed ambientale di possibili interventi di risparmio da eseguire sull'edificio stesso.

Il Decreto legislativo n. 115 del 30 Maggio 2008 [107] - *Attuazione della Direttiva 2006/32/CE relativa all'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e abrogazione della Direttiva 93/76/CEE* - definisce la diagnosi energetica (o in maniera equivalente l'Audit energetico) come la "procedura sistematica volta a fornire una adeguata conoscenza del profilo di consumo energetico di un edificio o gruppo di edifici, di una attività e/o impianto industriale o di servizi pubblici o privati, ad individuare e quantificare le opportunità di risparmio energetico sotto il profilo costi - benefici e riferire in merito ai risultati". In maniera pressoché equivalente, la UNI CEI EN 16247-1/2012 - *Energy audits: General requirements* - definisce l'Energy Audit come: "systematic inspection and analysis of energy use and energy consumption of a system or organization with the objective of identifying energy flows and the potential for energy efficiency improvements".

Poiché i decreti vigenti in materia specificano che l'Attestato di Prestazione Energetica deve comprendere anche l'indicazione di possibili interventi migliorativi delle prestazioni, molto spesso la seconda parte dell'attestato, mirata a fornire "raccomandazioni", si avvale (o dovrebbe avvalersi) di una congrua "diagnosi energetica".

A tale proposito, a rigore, per definire la classe di prestazione energetica si adottano metodologie di calcolo basate su input convenzionali, e quindi non idonei per una

diagnosi energetica finalizzata alla progettazione della riqualificazione energetica dell'edificio. Secondo l'approccio attuale, infatti, l'attestato di prestazione energetica è un documento finalizzato a certificare il consumo energetico convenzionale di riferimento di un edificio o di un'unità immobiliare, fotografando lo stato attuale del sistema edificio/impianti attraverso un approccio di tipo convenzionale (i.e., *Asset Rating*). Diversamente, la diagnosi energetica è un esame delle condizioni di funzionamento e gestione reali del sistema edificio/impianti, finalizzata allo studio della fattibilità tecnico-economica di possibili azioni di retrofit. La diagnosi energetica, dunque, si configura come una successione di azioni di rilievo, raccolta e analisi dei parametri relativi ai consumi specifici e alle condizioni di esercizio del sistema edificio/impianti in condizioni reali di esercizio. Le misure e i rilievi dovrebbero cioè essere effettuati in maniera affidabile ed in condizioni che sono rappresentative delle normali condizioni di esercizio e, ove significativo, in condizioni ambientali corrette.

Nella prima parte di questo capitolo sarà definita una metodologia per la diagnosi energetica degli edifici, evidenziando le maggiori criticità relative alla fase di caratterizzazione (audit) e alla simulazione tramite modello energetico, laddove sia richiesta un'analisi del comportamento reale dell'edificio (*Tailored Rating*) e non un'analisi su dati standardizzati (*Design Rating*). Lo schema per l'analisi delle prestazioni attuali messo a punto consente un approfondito esame delle condizioni di funzionamento e gestione del sistema edificio/impianti, finalizzato all'individuazione delle criticità nelle prestazioni energetiche degli edifici e allo studio delle possibilità di miglioramento globale di queste.

La procedura di diagnosi messa a punto è stata applicata a diversi edifici; in questo lavoro di Tesi di Dottorato si riporteranno solo i casi studio ritenuti più rappresentativi del lavoro svolto nei tre anni, e in particolare:

- Palazzo dell'Aquila Bosco Lucarelli (edificio storico);
- Palazzo Ex-INPS (edificio della prima metà del '900);
- Day-Hospital del complesso ospedaliero "G. Pascale" sito in Napoli.

I primi due edifici analizzati sono che sedi amministrative e didattiche del Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi del Sannio.

Rispetto al pur autorevole uso di codici commerciali, ancora, nell'ottica di ottimizzare gli strumenti a disposizione della diagnostica degli edifici, durante il percorso di ricerca di questi anni, insieme al gruppo di ricerca è stato messo a punto un modello numerico migliorativo, per la risoluzione dei ponti termici, sviluppato per consentirne l'implementazione all'interno dei codici di simulazione energetica dinamica ad oggi più diffusi nella ricerca in tema di efficienza energetica in edilizia. I ponti termici, infatti,

rappresentano un nodo critico nella diagnosi delle prestazioni energetiche del sistema edificio/impianti, determinando incrementi delle dispersioni laddove decade l'ipotesi di mono-dimensionalità del flusso termico. Tale ipotesi, talvolta non verosimile, è assunta da molti diffusi codici numerici per la simulazione energetica degli edifici. Autorevole quanto ampia letteratura tecnica dimostra come, in realtà, la trasmissione del calore, nei suoi effetti bi/tridimensionali non sia né trascurabile né compiutamente valutabile mediante metodologie di analisi approssimate, che ricorrono a semplici incrementi percentuale dell'energia dispersa per trasmissione, o che considerano l'effetto dei ponti termici come descrivibile attraverso coefficienti di scambio termico lineici o puntuali, ricavati da abachi o atlanti. Ciò diviene ancora più significativo in presenza di edifici in struttura composita, laddove si sovrappongono gli effetti indotti da ponti termici di forma e struttura.

Di contro, soluzioni accurate richiedono puntuali risoluzioni numeriche, mediante ricorso alla termo-fluidodinamica computazionale, la quale, però, è caratterizzata da diversi limiti nella sua integrazione in codici di simulazione energetica, risolvendo, questi ultimi, bilanci nel dominio del tempo e secondo un modello zero-dimensionale per l'aria ambiente e mono-dimensionale per la trasmissione del calore attraverso le strutture dell'involucro.

Nella terza parte di questo capitolo, dunque, sarà descritto e validato numericamente attraverso l'applicazione di codici propri della termo-fluidodinamica computazionale, e sperimentalmente un modello di risoluzione dei ponti termici implementato in Matlab. Le analisi presentate concernono strutture tipiche dell'edilizia italiana ed europea, analizzando l'affidabilità del metodo, sia in termini di precisione della soluzione che di tempo di calcolo e risorse richieste.

3.1 Una metodologia per l'analisi delle prestazioni attuali degli edifici esistenti

I requisiti generali per l'elaborazione di una diagnosi energetica sono riportati nella norma UNI CEI/TR 11428, "Gestione dell'energia - Diagnosi energetiche - Requisiti generali del servizio di diagnosi energetica" in vigore dal 6 Ottobre 2011 [148]. A questa si aggiunge la norma UNI CEI EN 16247-1, "Diagnosi energetiche - Parte 1: Requisiti generali" che definisce i requisiti, la metodologia comune e i prodotti delle diagnosi energetiche per tutte le forme di aziende ed organizzazioni, con l'esclusione delle singole unità immobiliari residenziali [149].

- In quanto procedura sistematica, la diagnosi energetica deve possedere i seguenti requisiti:
- completezza: definizione del sistema energetico comprensivo di tutti aspetti energetici significativi;

- attendibilità: acquisizione di dati reali in numero e qualità necessari per lo sviluppo dell'inventario energetico della diagnosi energetica e sopralluogo del sistema energetico;
- tracciabilità: identificazione e utilizzo di un inventario energetico, documentazione dell'origine dei dati e dell'eventuale modalità di elaborazione dei suoi dati a supporto dei risultati della diagnosi energetica, comprensivo delle ipotesi di lavoro eventualmente assunte;
- utilità: identificazione e valutazione sotto il profilo costi/benefici degli interventi di miglioramento dell'efficienza energetica espressi attraverso documentazione adeguata e differenziata in funzione del settore, delle finalità e dell'ambito di applicazione, trasmessa al committente.
- verificabilità: identificazione degli elementi che consentono al committente la verifica del conseguimento dei miglioramenti di efficienza risultanti dalla applicazione degli interventi proposti.

Per sua stessa definizione, la diagnosi energetica integra dati raccolti sul campo (a seguito di sopralluoghi) con strumenti di calcolo (elaborazione di un modello matematico del sistema edificio/impianti), attraverso cui individuare e analizzare interventi di riqualificazione energetica dell'edificio, sulla base dell'analisi del reale fabbisogno. Durante il percorso di dottorato, si è lavorato molto alla formalizzazione di uno schema per le diagnosi energetiche degli edifici, anche in funzione della loro destinazione d'uso. In linea generale, si può considerare valido lo schema elaborato e riportato in Figura 3.1. Dall'esperienza maturata, infatti, si ritiene che una diagnosi energetica debba prevedere due macro-fasi convergenti:

- caratterizzazione energetica dell'edificio;
- simulazione tramite modello energetico.

La caratterizzazione energetica dello stato attuale dell'edificio è richiesto che sia ottenuta attraverso un accurato audit energetico, che, come si vede in Figura 3.1, richiede:

- analisi generale dell'utenza: profili di occupazione, censimento delle apparecchiature elettriche, ricostruzione dei consumi energetici elettrici e termici sulla base delle distinte di fornitura e della tipologia contrattuale;
- raccolta dei dati sull'involucro edilizio;
- raccolta dei dati relativi agli impianti termo-tecnici installati.

L'audit è lo strumento principale per conoscere e quindi intervenire efficientemente sulla prestazione energetica di una struttura, in quanto consente di fotografare lo stato attuale dei consumi e di evidenziare le principali problematiche nonché i margini di razionalizzazione ed i miglioramenti conseguibili rispetto alla situazione attuale del sistema edificio/impianti.

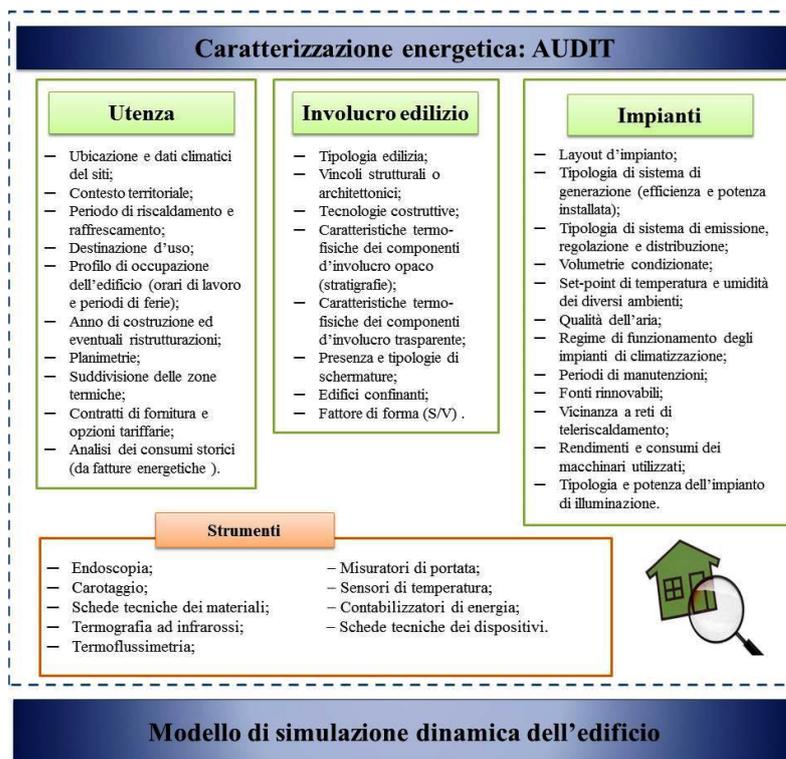


Figura 3.1: Schema generale per la diagnosi energetica di un edificio.

La fase di audit richiede, evidentemente, misure in situ, per stimare i parametri che condizionano significativamente i flussi energetici; questi in linea generale possono essere suddivisi in quattro categorie:

- misure di parametri che definiscono il comfort ambientale;
- misure sull'involucro;
- misure sull'impianto;
- misure climatiche esterne.

Note le caratteristiche energetiche reali dell'edificio, si può poi mettere a punto e calibrare un modello di simulazione termo-energetica dell'edificio tale da poter riprodurre numericamente i consumi termici ed elettrici. Una volta calibrato il modello, e tenendo conto delle indicazioni rilevate durante l'audit, la simulazione del rendimento energetico del sistema edificio/impianti consente risposte precise sugli effetti dovuti all'installazione di tecnologie efficienti e/o alla sostituzione dei componenti impiantistici.

Pertanto, fatto ciò, come sarà descritto più approfonditamente nel prossimo capitolo, la progettazione della riqualificazione energetica dell'edificio passa attraverso l'analisi energetica ed economica dei diversi scenari d'intervento ipotizzabili, tali da permettere di determinare l'intervento che più soddisfa la richiesta e le necessità dell'eventuale committente. Nel dettaglio, dunque, si propone l'analisi delle diverse fasi della procedura di diagnosi proposte, approfondendo anche taluni aspetti relativi alle misure ed alle indagini in situ.

3.1.1 La caratterizzazione energetica (audit)

Poiché l'audit energetico costituisce il fulcro del processo decisionale di progettazione del retrofit energetico, per realizzarlo è necessario creare un approfondito sistema di rilievo, raccolta ed analisi dei dati relativi al fabbisogno energetico, affinché sia possibile mettere in evidenza i consumi specifici e le condizioni di esercizio di tutti gli impianti asserviti alla struttura. Riferendosi, quindi, alla precedente struttura si specificano le informazioni necessarie per ciascun dei tre macrogruppi.

a. Caratterizzazione dell'utenza

La prima fase è costituita dalla ricognizione del sito e la raccolta di tutte le informazioni necessarie alla caratterizzazione energetica ed ambientale dell'area attraverso l'analisi e le valutazioni di supporti cartografici, rilievi, misure e supporti fotografici. Le informazioni - che dovrebbero essere raccolte al fine di una corretta definizione dei parametri energetici ed ambientali degli edifici - sono riportate nella Tabella 3.1.

Scheda: Dati climatici				
Località	Latitudine	Longitudine	Altezza sul livello del mare	
Clima	Zona climatica	Gradi Giorno	Periodo convenzionale di riscaldamento	
Temperatura	Valore minimo giornaliero	Valore medio giornaliero	Valore massimo giornaliero	Valore medio mensile
Umidità relativa	Mensile		Stagionale	
Precipitazioni	Giornaliera	Media	Massima	
Venti al suolo	Direzione	Velocità	Intensità	
Soleggiamento	Energia media giornaliera	Ore di sole rilevate	Altro	

Tabella 3.1: Scheda per la ricognizione dei dati generali sul sito

Si procede poi a predisporre uno schema planimetrico di massima dell'edificio e dell'area pertinente sul quale siano rappresentati anche gli edifici circostanti ed ogni

altro elemento esterno (orografia, vegetazione, ostruzioni varie) atto a schermare la radiazione solare o a influenzare il profilo dei venti.

Attraverso il rilievo geometrico si devono ricavare con esattezza piante, sezioni verticali e prospetti. In particolare, attraverso il rilievo è opportuno chiarire l'entità degli spessori delle murature portanti ai diversi livelli, lo spessore e la tipologia dei solai, lo sviluppo planimetrico ed altimetrico delle eventuali scale presenti, la posizione dei vani di accesso e l'individuazione della tipologia di copertura.

La seconda fase prevede l'individuazione delle zone termiche e degli spazi non riscaldati o climatizzati, attraverso la definizione della destinazione d'uso degli ambienti interni costituenti la struttura. Ciascun ambiente deve essere caratterizzato in termini di superfici e volumi ma anche in relazione al tipo di carico previsto. Pertanto, per ciascun ambiente, mediante una semplice ispezione diretta, si devono specificare il numero medio di occupanti e le apparecchiature presenti, in modo da poter ricavare i carichi termici interni in modo accurato.

In seguito, in una sorta di "firma energetica", si ritiene necessario ricostruire gli andamenti mensili o annuali delle richieste energetiche, operando anche eventuali disaggregazioni di dati stagionali non ripartiti per singolo mese.

La raccolta dei consumi energetici storici ingloba diverse operazioni, prima su tutte l'individuazione delle tipologie di fonti energetiche utilizzate e rese disponibili alla struttura e l'analisi delle distinte di fornitura di un periodo statisticamente significativo di anni (almeno 4). Per riuscire a ricostruire gli andamenti mensili o annuali, considerando che spesso il dato sui consumi in bolletta risulta aggregato, sono necessarie ulteriori informazioni relative alla tipologia di contratto di fornitura e alla gestione degli impianti. In particolare, ove possibile, si dovrebbero reperire i dati tecnici sugli impianti e informazione sugli orari e le modalità di funzionamento degli stessi. Allo stesso modo, è necessaria una raccolta dei dati sul sistema di distribuzione e sopralluoghi per verificare la tipologia dei corpi scaldanti. Evidentemente, la possibilità di monitorare direttamente i flussi energetici almeno di utenze selezionate consentirebbe un'analisi più puntuale e precisa con riferimento ad andamenti orari o giornalieri dei fabbisogni.

La ricostruzione dei profili di consumo attuali è una fase molto importante della diagnosi energetica, poiché i dati acquisiti potranno essere utilizzati per diversi scopi:

- calibrare il modello di simulazione energetica dell'edificio;
- utilizzare i dati rilevati per studi scientifici di settore, confrontando le prestazioni con quelle di analoghe strutture o in funzione delle destinazioni d'uso degli ambienti in modo da individuare le attività a maggior richiesta energetica ed impostare opportune strategie di controllo o razionalizzazione;
- archiviare dati e informazioni su cui basare analisi statistiche.

b. Caratterizzazione dell'involucro opaco e trasparente

La procedura di rilievo dei dati in campo per la caratterizzazione dell'involucro edilizio e dei componenti trasparenti è articolata in diverse fasi.

Prima di tutto, è necessario individuare l'epoca di costruzione dell'edificio, ponendo particolare attenzione alla composizione strutturale, alle caratteristiche architettoniche ed ad eventuali ampliamenti o ammodernamenti effettuati in epoche successive. Allo stesso tempo, si determinano eventuali vincoli o peculiarità rispetto all'importanza storica dell'edificio e si tiene nota di ristrutturazioni eventualmente già programmate, relative sia all'edificio che agli impianti, al fine di integrare i possibili nuovi interventi proposti.

Relativamente all'audit d'involucro edilizio, considerando le problematiche relative alla reperibilità di informazioni certe circa le stratigrafie nel caso di edifici esistenti e alla mancata corrispondenza con i valori teorici di progetto, per cause quali, ad esempio, la degradazione della struttura, una valutazione teorica delle caratteristiche termofisiche risulta molto difficile, ed è quindi importante combinare l'approccio analitico a quello sperimentale, attraverso opportune misure in situ e monitoraggi delle grandezze termofisiche di interesse.

A proposito della composizione strutturale dell'edificio, in generale si possono avere tre situazioni:

- il progetto architettonico illustra con chiarezza la tecnica ed i materiali utilizzati;
- le caratteristiche dell'edificio possono essere assimilate a quelle di uno noto;
- la stratigrafia non è nota e in questo caso si applicano procedimenti intrusivi (es. endoscopia, estrazioni con carotaggi) per giungere alla individuazione della tipologie di materiali impiegati e degli spessori.

In questi casi, per caratterizzare la termofisica dell'involucro in termini di trasmittanza termica, si fa riferimento alla norma UNI EN ISO 6946:1999, "*Componenti e elementi per edilizia – Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodo di calcolo*" [92]. Diversamente, quando non si conoscono le caratteristiche dell'edificio o si vuole evitare l'uso di prove distruttive (endoscopie), si fa riferimento alla norma ISO 9869 ("*Thermal insulation – Building elements –in-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance*") con l'impiego dei termoflussimetri.

Come mostra la Figura 3.2, la valutazione della trasmittanza può essere effettuata o facendo un calcolo oppure procedendo con delle misure effettive.

Le prove per la valutazione della trasmittanza termica possono essere condotte sia in regime stazionario, seguendo le indicazioni della norma EN 1934 (*Thermal*

performance of buildings. Determination of thermal resistance by hot box method using heat flow meter. Masonry), per la misura in laboratorio e, per la misura in sito, della ISO 9688, sia in regime variabile secondo il pr EN 12494, (*Building components and elements. In situ measurement of the surface-to-surface thermal resistance*). La norma ISO 9869 [150] descrive il metodo per la misurazione delle proprietà di trasmissione termica dei componenti piani negli edifici mediante impiego di termoflussimetri.

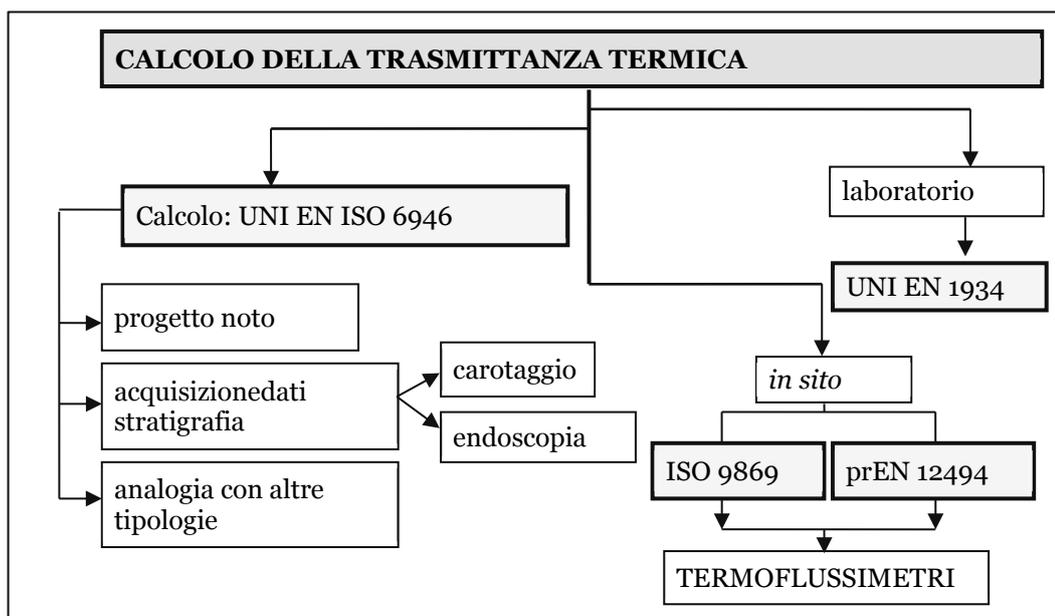


Figura 3.2: Metodi di valutazione della trasmittanza termica.

La strumentazione, conforme alla norma, si compone di uno strumento di misura, data-logger, di un sensore di flusso termico e di quattro termocoppie per la misura delle temperature superficiali delle pareti interne ed esterne. Il sistema è di solito collegato ad un computer ed è gestito da un software per l'acquisizione e la registrazione dei dati.

La configurazione tipica, schematizzata in Figura 3.3, consiste nel posizionare il sensore di flusso sulla superficie interna della parete e due o più sensori di temperatura sulla superficie interna e sulla superficie esterna della parete. L'uso di più sensori di temperatura permette di mediare i valori, riducendo l'errore di misura in caso di costruzioni non sufficientemente omogenee.

La norma ISO 9869 fornisce alcune indicazioni operative sul modo in cui applicare i sensori per consentire una maggiore accuratezza e affidabilità della misura. In particolare, i sensori vanno installati in una porzione di superficie rappresentativa della parete corrente che si desidera caratterizzare, ma al fine di evitare effetti di bordo, che possono introdurre errori notevoli nella misura, sono da evitare le zone vicine agli

spigoli ed ogni altra zona della parete in cui si presentino delle anomalie di carattere fisico o geometrico.

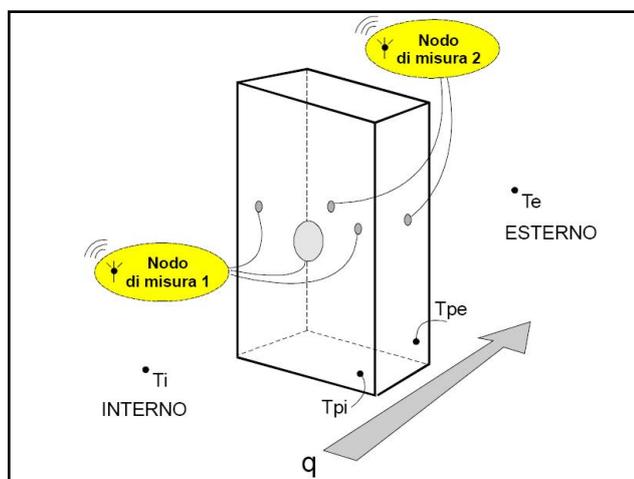


Figura 3.3: Schema di installazione dei sensori di misura.

Pertanto, per una diagnosi accurata, per ciascuna porzione rappresentativa dell'edificio è necessario individuare e caratterizzare i singoli ponti termici di forma e/o di struttura. Questa analisi può essere fatta mediante ricorso alla termografia ad infrarossi. La termografia è una mappatura termica ottenuta tramite l'utilizzo di una termocamera in grado di rilevare l'emissione infrarossa. L'elaborazione tramite software specifico fornisce dettagliate informazioni sulla prestazione termica dell'involucro. In particolare, la termografia in edilizia è una tecnica:

- diagnostica e conoscitiva;
- non distruttiva né invasiva;
- in grado di rilevare la temperatura di oggetti attraverso la misura della radiazione infrarossa emessa.

Una mappatura dell'emissione termica è utile sia al corretto posizionamento dei sensori per la misura in opera della conduttanza termica, sia per catalogare le tipologie di ponte termiche riscontrate, riportando per ciascuno di questi i principali parametri geometrici che ne consentono la valutazione della resistenza al flusso termico.

Nell'utilizzo dei termoflussimetri, occorre molta cautela nella posa delle termocoppie e, poiché è necessario anche il loro posizionamento sul lato esterno, bisogna evitare che queste siano investite direttamente dalla radiazione solare. In questo caso è opportuno scegliere, quando possibile, una parete orientata verso nord o nord-est, oppure collocare il sensore in una zona di parete soggetta ad elevato ombreggiamento.

Per quanto riguarda il posizionamento del sensore di flusso, la norma prevede di posizionarlo sul lato interno della parete, poiché è necessario evitare che esso sia

investito direttamente dalla radiazione solare. In caso contrario, si possono avere sensibili errori di misura.

La presenza dei sensori provoca disturbi al fenomeno da misurare e quindi errori di misura, dovuti non solo alle sue diverse caratteristiche spettrali, ma anche all'aggiunta di resistenze che hanno come conseguenza la distorsione delle isoterme e le deflessioni che si verificano ai lati della sonda a causa degli effetti di bordo. Tuttavia, l'errore dovuto alla distorsione delle isoterme può essere ridotto riducendo lo spessore dei sensori. Diversamente, l'errore dovuto alle deflessioni può essere ridotto applicando una guardia ovvero un materiale di riempimento non sensibile intorno alla parte sensibile del sensore.

Inoltre, occorre assicurare un buon contatto termico tra superfici della parete e sensori, in quanto un significativo errore di misura può essere dovuto al fatto che il contatto tra la superficie del sensore e quella della parete è discontinuo in conseguenza della rugosità caratteristica delle superfici delle pareti; a causa di ciò, la superficie di contatto risulta minore di quella apparente geometrica e le cavità presenti sono riempite di aria (che offre una resistenza termica elevata, se in quiete).

Un altro aspetto da prendere in considerazione, allo scopo di evitare errori di misura, è l'influenza delle condizioni al contorno. E' buona norma, infatti, effettuare la sperimentazione durante un periodo di tempo caratterizzato da forti differenze di temperatura fra ambiente interno ed esterno. A tale riguardo, il valore ottimale di Δt è di circa 10°C. Questa condizione garantisce di rilevare le grandezze, specie i flussi termici, nelle condizioni in cui essi assumono valori più alti. In tal modo si opera con segnali in uscita dai trasduttori più elevati, cosicché il sistema risulta essere meno sensibile ai disturbi esterni e gli strumenti di misura siano in condizioni operative sensibilmente maggiori della soglia minima di rilevazione.

I dati possono essere analizzati impiegando due metodi; uno è quello delle medie progressive (molto semplice), l'altro, dinamico, detto black box, risulta più laborioso ma con una qualità dei risultati finali migliore. La differenza tra i metodi consiste nel numero di misure necessarie per compiere valutazioni affidabili.

Qualora le condizioni termiche alle quali la parete in esame è sottoposta fossero caratterizzate da regime stazionario, la trasmittanza termica si potrebbe ricavare per via sperimentale semplicemente attraverso la misura istantanea del flusso specifico (q) e delle temperature interna (T_i) ed esterne (T_e).

Diversamente, gli edifici nelle condizioni operative reali, sono soggetti a condizioni al contorno fortemente variabili nel tempo, e pertanto le procedure di misura in opera dovranno prevedere una elaborazione dei dati sperimentali tale da gestire gli effetti transitori indotti dal regime termico variabile. Ciò induce nella pratica ad utilizzare al

posto delle grandezze istantanee i valori medi, valutati ad istanti di tempo discreti ("n" campioni), su un periodo sufficientemente lungo.

Il metodo delle medie progressive consiste, pertanto, nel calcolare la trasmittanza utilizzando, ad ogni istante, anziché i valori istantanei di flusso e temperatura, la media progressiva dei valori di flusso e di temperature su tutti gli istanti precedenti. In questo modo, il valore calcolato tende ad approssimare asintoticamente quello che meglio rappresenta il comportamento della struttura. Mediante questa semplificazione, la trasmittanza termica viene calcolata secondo l'equazione 3.1:

$$U = \frac{\int \mathbf{q} \cdot dt}{\int (\mathbf{T}_i - \mathbf{T}_e) \cdot dt} \cong \frac{\sum_{j=1}^n \mathbf{q}_j}{\sum_{j=1}^n (\mathbf{T}_{i,j} - \mathbf{T}_{e,j})} \quad \text{eq 3.1}$$

Nella pratica, è più agevole e affidabile effettuare il rilievo in opera della conduttanza della parete piuttosto che della trasmittanza, adottando, in seguito, coefficienti di adduzione interno (h_i) esterno (h_e) secondo valori previsti dalla normativa tecnica. Di conseguenza, si effettua il calcolo:

$$C = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{pi,j} - T_{pe,j})} \quad \text{eq 3.2}$$

Nella equazione 3.2, il delta T è rappresentato dalla differenza tra le temperature superficiali interne ed esterne, misurate dai sensori di flusso applicati sulla parete.

Evidentemente, se il metodo di elaborazione scelto è quello delle medie progressive, l'accuratezza della misura aumenta all'aumentare del numero di dati raccolti.

La norma, pertanto, prevede che la rilevazione possa essere interrotta solo quando sono verificate tutte le seguenti condizioni:

- la durata del test ha superato le 72 ore;
- il valore di resistenza alla fine del test non deve differire di più del $\pm 5\%$ rispetto al valore ottenuto dalle 24 ore precedenti;
- il valore di resistenza ottenuto, analizzando i dati per un periodo di tempo pari a $\text{INT}(2 \times \text{DT} / 3)$ giorni, non deve differire di più del $\pm 5\%$ rispetto ai valori

ottenuti nell'ultimo periodo di tempo della stessa durata; dove: DT è la durata in giorni; INT è la parte intera del numero;

- la variazione di energia accumulata è maggiore del 5% rispetto al flusso termico diretto.

Per quanto concerne la caratterizzazione dell'involucro trasparente, per ciascun componente si individua il tipo di vetro, di infisso e la presenza e tipologia di eventuali schermature. Per il vetro, si specifica se si tratta di vetro singolo o vetrocamera; se il materiale ha particolari proprietà (ad esempio, se è un vetro colorato assorbente, riflettente, di materiale traslucido e isolante trasparente, con pellicole a bassa emissività o elettrocromici). Una volta definite anche le caratteristiche del serramento, è possibile valutare la trasmittanza termica. Molto importante per stabilire la classe di tenuta all'aria/stato di manutenzione dei serramenti è l'analisi mediante *Blower door test*, attraverso la metodologia codificata dalla UNI EN 13829/2002, "*Prestazione termica degli edifici - Determinazione della permeabilità all'aria degli edifici - Metodo di pressurizzazione mediante ventilatore*".

c. Tipologia, utilizzo e regolazione degli impianti

La caratterizzazione degli impianti prevede lo studio dei progetti e dei rilievi in termini di:

- analisi dei progetti, dei capitolati e della documentazione tecnica relativi agli impianti di condizionamento e di produzione di acqua calda sanitaria;
- impianti per la conversione energetica da fonti rinnovabili;
- caratterizzazione del sistema di illuminazione.

Ove possibile, è necessario reperire i libretti delle macchine costituenti gli impianti, cercando di individuare tipologia, potenza termica, e caratteristiche di efficienza. Attraverso opportuni sopralluoghi si deve verificare il numero e il tipo di terminali presenti, la loro collocazione e la presenza di eventuali sistemi di regolazione. Inoltre, è necessario valutare il regime di funzionamento previsto e il valore di set-point dei principali parametri termoigrometrici.

Per ciascun ambiente individuato attraverso le destinazioni d'uso, deve essere indicata la potenza di illuminazione, il numero e il tipo di corpo illuminante installato, riportando ove possibile informazioni sulla qualità dell'illuminamento in misura anche delle esigenze manifestate dagli occupanti.

3.1.2 Il modello di simulazione energetica dell'edificio

Tutti gli indicatori energetici, e quindi i vari fabbisogni annui di energia primaria, richiesti per unità di superficie o di volume e calcolati per ogni uso energetico (riscaldamento invernale, raffrescamento e climatizzazione estiva, illuminazione artificiale degli ambienti, fabbisogno di energia per la produzione dell'acqua calda ad uso igienico-sanitario), se valutati assumendo, per il calcolo, condizioni al contorno convenzionali e non reali (temperature costanti per 24 h al giorno all'interno degli ambienti, condizioni di occupazione standardizzate, ecc.), consentono la semplice definizione di certificati energetici espressivi di una prestazione relativa e non reale, risultando funzionali al mero confronto tra prestazioni di edifici diversi, resi confrontabili proprio perché esaminati fissando condizioni di calcolo uguali anche se non veritiere.

Come ampiamente approfondito nel secondo capitolo, strumento operativo indispensabile per una diagnosi verosimile ed accurata delle prestazioni attuali e potenziali degli edifici risulta essere la simulazione termo-energetica dinamica, tipologia di analisi che supera i limiti dell'approccio stazionario basato su dati di riferimento convenzionali. Tali analisi numeriche consentono, pertanto, le necessarie valutazioni sia di tipo qualitativo (capacità di controllo dei parametri microclimatici da parte delle soluzioni impiantistiche studiate) che di tipo quantitativo (richieste energetiche), superando i limiti dello studio in condizioni di progetto, avvalendosi di dati climatici orari e variazione temporale, anche fortemente impulsiva, dei carichi endogeni. Le numerose informazioni fornite da questo tipo di analisi consentono di inquadrare problematiche e fornire soluzioni, permettendo valutazioni relative alla rispondenza di molte e diverse soluzioni progettuali, sia per quanto riguarda l'involucro edilizio (composizione delle strutture, grado di isolamento, capacità termica e parametri termofisici dinamici) che relativamente agli impianti (consentendo di confrontare diverse soluzioni progettuali, dalle configurazioni più diffuse in in funzione della destinazione d'uso considerata a quelle di maggiore interesse tecnologico per quanto concerne l'aspetto di innovazione).

In questo lavoro di tesi, la simulazione energetica del modello numerico degli edifici, sarà stata condotta mediante utilizzo diretto del motore di calcolo dinamico di EnergyPlus. La sola costruzione geometrica del modello e la suddivisione delle zone termiche interne, invece, sarà effettuata mediante il codice di interfaccia Design Builder.

Una simulazione energetica del modello dinamico dell'edificio può considerarsi articolata nelle seguenti fasi:

- scelta dell'intervallo di simulazione e dei parametri di controllo del sistema;
- definizione della località e definizione dell'orientamento dell'involucro;

- costruzione del modello geometrico e dei componenti di involucro;
- caratterizzazione dei sistemi impiantistici asserviti all'edificio;
- definizione dei parametri di attività e di funzionamento del sistema edificio/impianti.

In particolare, per creare un modello dell'edificio aderente alla realtà, è necessario riportare l'esatta geometria e forma di tutte le superfici opache e trasparenti che costituiscono l'involucro edilizio, caratterizzando ciascun elemento in funzione dei dati ricavati attraverso l'audit.

Per riprodurre con accuratezza i fabbisogni reali, poi, è necessario creare tante zone termiche quante sono le effettive destinazioni d'uso censite, in modo da valutare i diversi fenomeni di trasmissione del calore e bilancio energetico in ambienti con caratteristiche sensibili spesso molto differenti sulle prestazioni globali del sistema edificio/impianti.

Nell'approccio proposto in questo lavoro di tesi, il modello geometrico così definito verrà poi esportato in EnergyPlus, dove senza alcuna interfaccia, verrà costruito l'impianto di climatizzazione asservito all'edificio. Il modello, quindi, verrà tarato modificando opportunamente i dati di input impostati, analizzando le eventuali incongruenze e facendo ulteriori sopralluoghi e rilievi.

Come riportato nello Standard ASHRAE "Measurement of Energy and Demand Savings" [151] per calibrare un modello di simulazione energetica di un edificio si possono utilizzare i dati mensili di fabbisogno desumibili dalle distinte di fornitura relative a ciascun vettore energetico asservito all'edificio attraverso opportune elaborazioni. Questi dati, insieme alle informazioni sulle modalità di utilizzo delle varie apparecchiature, permettono una affidabile taratura del modello. Lo stesso standard individua come ulteriore metodo di calibrazione il confronto con dati di consumo orari, se disponibili, rilevati o a livello globale sull'edificio o attraverso monitoraggio su utenze opportunamente selezionate.

I due indici che il documento individua per determinare l'efficacia della calibrazione sono:

- hourly mean bias error (MBE) [152,153]
- coefficient of variation of the root mean squared error (CV(RMSE)) [154].

Il MBE è un errore percentuale calcolato su base mensile o annuale. Questo è definito come il rapporto tra la differenza tra il fabbisogno misurato/stimato da bolletta e quello ricavato dal modello di simulazione, rispetto al fabbisogno misurato/stimato. Tale indice, però, può essere affetto da errori di compensazione. Pertanto, come indice

aggiuntivo si utilizza il CV(RMSE) che rappresenta il coefficiente di variazione dello scarto quadratico medio e cioè il rapporto tra lo scarto quadratico medio riferito ad un certo periodo e il valor medio dei dati misurati nello stesso periodo. L'indice è espresso generalmente su base mensile e annuale. Si ritengono accettabili modelli in cui l'indice MBE rientri in un range del $\pm 10\%$ e il CV(RMSE) entro $\pm 30\%$ se si utilizzano dati orari per la calibrazione; se i dati di riferimento sono mensili (fatture di fornitura) allora il valore di tolleranza per i due indici diventa rispettivamente $\pm 5\%$ e $\pm 15\%$.

Infine, il modello calibrato dei consumi energetici permetterà di simulare, successivamente, gli effetti prodotti sul comportamento del sistema dovuti all'installazione di tecnologie efficienti e/o alla sostituzione di vecchi e impianti.

La figura seguente (3.4) riassume lo schema concettuale per la costruzione del modello di simulazione numerica dell'edificio e dunque dell'intera metodologia di diagnosi proposta.

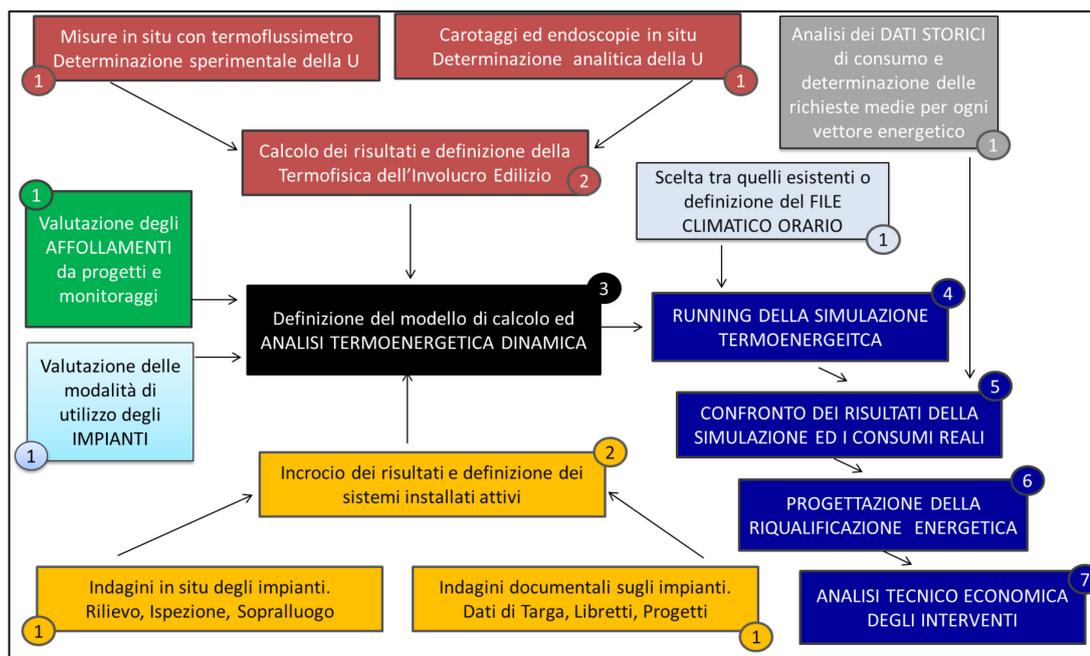


Figura 3.4: Flow Chart del metodo per la costruzione/validazione del modello numerico.

3.2 Stato di fatto e analisi delle prestazioni attuali per alcuni casi studio

Mentre la progettazione di un nuovo edificio permette una gamma molto ampia di soluzioni tecniche percorribili per soddisfare i vincoli imposti e i limiti ai consumi, negli interventi di recupero il campo si restringe a quelle soluzioni in grado di conciliare prestazioni energetiche soddisfacenti con i vincoli posti dalla preesistenza. In questi casi quindi è necessaria un'analisi multi-criteriale tale da prendere in esame le esigenze da soddisfare ed i requisiti che le soluzioni di risparmio energetico dovranno conseguire.

Di seguito, verrà discussa l'applicazione della metodologia di diagnosi energetica precedentemente descritta a tre casi studio:

- A. Palazzo Dell'Aquila Bosco Lucarelli: sede amministrativa/didattica del Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi del Sannio, a Benevento;
- B. Palazzo Ex-Inps: sede amministrativa/didattica del Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi del Sannio, a Benevento;
- C. Edificio Day-Hospital dell'azienda ospedaliera "G. Pascale" di Napoli.

I casi studio sopra-riciamati e di seguito discussi sono rappresentativi di edifici del settore terziario, con diversa destinazione d'uso, epoca di costruzione e tecnologia costruttiva. Questo consentirà di evidenziare le peculiarità che si riscontrerebbero in ciascuna condizione e di generalizzare la metodologia di analisi e diagnosi delle prestazioni attuali messa a punto in applicazione a diverse situazioni. Inoltre, la metodologia di caratterizzazione sviluppata e i dati acquisiti potrebbero convergere in un lavoro più ampio di definizione di *Reference Building* per il settore terziario. Poiché l'obiettivo è stato quello di costruire un modello convergente, nei risultati numerici, con le strutture reali, tutti gli studi sono stati effettuati sia in regime di calcolo da progetto, *Asset Rating*, per la "quantificazione" dell'energia risparmiabile mediante valutazione standardizzata, sia con valutazioni adattate all'utenza, *Tailored Rating*, finalizzate all'ottimizzazione della prestazione energetica nelle reali condizioni di esercizio.

3.2.1 La diagnosi energetica di un edificio storico

Il primo edificio analizzato è stato *Palazzo dell'Aquila Bosco Lucarelli* (Figura 3.5), sede amministrativa e didattica del Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi del Sannio. Realizzato in diverse epoche e con il presente assetto prettamente ottocentesco, di notevole pregio storico-artistico, è stato oggetto di interesse, da parte delle istituzioni politiche locali, per quanto riguarda la valutazione tecnica di possibili interventi migliorativi, sia relativi al comportamento statico-sollecitazionale in presenza di eventi sismici, sia volti al miglioramento della prestazione energetica del manufatto architettonico, ed al contempo rispettosi del valore di Bene Culturale della fabbrica.

La diagnosi energetica e la progettazione del retrofit energetico di questo edificio costituiscono dunque un tema di grande interesse poiché, seppure una parte importante dell'edilizia italiana sia stata realizzata in seguito all'inurbamento post II guerra mondiale, in Italia ci sono oltre 3'900'000 edifici costruiti precedentemente al 1920, molti dei quali sottoposti a vincolo storico-artistico.

La legislazione energetica italiana esclude da ogni obbligo di riqualificazione energetica tali architetture, qualora i retrofit energetici siano tali da determinare

alterazione delle caratteristiche di pregio intrinseche a tali edifici, ma, considerando che molti edifici storici ospitano Istituzioni pubbliche (Università, Enti Locali, Musei, Biblioteche, etc.), questi sono frequentemente interessati da interventi di messa in sicurezza statica, in un contesto, come quello italiano, in cui la grandissima parte del territorio presenta elevati rischi di sismicità.

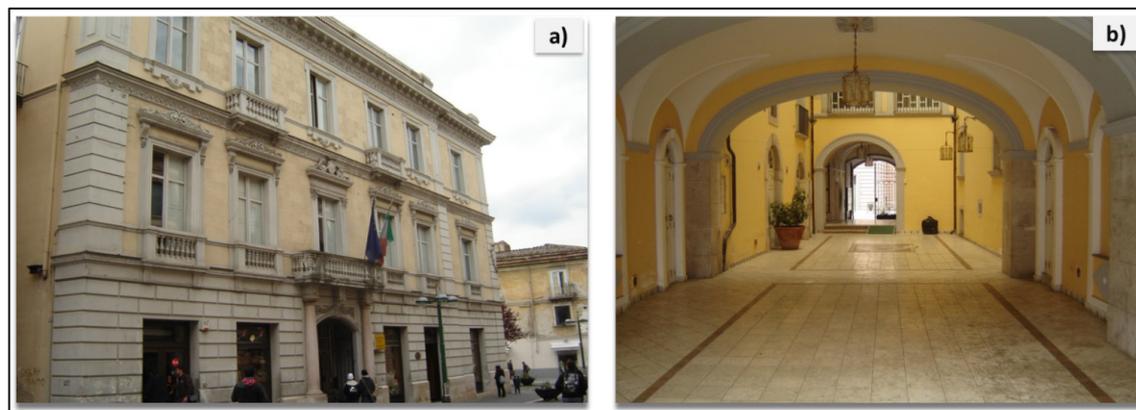


Figura 3.5: Palazzo Dell'Aquila Bosco Lucarelli: a) vista frontale; b) vista dell'atrio a piano terra.

All'interno di lavorazioni di riqualificazione strutturale, che spesso richiedono intervento sulle strutture primarie e secondarie, anche il *refurbishment* energetico può trovare spazio, in una visione virtuosa e globale della progettazione del sistema edificio-impianti. Il lavoro qui presentato è stato oggetto di alcuni lavori scientifici riportati in bibliografia [155,156].

a. Analisi dell'utenza

La struttura presenta una pianta rettangolare cava ed è costituita da un piano interrato non completamente accessibile, dal piano terra, un piano primo, un piano secondo, un sottotetto ed una copertura a falde con struttura portante in acciaio. Le dimensioni d'ingombro massime in pianta sono di 33.48 m per 26.32 m, l'altezza dell'edificio è di 18.19 m e la cubatura è stimata intorno ai 15.100 m³.

Nel corso della collaborazione tra Università del Sannio e Dipartimento Nazionale della Protezione Civile, per il Palazzo è stato realizzato un rilievo geometrico che ha permesso la restituzione grafica di piante (Figura 3.6), sezioni verticali (Figura 3.7) e prospetti. In particolare, il rilievo ha permesso di chiarire l'entità degli spessori delle murature portanti ai diversi livelli, lo spessore e la tipologia dei solai, lo sviluppo planimetrico ed altimetrico della scala, la posizione dei vani di accesso e l'individuazione di una copertura in acciaio. I rilievi sono stati condotti anche tramite asportazione parziale dei rivestimenti, di intonaci e con perforazioni trasversali e saggi

endoscopici per stimare l'effettiva dimensione e la composizione trasversale degli elementi strutturali. Sulla base di tali rilievi è stata anche individuata la geometria degli elementi strutturali e di quelli architettonici decorativi.



Figura 3.6: Pianta del primo piano.

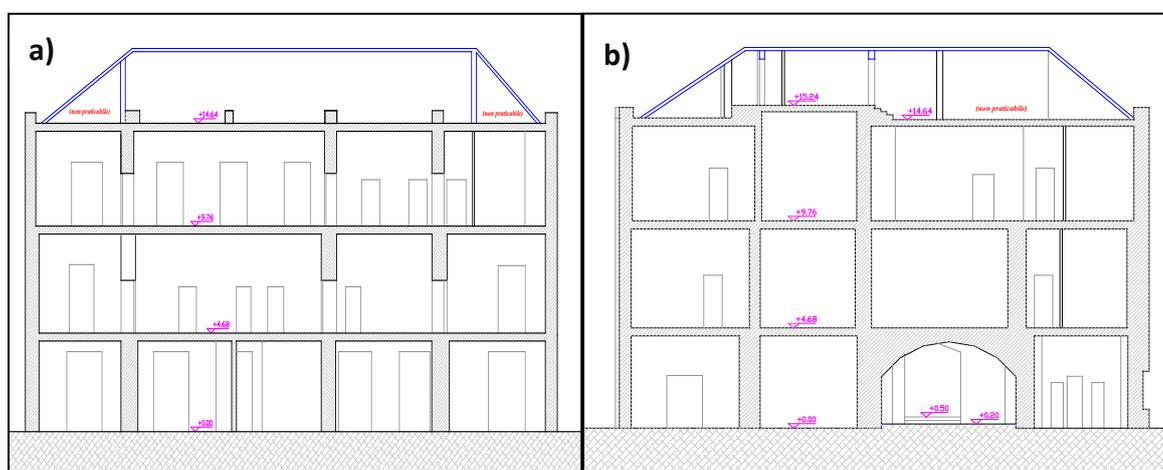


Figura 3.7: Sezioni: a) longitudinale; b) trasversale.

L'edificio è situato nel centro storico di Benevento e la Tabella 3.2 riassume i principali dati geografici e climatici del sito.

Palazzo dell'Aquila Bosco Lucarelli è rappresentativo di un'edilizia molto diffusa nei centri storici delle città italiane ed europee, in termini non solo di tipologia costruttiva ma anche di destinazione d'uso, poiché al piano terra l'edificio ospita attività commerciali mentre a partire dal primo piano, di pertinenza dell'Università degli Studi

del Sannio, le tipologie di destinazione d'uso dell'edificio sono quelle tipiche di un *educational building*.

Località	BENEVENTO
Latitudine	41° 7'
Longitudine	14° 47'
Gradi giorno	1316
Zona climatica	C
Temperatura esterna minima invernale	-2 °C
Periodo convenzionale di riscaldamento	15 Novembre - 31 Marzo

Tabella 3.2: Principali caratteristiche della località in cui è collocato l'edificio - Benevento.

Seppur il fine dell'analisi e la progettazione di interventi di retrofit (presentata nel prossimo capitolo) abbia riguardato esclusivamente i piani della struttura di pertinenza dell'Università, ciò ha comunque richiesto la modellazione accurata anche dal piano terra, rappresentando questo una condizione al contorno necessaria a chiudere la definizione del modello di simulazione.

Pertanto, attraverso un accurato censimento, per ciascun locale del piano terra sono stati caratterizzati i profili di occupazione e di carico relativi alle specifiche attività. Negli uffici l'analisi energetica è stata svolta riferendosi ai consumi standard del terziario, nel caso dei laboratori, invece, le apparecchiature specifiche sono state valutate attraverso il censimento. I valori utilizzati per i carichi interni, i carichi di ventilazione e i fabbisogni elettrici del sistema di illuminazione sono riportati nel sotto-paragrafo relativo alla costruzione del modello energetico.

b. Caratterizzazione dell'involucro edilizio

Attraverso le indagini condotte dal Laboratorio di Tecnica delle Costruzioni, è stato possibile determinare dati sulle caratteristiche strutturali dell'edificio. L'ossatura portante dell'edificio è costituita da murature portanti in pietra e laterizio, con solai dello spessore totale di 36 cm costituiti da putrelle in acciaio IPE 200 e tavelle in laterizio forato. A piano terra, nell'atrio anteriore e posteriore dell'edificio sono invece presenti volte in muratura (Figura 3.5b).

Le murature portanti, a conferma dell'evoluzione storica del Palazzo, mostrano fattura diversa, e gli spessori ai vari piani sono mediamente pari a 60 cm con punte di circa 90 cm per alcuni setti al piano terra. Al piano seminterrato, parzialmente ispezionabile, i paramenti murari sono realizzati con blocchi di dimensioni più grandi ed irregolari rispetto alla tessitura del piano terra con inclusioni di blocchi tufacei e mattoni.

Questa tessitura lascia supporre che le fondazioni dell'edificio consistano in un allargamento dei muri perimetrali in profondità.

	Descrizione strato	s [m]	λ [W/m K]	ρ [kg/m ³]	R [m ² K/W]
i	Intonaco armato	0.05	1.4	2300	0.036
1	Pietre miste aggregate	0.5	2.3	2600	0.22
2	Intonaco armato	0.05	1.4	2300	0.036
e	Rivestimento	0.05	1.0	1800	0.05
Spessore totale 0.65 m			Trasmittanza totale pari a 1.95 W/m² K		

Tabella 3.3: Stratigrafia parete del piano terra.

Al piano terra, i muri sono costituiti da blocchi di pietra naturale informi (Figura 3.8a), rocce calcaree, conglomerati e blocchi di tufo secondo una tessitura muraria molto diffusa nelle costruzioni beneventane coeve al Palazzo e probabilmente riconducibili al periodo di edificazione del primo nucleo dell'edificio. A piano terra, in alcuni punti si sono rinvenute cortine di tufo giallo napoletano, probabilmente realizzate in epoca successiva alla costruzione del primo impianto dell'edificio per la chiusura di vani preesistenti. I rilievi hanno consentito di caratterizzare la termofisica della struttura come riassunto in Tabella 3.3.

Ai piani superiori i muri sono costituiti da mattoni in argilla (Figura 3.8b), realizzati probabilmente in seguito ad un ampliamento dell'edificio alla fine del XIX secolo.



Figura 3.8: Particolare muratura: a) piano terra; b) primo e secondo piano.

Nella parte ispezionabile, il tetto è formato da capriate in acciaio che sostengono una copertura metallica sulla quale poggiano le tegole in laterizio (Figura 3.9 a); le capriate metalliche poggiano a loro volta su travi perimetrali in calcestruzzo armato con funzione di cordolo per le murature sottostanti. L'edificio possiede un cortile interno,

che si estende per tutta l'altezza della struttura e ha una copertura in vetro mostrata nella Figura 3.9 b.



Figura 3.9: Solaio: a) particolare della copertura a falde; b) particolare della copertura del cortile.

Per quanto riguarda i componenti trasparenti, sono presenti vetrocamera con lastre chiare non rivestite e intercapedine d'aria, (6 mm), con telaio in legno e trasmittanza totale pari a $3.146 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

Poiché le indagini sulle strutture, mediante endoscopie (Figura 3.10 a) e carotaggi, hanno consentito di determinare le stratigrafie reali dell'edificio, è stato possibile incrociare i risultati derivati dal calcolo analitico dei parametri termici stazionari e dinamici caratterizzanti l'involucro edilizio, con quelli ottenuti dalle misure in campo mediante monitoraggi con termoflussimetri (Figura 3.10 b), in ottemperanza a quanto prescritto dalla norma ISO 9869. Alla misura della conduttanza termica, è stata affiancata un'accurata indagine termografica, per individuare i principali ponti termici e dunque il corretto posizionamento dei sensori e le principali criticità della struttura (Figura 3.10 c). Lo strumento utilizzato per la prova sperimentale è la termocamera *Thermo Tracer TH102WL (NEC)*, di cui sono riportate le caratteristiche in Tabella.

Campo inquadrabile	29° x 22°
Minima sensibilità	0,08°C
Campo spettrale	8 – 14 μm
Risoluzione IR	320 x 240 pixels
Intervallo di temperatura	-40°C to 500°C
Accuratezza	$\pm 2\%$ Reading Full Scale

Tabella 3.4: Specifiche tecniche della termocamera utilizzata

Nel seguito, si riporta un approfondimento sulle misure effettuate.

b.1) Misura in opera della conduttanza termica su una parete

La prima misura ha riguardato una parete dell'involucro verticale opaco esterno, di spessore complessivo di 60 cm. Questa è costituita da uno strato di mattoni d'argilla (*dimensioni 25 cm x 2.5 cm x 6 cm*), ed è rivestita, sia internamente che esternamente, di uno strato di intonaco armato (*spessore 5 cm*) con rete metallica elettro-saldada (*diametro 4mm con passo 15 cm*). Il nodo di misura installato (Figura 3.10 b) è costituito all'interno da un sensore di flusso termico e 2 sensori di temperatura, mentre all'esterno, in corrispondenza dei sensori interni, sono stati installati ulteriori due sensori di temperatura. La distanza minima dei sensori da ponti termici è di circa 1.5 m, mentre l'altezza di fissaggio dal pavimento è di circa 2.5 m.

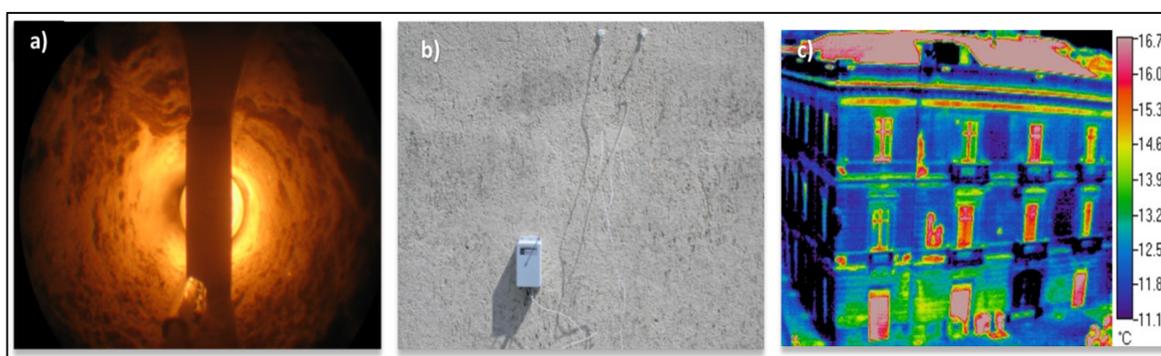


Figura 3.10: Misure: a) endoscopia piano terra; b) posizionamento dei sensori; c) termografia edificio.

La misura è stata fatta con un *termoflussimetro wireless ThermoZig* della *Carlesi Strumenti* fornito dal Laboratorio di Tecnica delle Costruzioni dell'Università degli Studi del Sannio, le cui caratteristiche tecniche principali sono riportate nella tabella seguente.

Tipo di Sensore	Flusso°	Temperatura superficiale
Tempo di risposta	4 min	8 s
Range operativo	-300 to 300 W/m ²	-50 to 125°C
Risoluzione	0.01 W/m ²	0.01 °C
Accuratezza	± 5 % (to 20°C)	±(0.10+0.0017 t)°C

Tabella 3.5: Specifiche tecniche del termoflussimetro wireless.

Il sistema di acquisizione completo (Figura 3.11) prevede il posizionamento di uno o più nodi di misura, dotati di opportuni sensori, e di un apparecchio DL01 che consiste in un datalogger ad alte prestazioni, predisposto per operare in una rete wireless, dotato di un orologio interno con batteria tampone; ogni dato ricevuto viene sincronizzato a tale orologio con una risoluzione di 0.1 s.

Ogni nodo di misura invece è composto da un radio modem (RM0x) e da un dispositivo di condizionamento del segnale (FE0x), che consiste in un sistema di acquisizione multicanale completo concepito per misure accurate di temperature superficiali e/o flussi termici. I sensori di temperatura sono delle termo-resistenze mentre quelli di flusso sono delle termopile.

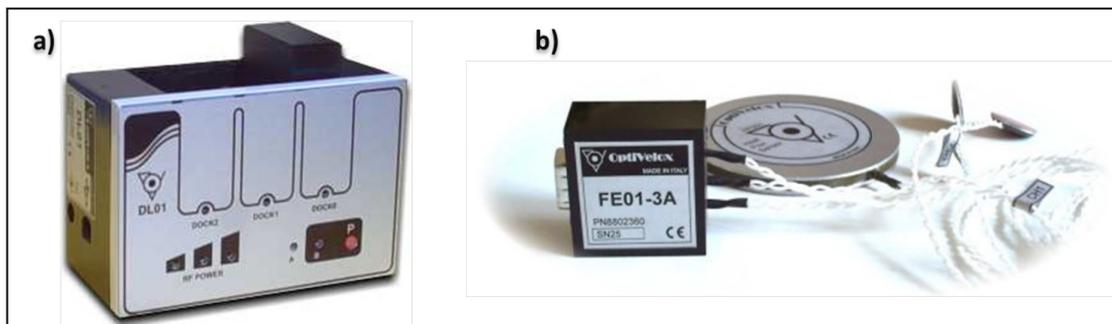


Figura 3.11: Sistema di acquisizione: a) Datalogger; b) Dispositivo FE01.

Il periodo di rilevamento è stato di circa 4 giorni, con intervallo di acquisizione pari a 30 minuti e quindi un numero di misurazioni pari a 187. Nella Figura 3.12 e 3.13 sono riportati rispettivamente gli andamenti di temperatura interna ed esterna e l'andamento del flusso termico. Dai grafici è possibile notare come l'andamento di temperatura esterna rispecchi quello di una classica stagione del beneventano, invernale con picchi massimi di quasi 11°C nelle ore diurne e picchi minimi di circa 0°C nelle ore notturne, mentre quella interna è mediamente 22 °C e il Δt medio interno – esterno risulta pari a circa 15 °C, e dunque compatibile con quanto prescritto dalla normativa tecnica per le misure della trasmittanza in situ.

In Figura 3.13 si evince che, superata la forte oscillazione del primo giorno, l'andamento del flusso termico in parete tende a stabilizzarsi, per mantenersi quasi costante negli ultimi due giorni di rilevazione.

A partire dai dati acquisiti, il calcolo della trasmittanza termica è stato fatto con l'algoritmo delle medie progressive, in accordo allo standard ISO 9869. Nel caso in esame, la conduttanza finale, il cui andamento misurato è riportato in Figura 3.14, risultata 0.924 W/(m²K).

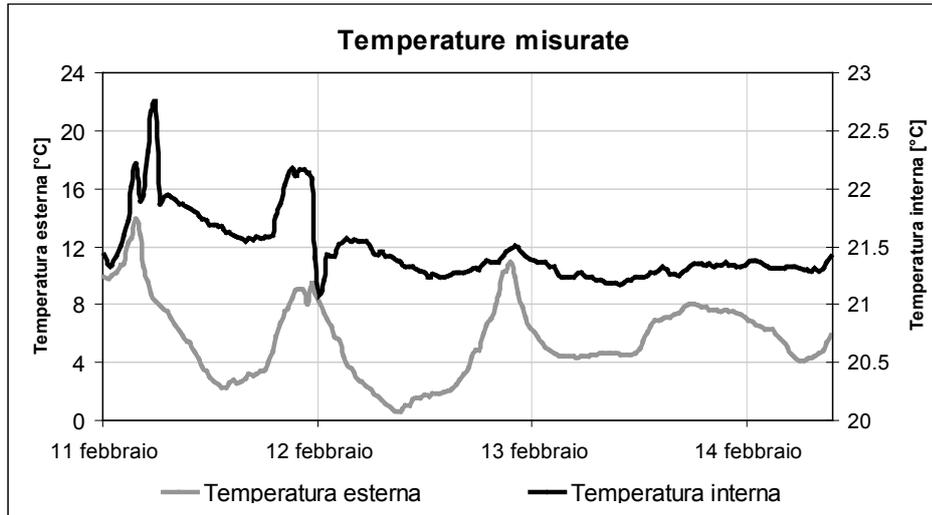


Figura 3.12: Andamento delle temperature misurate.

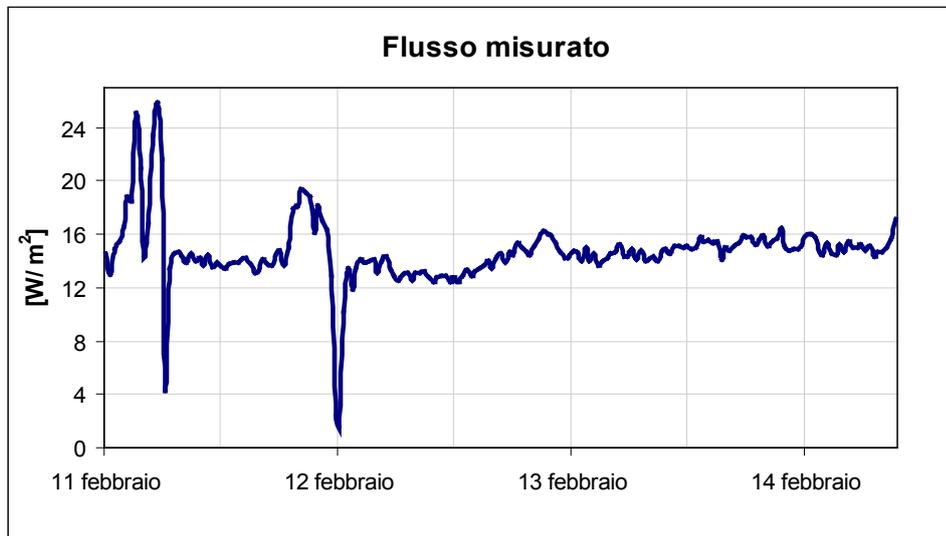


Figura 3.13: Andamento del flusso termico.

Un criterio, suggerito dalla norma, per stabilire se si è raggiunta una condizione di misura accettabile è quello di confrontare i valori di conduttanza ottenuti all'inizio e alla fine delle ultime 24 h di misura. Nel caso in esame, risulta che la conduttanza termica all'inizio delle ultime 24 h di misura risulti pari a $0.891 W/(m^2K)$, mentre la conduttanza termica alla fine delle ultime 24 h di misura è $0.925 W/(m^2K)$, con una differenza percentuale pari al 3.4%. Il risultato, pertanto, si può ritenere affidabile essendo tale percentuale minore del 15%. Per la parete in esame, considerando come conduttanza liminare interna ed esterna rispettivamente valori $h_i=7.7 W/(m^2K)$ e $h_e=25 W/(m^2K)$, la trasmittanza calcolata a regime risulta pari a $0.798 W/(m^2K)$.

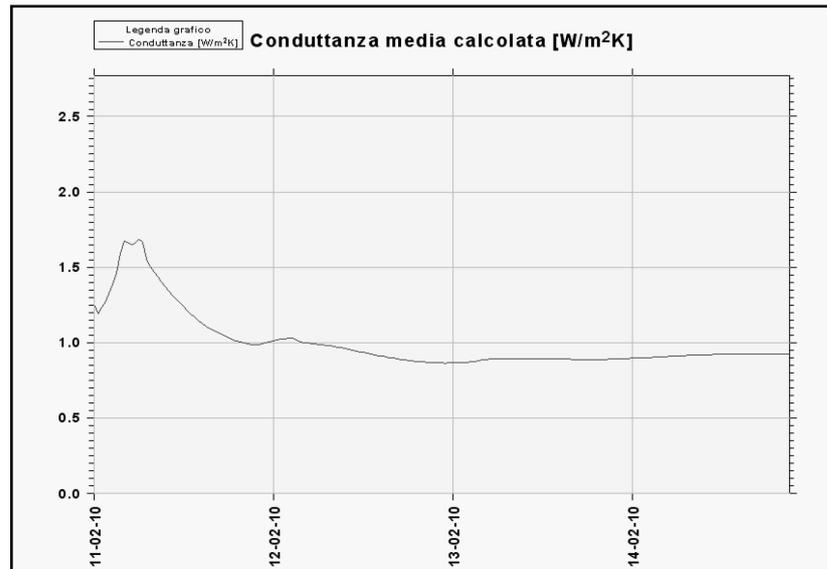


Figura 3.14: Andamento della conduttanza termica.

Questo valore è stato confrontato con quello calcolato analiticamente, secondo quanto previsto dallo standard EN ISO 6946, considerando per gli strati di intonaco e quelli di mattone una conducibilità termica (λ) rispettivamente di 1.4 W/(m K) e 0.55 W/(m K). La trasmittanza termica calcolata vale 0.868 W/(m²K). Si ottiene, pertanto, uno scostamento percentuale tra il valore misurato e quello calcolato del 9% circa.

b.2) Misura in opera della conduttanza termica sul solaio

La seconda misura è stata effettuata sul solaio di copertura (spessore totale di 36 cm) costituito da putrelle in acciaio IPE 200 e tavelle in laterizio forato (Figura 3.15); lo strato di completamento è in calcestruzzo gettato in opera dello spessore di 10 cm e l'interasse fra le travi in acciaio è di 85 cm.

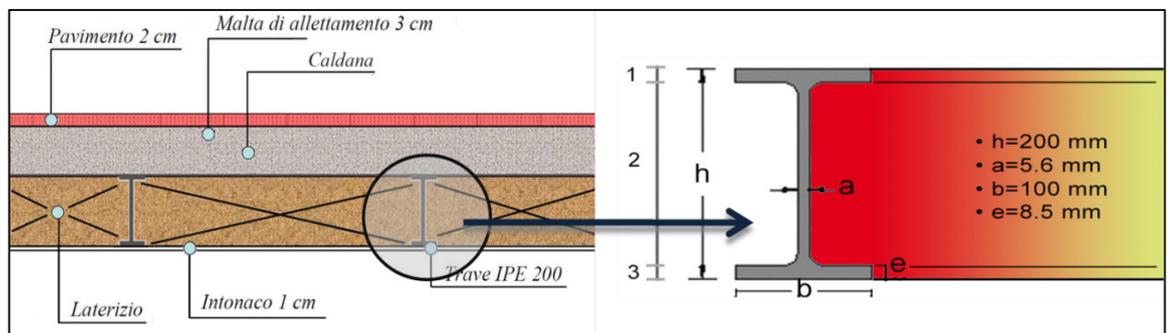


Figura 3.15: Stratigrafia solaio e particolare della trave IPE ad ali parallele.

Anche su questa struttura sono stati installati due nodi di misura. La durata della prova è stata di 4 giorni con un intervallo di acquisizione pari a 30 minuti, cui corrisponde un numero di misurazioni pari a 192. I sensori sono stati posizionati

nell'unica parte accessibile del sottotetto, e nell'ufficio corrispondente del piano inferiore.

Il Δt medio interno – esterno è risultato piuttosto basso (4°C), tuttavia questo si può ritenere non influenzi sensibilmente la misura poiché l'andamento della conduttanza tende a stabilizzarsi ugualmente in modo molto rapido come si vede in Figura 3.16. Dai dati rilevati, quindi, si ricava una conduttanza finale di 3.163 W/(m²K).

Confrontando i valori di conduttanza ottenuti all'inizio con quelli ottenuti alla fine delle ultime 24 h di misura, risulta che la conduttanza termica all'inizio delle ultime 24 h di misura sia pari a 3.226 W/(m² K), mentre la conduttanza termica alla fine delle ultime 24 h di misura risulta 3.226 W/(m²K), con una differenza percentuali pari al 2%, pertanto la misura si può ritenere affidabile. Per la struttura in esame, considerando come conduttanza liminare interna $h_i=7.7$ W/(m²K) ed esterna $h_e=12$ W/(m²K) la trasmittanza calcolata a regime risulta pari a 1.91 W/(m²K).

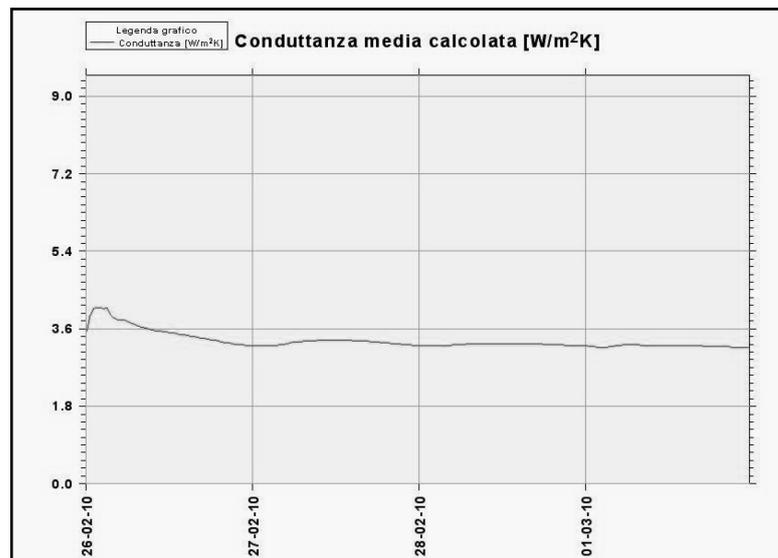


Figura 3.16: Andamento della conduttanza termica per la misura sul solaio.

Per quanto riguarda il solaio, il calcolo analitico della trasmittanza è più complesso in quanto bisogna opportunamente valutare quello che accade nello strato costituito da blocchi in laterizio e travi d'acciaio; invece gli altri strati possono considerarsi, senza troppa approssimazione, omogenei.

Complessivamente la resistenza termica totale del solaio si può calcolare come somma delle resistenze dei singoli strati costituenti, ovvero:

$$R_T = R_i + R_1 + R_2 + R_3 + R_{4m} + R_5 + R_e \quad \text{eq 3.3}$$

Relativamente alle resistenze superficiali, sul lato interno ed esterno continua a valere quanto assunto precedentemente, mentre per gli strati di completamento invece, secondo quanto specificato nei relativi cataloghi tecnici si assume:

- Resistenza pavimento: $R_1 = s_1/\lambda_1 = 0.02/1.3 = 0.015 \text{ (m}^2 \text{ K)/W}$;
- Resistenza malta di allettamento: $R_2 = s_2/\lambda_2 = 0.03/1.0 = 0.03 \text{ (m}^2 \text{ K)/W}$;
- Resistenza caldana: $R_3 = s_3/\lambda_3 = 0.1/1.91 = 0.052 \text{ (m}^2 \text{ K)/W}$;
- Resistenza intonaco: $R_5 = s_5/\lambda_5 = 0.01/0.47 = 0.021 \text{ (m}^2 \text{ K)/W}$.

Per la resistenza media del blocco laterizi e travi, R_{4m} , si devono analizzare tre possibili situazioni relative alla posizione reciproca del laterizio e del profilo metallico. Si consideri, infatti, il profilo mostrato in Figura 3.15. Con le misure riportate sul profilo della trave, sapendo che l'interasse tra le travi in acciaio è di 85 cm e che lo strato ha uno spessore complessivo di 20 cm, si deve calcolare una resistenza pari ad una media ponderale relativa alla combinazione tra profilo d'acciaio e laterizio.

In particolare R_{4m} si può considerare come la serie di tre resistenze, ciascuna pesata per uno spessore relativo all'ingombro dell'ala del profilo e del blocco in laterizio, cioè: R_{4m1} è la resistenza relativa allo strato superiore, mediando quindi l'ala della putrella in acciaio e l'estensione del laterizio, R_{4m2} è la resistenza relativa allo strato di spessore 18.3 cm, (livello tra le due ali) in cui si media la resistenza termica offerta dall'anima della putrella e dalla tavella nella sua massima estensione, R_{4m3} è l'equivalente di R_{4m1} ma con riferimento al livello dell'ala inferiore.

Ciascuna delle tre resistenze però è calcolata considerando un valore medio per la conducibilità termica, dovuto al parallelo tra le conducibilità dei due materiali considerati pesate per le rispettive porzioni di influenza negli 86 cm complessivi dell'interasse tra le anime delle IPE. Un tale procedimento, a rigore, consente di tener conto dell'effetto di non omogeneità indotto dalla presenza di due materiali con caratteristiche termiche differenti in uno stesso strato, pesando ciascuno per quello che è il suo reale contributo nel meccanismo di scambio termico.

Detti, dunque, s_a , λ_a e s_l , λ_l gli spessori e le conducibilità rispettivamente di acciaio e laterizio, la conducibilità equivalente è calcolata con la seguente formula.

$$\lambda_{\text{equi}} = \frac{(s_a * \lambda_a) + (s_l * \lambda_l)}{(s_a + s_l)} \quad \text{eq 3.4}$$

I valori calcolati sono mostrati nella tabella seguente.

	s [m]	λ [W/m K]	λ_{equi}
Livello ala superiore IPE	0.1	54	6.64
	0.76	0.41	
Livello anima IPE	0.0056	54	0.76
	0.85	0.41	
Livello ala inferiore IPE	0.1	54	6.64
	0.76	0.41	

Tabella 3.6: Valori calcolati per la conducibilità termica equivalente.

La resistenza totale dello strato esaminato risulta pari a 0.243 (m²K)/W. Conseguentemente, la trasmittanza termica vale 1.748 W/(m²K) e quindi c'è uno scarto percentuale dal valore misurato circa dell' 8.5%.

c. Descrizione degli impianti asserviti all'edificio

Per quanto riguarda i due piani di pertinenza dell'Università, l'energia termica necessaria a bilanciare le dispersioni invernali e le rientrate termiche estive è fornita da un impianto ad acqua, con caldaia a metano e una macchina frigorifera a compressione di vapore, del tipo aria-acqua, per la produzione dei fluidi termo-vettori di alimentazione dei ventilconvettori, rispettivamente in regime invernale ed estivo. La produzione dell'acqua calda sanitaria avviene invece con dei boiler elettrici tradizionali. Il rilievo diretto, l'analisi di elaborati progettuali, dati di targa e libretti di centrale hanno consentito la definizione di tutti i parametri relativi ai rendimenti dei sottosistemi di generazione. Per quanto riguarda il profilo di funzionamento dell'impianto, durante il periodo di accensione il sistema funziona per mantenere i livelli di temperatura desiderati e non coerenti con quelli previsti a livello legislativo:

- periodo invernale: 22°C dalle 8:00 alle 18:00 dal lunedì al venerdì;
- periodo estivo: 24°C con intervalli i tempo uguali a quelli in regime invernale.

Si osserva che relativamente alle temperature di set-point, per il periodo invernale si è fatto riferimento ai profili per le temperature interne ricavati dalla misura con il termoflussimetro, mentre il valore per il funzionamento estivo, è stato ipotizzato sulla base delle indagini sui dati storici di funzionamento.

Il periodo di funzionamento dell'impianto di climatizzazione ai fini della simulazione, è stato scelto – con riferimento al regime invernale – pari al periodo convenzionale di riscaldamento previsto per la città di Benevento dal D.P.R. 412/93, e quindi dal 15 novembre al 31 marzo.

Le aree commerciali, invece, sono dotate di impianti autonomi consistenti in sistemi multisplit e barriere a lama d'aria, funzionanti sia come refrigeratori che come pompe di calore, con unità interna e cassetta in controsoffitto e unità esterne collocate in copertura.

d. Simulazione del rendimento energetico del sistema edificio/impianti

Come già accennato, lo strumento utilizzato in questo lavoro di tesi per costruire il modello di simulazione energetica dell'edificio è Energy Plus, mediante l'interfaccia grafica Design Builder per la modellazione geometrica dell'edificio.

I dati climatici di progetto sono quelli presenti nei provvedimenti legislativi italiani in merito (D.P.R. 1052/77) per la zona Benevento e riportati in Tabella 3.2. Diversamente, il necessario file climatico atto a descrivere l'anno tipo non è presente né negli archivi TRY, né in quelli IWECA (ASHRAE, 2001) o IGDG. Per tale ragione, uno specifico *Hourly Weather File* è stato ricavato attraverso uno studio dedicato, ad oggi ancora oggetto di ricerca da parte del gruppo di lavoro con cui ho collaborato.

Attraverso DesignBuilder, è stata riportata l'esatta geometria e forma di tutte le superfici opache e trasparenti che sono state caratterizzate in modo conforme a quanto rilevato nell'audit d'involucro. Le Figure 3.17 e 3.18 mostrano il rendering dell'edificio ricostruito.

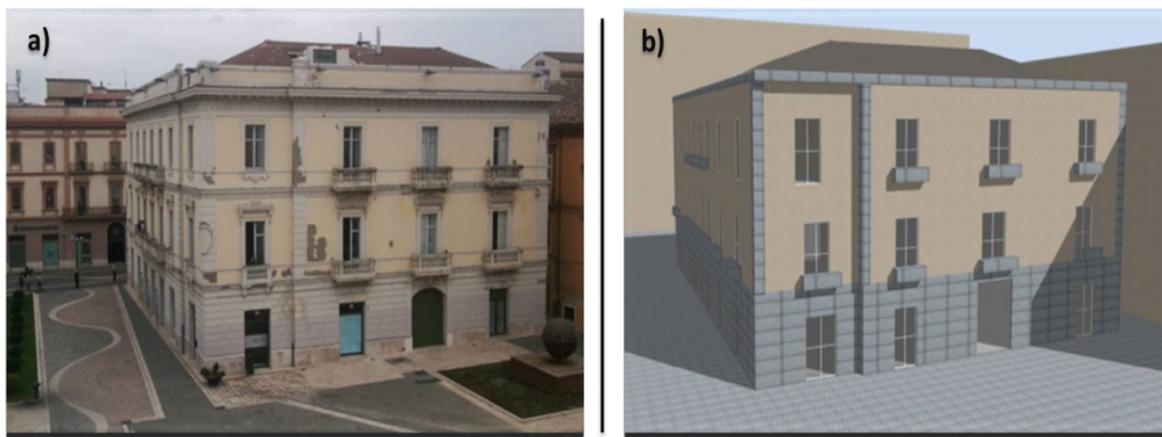


Figura 3.17: Edificio reale (a) e modello di simulazione (b): vista dal lato Palazzo Giannone.

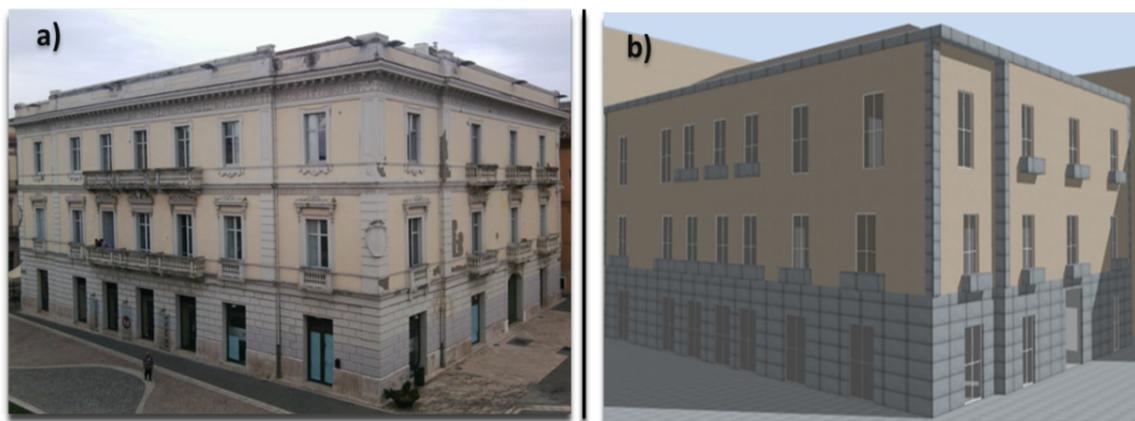


Figura 3.18: Edificio reale (a) e modello di simulazione (b): vista dal lato di Piazza Roma.

Nei due piani di pertinenza dell'Università, rispettando quanto ricavato dal censimento, sono state create 6 zone termiche differenti, per ciascuna delle quali è stato impostato un tasso di rinnovo pari a 6 l/s pers:

- zona termica “*uffici*”: il carico relativo alle apparecchiature è di 16 W/m^2 e per gli occupanti si assume 120 W/m^2 (attività leggera d'ufficio);
- zona termica “*sala riunioni*”: il carico complessivo dei dispositivi presenti è di 4 W/m^2 e la potenza metabolica è assunta 120 W/m^2 ;
- zona termica “*laboratori*”: il carico complessivo è di 27 W/m^2 mentre la potenza metabolica è assunta pari a 160 W/m^2 (attività media in piedi);
- zona termica “*aule*”: alle apparecchiature presenti è assegnato un carico di 3 W/m^2 mentre per gli studenti si assume una potenza metabolica di 99 W/m^2 (attività leggera sedentaria);
- zona termica “*corridoio*”: è una zona termica riscaldata, utilizzata per modellare tutte le zone di passaggio verso l'interno;
- zona termica “*ingresso*”: è una zona termica non riscaldata, utilizzata per modellare tutte le zone di passaggio verso l'esterno e il vano ascensore.

Al tasso di rinnovo impostato, è stato aggiunto un'ulteriore aliquota di 1.2 vol/ora per tener conto degli effetti indotti dalla deformazione delle guarnizioni dei serramenti - oramai in uno stato di conservazione tale da richiedere sostituzione - e il ricambio di aria dovuto alla saltuaria apertura/chiusura delle finestre operata dagli occupanti.

Per quanto riguarda il sistema di illuminazione, da sopralluogo dedicato sono state individuate lampade ad illuminazione indiretta con sorgenti luminose a ioduri metallici. Ciò ha portato ad impostare nel modello un carico medio pari a 5 W/m^2 per ogni ambiente, a cui si aggiungono ulteriori 2 W/m^2 nel periodo invernale, per garantire una qualità di illuminazione soddisfacente.

Dopo aver costruito il modello geometrico in DesignBuilder, ed averlo esportato in EnergyPlus (v.5.0.0), è stato definito l'impianto di climatizzazione senza ausilio di codici di interfaccia. In particolare, la macchina frigorifera è stata modellata con i reali e noti livelli termici dell'acqua termovettore in uscita dall'evaporatore e del fluido refrigerante in ingresso al condensatore. Allo stesso modo, è stato definito il rapporto tra la potenza elettrica assorbita dai fan e quella scambiata nel condensatore (dato di targa della macchina). È stato scelto, tra i vari modelli di refrigeratori del codice EnergyPlus, il modulo "ChillerElectric:EIR", in cui la determinazione dei coefficienti di prestazione a carico parziale si basa sulle polinomiali implementate nel codice DOE-2. Le prestazioni energetiche sono ricavate mediante due curve biquadratiche (capacità di raffreddamento in funzione della temperatura del fluido termovettore in uscita dall'evaporatore, curva di parametrizzazione della variazione dell'input elettrico rispetto alla potenza frigorifera in uscita come funzione della temperatura di uscita dell'acqua dell'evaporatore e della temperatura del refrigerante in ingresso allo scambiatore) e una curva biquadratica che parametrizza la variazione della potenza meccanica fornita dal compressore come funzione del rapporto di carico parziale. I coefficienti sono stati selezionati nell'archivio EnergyPlus Reference Data Sets del codice. Con il medesimo approccio di commistione tra dati reali, misurati, di targa e desunti da monitoraggi, sono stati definiti i dati di input di tutti gli altri sottosistemi caratterizzanti l'impianto di climatizzazione.

Il modello di calcolo, definito in dettaglio mediante dati desunti dalle analisi sopraccitate, ha fornito risultati poi confrontati con i dati storici di consumo, sia per quanto riguarda il prelievo di energia elettrica dalla rete, che relativamente alle forniture di gas naturale. Sebbene il modello sia stato accuratamente costruito, tale confronto ha consentito la validazione definitiva dell'analisi numerica.

In particolare, per definire il bilancio energetico reale dell'edificio, sono state analizzate le distinte dei contratti di fornitura di gas ed energia elettrica del quadriennio 2005-2009. Tali dati, integrati da informazioni relative all'utilizzo di tutti gli impianti, hanno permesso la costruzione di una richiesta energetica media mensile.

Nel grafico seguente (Figura 3.19) sono confrontati gli andamenti per il fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento, così come valutato dalle fatture energetiche, e quello derivante dalla simulazione numerica su modello calibrato.

Per ottenere il valore del fabbisogno netto della porzione di edificio considerato, è stato necessario sottrarre, al valore mensile ricavato, i consumi attribuibili ai locali che ospitano i negozi del piano terra.

Dal grafico si evince come gli andamenti del fabbisogno mostrino una soddisfacente congruenza. Ancora, per ogni mese è mostrato lo scostamento percentuale. Su base

annua, è stato calcolato uno scostamento tra richiesta reale di gas naturale per il riscaldamento (113 MWh) e consumo derivante dall'analisi energetica (110 MWh) pari al 3%.

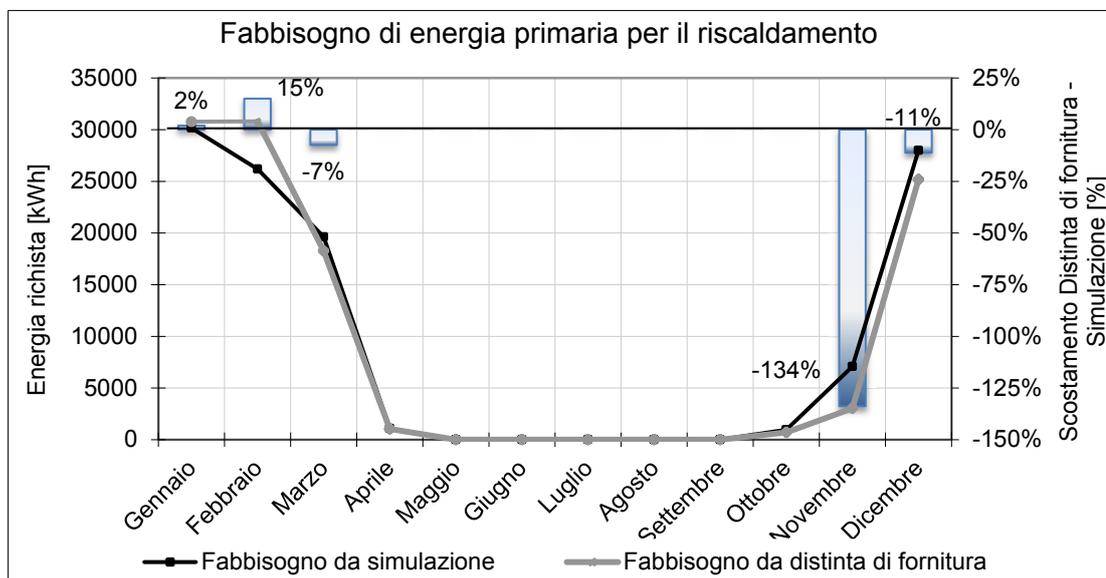


Figura 3.19: Fabbisogno di energia primaria riscaldamento: richieste reali e da simulazione.

In particolare, si deve notare come si sia ottenuto uno scostamento superiore nel mese di novembre. Ciò potrebbe derivare dal fatto che, considerando che nelle elaborazioni delle distinte di fornitura, il dato risulta aggregato e mediato sugli anni, questo sia potuto risultare impreciso o possa aver risentito di un clima particolarmente mite, che quindi non ha richiesto un utilizzo costante e spinto dell'impianto di riscaldamento. A questa motivazione se ne potrebbero aggiungere delle altre, alle quali però non si è avuto modo di trovare riscontro, come ad esempio una sospensione parziale delle attività lavorative o un blocco dell'impianto. In ogni caso, uno scostamento percentuale alto comunque fa riferimento ad uno scarto assoluto, in questo caso, basso.

Per quanto riguarda l'energia elettrica, in Figura 3.20, sono riportati gli andamenti delle richieste, da bolletta e da simulazione. Anche in questo caso, si nota come i profili siano tendenzialmente convergenti, con uno scarto del 4% sul fabbisogno annuale (123 MWh l'energia elettrica da fattura energetica e 118 MWh quella da simulazione). Gli scostamenti mensili sono abbastanza omogenei, con un massimo del 9% nel mese di dicembre. Analizzando gli andamenti delle richieste, si nota che il fabbisogno nel mese di agosto si riduce notevolmente, pur essendo il mese in cui le richieste di condizionamento dovrebbero essere le maggiori del periodo o comunque confrontabili con quelle del mese di luglio.

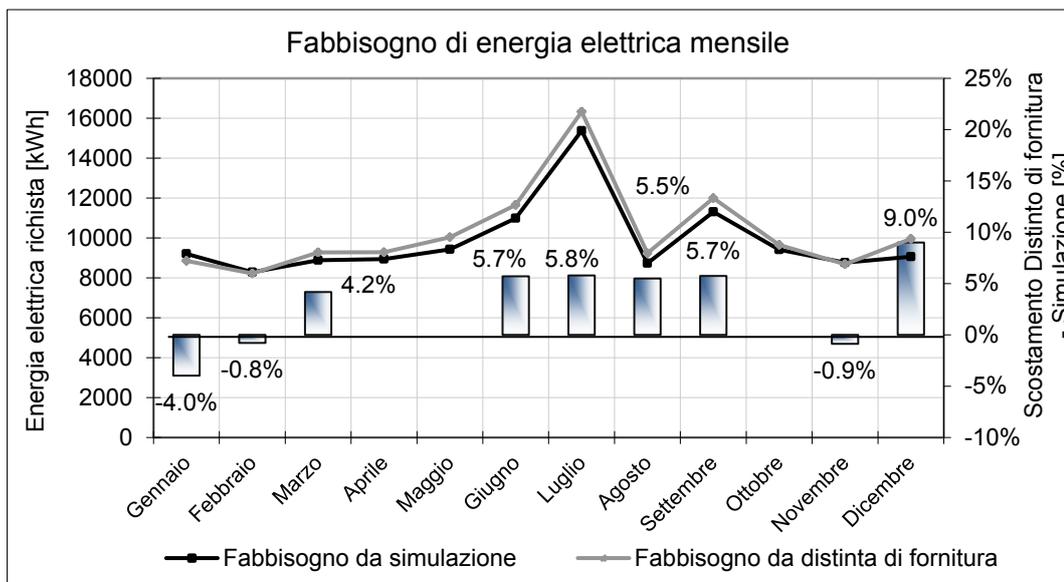


Figura 3.20: Fabbisogno di energia elettrica: richieste reali e modello di simulazione.

A tale andamento, si può provare a dare una spiegazione intuitiva abbastanza giustificata; infatti, ad agosto, le attività didattiche sono sospese mentre continuano a ritmo ridotto solo le attività amministrative, opportunamente intervallate da periodi di ferie per il personale. Pertanto, si riducono sia le esigenze di condizionamento, sia le potenze endogene (macchinari e persone).

Complessivamente, dunque, si può concludere che il modello approssima con ottima accuratezza il comportamento reale dell'edificio.

Laddove si volesse indurre una maggiore convergenza, si dovrebbero elaborare dei modelli che permettano di attribuire ai diversi carichi il relativo contributo rispetto alla richiesta energetica complessiva.

Infatti, per quanto concerne la richiesta elettrica, molteplici utenze richiedono energia (illuminazione, computer, condizionatori, apparecchiature di laboratorio). Per tarare opportunamente il sistema sarebbe necessario avere un'informazione più dettagliata rispetto ai dati mensili reperibili dalle fatture di fornitura energetica, ovvero l'andamento orario del consumo e il monitoraggio del carico relativo ad alcune tipologie di utenza opportunamente selezionate. Questi dati, insieme alle informazioni sulle modalità di utilizzo delle varie apparecchiature, permetterebbero una migliore calibrazione del modello per l'attribuzione dei diversi carichi.

In ogni caso, anche rispetto alle tarature dei modelli riscontrate in letteratura, la calibrazione qui proposta (dati da norma, endoscopie, misure penetrometriche, prove mediante termoflussimetro, incrocio con consumi storici) risulta pienamente soddisfacente.

3.2.2 La diagnosi energetica di un edificio del '900

Il secondo caso studio ha come oggetto *Palazzo Ex-INPS*, sede amministrativa e didattica del Dipartimento d'Ingegneria dell'Università del Sannio. L'edificio ha subito, nel secolo scorso, diverse modifiche e cambiamenti di destinazione d'uso a seguito della riprogettazione del centro cittadino, a partire dal 1926. Pur non essendo oggetto di vincoli storico-architettonici, l'edificio è un interessante caso studio poiché il contesto in cui è inserito, il centro storico di Benevento, è un esempio di “*conservation area*”, cioè un'area il cui valore storico/artistico comporta che nulla del carattere estetico/formale dei suoi edifici possa essere mutato. Una diagnosi energetica finalizzata al retrofit della struttura è dunque interessante e articolata, ma d'altra parte - poiché l'edificio in oggetto è un edificio pubblico - in ogni caso si devono rispettare le prescrizioni circa il “*ruolo esemplare degli edifici degli enti pubblici (Art. 6)*”, in accordo alla Direttiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 25 ottobre 2012 *sull'efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 204/8/CE e 2006/32/CE*. Si potrebbe inoltre sottolineare che tale edificio, pur essendo di epoca recente, potrebbe essere collocato tra quelli che Fabbri [157] definisce *heritage building*. L'autore, infatti, sottolinea che nella definizione di “edificio storico” si dovrebbero distinguere almeno tre categorie:

- monumenti ed edifici di interesse architettonico;
- edifici costruiti prima di una data che si riferisce ad un evento storico importante (*historical threshold*);
- edifici caratterizzati da soluzioni e tecnologie costruttive innovative o di particolare interesse scientifico.

Pertanto, se il 1945 – come comunemente avviene – viene considerato come un “*historical threshold*”, palazzo Ex-INPS rientra negli edifici di interesse storico/culturale. Le analisi qui descritte sono state oggetto del lavoro riportato in bibliografia [158].

a. Analisi dell'utenza

Il primo podestà di Benevento, Matteo Renato Dionisi, agli inizi del 1900 diede avvio ad un progetto di ridefinizione del centro storico della città, con l'obiettivo di valorizzare l'asse che va dall'attuale *Piazza Roma* all'*Arco di Traiano*, in modo da collegare idealmente, nel cono prospettico, quella che doveva essere l'area direzionale, sede dei poteri politici ed economici, con i fasti del passato e l'autorevolezza della storia. In piazza Roma si voleva quindi ubicare la sede della Banca d'Italia, il Palazzo del Littorio ed il Palazzo delle Poste. Demolita la Chiesa del Gesù nel 1926, e con il cambio ai vertici dell'amministrazione cittadina, il progetto fu ridimensionato e al posto del

Palazzo del Littorio, sull'area dell'abbattuta casa Pace, si costruì l'edificio della Cassa Nazionale Assicurazioni Sociali (CNAS) attorno al 1927, l'unico edificio del centro storico di Benevento dotato di portico. Oggi, tale edificio è comunemente chiamato Palazzo Ex-INPS. La Figura 3.21 mostra i progetti dell'edificio conservati presso il Museo del Sannio di Benevento.

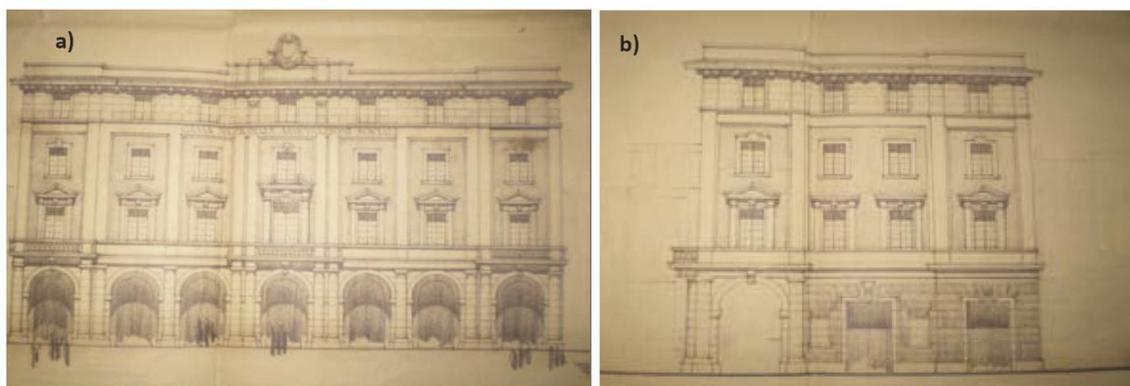


Figura 3.21: Progetto originale: a) prospetto frontale, b) prospetto laterale.

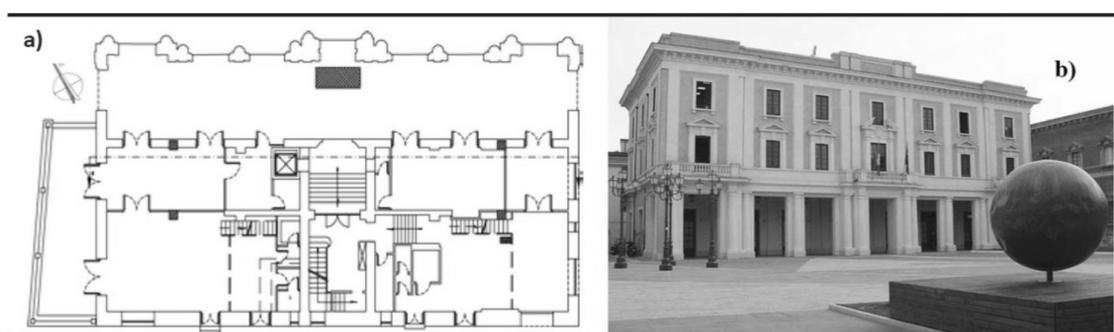


Figura 3.22: Architettura attuale: a) planimetria del piano terra; b) vista dell'edificio dal lato di piazza Roma.

Dal confronto delle Figure 3.21 e 3.22, si vede che la costruzione attuale dell'edificio si discosta dal progetto originale per alcuni particolari: non sono stati costruiti né il terzo piano né il piano ammezzato, tra il piano terra e il primo piano; non sono stati costruiti i balconi previsti sul lato posteriore dell'edificio; lo stemma della CNAS non è posto a sovrastare tutto l'edificio.

Nella sua configurazione attuale, l'edificio - che presenta un portico sul lato nord-est - ha una pianta rettangolare con ingombro massimo di 17.9 m × 34.0 m e altezza complessiva di 13.0 m. La Tabella 3.7 mostra i principali dati geometrici e la percentuale della superficie vetrata per esposizione. La superficie netta climatizzata è pari a circa 1311 m² e il "rapporto di forma" (S/V) è pari a 0.40 m⁻¹.

	Totale	Nord	Est	Sud	Ovest
Superficie Laterale totale [m ²]	1314.5	439.9	212.8	448.9	212.8
Superficie trasparente [m ²]	204.4	75.1	30.1	70.7	28.5
Rapporto finestrato-opaco [%]	15.6	17.1	14.2	15.7	13.4

Tabella 3.7: Composizione dell'involucro: rapporto superfici opache e trasparenti.

Relativamente alla destinazione d'uso, al piano terra dell'edificio i locali sono adibiti ad aule universitarie, mentre al secondo e terzo piano ci sono i laboratori e gli studi dei docenti del Dipartimento di Ingegneria. Attraverso un censimento diretto, sono stati caratterizzati i dati relativi al carico interno in termini di apparecchiature elettriche e occupanti, ed è stato caratterizzato il sistema di illuminazione. Per uniformità di trattazione, i valori ricavati verranno presentati nella caratterizzazione delle zone termiche nel sotto-paragrafo relativo alla costruzione del modello di simulazione. Il profilo di occupazione, coerentemente all'utilizzo della struttura, è stato assunto dalle 9:00 alle 18:00, tutti i giorni ad eccezione del fine-settimana e dei periodi festivi. Ad agosto, si è considerato come periodo non lavorativo i 10 giorni centrali del mese.

Per effettuare una diagnosi energetica, è fondamentale ricostruire il profilo caratteristico di assorbimento energetico attraverso l'analisi dei consumi storici. Tali consumi energetici sono stati dedotti, per l'edificio in esame, dall'acquisizione e dallo studio delle fatturazioni sui pagamenti relativi alle forniture elettriche degli anni 2007-2011, essendo l'energia elettrica l'unico vettore energetico che effettivamente serve l'edificio. L'elaborazione dei dati deve tenere in considerazione molti fattori, in particolare il fatto che dalle distinte dei contratti di fornitura elettrica non si evince la suddivisione del fabbisogno per le diverse voci di carico. Per riuscire a scorporre il fabbisogno elettrico destinato all'impianto di climatizzazione è necessario incrociare i dati delle fatture energetiche con i profili di utilizzo degli impianti e con le informazioni sui carichi ricavate dal censimento dei dispositivi elettrici e del sistema di illuminazione.

Per effettuare tale suddivisione, è stato preso come riferimento il periodo in cui si ha una ragionevole conoscenza del profilo di utilizzo delle potenze installate e quindi del periodo in cui l'impianto di climatizzazione è spento. Ipotizzando, quindi, i carichi fissi (illuminazione, macchinari, produzione di acqua calda sanitaria) relativi ai mesi di Aprile, Maggio e Ottobre, il valor medio del fabbisogno di Aprile e Maggio (13.4 MWh) è stato ritenuto rappresentativo del cosiddetto "elettrico puro", fabbisogno cioè non legato al condizionamento ambientale relativamente al periodo estivo, mentre il fabbisogno di Ottobre (15.0 MWh) è stato considerato come quota di elettrico puro con riferimento al periodo invernale.

Il fabbisogno di energia elettrica mensile per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti è mostrato in figura 3.23. Come si evince dal profilo riportato, il fabbisogno annuale di energia elettrica è di 42.6 MWh. Considerando che per il parco termoelettrico italiano, l'efficienza di conversione è di 0.42 [160] e che il volume netto condizionato è di 5790 m³, il fabbisogno di energia elettrica primaria quindi per il riscaldamento e il raffrescamento è pari rispettivamente a 14.0 kWh/m³ e 3.2 kWh/m³.

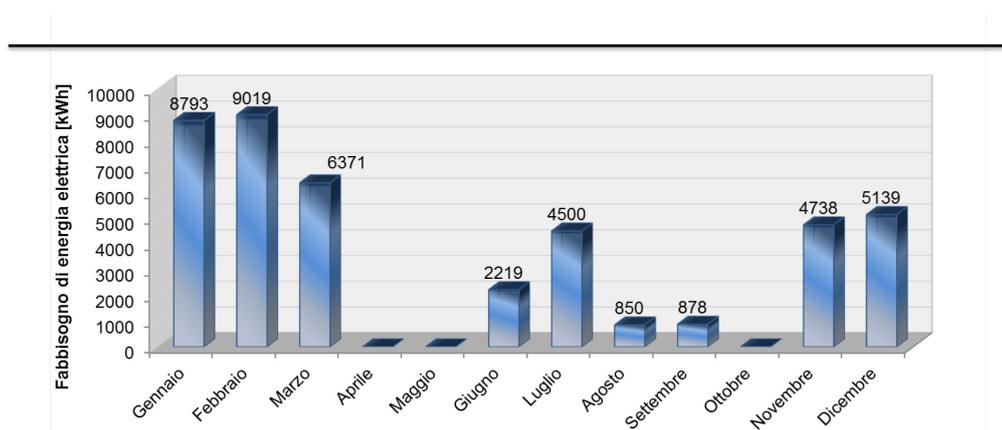


Figura 3.23: Fabbisogno di energia elettrica mensile per il riscaldamento e raffrescamento (valore medio da fattura energetica 2007–2011).

b. Audit d'involucro edilizio

L'utilizzo della termografia ad infrarossi ha consentito attraverso indagini non invasive (e senza contatto diretto), l'acquisizione e l'analisi di informazioni relative alle criticità termiche dei diversi componenti edilizi costituenti l'involucro opaco e trasparente, per i quali quindi è stato possibile determinare le irregolarità inerenti la trasmissione del calore. Le caratteristiche tecniche dello strumento sono quelle riportate per il precedente caso studio.

A partire dall'analisi termografica (Figura 3.24), si è riscontrato che i componenti trasparenti sono la parte dell'involucro edilizio più disperdente, con una differenza di temperatura tra la superficie dei componenti trasparenti e la temperatura dei componenti opachi pari anche a 8°C. In particolare, dai rilievi, si è riscontrato che nell'edificio c'è un unico tipo di componente finestrato con singolo vetro chiaro e infisso di legno. Il valore di trasmittanza considerato per tale componente è 5.8 W/(m² K).

L'ispezione termografica inoltre ha mostrato che gli infissi non sono sempre a tenuta e le connesse infiltrazioni comportano sia un carico termico aggiuntivo in inverno che un forte discomfort localizzato, dovuto a correnti d'aria. Nel progettare la riqualificazione dell'edificio, quindi, si ritiene essenziale pensare di intervenire sull'involucro trasparente.

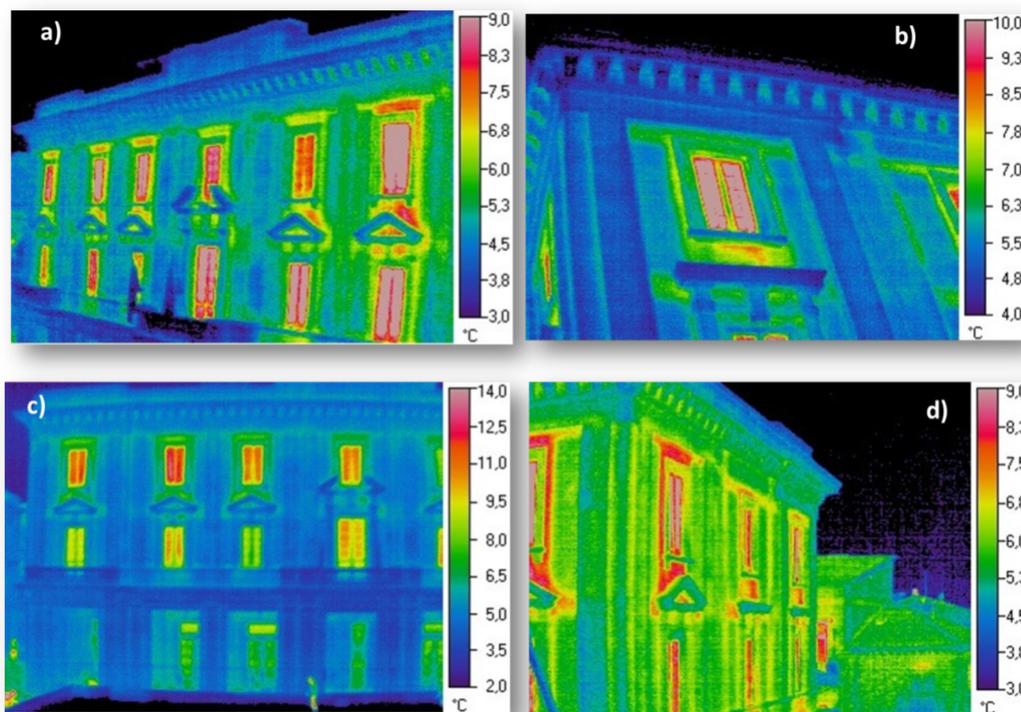


Figura 3.24: Termografia: a),c) vista dell'edificio dal lato di piazza Roma; b) particolare delle finestre su lato sud; d) termografia dell'edificio sul lato est.

La medesima analisi termografica ha consentito di individuare i ponti termici e di ottimizzare il posizionamento dei sensori termoflussimetrici per il rilievo della conduttanza in opera (Figura 3.25). In particolare, la misura è stata eseguita per cinque giorni nel mese di Marzo 2013. Avendo selezionato come tempo di campionamento 1800 s, in accordo ai metodi previsti dallo standard ISO 9869, sono state elaborate 280 misure. La differenza di temperatura tra interno ed esterno è stata di circa 12°C, per cui come evidenziato nell'andamento della conduttanza riportato in Figura 3.25, superata la forte oscillazione del primo giorno, l'andamento del flusso e quindi della conduttanza, tende a stabilizzarsi per mantenersi quasi costante negli ultimi due giorni di rilevazione. Nello specifico, la differenza percentuale tra la conduttanza termica all'inizio e alla fine delle ultime 24 ore è pari al 7% e quindi ampiamente compatibile con quanto prescritto dalla normativa di riferimento.

Assumendo per la conduttanza liminare interna ed esterna rispettivamente i valori $h_i = 7.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ e $h_e = 25 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, la trasmittanza calcolata a regime risulta pari a $0.74 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. La trasmittanza determinata a partire dalla misura in opera della conduttanza è stata confrontata con quella calcolata attraverso la metodologia specificata dalla EN ISO 6946. Dalle analisi condotte dal Laboratorio di Tecnica delle Costruzioni della Facoltà di Ingegneria della stessa Università del Sannio, si è ricavato che la

tompagnatura esterna è costituita da muratura in mattoni pieni con uno spessore totale di 0.64 m, per cui dal calcolo analitico si ottiene una trasmittanza di $0.76 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Lo scostamento tra il valore misurato e il valore ricavato è dunque del 3%.

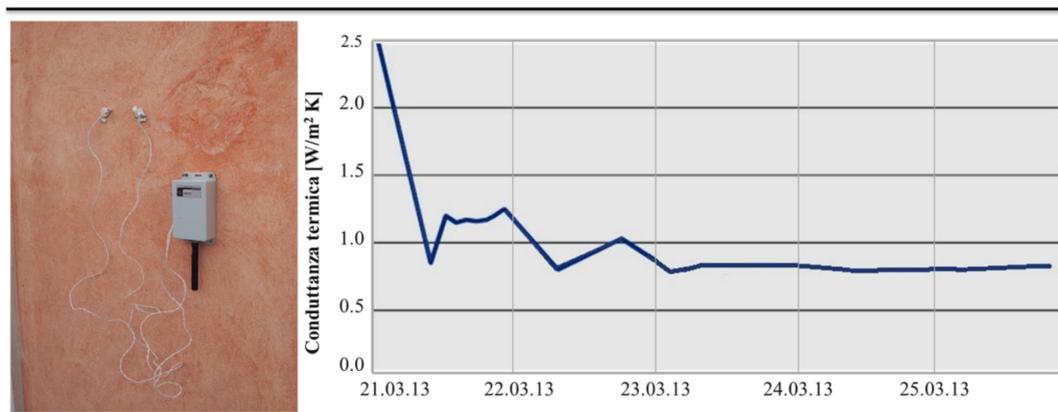


Figura 3.25: Misura in opera con termoflussimetro: a) posizionamento dei sensori su una parete esposta a nord-est; b) andamento della conduttanza termica misurata.

Anche per la caratterizzazione dei solai, si è fatto riferimento alle indagini eseguite dal Laboratorio di Tecnica delle Costruzioni della Facoltà di Ingegneria della stessa Università del Sannio. In particolare, il solaio di terra è in calcestruzzo con uno spessore complessivo di 0.30 m, mentre la copertura ha una struttura in latero-cemento, con uno spessore totale di 0.35 m. Conoscendo la stratigrafia si è proceduto al calcolo analitico della trasmittanza, che risulta per il solaio di terra pari a $2.71 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ e per il solaio di copertura pari a $1.36 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

c. Anagrafe del patrimonio impiantistico

La produzione dei fluidi termo-vettori per la climatizzazione invernale ed estiva è operata mediante utilizzo di una pompa di calore elettrica (EHP) reversibile del tipo aria/acqua, con una capacità in riscaldamento (raffrescamento) di 277 kW (245 kW). I coefficienti di prestazione della macchina, in condizioni nominali, sono pari a:

- $2.89 W_{ter}/W_{el}$ (COP) in riscaldamento;
- $2.63 W_{ter}/W_{el}$ (EER) in raffrescamento.

E' presente un solo scambiatore refrigerante/acqua, a fascio tubiero, di tipo a più circuiti frigoriferi ad espansione diretta. Il refrigerante circola quindi all'interno dei tubi che sono disposti a pettine, mentre l'acqua circola nel lato mantello dove è opportunamente convogliata da appositi setti. Le batterie di scambio refrigerante/aria sono costruite con tubi di rame senza saldature disposti su ranghi sfalsati e meccanicamente espansi in un pacco di alette corrugate di alluminio. I ventilatori delle

batterie di scambio refrigerante/aria sono direttamente accoppiati al motore e sono di tipo elicoidale con ventola dotata di pale in alluminio con profilo alare.

I circuiti frigoriferi sono realizzati con tubazioni in rame ACR; ognuno di essi è dotato di valvola a quattro vie per l'inversione del ciclo frigorifero, di valvole termostatiche di espansione con equalizzazione esterna, di valvole a solenoide e di separatori di liquido. La dotazione di ogni circuito frigorifero è completata da valvole di intercettazione lato refrigerante e lato liquido, da un filtro disidratatore o da un filtro a rete, da un vetro spia con indicatore di umidità, da un pressostato di alta pressione, da un pressostato di bassa pressione, da un pressostato differenziale dell'olio e da una valvola di sicurezza.

Per quanto riguarda l'adduzione e la sottrazione di energia termica, i terminali utilizzati negli ambienti sono ventilconvettori.

d. Modello di simulazione dinamica dell'edificio

La costruzione geometrica del modello di simulazione dell'edificio è stata fatta, come nel caso precedente, attraverso Design Builder. La Figura 3.26 mostra il rendering del modello di simulazione ricostruito.

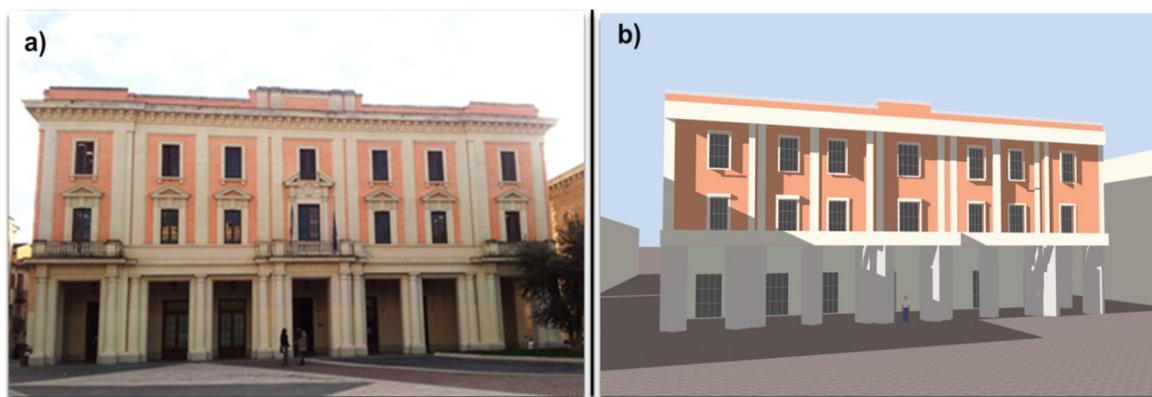


Figura 3.26: Edificio reale (a) e modello di simulazione (b): vista dal lato di Piazza Roma.

Definita la geometria e i principali parametri costruttivi, in accordo a quanto rilevato con l'audit d'involucro, il modello è stato esportato in EnergyPlus (v.7.2.0), dove è stato ricostruito l'impianto asservito all'edificio.

Ripercorrendo i passi già esposti nel precedente caso studio, sono stati impostati i parametri relativi alla località climatica (Benevento), assumendo il periodo di riscaldamento come riportato in Tabella 3.2 e come periodo di raffrescamento quello tra il 1 Giugno e il 30 Settembre. La temperatura di set-point nel periodo invernale è stata fissata a 20°C mentre il periodo di accensione dell'impianto è stato considerato dalle 8:00 alle 18:00 dal lunedì al venerdì. Nel periodo estivo il set-point di temperatura

è 26°C, e l'accensione dell'impianto è programmata dalle 10:00 alle 18:00, sempre dal lunedì al venerdì.

Relativamente ai carichi interni, per modellare il sistema secondo la sua reale destinazione d'uso, sono state create cinque zone termiche le cui caratteristiche principali sono riportate in Tabella 3.8. Il tasso di rinnovo dell'aria è stato fissato a 1.4 AHC, per garantire le necessarie condizioni di comfort e di qualità dell'aria, secondo quanto specificato dallo standard EN 15251 [91]. Più in dettaglio, per controllare la qualità dell'aria è stato utilizzato il "method based on ventilation rate per person or per m² floor area", considerando come soglia di insoddisfatti il 20% degli occupanti, che corrisponde alla *Categoria II*. Il tasso di infiltrazione, che modella gli effetti indotti dalle deformazioni delle guarnizioni dei serramenti, è stato posto pari a 0.7 ACH. Si è ritenuto infatti che questo fosse l'input idoneo, considerando anche l'apertura saltuaria di porte e finestre ad opera degli occupanti.

Zona	Occupazione [m ² /persona]	Carico interno [W/m ²]	Potenza elettrica per illuminazione [W/m ²]
Aule	5.0	7.0	8.0
Uffici	10	12.0	8.0
Laboratori	4.3	18.0	8.0
Bagni	9.4	4.0	8.0
Corridoio/scale	9.4	2.0	8.0

Tabella 3.8: Principali dati relativi alle zone termiche ricostruite per la simulazione.

Per riprodurre i consumi effettivi dell'edificio oggetto di diagnosi, in EnergyPlus l'involucro edilizio è stato modellato utilizzando i seguenti moduli relativi agli elementi costruttivi delle superfici:

- Material;
- Material: no mass;
- Material: Infrared Transparent;
- Window Material: Glazing;
- WindowMaterial:Gas;
- Construction;
- BuildingSurface:Detailed;
- FenestrationSurface:Detailed.

Di seguito, invece, si riporta una breve descrizione dei principali moduli utilizzati per la modellazione dell'impianto di climatizzazione.

Sottosistema di generazione (Plant Heating and Cooling Equipment):

- Refrigeratore del tipo aria/acqua: *ChillerElectric (EIR)* con COP nominale di 2.89 in riscaldamento ed EER nominale di 2.63;
- WaterHeater: Mixed;
- WaterHeater: HeatPump;
- PlantEquipmentOperation: CoolingLoad;
- PlantEquipmentOperation: HeatingLoad;
- PlantEquipmentOperationSchemes.

Sottosistema idronico:

- DesignSpecification: OutdoorAir;
- DesignSpecification: ZoneAirDistribution;
- Sizing: Zone;
- ZoneHVAC: FourPipeFanCoil;
- Coil: Cooling:Water;
- Coil: Heating:Water;
- Coil: WaterHeatingAirToWaterHeatPump
- Fan: ConstantVolume;
- FanOnOff;
- Pump: ConstantSpeed;
- OutdoorAirMixer;

Controlli termostatici e rilevazione umidità in ambiente:

- ZoneControlThermostat;
- ThermostatSetpoint: Dual Setpoint;
- Setpoint Manager Scheduled;

Nodi e connessioni per la logica di comunicazione tra i moduli:

- Connectors;
- Outdoor Air Nodes;
- Branches.

Relativamente ai criteri generali di simulazione stabiliti, per quanto concerne la convergenza e agli algoritmi di risoluzione dei bilanci energetici, questi sono quelli usuali per gli studi in ambito di efficienza energetica in edilizia, e quindi:

- Timestep orario: 2;
- Convergence Limit: Minimum System Timestep 1 minuto;

- Maximum HVAC iterations 20;
- Surface Convection Algorithm - Inside: TARP;
- Surface Convection Algorithm - Outside: DOE-2;
- Heat Balance Algorithm: Conduction Transfer Function;
- Sol-air Distribution: Full Interior And Exterior.

Come algoritmo di risoluzione dei bilanci di energia è stato selezionato il metodo delle funzioni di trasferimento (CTFs), in quanto affidabile e meno oneroso dal punto di vista computazionale rispetto alle risoluzioni alle differenze finite, che, invece, si rendono necessarie in casi particolari non contemplati da questo studio, quali, ad esempio, componenti a cambiamento di fase all'interno delle murature.

Ricostruito il modello dell'edificio, sono stati quindi confrontati i dati di consumo dall'analisi delle distinte di fornitura con i risultati delle simulazioni dinamiche dell'edificio, al fine di validare il modello di calcolo e tutte le ipotesi adottate, e per stimare in modo preciso la bontà degli interventi di riqualificazione energetica proposti e il loro tempo di ritorno economico.

Dalla Figura 3.27 emerge una buona convergenza nei profili di consumo tra il modello simulato e i valori elaborati dalle distinte di fornitura, e si leggono gli scostamenti percentuali mensili.

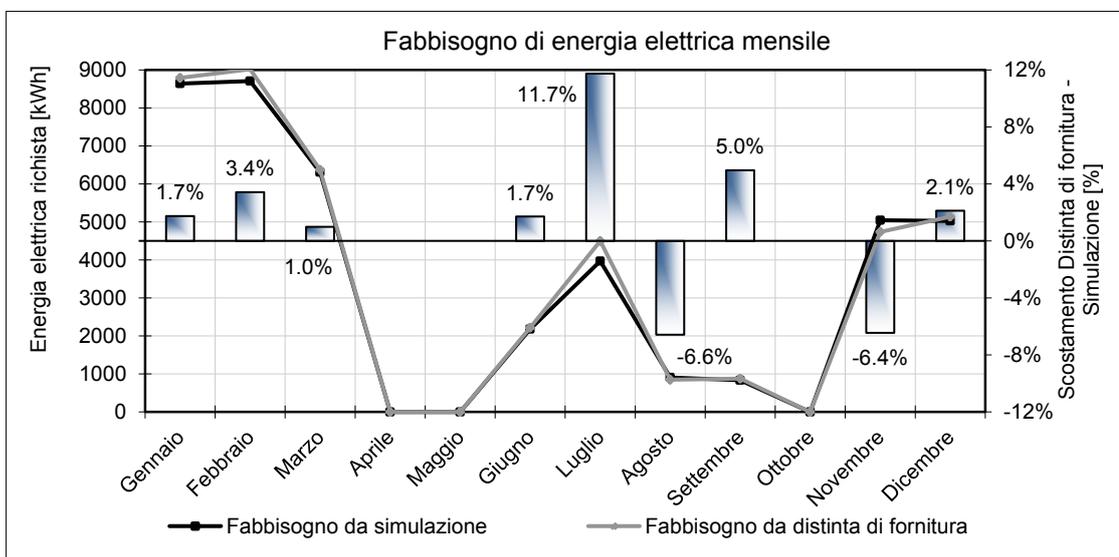


Figura 3.27: Fabbisogno di energia elettrica: richieste reali e modello di simulazione.

La scelta dei parametri impostati consente di affermare che il modello è calibrato se confrontato ai valori di tolleranza proposti dalla letteratura scientifica. La maggiore differenza si ha nel mese di luglio, poiché probabilmente il profilo di occupazione e di carico interno impostato non rispecchiano il profilo reale.

Il fabbisogno totale di energia elettrica, come ricostruito attraverso le simulazioni, è di 41.6 MWh con uno scostamento percentuale del 2% rispetto al valore ricavato dai contratti di fornitura.

3.2.3 La diagnosi energetica di un edificio ospedaliero

Come ultimo caso studio, è proposta la diagnosi energetica dell'edificio *Day-Hospital del Complesso Ospedaliero "G. Pascale"*, in quanto significativo esempio di applicazione della simulazione energetica dinamica, calibrata, all'edilizia ospedaliera. Coniugare gli standard di efficienza energetica vigenti con le norme e le leggi relative alla progettazione delle strutture sanitarie, rappresenta una delle più grandi sfide per il processo di efficientamento energetico del patrimonio edilizio nazionale. Anche se dati disaggregati sui consumi dell'edilizia ospedaliera sono di difficile reperibilità, tuttavia gli edifici a destinazione d'uso ospedaliera assumono una veste strategica nel processo di efficientamento, poiché si stima che questi abbiano fabbisogni medi tre volte superiori rispetto a quelli del settore civile residenziale in analoghe condizioni climatiche [160]. Questa necessità è stata sottolineata anche dall'AICARR [161], che ha suggerito l'introduzione di strumenti legislativi che regolamentino i principi generali su cui basare gli interventi di retrofit negli edifici ospedalieri italiani costruiti negli ultimi 50 anni.

Intervenire su questo settore, però, significa considerare contemporaneamente sia la normativa attualmente vigente in materia di risparmio energetico in edilizia che le norme di progettazione specifiche per le strutture sanitarie, aspetti, questi, talvolta contrastanti tra loro. Le norme e le leggi per la progettazione delle strutture ospedaliere [162-168], infatti, sono molteplici e riguardano svariati campi di applicazione, data la complessità e l'importanza sociale della struttura. Il controllo dei parametri che influenzano il benessere ambientale e microclimatico all'interno di un ambiente e le strategie di controllo di tali grandezze - mediante il ricorso ad opportuni impianti di climatizzazione e ventilazione - presentano le maggiori difficoltà applicative proprio nell'ambito dell'edilizia ospedaliera, caratterizzata, da una parte, dalla necessità di massimo rigore nel controllo ambientale e, dall'altra, da una complessità funzionale elevatissima, con destinazioni d'uso variegata e che richiedono diverse condizioni microclimatiche.

Il controllo del microclima, la necessaria purezza dell'aria, le esigenze di ricambio e filtrazione assumono particolare rilevanza nelle funzioni prettamente "ospedaliere" dei nosocomi, e quindi i reparti destinati alle degenze, le camere operatorie e quelle sterili, i reparti destinati ad ospitare malati immunodepressi (che devono essere protetti dall'ambiente esterno, mantenendo gli ambienti che li ospitano in sovrappressione e comunque separando tali zone mediante aree-filtro) o infettivi (da cui l'ambiente

esterno deve essere protetto, mantenendo, pertanto, tali reparti in depressione), terapie intensive e ambulatori. Altre funzioni, quali uffici amministrativi e dirigenziali, pur non richiedendo particolari strategie di controllo microclimatico, in ogni caso esigono quelle condizioni interne tali da garantire benessere per lavoratori ed utenti in genere. Ancora, reparti specialistici (tra cui le varie zone destinate a riabilitazione) e laboratori di ricerca possono richiedere condizioni interne specifiche, la qual cosa determina, in molti casi, anche qui la presenza di impianti di climatizzazione dedicati. In Tabella 3.9 si riporta anche se in maniera non esaustiva, per varie funzioni ospedaliere, una sintesi di talune condizioni di progetto [169].

	Aria Esterna (ACH)	Aria in circolo (ACH)	CONDIZIONI DI PRESSIONE	Temperatura invernale (estiva) (°C)	Umidità Relativa (%)
Reparti di Degenza					
Infettivi	2-5	4-10	Depressione	21/23 (24/26)	40/55
Immuno-depressi	2-5	4-10	Sovrappressione	22/24 (24/26)	40/55
Cure intensive	2	6	Sovrappressione	22/24 (26)	40/55
Degenza in genere	2	4	Legate al reparto	21/23 (26)	40/55
Diagnostica					
Farmacia	2	4	Sovrappressione	19/21 (25/27)	40/60
Medicazioni	2	4	Sovrappressione	19/21 (25/27)	40/60
Fisioterapia	2	6	Depressione	19/21 (25/27)	40/60
Blocchi Operatori					
Sale operatorie	15	15	Sovrappressione	22 (26)	45/60
Sala parto	5	12	Sovrappressione	22 (26)	40/60
Traumatizzati	5	12	Sovrappressione	22 (26)	40/60
Servizi					
Bagni	---	10	Sovrappressione	19/21 (25/27)	40/60
Cucine	2	10	Depressione	19/21 (25/27)	40/60

Tabella 3.9: Condizioni di progetto per alcune funzioni interne all'edilizia ospedaliera.

Da questa si evince come l'impianto di climatizzazione dovrebbe essere in grado di bilanciare condizioni di temperatura e umidità differenti sia tra reparto e reparto che, nel tempo, in quasi ogni singolo ambiente, non solo per le diverse condizioni di carico che possono verificarsi ma proprio per esigenze operative intrinseche alla destinazione d'uso dei locali. Dai dati di tabella 3.9 si intuisce che a rendere particolarmente complessa la progettazione sono soprattutto i tassi di aria di rinnovo richiesti in ciascun ambiente, cui si aggiunge spesso la necessità di evitare il ricircolo dell'aria o il mescolamento tra volumi d'aria provenienti da ambienti diversi e di fornire, in rapporto alle esigenze di reparto, aria sterile con l'utilizzo di sofisticati sistemi di filtrazione.

Dalle pur sintetiche osservazioni riportate, si comprende la complessità progettuale che caratterizza un intervento di efficientamento sull'edilizia ospedaliera, soprattutto relativamente alle scelte impiantistiche.

Con l'obiettivo di evidenziare le principali considerazioni precedentemente sottolineate, viene quindi proposta la diagnosi energetica finalizzata al retrofit energetico dell'edificio del Day-Hospital del Complesso Ospedaliero "G. Pascale", localizzato nei quartieri collinari di Napoli, all'interno della zona che, data la significativa densità di nosocomi, è comunemente conosciuta alla cittadinanza come "Zona Ospedaliera".

L'Istituto Nazionale Tumori IRCCS Fondazione "G. Pascale" ha di recente avviato un processo di riqualificazione dei propri edifici ed impianti, volto al miglioramento delle condizioni di occupazione, alla riduzione dei consumi energetici da fonte tradizionale associati all'utilizzo degli edifici e alla sicurezza degli addetti e dei fruitori. In particolare, tale riqualificazione si inserisce nel piano di interventi strutturali già individuati dall'Istituto per il biennio 2010-2011. All'interno di tali attività, nell'ambito di una convenzione di ricerca e supporto tecnico scientifico, è stato siglato un accordo di collaborazione tra l'Azienda Ospedaliera e il Dipartimento di Ingegneria (DING) dell'Università degli Studi del Sannio.

Come visibile in Figura 3.28, il complesso ospedaliero presenta un'articolazione alquanto complessa, costituendosi di diverse strutture deputate a diverse funzioni, all'interno di un contesto in cui trovano spazio giardini, parcheggi e viali. I tre edifici principali sono evidenziati in Figura 3.28, mentre la descrizione delle rispettive destinazioni d'uso segue nell'elenco numerato di cui sotto:

1. Complesso ospedaliero (8 corpi adiacenti per un totale di 20'000 m²);
2. Day Hospital (circa 12'000 m²);
3. Ripartizione scientifica (circa 8'500 m²);
4. Palazzina Uffici (non rappresentata in Figura 3.26, circa 1'200 m²).

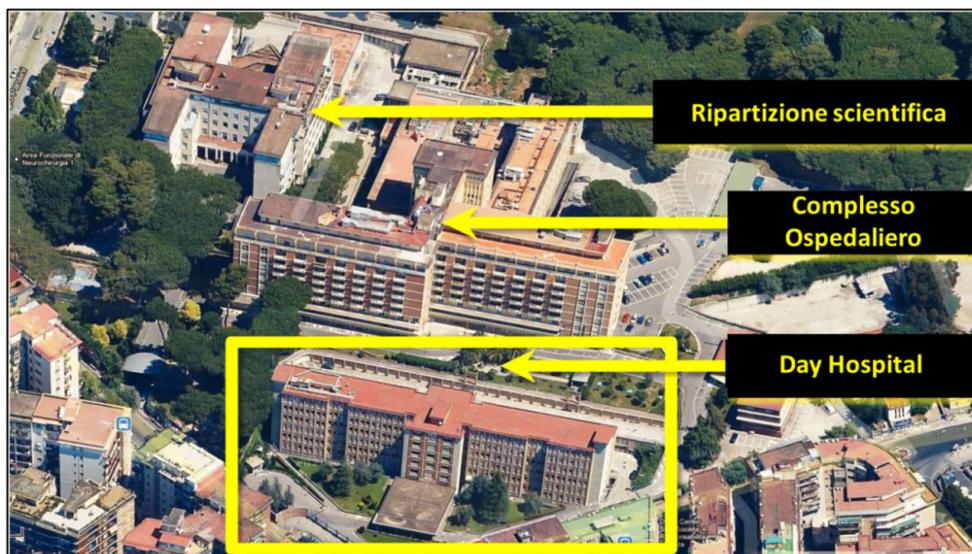


Figura 3.28: Struttura dell'Istituto Ospedaliero G.Pascale.

a. Analisi dell'utenza

L'edificio Day-Hospital, mostrato in Figura 3.29, ha una forma rettangolare allungata, simmetrica rispetto ad un corpo centrale più largo, elevandosi per 7 piani fuori terra (incluso uno parzialmente interrato), con un'altezza complessiva di 26.6 m. A Sud-Ovest, l'edificio presenta un blocco posto in adiacenza, mono-piano, contiguo al piano terra del corpo principale.

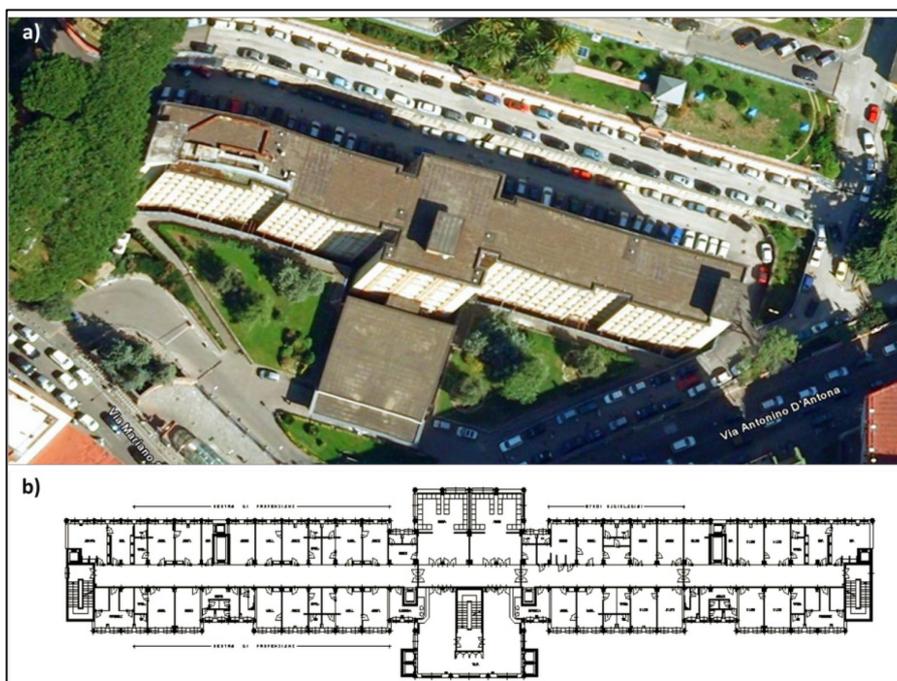


Figura 3.29: Day-Hospital: a) vista completa dell'edificio; b) pianta del piano tipo.

Le principali caratteristiche geografiche e climatiche della città di Napoli, in cui è situato l'edificio, sono riportate nella tabella seguente (3.10).

Località	NAPOLI
Latitudine	40° 51'
Longitudine	14° 16'
Gradi giorno	1034
Zona climatica	C
Temperatura esterna minima invernale	+2
Periodo convenzionale di riscaldamento	15 Novembre- 31 Marzo

Tabella 3.10: Dati climatici della città in cui è situato l'edificio – Napoli.

A partire dal primo piano, le tipologie di destinazione d'uso dell' edificio, di cui si darà descrizione dettagliata nel paragrafo relativo alla costruzione del modello di simulazione, sono quelle tipiche dell'attività ospedaliera in cui sono presenti

apparecchiature elettromedicali specifiche il cui consumo deve essere valutato caso per caso. A questo, si deve aggiungere l'apporto metabolico delle persone. Con riferimento al particolare caso in esame, considerazioni separate vanno fatte per il piano seminterrato e per il piano terra. Infatti, il piano seminterrato è occupato essenzialmente dalla centrale termica e dai magazzini, cioè depositi permanenti di macchine o archivi. Questi locali saranno modellati come ambienti evidentemente non climatizzati. Invece, al piano terra, la sezione centrale è occupata da una banca e da un'area ristoro e, pertanto, tali ambienti possono essere modellati in riferimento ai profili che la letteratura tecnica suggerisce per tali destinazioni d'uso.

b. Audit d'involucro

L'edificio è stato oggetto di un accurato audit energetico, che ha permesso di conoscere le stratigrafie e quindi di valutare i parametri termici stazionari e dinamici caratterizzanti l'involucro edilizio, in accordo con quanto prescritto dalla norma EN ISO 6946. Il calcolo numerico poi è stato incrociato con misure in campo mediante monitoraggi con termoflussimetro, seguendo le disposizioni e i criteri della norma ISO 9869, in modo da poter ricercare un riscontro tra i valori teorici e quelli sperimentali.

La misura in opera della trasmittanza ha riguardato la parete esterna che, come mostrato in Figura 3.30, si può considerare costituita da tre "sottostrutture edilizie", specificate di seguito con il valore che si otterrebbe dal calcolo analitico della trasmittanza termica:

1. Vani sottofinestra: tamponatura in muratura con uno spessore di circa 15 cm, trasmittanza $1.67 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$;
2. Parete esterna: tamponature esterne in doppio tavolato di mattoni forati, caratterizzate da laterizi forati da 10 cm sul lato interno, intercapedine inclusa, e mattoni semi-forati in clinker, a faccia vista sul lato esterno; trasmittanza calcolata $0.877 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$;
3. Intelaiatura verticale in calcestruzzo armato: il reticolo di travi e pilastri presenta un sistema a telaio in calcestruzzo armato senza isolamento. Lo spessore dei pilastri (intonacati) è di 40 cm e la trasmittanza termica calcolata è pari a $1.42 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

In particolare, le misure con termoflussimetro hanno riguardato il vano sottofinestra (Figura 3.30 b) e la parete con rifinitura esterna in mattoni (Figura 3.30 c).



Figura 3.30: Misura con termoflussimetro: a) schema della parete esterna; b) posizionamento sensori lato interno del sottofinestra; c) posizionamento sensori lato esterno parete con rifinitura in mattoni.

La trasmittanza termica complessiva valutata incrociando le misure in opera e considerando per ciascuna sottostruttura il peso percentuale riportato in Tabella 3.11, risulta pari a $1.30 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$;

Sottostruttura	Peso [%]
Sezione pilastri e travi	33
Sezione sottofinestra	18
Sezione cassonetto	15
Sezione parete in mattoni	34

Tabella 3.11: Incidenza di ciascuna sottostruttura alla composizione della parete esterna.

Per quanto concerne il solaio a terra e il solaio di copertura, si è considerata una struttura in latero-cemento, senza presenza di isolamento termico, con una trasmittanza termica di calcolo pari a $2.68 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Il corpo d'ingresso, antistante il primo piano rialzato dell'edificio, invece, presenta una struttura più omogenea, cui è attribuita una trasmittanza di $1.05 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. I componenti trasparenti sono costituiti da finestre con vetro-camera semplice con intercapedine d'aria (3/6/3) e infisso in metallo; la trasmittanza termica di calcolo è pari a $3.2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

c. Descrizione degli impianti termici asserviti al Day-Hospital

Mediante ispezione diretta, sono stati raccolti i dati sugli impianti di riscaldamento e raffrescamento, di produzione dell'acqua calda sanitaria e per la illuminazione artificiale degli ambienti, e si è realizzato il censimento delle principali apparecchiature elettriche presenti. Relativamente agli impianti termici, a servizio dell'intero complesso

ospedaliero (a meno della palazzina uffici dotata di impianto autonomo) è presente una centrale termo-frigorifera al piano seminterrato di uno dei corpi costituenti il plesso degenze, in cui si trovano anche tutti i circuiti di distribuzione e le elettropompe per la circuitazione dell'acqua. La centrale termo-frigorifera alimenta tutti gli edifici dal punto di vista termico (riscaldamento ed acqua calda sanitaria) ed i soli corpi dell'edificio principale per quanto concerne il condizionamento estivo. Con riferimento alla climatizzazione estiva, gli altri edifici, e quindi anche il Day-Hospital, sono alimentati da impianti autonomi presenti nei cortili o sulle coperture.

I quattro generatori di vapore in centrale termica (a gas naturale dalla rete di città) alimentano tre scambiatori di calore per il circuito di riscaldamento (da 2000 kW ciascuno), sia i due scambiatori a servizio dei boiler per la produzione dell'acqua calda sanitaria. Dagli scambiatori di calore, decentrati presso ciascun blocco, l'acqua è inviata ai collettori di distribuzione da cui si dipartono tutte le utenze dell'impianto di riscaldamento a mezzo di elettropompe centrifughe. Il livello termico del fluido termovettore caldo disponibile al circuito secondario degli scambiatori di calore risulta essere di circa 55°C, utilizzabile quindi dai terminali in camera (convettori e fan coil) e dalla batteria di riscaldamento delle unità di trattamento aria. Per quanto concerne il condizionamento estivo, come detto, l'edificio principale è dotato di due gruppi frigoriferi con condensazione in aria, ciascuno con una potenza frigorifera di 700 kW. Il fluido termovettore prodotto da tali unità è inviato ad un collettore generale (in centrale termo-frigorifera) da cui spillano i vari circuiti dell'edificio ospedaliero e della ripartizione scientifica. Nello stesso locale sono presenti tutte le distribuzioni e le elettropompe per la distribuzione dell'acqua calda e refrigerata a servizio dell'impianto di riscaldamento e condizionamento estivo; i due refrigeratori sono installati all'aperto di fronte il corpo "Piastra Radiologica".

Per quanto concerne l'approvvigionamento elettrico, il complesso dispone attualmente di una cabina elettrica principale situata al piano seminterrato dell'edificio ospedaliero, dove è presente l'arrivo in MT e la trasformazione in BT funzionale ai fabbisogni elettrici di tale edificio e delle utenze tecnologiche; sono altresì presenti le alimentazioni in MT per le cabine di trasformazione a servizio dell'edificio Day-Hospital e dell'edificio della Ripartizione Scientifica.

d. Modello di simulazione dinamica dell'edificio

Dopo aver impostato i parametri climatici descrittivi della località rispetto alla quale simulare il comportamento energetico dell'edificio, si è passati alla creazione del modello e alla scelta dei materiali di involucro opaco e trasparente in modo coerente a quanto determinato attraverso l'audit.

Per realizzare un'analisi accurata, è stato necessario costruire un modello di calcolo molto dettagliato, tale da ben specificare tutte le zone termiche in funzione della destinazione d'uso dei diversi locali in cui ciascun piano è suddiviso.

Complessivamente, l'edificio – con riferimento al solo Day-Hospital – è stato suddiviso, ancora per quanto concerne la definizione del modello, in molteplici zone termiche differenti, analizzate contemporaneamente per gestire meglio l'influenza reciproca dei diversi ambienti con caratteristiche sensibili differenti. In particolare, si è proceduto alla seguente zonizzazione:

- al piano seminterrato: archivi, ascensori, centrale termica, deposito, ingresso e atrio, locale ascensori, magazzini, scale e servizi;
- al piano terra (Figura 3.31): accettazione, Istituto bancario, bar, area cartelle cliniche, centralino, centro di calcolo, corridoio, deposito, vano scala, laboratori farmaceutici, sale d'attesa, ambienti adibiti a segreteria e direzione, servizi, uffici informatici, uffici prenotazione, ufficio tecnico;
- al piano primo: ambulatori e mediche, stanza caposala, senologia, chirurgia plastica, corridoi, ecografie, guardiole, ortopedia, personale, sala riunioni, sala d'attesa, scale, servizi e wc, spogliatoi, studi medici, terapia, terapia antalgica, urologia;
- al piano secondo (Figura 3.32): accettazione e centro prevenzione, ambulatori, degenze, depositi, corridoio, guardiola, studi personale, servizi e wc, spogliatoi, studi provveditorato, studi radiologia, sala d'attesa;
- al piano terzo: ambulatorio e sala d'attesa immunologia, cardiologia, corridoio, deposito, laboratori, guardiola, citopatologia, lavanderia, medicina nucleare, patologia clinica, medicina nucleare, sala d'attesa, sala riunioni, uffici dei medici e del personale, wc;
- al piano quarto: ambulatorio chemioterapia, ambulatorio oncologia, degenze, AVO, corridoi, depositi, ematologia, personale, sala d'attesa, scale, servizi, wc, spogliatoi;
- al piano quinto: ambulatori medicina, ambulatori endoscopici, attesa ed accettazione, blocco operatorio, guardiola, preparazione medici, sale d'attesa, servizi, wc, scale, spogliatoi, sterilizzazione, studi medici, depositi.

Nel calcolo dei carichi termici, sono state considerate le condizioni al contorno proprie della norma UNI 10339/1995 "Impianti aerulici a fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura", in particolare per quanto riguarda gli affollamenti (0.1 persone/m^2) ed il volume d'aria di rinnovo ($11 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ persona) in utenze ospedaliere. Per quanto

riguarda il carico di illuminazione dell'edificio in esame, questo è stato definito rispetto a ciascuna zona termica, considerandone lo specifico uso ed i presunti profili di occupazione.

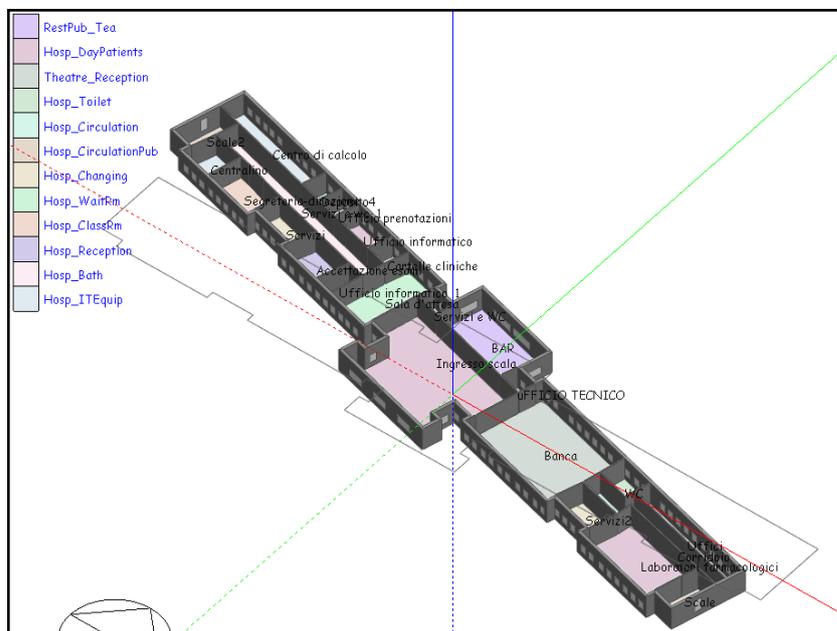


Figura 3.31: Particolare delle zone termiche del piano terra.

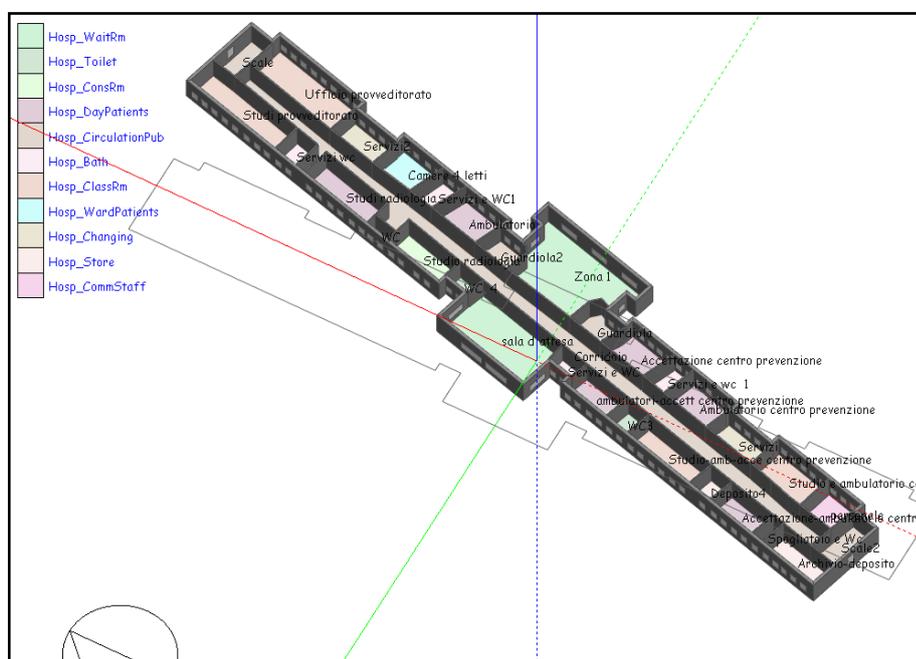


Figura 3.32: Particolare delle zone termiche del secondo piano.

Infine la Figura 3.33 mostra il rendering del modello dell'edificio.

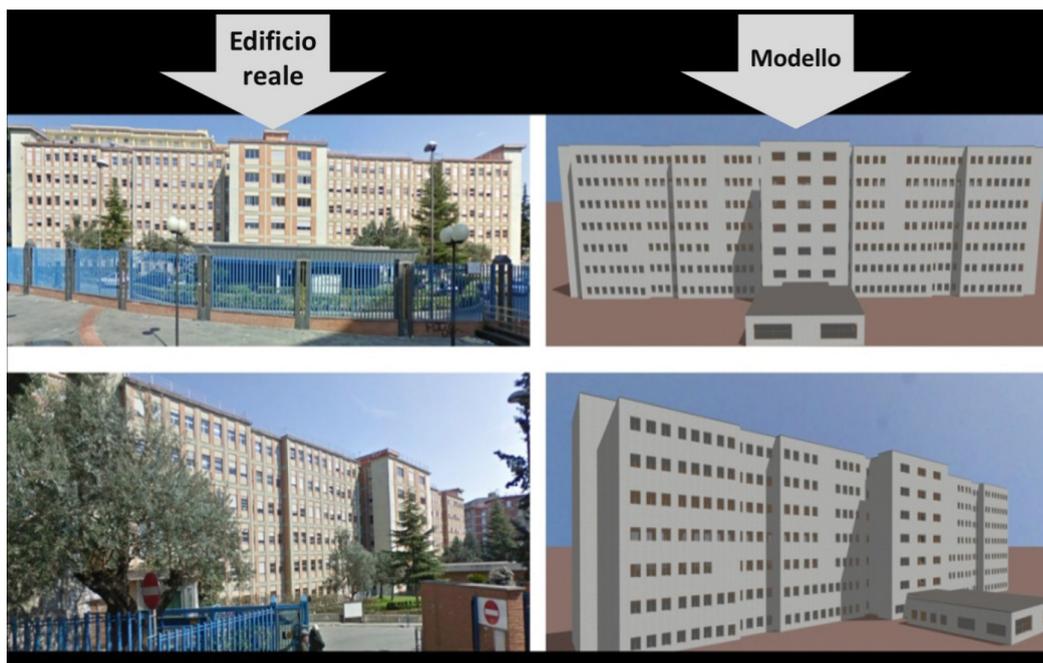


Figura 3.33: Edificio reale (a) e modello di simulazione (b).

La calibrazione del modello è stata effettuata attraverso un'analisi dei consumi di energia elettrica e termica desunti dalle distinte di fornitura energetiche relative all'anno 2009, nonché mediante i risultati di misure "amperometriche" fornite (effettuate sui quadri elettrici principali al fine di stimare la potenza elettrica prelevata dai vari edifici). Tali misure, unitamente ad un puntuale censimento delle apparecchiature, hanno consentito di suddividere i carichi complessivi per i vari edifici presenti nel complesso.

La tabella riporta i carichi in riscaldamento e raffrescamento con riferimento alla sola aliquota sensibile.

Carico termico di picco	Riscaldamento	Raffrescamento
Carico interno (persone, macchinari, etc.) (kW)	21.18	217.51
Dispersione componenti finestrati (kW)	-57.06	150.82
Infiltrazioni (kW)	-240.42	73.00
Dispersione componenti opachi (kW)	-505.25	99.06
Carico sensibile totale (kW)	781.55	-540.38
Potenza sensibile totale (W/m ²)	77	-53

Tabella 3.12: Carico sensibile di riscaldamento e raffrescamento per l'edificio attuale.

Nel quarto capitolo, nella paragrafo dedicato alla progettazione del retrofit degli edifici saranno valutati i fabbisogni di energia primaria, determinando con attenzione le caratteristiche degli impianti termici, e quindi contemplando le perdite energetiche dovute al sistema di generazione (generatori di vapore), agli scambiatori, alla rete di distribuzione, al sistema di controllo e regolazione.

3.3 Ponti termici: verifica di un metodo di risoluzione numerica, per l'integrazione in codici dinamici di simulazione

Nell'ottica di ottimizzare gli strumenti a disposizione della diagnostica degli edifici, durante il percorso di ricerca di questi anni è stato messo a punto un modello numerico di risoluzione dei ponti termici, sviluppato per consentirne una agevole implementazione all'interno dei codici per la simulazione energetica dinamica, con riferimento a quelli maggiormente accreditati e diffusi nella comunità scientifica impegnata in tema di efficienza energetica in edilizia. Con riferimento al modello numerico proposto, implementato in Matlab, è stata valutata l'affidabilità, sia in termini di precisione della soluzione che di tempo di calcolo e risorse richieste attraverso il confronto con le soluzioni ottenute dall'applicazione di codici propri della termo fluidodinamica computazionale e attraverso indagini sperimentali con flussimetri e termo-camera ad infrarossi. L'analisi è stata condotta per diverse tipologie di ponte termico.

Nel seguito, si mostreranno sia il metodo che i test di validazione, evidenziando come al variare del numero di celle della griglia di calcolo, dei timestep della simulazione, delle condizioni ambientali e del tipo di geometria analizzata per la determinazione del flusso termico, il metodo proposto ha un errore massimo mai superiore al 5% rispetto ai risultati che si otterrebbero con algoritmi di soluzione ai volumi finiti.

Inoltre è emerso che i tempi di calcolo, e quindi la potenza computazionale necessaria, sono estremamente contenuti rispetto alle analisi condotte mediante risolutori commerciali CFD. Tale evenienza, considerando la moltitudine di ponti termici presenti all'interno di un edificio, rappresenta elemento che incoraggia ulteriori studi.

Infine, come si evincerà dalla formulazione fisico-matematica, la possibile implementazione del metodo in programmi di analisi energetica dell'edificio - quali, ad esempio, EnergyPlus - risulta pertanto ragionevole e praticabile, consentendo di ottenere risultati più verosimili e vicini, rispetto alle attuali versioni di tali codici commerciali, alla reale prestazione energetica dell'involucro edilizio.

3.3.1 Il problema dell'analisi dei ponti termici

I ponti termici, generalmente localizzati in corrispondenza delle giunzioni tra gli elementi edilizi o dove la composizione degli stessi elementi edilizi si modifica, producono due effetti: una alterazione del flusso termico e una modifica della temperatura interna superficiale rispetto ai componenti di involucro in cui il flusso termico può essere assunto come mono-dimensionale.

La norma UNI EN ISO 10211: *Ponti termici in edilizia - Flussi termici e temperature superficiali - Calcoli dettagliati* [97] definisce un ponte termico come quella parte dell'involucro edilizio dove la resistenza termica, altrove uniforme, cambia in modo significativo per effetto di:

- compenetrazione totale o parziale di materiali con conduttività termica diversa nell'involucro edilizio;
- variazione dello spessore della costruzione;
- differenze tra l'area della superficie disperdente sul lato interno e quella del lato esterno, come avviene per esempio in corrispondenza dei giunti tra parete e pavimento o parete e soffitto.

Le cause di cui sopra possono verificarsi singolarmente o combinare i propri effetti. Già nel 1995, Kosny e Christian [170] hanno dimostrato che la resistenza termica di una parete - rinforzata con profili metallici - può ridursi di oltre il 45%, per effetto dei ponti termici. Kosny e Kossecka [171] inoltre, nel 2002, hanno valutato come l'ipotesi di flusso mono-dimensionale, nella computazione di ponti termici, possa condurre ad una valutazione della resistenza termica offerta da una struttura edilizia errata fino al 44%.

Ad oggi, i codici numerici per la simulazione termo-energetica dinamica del sistema edificio/impianto di climatizzazione operano bilanci energetici sulle pareti, secondo ipotesi di flusso-monodimensionale, mediante metodi risolutivi basati generalmente sulle funzioni di trasferimento (come descritto nei paragrafi precedenti di questa Tesi), senza apportare nessuna correzione per tenere conto della presenza dei ponti termici. Se le pareti presentano una bassa capacità termica, l'errore è contenuto; viceversa, se si valutano alcune pareti in muratura, gli effetti bi/tri-dimensionali risultano tutt'altro che trascurabili.

In letteratura sono disponibili diversi approcci per l'analisi dei ponti termici. In [172] è sviluppata la teoria della parete equivalente, che consente di analizzare murature con strati posti *in serie* ed *in parallelo*, con le stesse caratteristiche termo-fisiche delle strutture originarie. Ben Larbi [173] ha proposto diversi modelli statistici sulla valutazione della trasmittanza equivalente dei ponti termici bi-dimensionali, sviluppando poi atlanti che descrivono le geometrie più comuni.

Relativamente alla risoluzione numerica dei ponti termici, Deque et al. [174,175] hanno sviluppato modelli che consentono di analizzare il flusso termico trasmesso mediante rappresentazione nello spazio di stato (i.e., "state-space method"). Stephenson e Mitalas [176] hanno elaborato un metodo per ricavare le funzioni di trasferimento relative a flussi mono-dimensionali in strutture multistrato mediante ricorso alla trasformata / anti-trasformata di Laplace. Tale approccio è quello rispetto

cui conduce i bilanci energetici il codice Blast (Building Loads Analysis and System), partendo dalle procedure sviluppate da Hittle [177] e da Hittle and Bishop [178].

Come anticipato nei paragrafi precedenti, nella maggior parte dei casi, i programmi di simulazione risolvono il calcolo del flusso termico con l'ipotesi di mono-dimensionalità, trascurando gli effetti dei ponti termici [179]. Soprattutto con riferimento alle simulazioni energetiche dinamiche, se i ponti termici non sono adeguatamente presi in considerazione, la precisione dell'analisi può essere fortemente limitata.

Ritornando agli algoritmi numerici di risoluzione, la formulazione secondo le funzioni di trasferimento (CTF) stabilisce che il flusso di calore su una faccia di elemento dell'involucro è legato alle temperature superficiali interne ed esterne all'istante considerato e ad alcuni istanti precedenti, così come al valore assunto ai timestep precedenti dal flusso termico stesso [16]. Il flusso termico è calcolato numericamente, senza completa conoscenza dell'andamento delle temperature all'interno della struttura muraria. Pertanto, il campo termico in parete non è determinato. Diversamente, per risolvere multi-dimensionali fenomeni di scambio termico all'interno dell'involucro edilizio, metodi alle differenze finite (Finite Element - FEM) e metodi ai volumi finiti (Finite Volume - FVM), discretizzano la struttura, risultando, anche se molto onerosi dal punto di vista computazionale, ben più precisi nel risolvere i fenomeni di scambio termico. Pertanto, i codici CFD (Computational Fluid Dynamic) adottano generalmente queste metodologie numeriche. In particolare, il dominio di calcolo viene discretizzato in un gran numero di celle elementari, generando una griglia di calcolo (mesh) sulla quale applicare dei metodi di risoluzione iterativi al fine di risolvere le equazioni di conservazione dell'energia. Anche se questa metodologia può essere teoricamente applicata per la valutazione della trasmissione termica attraverso i componenti d'involucro, l'accoppiamento di algoritmi CFD e programmi di simulazione energetica dell'edificio per studi estesi a interi anni, è piuttosto complicato e diversi autori lo hanno sottolineato.

In particolare Zhai et al. [180], hanno analizzato le difficoltà di accoppiamento delle simulazioni energetiche orarie (nel dominio del tempo) e gli studi di fluidodinamica computazionale nel dominio spaziale, evidenziando le differenze nei modelli fisici alla base dei due algoritmi. Questi hanno individuato come possibile accoppiamento il valore del coefficiente di scambio termico convettivo e la differenza tra la temperatura desiderata in ambiente e la temperatura superficiale della parete.

Zhai e Chen [181] propongono diverse soluzioni per combinare i due approcci: a) accoppiamento statico, b) accoppiamento dinamico. L'accoppiamento, tuttavia, è abbastanza difficile e non può essere sempre applicato. Pertanto, gli stessi autori [182], descrivono le situazioni particolari in cui è strettamente necessario.

Da questa breve sintesi si capisce che, sebbene per analizzare il flusso termico attraverso l'involucro edilizio, considerando i ponti termici, sia necessario un accoppiamento tra programmi di simulazione energetiche dell'edificio e codici CFD, con algoritmi di risoluzione secondo metodi FVM o FEM, questo accoppiamento è molto complicato.

Nella sua Tesi di Dottorato, J. E. Seem [183] ha dimostrato che, operando una opportuna discretizzazione del dominio spaziale, il metodo delle funzioni di trasferimento può efficacemente risolvere anche la trasmissione del calore bi- e tri-dimensionale attraverso ponti termici.

Tornando alla trasmissione del calore in transitorio, Seem et al. [184], Ceylan e Meyers [185] e Ouyang e Haghigat [186] hanno proposto procedure numeriche di risoluzione delle funzioni di trasferimento attraverso la metodologia di calcolo nello spazio di stato (i.e., "state space representation"). Tale formulazione è stata poi inserita nel codice sorgente del software EnergyPlus.

Ulteriore miglioramento del metodo è stato predisposto da Renon [176], il quale ha applicato tale metodologia di risoluzione a vari ponti termici, delineando anche la possibilità di implementazione di questa in codici numerici, con particolare riferimento ad EnergyPlus.

Gli studi condotti da J. E. Seem [183,184] sono il punto di partenza del metodo numerico elaborato, il quale propone un criterio, inserendo talune approssimazioni, per ridurre i tempi di calcolo e l'onere numerico/computazionale richiesto.

3.3.2 Modellare il flusso bi-tridimensionale all'interno dei software di simulazione energetica degli edifici

Il campo di temperatura in una struttura è espresso dalla soluzione dell'equazione della conduzione, riportata da White [190] e qui proposta all' equazione 3.5.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_v \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad \text{eq 3.5}$$

Assumendo, come ipotesi, la costanza di k (conducibilità termica del materiale), ρ (densità) e c_v (calore specifico a volume costante), rispetto alla temperatura e in assenza di generazione, si ottiene l'Equazione 3.6, in cui $\alpha = k/(\rho c_v)$ rappresenta la diffusività del materiale.

$$\alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad \text{eq 3.6}$$

Per una struttura molto estesa lungo l'asse z , caratterizzata da condizioni uniformi su tale ascissa, la componente del gradiente di temperatura lungo l'asse z è trascurabile, e dunque l'equazione può essere ridotta a quella espressa dall'equazione 3.7:

$$\alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad \text{eq 3.7}$$

Le condizioni iniziali devono invece essere specificate caso per caso. Negli esempi qui analizzati si farà riferimento ad una temperatura iniziale costante (T_0).

La soluzione della trasmissione del calore, mediante metodi analitici e valutando il problema nei suoi aspetti di transitorietà temporale e bi-dimensionalità, risulta talora molto complessa.

Come in precedenza accennato, una delle possibili strade praticabili consiste nel ricorso alla metodologia di analisi alle differenze finite. Tale procedura numerica prevede discretizzazione del dominio di interesse, al fine di ridurre il modello di calcolo da un sistema di equazioni differenziali ad un set di equazioni algebriche. Per la soluzione esistono in letteratura diverse tecniche, dipendenti dalla metodologia adottata, che, a seconda della qualità della griglia di calcolo, incidono sulla qualità dei risultati, sull'entità dei tempi di risoluzione e sull'onere computazionale. Un tempo di calcolo eccessivamente lungo, legato sia alla qualità della "mesh" che al "time-step" di riferimento, pregiudica la applicabilità del metodo, rendendolo idoneo solo all'applicazione su geometrie semplici e limitatamente a singoli o ridotti istanti temporali.

Per far fronte a tali limiti, connessi alle risorse richieste, Seem ha proposto una soluzione alternativa mediante utilizzo delle funzioni di trasferimento.

Il primo step prevede la discretizzazione (ovvero la riduzione) del volume oggetto di studio in un definito numero di nodi. Su ciascuno di tali nodi andrà eseguito un bilancio di energia che dunque definiscono un sistema di equazioni differenziali, ordinarie e del primo ordine.

In un sistema con n variabili di stato, p input e m output, la rappresentazione nella forma dello spazio di stato ha la struttura mostrata nel sistema di equazioni 3.8.

$$\begin{cases} \frac{dx}{d\tau} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad \text{eq 3.8}$$

Nelle equazioni i termini rappresentano:

- A = matrice di costanti, di dimensione n x n;
- B = matrice di costanti, di dimensione n x p;
- C = matrice di costanti, di dimensione m x n;
- D = matrice di costanti, di dimensione m x p;
- y = vettore degli m output;
- τ = tempo;
- u = vettore dei p input;
- x = vettore delle n variabili di stato.

Dopo aver effettuato la discretizzazione del dominio di interesse, gli elementi che costituiscono le matrici A, B, C e D risultano essere indipendenti sia dall'intervallo di tempo considerato che dagli input del sistema.

La soluzione di calcolo per un sistema di equazioni differenziali del primo ordine a coefficienti costanti è data da Brogan [189] e qui riportata nell'equazione 3.9, dove δ [h] è il passo temporale, u(τ) è il vettore degli input compreso tra l'istante t e t+δ, che può essere determinato attraverso la relazione proposta all'equazione 3.10.

Sostituendo, la Equazione 3.10 nella 3.9, si ottiene l'equazione 3.11 e quindi la 3.12.

$$x_{t+\delta} = e^{A\delta} x_t + \int_t^{t+\delta} e^{A(t+\delta-\tau)} B u(\tau) d\tau \quad \text{eq 3.9}$$

$$u(\tau) = u_t + \frac{(\tau-t)}{\delta} (u_{t+\delta} - u_t) \quad \text{eq 3.10}$$

$$x_{t+\delta} = e^{A\delta} x_t + \int_t^{t+\delta} e^{A(t+\delta-\tau)} B \left[u_t + \frac{\tau-t}{\delta} (u_{t+\delta} - u_t) \right] d\tau \quad \text{eq 3.11}$$

$$x_{t+\delta} = e^{A\delta} x_t + \left[\int_0^\delta e^{A(\delta-\alpha)} d\alpha \right] B u_t + \left[\int_0^\delta \alpha e^{A(\delta-\alpha)} d\alpha \right] \left[\frac{B}{\delta} (u_{t+\delta} - u_t) \right] \quad \text{eq 3.12}$$

Con riferimento all'equazione 3.12, la soluzione del primo integrale è riportata all'equazione 3.13, mentre il secondo è risolto nell'equazione 3.14.

$$\int_0^\delta e^{A(\delta-\alpha)} d\alpha = A^{-1} (e^{A\delta} - I) \quad \text{eq 3.13}$$

$$\int_0^{\delta} \alpha e^{A(\delta-\alpha)} d\alpha = A^{-1} A^{-1} (e^{A\delta} - I) - A^{-1} \delta \quad \text{eq 3.14}$$

Definiti, poi, i termini riportati alle seguenti equazioni 3.15, 3.16 e 3.17, il vettore delle variabili all'istante $t+\delta$ è calcolato così come riportato nell'equazione 3.18.

$$\Phi = e^{A\delta} \quad \text{eq 3.15}$$

$$\Gamma_1 = A^{-1} (e^{A\delta} - I) B \quad \text{eq 3.16}$$

$$\Gamma_2 = \left[A^{-1} A^{-1} (e^{A\delta} - I) - A^{-1} \delta \right] \cdot \frac{B}{\delta} = A^{-1} \left(\frac{\Gamma_1}{\delta} - B \right) \quad \text{eq 3.17}$$

$$x_{t+\delta} = \Phi x_t + (\Gamma_1 - \Gamma_2) u_t + \Gamma_2 u_{t+\delta} \quad \text{eq 3.18}$$

L'ultimo termine della parte destra dell'equazione 3.18 richiede la conoscenza dell'input all'istante temporale successivo a quello considerato.

Introducendo uno "shift factor -F", definito da [190] e dettagliato nell'equazione 3.19 per la generica variabile "v", è poi possibile scrivere l'equazione 3.18 nella forma dell'equazione 3.20.

$$F = \frac{v_{t+\delta}}{v_t} \quad \text{eq 3.19}$$

$$x_t = (FI - \Phi)^{-1} \cdot (F\Gamma_2 - \Gamma_1 + \Gamma_2) u_t \quad \text{eq 3.20}$$

Infine, operando semplici sostituzioni all'interno del sistema di cui alla 3.8, si ottiene:

$$y_t = [C \cdot (FI - \Phi)^{-1} \cdot (F\Gamma_2 - \Gamma_1 + \Gamma_2) + D] \cdot u_t \quad \text{eq 3.21}$$

La soluzione di quest'ultima equazione richiede elevati tempi di calcolo. Come dimostrato da Seem, una riduzione dei tempi di calcolo potrebbe aversi utilizzando l'algoritmo di Leverrier, cui si rimanda con la trattazione di [191] e di Zheng e Wang [192].

Seem al fine di by-passare il problema, propose il ricorso all'equazione 3.22, in cui S è una matrice di dimensione (m x p) di coefficienti delle funzioni di trasferimento. Gli

elementi di tale matrice sono definiti alle equazioni di cui al sistema 3.23, in cui e_j è un coefficiente della funzione di trasferimento.

$$y_t = \sum_{j=0}^n S_j u_{t-\delta_j} - \sum_{j=1}^n e_j y_{t-\delta_j} \quad \text{eq 3.22}$$

$$\begin{cases} S_0 = CR_0\Gamma_2 + D \\ S_j = C[u_{j-1}(\Gamma_1 - \Gamma_2) + R_j\Gamma_2] + e_j D & 1 \leq j \leq n-1 \\ S_n = CR_{n-1}(\Gamma_1 - \Gamma_2) + e_n D \end{cases} \quad \text{eq 3.23}$$

Il vantaggio della equazione 3.22 consiste nel correlare l'output dell'istante desiderato alla serie degli input di quell'istante, e alla serie degli input ed output degli istanti precedenti. In particolare, si osserva come all'aumentare del numero dei nodi, n , i coefficienti della funzione di trasferimento riducano la propria entità con la progressione di j . Tale procedura richiede il calcolo dei coefficienti delle matrici delle funzioni di trasferimento, la qual necessità incrementa oneri e tempi computazionali.

Sono disponibili in letteratura diversi metodi per ridurre il numero di equazioni ad un numero gestibile e nello stesso tempo tale da non pregiudicare la qualità dei risultati, tra cui si segnalano gli studi di Marshall [193] e Moore [194]. Gao et al. [195] ha proposto un modello di riduzione che, accoppiato al calcolo del flusso termico monodimensionale attraverso le pareti, consente la determinazione del carico termico dell'edificio. La procedura, poi, è stata implementata nel codice TRNSYS.

Il metodo proposto a seguito degli approfondimenti condotti, mira a semplificare quello proposto da Seem assumendo che il vettore rappresentativo delle variabili di sistema (x – temperatura dei nodi) è poco legato alla variazione dei parametri ambientali passando dall'istante t a $t+d$. Questa ipotesi consente di semplificare l'equazione 3.18 e di riscriverla come:

$$x_{t+\delta} = \Phi x_t + (\Gamma_1 - \Gamma_2)u_t + \Gamma_2 u_t \longrightarrow x_{t+\delta} = \Phi x_t + \Gamma_1 u_t \quad \text{eq 3.24}$$

Applicando poi il fattore F solo a x_t l'equazione 3.20 diventa:

$$x_t = \Gamma_1 \cdot u_t \cdot (FI - \Phi)^{-1} \quad \text{eq 3.25}$$

Infine, sostituendo nella equazione 3.21, si ottiene:

$$y_t = [C \cdot (FI - \Phi)^{-1} \cdot \Gamma_1 + D] \cdot u_t \quad \text{eq 3.26}$$

L'intero sistema di equazioni è ora molto più semplice e la sua risoluzione è alquanto rapida. Nel seguito della Tesi, diverse analisi circa l'affidabilità di questa nuova procedura sono proposte, mediante confronto sia con procedure numeriche badate sull'analisi ai volumi finiti (utilizzando come codice per le comparazioni il software commerciale Fluent), rispetto al metodo originale proposto da Seem, e ancora con rilievi sperimentali della trasmissione del calore mediante indagini presso edifici dell'Università degli Studi del Sannio.

3.3.3 Configurazioni analizzate e discussione

Come sopra anticipato, l'algoritmo di calcolo introdotto e implementato in MatLab™ [196] è stato validato sia numericamente che sperimentalmente. In particolare, nel seguito sono proposti i principali risultati ottenuti per tre casi studio che sono stati oggetto dei lavori scientifici in bibliografia [197,198].

Il primo caso studio riguarda un ponte termico di forma: lo spigolo fra due muri esterni di uguale struttura, nel seguito indicato con A_{pt} . Per questa struttura, i risultati ottenuti attraverso il metodo di calcolo proposto, sono stati confrontati sia numericamente (rispetto al modello originale proposto da Seem) che sperimentalmente attraverso un apparato di misura, che prevede un termoflussimetro, un flussimetro a film sottile, sonde di temperatura e una termocamera ad infrarossi.

Il confronto numerico poi è stato esteso anche a geometrie più complesse:

- × un pilastro d'angolo inserito in una muratura esterna, nel seguito indicato come L_{pt} ;
- × l'innesto a T tra una muratura esterna ed una muratura interna di differente struttura, nel seguito indicato come T_{pt} .

Queste strutture sono tipiche degli edifici in cemento armato, caratteristiche dello stock costruttivo Europeo.

In dettaglio, al fine di testare l'affidabilità della metodologia proposta, dal punto di vista numerico, i risultati sono stati confrontati con quelli ottenibili adottando un metodo risolutivo del tipo FVM, utilizzando il software Ansys Fluent [199] e rispetto al modello originale proposto da Seem.

Prima dell'applicazione, tale modello di riferimento è stato verificato e calibrato al fine di valutare l'impatto della *mesh* sulla qualità della soluzione. La griglia di calcolo, infatti, può essere realizzata in diversi modi (strutturata, non strutturata, ortogonale o meno) e può variare anche in funzione della forma delle celle elementari (triangolare, quadrangolare, tetraedrica e così via). Il numero di nodi gioca un ruolo primario nel

risultato di una simulazione. Pertanto, è necessario valutare l'indipendenza dei risultati al variare della griglia computazionale. Con riferimento

In particolare, si è trovato che dopo un periodo iniziale di stabilizzazione, necessario per conseguire la convergenza computazionale, circa 20 h per A_pt e 70 h per L_pt e T_pt, le griglie di calcolo definite non influenzano i risultati. Secondo UNI EN ISO 10211 [97], i risultati ottenuti da due simulazioni consecutive, effettuate raddoppiando il numero di nodi della griglia di calcolo, non deve differire più di 1%. Nel caso studio in esame si è trovato che i flussi termici sono sostanzialmente gli stessi, passando da un numero di maglie di base a griglie con un numero di nodi 15 volte superiore.

Il confronto è stato effettuato al variare delle condizioni al contorno e quindi al variare della temperatura esterna e della radiazione solare incidente; per queste variabili, si è considerato considerando l'andamento tipico per la stagione invernale in un clima mediterraneo (Figura 3.34).

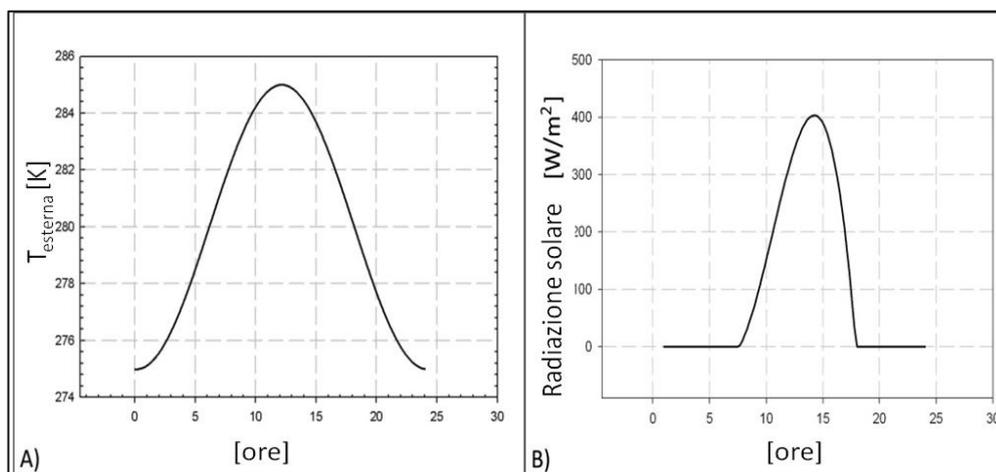


Figura 3.34: Leggi di Variazione di temperatura (A) e radiazione solare incidente (B).

a) Ponte termico ad angolo: spigolo fra due muri esterni di uguale struttura

Una prima validazione del metodo semplificato è stata effettuata confrontando i risultati ottenibili con quelli derivati dal metodo completo introdotto dal Seem. Il confronto è stato fatto per un ponte termico di forma: lo spigolo fra due muri esterni di uguale struttura (Figura 3.35 A). La struttura è costituita da materiale omogeneo, con le seguenti proprietà: conducibilità termica (λ) 0.72 W/(m K); densità (ρ) 1800 kg/m³; calore specifico (c_p) 840 J/(kg K).

La griglia computazionale è costituita da 2162 nodi (Fig. 3.35 B) e le superfici di confine sono considerate adiabatiche. Le simulazioni sono state eseguite per 168 h.

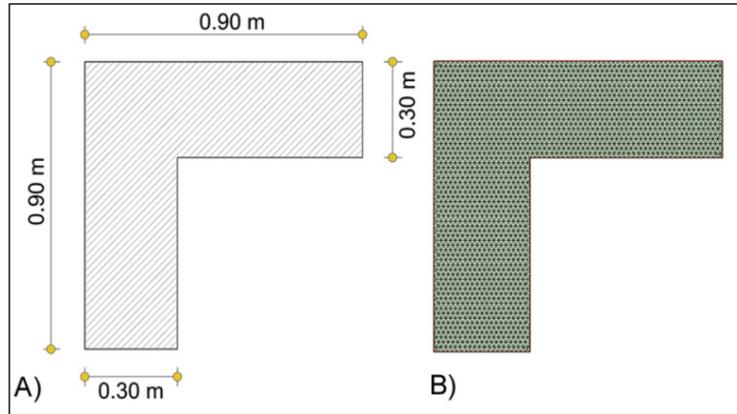


Figura 3.35: Primo ponte termico analizzato: A) geometria; B) griglia di calcolo.

Le condizioni al contorno considerate sono:

- profili di temperatura esterna riportato in Figura 3.32;
- timestep di simulazione: 30 min;
- temperatura dell'aria interna: 300 K;
- temperatura iniziale della superficie interna della parete: 288 K;
- coefficiente di scambio termico liminare interno ed esterno: $8.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

In Figura 3.36 A, emerge come, dopo un periodo di stabilizzazione di circa 20 h per entrambi i modelli, c'è una buona corrispondenza tra le due metodologie. L'errore medio oscilla (Fig. 3.36 B) nell'intervallo $-0.35\% \div +0.35\%$.

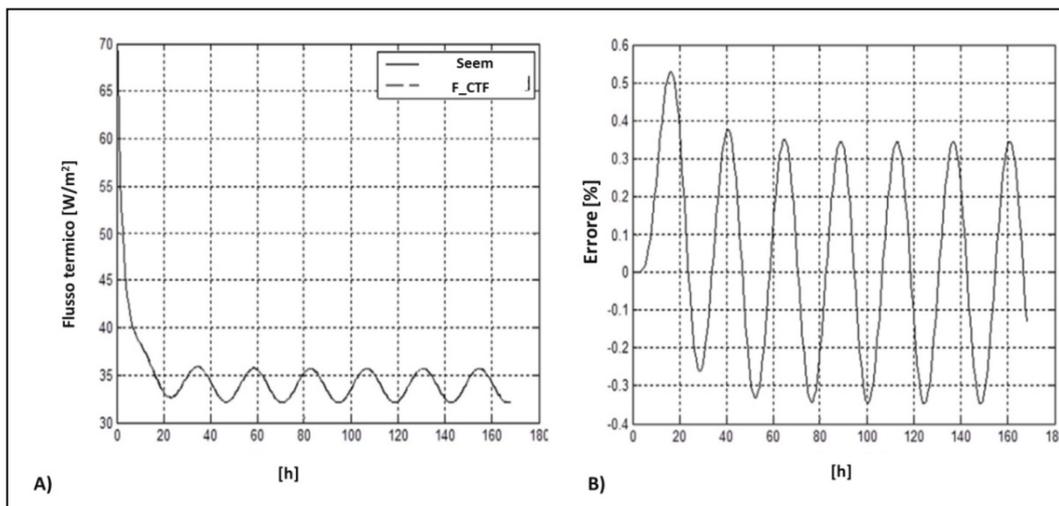


Figura 3.36: Confronto tra il metodo proposto e quello di Seem:
A) andamento del flusso termico; B) errore percentuale.

La validazione consente di affermare l'affidabilità del modello di calcolo semplificato rispetto ai risultati conseguibili da un'applicazione del metodo di calcolo completo.

Un secondo confronto, questa volta di natura sperimentale, è stata fatta mediante comparazione tra risultati numerici e da monitoraggio sperimentale su un ponte termico dello stesso tipo sopra descritto. In particolare, si tratta di un ponte termico individuato in una sala al terzo piano del *Complesso San Vittorino*, edificio sede di alcuni laboratori dell'Università degli Studi del Sannio. L' apparato sperimentale è composto da:

- ✓ *una termo-camera ad infrarossi;*
- ✓ *una serie di dieci sensori di flusso a film sottile, collegati ad un datalogger;*
- ✓ *un termoflussimetro wireless composto da un sensore di flusso e quattro termocoppie di temperatura;*
- ✓ *due sensori di temperatura.*

La termografia è stata utilizzata per identificare il ponte termico, individuando il posizionamento adeguato dei sensori di flusso in diversi punti della superficie interna della parete. Il termoflussimetro, per la misura in opera della trasmittanza, è stato installato in modo tale che la misura non fosse influenzata da ponte termico, cosicché si potesse ritenere verificata l'ipotesi di flusso monodimensionale. I sensori di temperatura sono stati utilizzati per monitorare le temperature interne ed esterne. Le caratteristiche tecniche della strumentazione adottata sono riportate nella sezione precedente di questo capitolo.

L'andamento delle temperature esterne è stato valutato attraverso i sensori con un intervallo di acquisizione di 60 minuti mentre quello della radiazione solare incidente è stato ricostruito a partire dai dati forniti da una stazione meteorologica situata proprio a Benevento. Poiché la parete esterna è di color rosso scuro, è stato considerato un coefficiente di assorbimento della radiazione solare pari a 0.7. Non è stata considerata la radiazione ad onda lunga per la costruzione del modello di cielo (in accordo alle indicazioni dell' ASHRAE [200] per i componenti verticali opachi). La temperatura dell'aria interna è stata mantenuta fissa a $26,0 \pm 0,5$ °C ed è stata monitorata mediante il sensore di temperatura interna. Le conduttanze liminari interna ed esterna sono state assunte rispettivamente pari a $7.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ e $25.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

La struttura considerata, mostrata in Figura 3.37 A con l'apparato sperimentale in opera, è una parete in mattoni pieni costituita da tre strati: intonaco esterno (3 cm), blocchi in tufo (50 cm), intonaco interno (2 cm). La trasmittanza termica, calcolata attraverso il procedimento individuato dalla EN ISO 6946 è pari a $0.975 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ con uno scostamento dello 0.4% se comparato a quello ottenuto mediante misura in opera con il termo-flussimetro ($U \approx 0.971 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$).

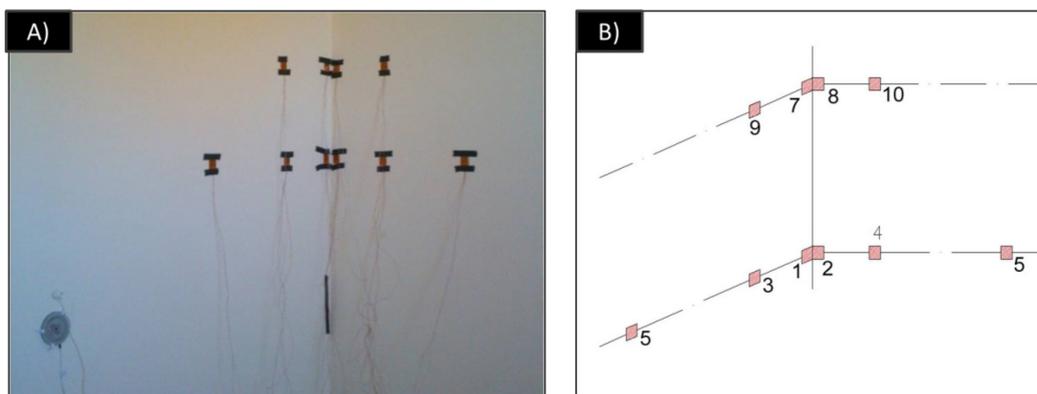


Figura 3.37: Posizionamento dell'apparato sperimentale: A) posizione sensori di flusso e termoflussimetro; B) schema della posizione dei nodi.

La Figura 3.38, invece, mostra la termografia del ponte termico, effettuata dall'interno, e si vede come questo provochi un'evidente riduzione della temperatura superficiale, in quanto il flusso diventa bidimensionale. L'analisi termografica, inoltre, verifica l'omogeneità della struttura in esame, mostrando che la condizione di flusso monodimensionale è soddisfatta con buona approssimazione a partire da 1 metro dal ponte termico. A tale distanza, pertanto, sono stati posizionati i sensori del termoflussimetro, in modo che la misura della conduttanza in opera non fosse affetta dall'errore indotto dalla deviazione delle linee di flusso termico. La misura è stata condotta dalle 10:30 del 23/01/2013 alle 10:30 del 26/01/2013.

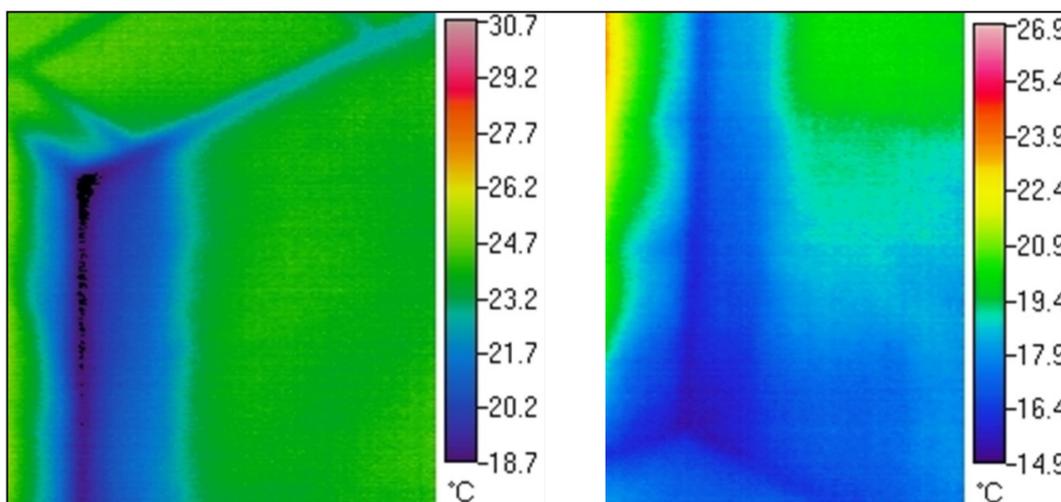


Figura 3.38: Termografia del ponte termico analizzato.

Come si vede in Figura 3.37, i primi 6 sensori di flusso utilizzati sono stati posti ad una distanza di 1.5 m dal pavimento (a metà rispetto altezza all'altezza della parete), mentre i restanti ad un'altezza di 1.9 m per riuscire a cogliere anche gli effetti del ponte termico tri-dimensionale in corrispondenza dell'attacco del solaio. Al fine di validare il

codice sviluppato, sono state utilizzate sono le misure dei primi sei sensori. I sensori sono stati collocati simmetricamente rispetto all'angolo, al fine di valutare il flusso in diversi punti del ponte termico: la distanza tra il sensore 1 (2) e il sensore 3 (4) è maggiore rispetto alla distanza tra il sensore 3 (4) e il sensore 5 (6), perché il flusso varia in modo minore allontanandosi dall'angolo, e tende asintoticamente al flusso monodimensionale nella parte centrale della parete piana. La misura è stata condotta dalle 10:30 del 24/01/2013 alle 10:30 del 25/01/2013.

Poiché il profilo di temperatura iniziale della struttura non era noto, le simulazioni numeriche sono state effettuate per un periodo di 10 giorni, ricostruendo l'andamento della temperatura esterna giornaliera attraverso i dati rilevati con i sensori e considerando una temperatura iniziale uniforme della struttura pari a 18°C. Infatti, un tempo di simulazione di 10 giorni è sufficiente per realizzare le condizioni stazionarie, per cui i valori del flusso termico calcolato per le ultime 24 ore non dipendono dalla temperatura iniziale della parete. Pertanto, i dati sperimentali sono stati confrontati con i risultati ottenuti per l'ultimo giorno di simulazione. Le simulazioni sono state eseguite con un passo temporale pari a 1 h, in quanto i valori di temperatura interna ed esterna e la radiazione solare sono stati rilevati ogni 60 minuti, ma poiché i dati sperimentali sono stati campionati con un passo pari a 6 minuti, i valori misurati del flusso sono stati mediati con riferimento ad un periodo di 60 minuti.

Poiché il codice numerico fornisce risultati simmetrici rispetto all'angolo, il flusso è stato calcolato solo in tre punti differenti ed è stato confrontato con la media dei flussi sperimentali ottenuti dai corrispondenti due sensori (Figura 3.37 B):

- ✦ nell'angolo ($d=0.0$ m): sensori 1 e 2;
- ✦ ad una distanza di 15 cm dall'angolo ($d=0.15$ m): sensori 3 e 4;
- ✦ ad una distanza di 50 cm dal angolo ($d= 0.5$ m): sensori 5 e 6.

L'analisi numerica, mediante il codice sviluppato, è stata condotta per tre differenti mesh a celle triangolari caratterizzate da 1427, 2321 e 3245 nodi. Il calcolo ha mostrato che il tipo di mesh ha una scarsa influenza sul risultato della simulazione e quindi tutte le successive simulazioni sono state eseguite per la maglia di 2321 nodi, al fine di garantire il miglior compromesso tra tempo di calcolo necessario e precisione.

Nelle Figure 3.39 A, 3.40 A e 3.41 A è riportato il confronto tra il valore del flusso termico misurato (indicato con F_{SPR}) e quello ottenuto dal codice di calcolo implementato (F_{CTF}) per le tre distanze precedentemente individuate, mentre le figure 3.30 B, 3.40 B e 3.41 B riportano gli errori percentuali del metodo numerico rispetto al rilievo sperimentale.

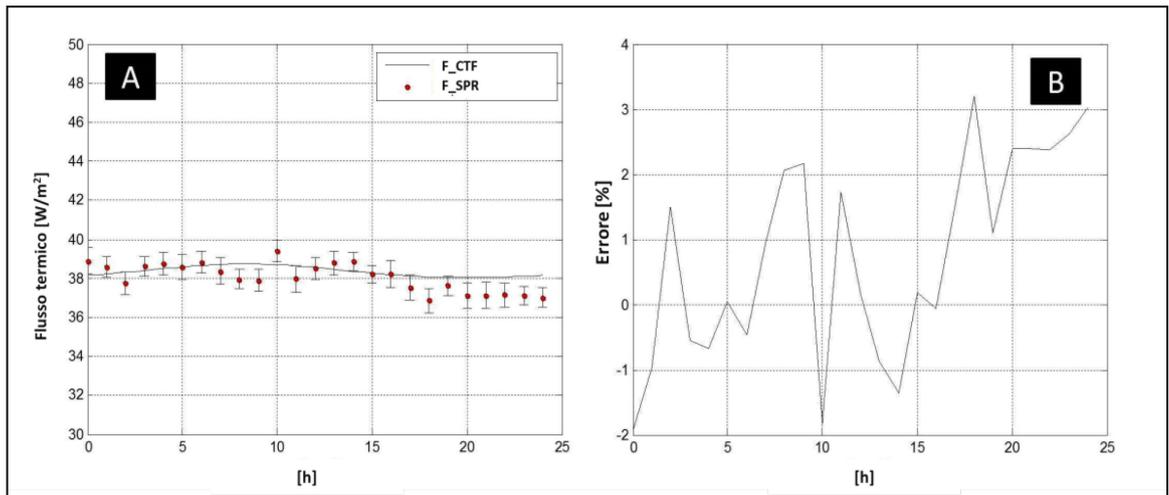


Figura 3.39: Confronto tra il metodo CTF e i dati sperimentali quando $d=0.0m$:
A) andamento del flusso termico; B) errore percentuale.

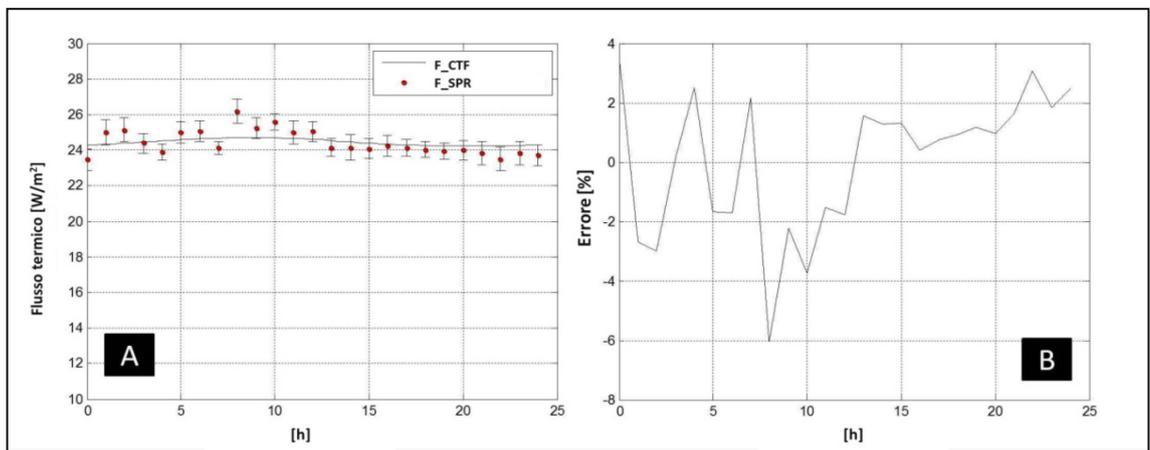


Figura 3.40: Confronto tra il metodo CTF e i dati sperimentali quando $d=0.15m$:
A) andamento del flusso termico; B) errore percentuale.

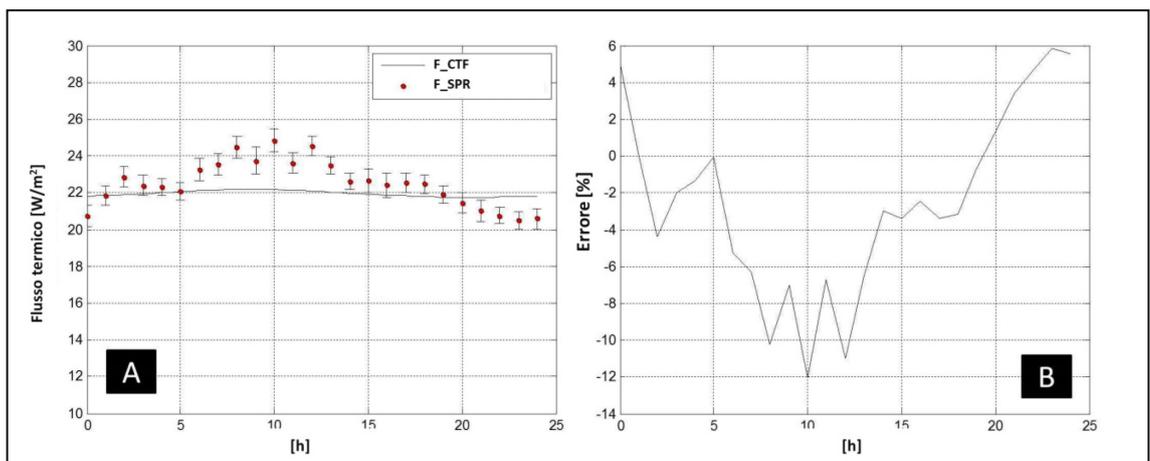


Figura 3.41: Confronto tra il metodo CTF e i dati sperimentali quando $d=0.50m$:
A) andamento del flusso termico; B) errore percentuale.

I risultati sono molto soddisfacenti. La lieve differenza tra i dati sperimentali e i risultati numerici dipende dal fatto che molti aspetti dello scenario reale non sono facili da modellare, tra i quali, ad esempio, l'effetto del vento e della pioggia, la non omogeneità dei materiali, i valori assunti dai coefficienti di scambio termico liminari, etc.

Il massimo errore percentuale - in termini assoluti - è pari al 12% (Figura 3.41 B), mentre l'errore medio - con riferimento a tutti e tre i casi - è quasi nullo.

b) Ponte termico dovuto ad un pilastro d'angolo inserito in una muratura esterna

La seconda struttura analizzata è un ponte termico ad angolo misto, dovuto alla sovrapposizione di un ponte termico di forma con uno di struttura. Tale geometria è piuttosto tipica, e rappresenta il tradizionale esempio dell'innesto di un pilastro in una muratura esterna. Il ponte termico analizzato è schematizzato in Figura 3.42.

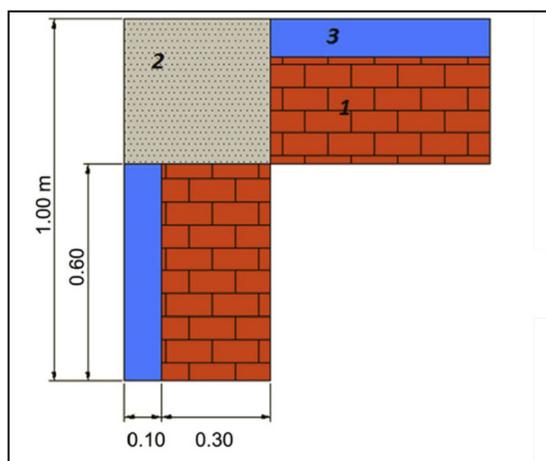


Figura 3.42: Tipologia di ponte termico analizzato: pilastro d'angolo.

Le principali proprietà definite per i materiali da costruzione sono riportate in Tabella 3.13, mentre le dimensioni sono evidenziate in Figura 3.42.

Materiale	λ [W/(m K)]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/(kg K)]
1 - Mattoni	0.54	1200	840
2- Cemento armato	1.90	2400	1000
3- EPS	0.04	25	1450

Tabella 3.13: Caratteristiche termofisiche dei materiali considerati.

Il primo confronto è stato fatto ipotizzando una temperatura esterna costante e un timestep di simulazione pari a 1.0 h e trascurando l'effetto della radiazione solare

incidente. Per il metodo CTF proposto sono state considerate tre differenti discretizzazioni con 521, 979 e 1'804 nodi. I risultati del confronto sono stati riportati in Figura 3.43. Dopo un periodo di stabilizzazione di circa 75 ore, l'andamento del flusso termico è simile a quello modellato da un algoritmo FVM (*mesh caratterizzata da 1932 nodi*), con un errore compreso tra $-0.9 \div +2.3 \%$ per la griglie a 1'804 nodi, e tra $1.5 \div 4.0 \%$ per la griglia con 521 nodi.

La seconda analisi considera un profilo variabile per la temperatura esterna (come quello riportato in Figura 3.34) e trascurando la radiazione solare incidente. In questo caso, considerando per il modello CTF una mesh a 979 nodi, la Figura 3.44 mostra i risultati che si ottengono al variare del timestep: 15 min ($d = 0,25$ h), 30 min ($d = 0.50$ h) e 120 min ($d = 2,0$ h).

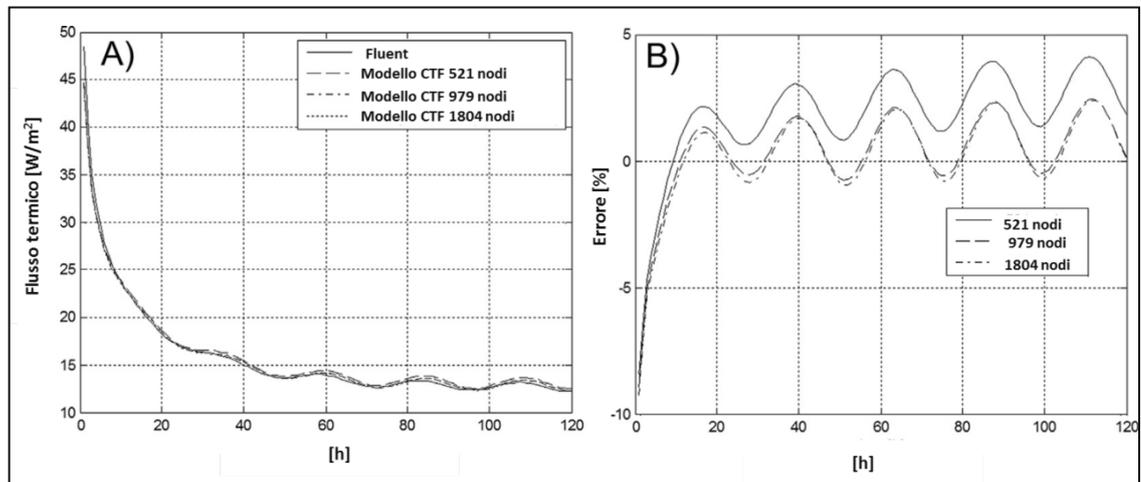


Figura 3.43: Confronto tra il metodo CTF e FVM (Fluent) considerando la temperatura esterna costante: A) andamento del flusso termico; B) errore percentuale.

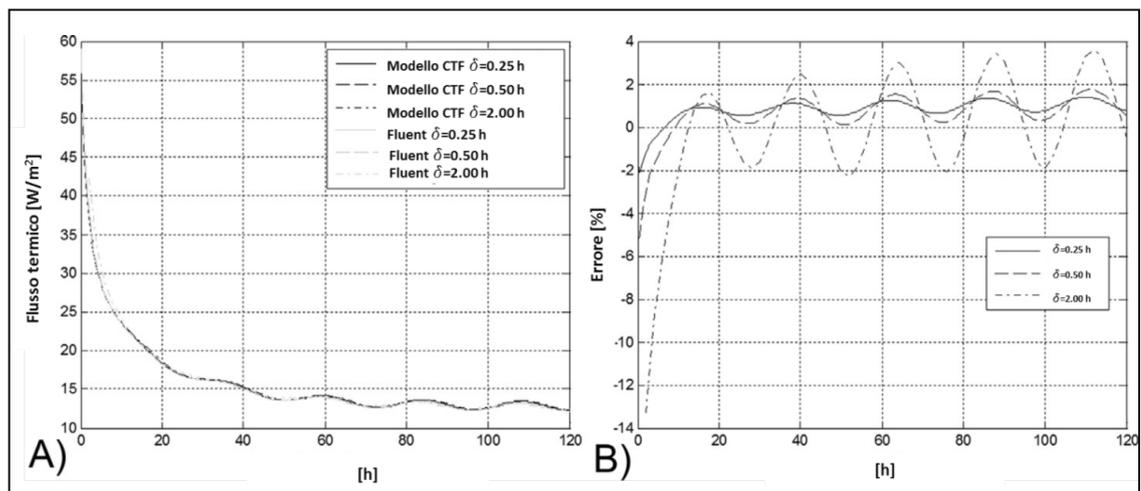


Figura 3.44: Confronto tra il metodo CTF e FVM (Fluent) considerando la temperatura esterna variabile: A) andamento del flusso termico; B) errore percentuale.

Si può osservare che

- quando il timestep è impostato a $d= 0.25$ h e $d= 0.50$ h, i due metodi sono convergenti. In particolare dopo un intervallo di stabilizzazione di 75 h, l'errore oscilla tra $0.4 \div 1.7\%$ per $d= 0.50$ h. E' evidente che l'errore si riduce quando il timestep decresce, poiché l'assunzione che la transizione della temperatura ambiente tra due timestep consecutivi non determini variazione del flusso termico induce una minore approssimazione (ma molto più rapidi tempi computazionali).
- quando $d = 1.0$ h, l'errore commesso è maggiore. Questo è dovuto alla prima semplificazione introdotta nel metodo presentato allo scopo di ridurre il tempo totale computazionale. In ogni caso, dopo un intervallo di stabilizzazione, l'errore non è mai esterno all'intervallo $-1.9 \div 3.5\%$.

L'ultimo confronto è stato fatto considerando variabili sia la temperatura esterna che la radiazione solare incidente. In questo caso si è assunto, per il sistema CTF una mesh a 979 nodi, e il timestep pari a 60 min ($d= 1,0$ h). Dalla Figura 3.45 si evince che, dopo un opportuno intervallo di stabilizzazione, l'errore si mantiene nell'intervallo $-2.4 \div 4.5\%$. Pertanto, si può concludere che anche quando le condizioni climatiche esterne sono fortemente variabili, il metodo mostra una buona affidabilità.

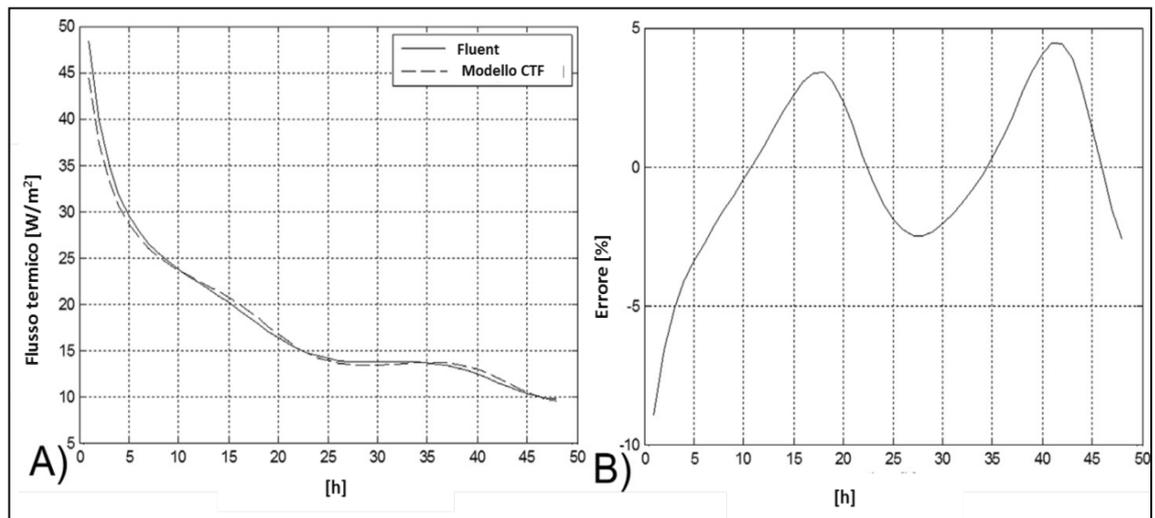


Figura 3.45: Confronto tra il metodo CTF e FVM (Fluent) considerando la temperatura esterna e la radiazione solare incidente variabili:
A) andamento del flusso termico; B) errore percentuale.

Relativamente ai tempi di calcolo, la Tabella 3.14 riporta quelli che sono stati necessari per completare la simulazione con il modello di calcolo proposto basato sulle funzioni di trasferimento, nella versione semplificata elaborata. Per quanto concerne la

simulazione mediante metodi ai volumi finiti, tale tipologia di studio richiede tempi di calcolo da 5 a 10 volte più grandi in funzione della variabilità delle condizioni al contorno e del tipo di risoluzione con cui si è deciso di discretizzare il dominio. È evidente che a tali oneri computazionali corrispondono anche soluzioni più accurate. Infatti, il metodo proposto consente solo di determinare il flusso termico tra l'interfaccia interno ed esterno della parete e quindi tale da interessare l'aria interna, senza risolvere il campo di temperature all'interno della parete stessa. Tuttavia, generalmente, tale dettaglio d'informazioni non è richiesto ai fini delle diagnosi energetiche e dell'analisi delle prestazioni globali degli edifici.

Mesh	Tempo di calcolo
521 nodi	1.1 s
979 nodi	3.2 s
1804 nodi	19.7 s

Tabella 3.14: Tempo computazionale richiesto in funzione della geometria.

c) Ponte termico dovuto all'innesto a T tra una muratura esterna ed una muratura interna di differente struttura

Il terzo ponte termico analizzato è quello dovuto all'innesto a T tra una muratura esterna e una muratura interna di differente composizione materiale, con il piano di simmetria individuato in Figura 3.46. Le proprietà per i materiali sono quelle riportate in Tabella 3.14.

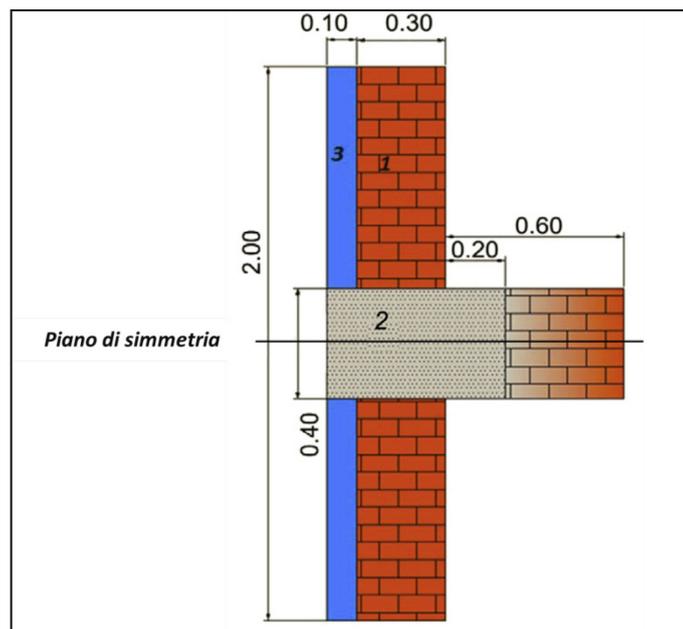


Figura 3.46: Tipologia di ponte termico analizzato: innesto a T tra una muratura esterna ed una muratura interna di differente struttura.

Come nel caso precedente, il primo confronto è stato fatto considerando una temperatura esterna costante, assenza di carico radiativo e timestep di simulazione pari a di 1.0 h. Dalla Figura 3.47 si evince che c'è una buona convergenza nei risultati, anche in questo caso comparativi del metodo proposto rispetto alla risoluzione mediante codice commerciale ai volumi finiti, con un errore medio di +1.25%, mentre l'errore massimo è circa il 2.7% quando si considera una griglia con 443 nodi per la simulazione basata sulla variazione del metodo di Seem.

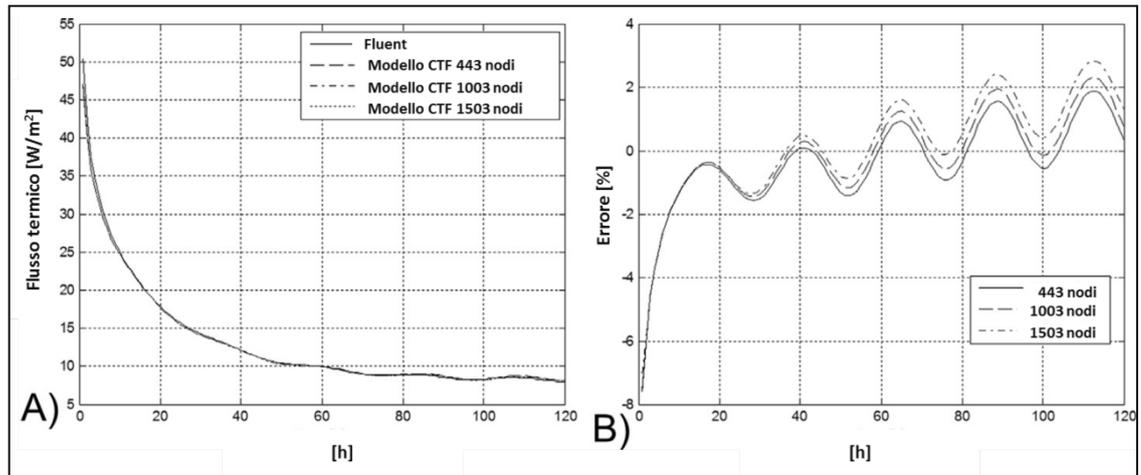


Figura 3. 47: Confronto tra il metodo CTF e FVM (Fluent) considerando la temperatura esterna costante: A) andamento del flusso termico; B) errore percentuale.

Il secondo confronto, al variare del timestep ($\delta=0.25$ h, $\delta=0.50$ h e $\delta=2.00$ h), come per il primo ponte termico analizzato, è stato fatto considerando variabile la temperatura esterna ma trascurando il carico radiativo.

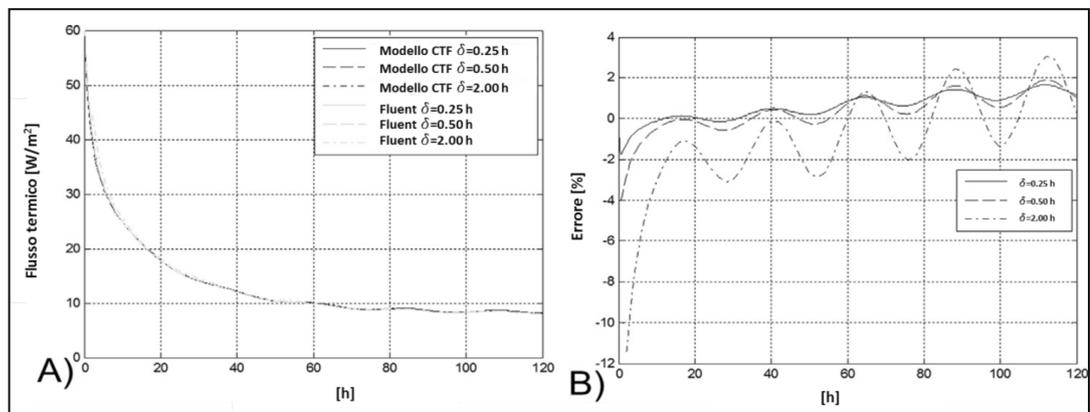


Figura 3.48: Confronto tra il metodo CTF e FVM (Fluent) considerando la temperatura esterna variabile: A) andamento del flusso termico; B) errore percentuale.

Dalla Figura 3.48, si vede che il modello semplificato basato sulle CTF diverge maggiormente nei risultati rispetto alla simulazione in Fluent all'aumentare del timestep. Tuttavia, anche per $d= 2.0$ h, dopo la stabilizzazione, risulta comunque compreso nell'intervallo $-1.1\div +2.9\%$. Per timestep più brevi, come 0.25 h, l'errore è nel range $+0.9\div +1.5\%$, con una leggera sovrastima del flusso termico.

Come ultima analisi (Fig. 3.49), fissando il timestep a 1.0 h, si considerano variabili sia la temperatura dell'aria esterna che la radiazione solare incidente e per il modello CTF (in Matlab) si considerano 1003 nodi.

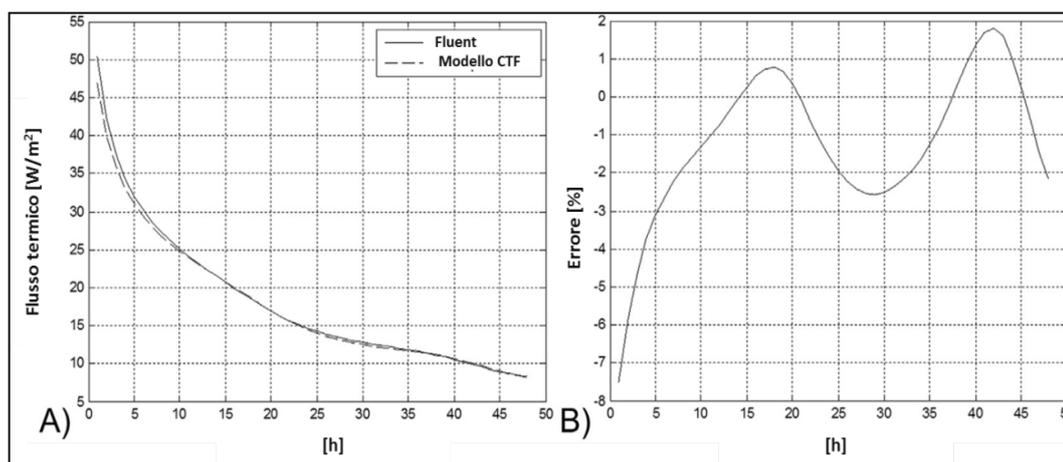


Figura 3. 49: Confronto tra il metodo CTF e FVM (Fluent) considerando la temperatura esterna e la radiazione solare incidente variabili:
A) andamento del flusso termico; B) errore percentuale.

Dopo circa 80 h, necessarie per il raggiungimento della stabilizzazione dei flussi termici calcolati, la differenza tra i flussi è oscillante nell'intervallo $-2.0\div +1.8\%$, mentre l'errore medio è di circa $-0,5\%$ (Fig. 3.49 B). Pertanto, anche questo confronto è del tutto soddisfacente, rivelando che la metodologia CTF semplificato, atta a valutare i flussi di calore in regime bidimensionale, ha un errore medio inferiore al 1% ed è dunque accettabile secondo i parametri ammessi dalla UNI EN ISO 10211. Il risultato ottenuto è ancora più rilevante se si considera che il limite proposto dalla norma è riferito al calcolo stazionario, mentre le simulazioni qui condotte sono effettuate in regime transitorio.

I tempi di simulazione, riportati in Tabella 3.15 si riducono da sette a dieci volte rispetto ad una simulazione in Fluent.

In conclusione, dalle validazioni numeriche e sperimentali effettuate, si è riscontrato come il modello numerico proposto per la valutazione dei flussi di energia attraverso ponti termici ha una buona affidabilità. In particolare, gli studi sono stati condotti secondo diversi livelli di approfondimento, al fine di verificare sia la stabilità della procedura risolutiva sia i tempi di calcolo.

<i>Mesh</i>	<i>Tempo di calcolo</i>
443 nodi	0.7 s
1003 nodi	4.2 s
1503 nodi	19.3 s

Tabella 3.15: Tempo computazionale richiesto in funzione della geometria.

È emerso che i tempi di calcolo, e quindi la potenza computazionale necessaria, sono estremamente contenuti rispetto alle analisi condotte mediante risolutori commerciali CFD. In particolare, all'aumentare della complessità della geometria, il metodo numerico sviluppato diviene sensibilmente meno oneroso, in termini di tempo e risorse, rispetto all'approccio CFD. Tale evenienza, considerando la moltitudine di ponti termici presenti all'interno di un edificio, rappresenta elemento che incoraggia ulteriori studi. Allo stesso tempo, il modello proposto fornisce anche soluzioni stabili, indipendentemente dal passo temporale scelto.

La possibile implementazione del metodo in programmi di analisi energetica dell'edificio, quali, ad esempio, EnergyPlus, risulta pertanto ragionevole e praticabile, consentendo di ottenere risultati più verosimili e vicini, rispetto alle attuali versioni di tali codici commerciali, alla valutazione della reale trasmissione del calore che interessa gli involucri edilizi.

Capitolo 4

La progettazione della riqualificazione energetica: analisi delle prestazioni del sistema edificio/impianti

Per riqualificazione energetica dell'edificio (o *retrofit energetico dell' edificio*) si intende l'insieme di tutte le operazioni, tecnologiche e gestionali, atte al conferimento di una nuova o superiore qualità prestazionale alle costruzioni esistenti dal punto di vista dell'efficienza energetica.

In generale, gli interventi di riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente sono finalizzati alla razionalizzazione dei flussi energetici tra il sistema edificio/impianti e l'ambiente esterno, con l'obiettivo di migliorare il comfort degli ambienti interni, contenere i consumi di energia, ridurre le emissioni inquinanti e il relativo impatto ambientale. Ulteriore obiettivo è utilizzare in modo razionale le risorse energetiche, ove possibile attraverso lo sfruttamento di fonti rinnovabili in sostituzione dei combustibili fossili, ottimizzando quindi la gestione complessiva dei servizi energetici.

I principali interventi in grado di garantire un retrofit vantaggioso, riguardano fondamentalmente:

- il miglioramento delle prestazioni dell'involucro edilizio opaco e trasparente;
- la sostituzione di componenti degli impianti di climatizzazione e di illuminazione;
- l'integrazione razionale dell'utilizzo di energie rinnovabili;
- le strategie di controllo microclimatico e l'efficacia dei sistemi di regolazione installati;
- la corretta gestione della ventilazione naturale e del raffrescamento passivo;
- l'introduzione di sistemi di contabilizzazione individuale dell'energia.

In questo capitolo, dunque, saranno approfonditi i possibili interventi attuabili per il retrofit di edifici esistenti, finalizzati al miglioramento del sistema edificio/impianti. Il lavoro è diviso in tre sezioni, ciascuna dedicata ad un particolare aspetto della progettazione del retrofit energetico degli edifici.

Nella prima parte, sono presentati analisi dettagliate sull'applicazione di singoli interventi di retrofit, evidenziando i principali aspetti relativi alle metodologie di calcolo e ai parametri prestazionali di calcolo. Rispetto all'ampia casistica approfondita durante questi anni si è ritenuto interessante riportare in questo lavoro di tesi l'approccio

utilizzato nell'ambito delle tecnologie innovative per l'efficientamento energetico in edilizia.

In particolare, nel seguito di questo capitolo viene presentata l'analisi dell'effetto dell'integrazione dei *Phase Changing Materials* nei comuni materiali da costruzione attraverso casi studio su *edifici tipo* rappresentativi dello stock edilizio europeo sia con riferimento alla destinazione d'uso (offices, residential and commercial buildings) sia alla tipologia costruttiva. Nel dettaglio, attraverso modelli numerici di simulazione dinamica delle prestazioni, è stato valutato il risparmio energetico conseguibile con un intervento di retrofit non invasivo mediante applicazione di intonaci PCM. L'obiettivo è stato quello di valutare il potenziale di risparmio energetico soprattutto sul fabbisogno per la climatizzazione estiva e di individuare logiche di progettazione e selezione dei materiali a cambiamento di fase in funzione della tipologia di edificio e del contesto climatico in cui questo è inserito. Partendo dai dati raccolti e dalla calibrazione dei modelli di simulazione utilizzati, i risultati della ricerca potranno confluire in una ricerca sperimentale che consenta di lavorare parallelamente alla progettazione del materiale (ottimizzandone i parametri prestazionali) e ai modelli di simulazione del comportamento di questi materiali sviluppando appropriati algoritmi di calcolo e validando quelli attualmente in uso.

Un altro aspetto approfondito è l'analisi di convenienza energetica, ambientale ed economica, derivante dal ricorso a *coperture a verde* in vari climi Europei. In particolare, sono state confrontate diverse soluzioni progettuali rispetto a soluzioni tradizionali e non.

Nella seconda parte del capitolo invece viene presentato un approccio globale alla progettazione di interventi di riqualificazione energetica di un edificio attraverso la valutazione energetica, ambientale ed economica di possibili scenari di retrofit, mediante azioni sia sull'involucro edilizio che sugli impianti termotecnici installati. Come già accennato, un'azione di retrofit efficace non può non derivare da un'accurata diagnosi energetica attraverso la quale emergono le principali criticità e linee d'intervento. In questo lavoro di tesi, quindi, si presenta l'analisi di interventi di retrofit energetico per gli edifici per i quali nel terzo capitolo è stata presentata la diagnosi energetica e si è costruito e calibrato il modello di simulazione energetica del sistema edificio/impianti. In dettaglio, la progettazione del retrofit energetico di *Palazzo dell'Aquila Bosco Lucarelli* e *Palazzo Ex-INPS* consente di evidenziare le principali problematiche dei vincoli dovuti alla natura storico-artistica di un edificio o del contesto in cui questo è inserito. Relativamente al retrofit *del Day-Hospital dell'Istituto G. Pascale*, sulla base dei risultati ottenuti dalla simulazione del modello energetico dell'edificio e tenendo conto delle indicazioni rilevate durante i diversi sopralluoghi

effettuati, una prima parte di lavoro presentato è centrata sull'applicazione di interventi tradizionali sull'involucro edilizio volti a stabilizzare le condizioni interne e rimuovere le attuali criticità. Poi, è stato condotto un particolare approfondimento sulle prestazioni del sistema HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) attraverso l'analisi delle esigenze specifiche dell'area servita dagli impianti e delle possibili variazioni legate allo sviluppo delle esigenze mediche. In ambito ospedaliero, infatti, un impianto deve non solo garantire condizioni di comfort termo-igrometrico e qualità dell'aria per gli occupanti, ma deve soddisfare anche esigenze di processo legate alle diverse attività mediche previste, considerando che, in molti ambienti, il rispetto di taluni requisiti (efficienza di filtrazione, quantità di ventilazione di aria esterna, condizioni di pressione dell'ambiente) è la condizione necessaria allo svolgimento dell'attività stessa. Per questa destinazione d'uso sono state studiate nuove combinazioni delle tecnologie esistenti e strategie di controllo del microclima che tali da consentire di massimizzare il risparmio energetico.

I risultati dell'analisi di convenienza tecnico-economica presentata consentono di individuare linee guida per la selezione di interventi idonei alla riqualificazione di edifici adibiti ad ospedali, nell'ottica di un funzionale ed efficace controllo microclimatico.

Infine, nella terza parte del capitolo viene affrontato l'aspetto della progettazione di sistemi di teleriscaldamento per aree urbane esistenti. I sistemi di teleriscaldamento urbano rappresentano un'importante opportunità di utilizzazione razionale dell'energia e un doveroso contributo al contenimento della spesa energetica, rispetto a temi quali la riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra ed il controllo dell'inquinamento locale. La centrale di teleriscaldamento può utilizzare tecnologie cogenerative e/o basate sullo sfruttamento delle fonti rinnovabili, garantendo, in entrambi i casi, una riduzione nello sfruttamento delle fonti fossili per fini energetici. La progettazione e il dimensionamento di tali sistemi richiede però un'approfondita conoscenza del contesto urbano e una preliminare caratterizzazione delle diverse utenze. Le Mappe energetiche urbane possono in questo senso rappresentare un valido strumento di supporto. Pertanto avendo messo a punto le MEU del centro storico di Benevento, è stata dimensionata una rete a servizio di due sezioni censuarie. Il caso studio presentato consente di sottolineare da un lato i vantaggi energetici ed ambientali della diffusione di reti di teleriscaldamento/teleraffrescamento urbano, dall'altro le principali problematiche che potrebbero incorrere e le informazioni necessarie alla progettazione.

4.1 Metodologia d'analisi: indici energetici, economici e di impatto ambientale

L'analisi di ciascuna delle misure di efficienza energetica studiata o della loro combinazione è stata condotta con un approccio multidisciplinare, che vede coinvolta

non solo la fisica tecnica, ma anche l'analisi di impatto ambientale, l'analisi delle condizioni di comfort indoor e la valutazione economica degli interventi proposti.

In questo sotto-paragrafo, dunque, sono introdotti i principali indici utilizzati, mentre i diversi coefficienti necessari alla determinazione di tali indici saranno specificati di volta in volta poiché dipendono spesso dai dati economici/ambientali resi ufficiali nel periodo in cui le analisi presentate sono state svolte nel corso del triennio di dottorato.

4.1.1 Indici per l'analisi energetica

L'analisi energetica, attraverso il primo e il secondo principio della termodinamica e al concetto di exergia, consente di confrontare diversi sistemi in termini di fabbisogno di energia primaria. Tra i principali indici che saranno citati nell'analizzare i casi studio, c'è il Risparmio di Energia Primaria, $\Delta EP\%$, (talvolta anche indicato come *PES – Primary Energy Saving*) che quantifica l'energia primaria risparmiata a seguito dell'intervento di retrofit rispetto alla situazione attuale dell'edificio.

Per gli interventi proposti, sarà quindi valutato il risparmio di energia primaria, semplicemente come rapporto percentuale (eq 4.1) tra la differenza dell'energia richiesta dall'edificio nello stato attuale (EP^{ST}), e quella richiesta dopo aver effettuato l'intervento di riqualificazione proposto (EP^{SP}) (al numeratore), rispetto allo stato attuale (denominatore). Tale valutazione, per ciascuna delle fonti energetiche asservite all'edificio, sarà fatta sia mensilmente sia annualmente, per valutare l'impatto dell'intervento, le eventuali criticità, al fine di avere un dato globale di confronto.

$$\Delta E_{\%} = \frac{EP^{ST} - EP^{SP}}{EP^{ST}} \cdot 100 \quad \text{eq 4.1}$$

Talvolta ci si riferirà anche al risparmio netto di energia primaria (ΔEP) ovvero l'energia primaria risparmiata in kWh, intesa come differenza tra EP^{ST} e EP^{SP} .

4.1.2 Indici per l'analisi dell'impatto ambientale

Per quanto riguarda l'impatto ambientale, sarebbe necessaria un'analisi globale, tale cioè da coinvolgere non solo l'emissione di sostanze inquinanti ma anche l'impatto acustico e visivo, l'occupazione dei suoli e l'interazione con la fauna e la flora.

Una più semplice tipologia di analisi, di più immediata lettura, fa riferimento al solo effetto serra, che studia le emissioni di gas climalteranti in termini di anidride carbonica "equivalente" emessa, in cui si riporta ciascun gas serra alla CO_2 , attraverso un fattore di conversione. In questo lavoro di tesi, per effettuare tale equivalenza, si utilizzano dei coefficienti che dipendono dalla tecnologia, dal combustibile utilizzato nel processo di conversione energetica e che prendono in considerazione il ciclo di vita globale per

ciascun vettore energetico considerato: gli *LCA (Life Cycle Assessment) emission factors*. Tali fattori di conversione saranno assunti in accordo a quanto riportato nel documento ufficiale della Comunità europea “*The Covenant of Mayors, Committed to local sustainable energy*” [201] o talvolta facendo riferimento ai dati relativi alla produzione termo-elettrica italiana [202].

Nel dettaglio, le potenziali emissioni evitate, su base annua, vengono valutate attraverso il parametro $\Delta CO_{2,\%}$ (eq 4.2) che esprime in percentuale, rispetto alle emissioni dell’edificio allo stato attuale ($CO_{2,eq}^{ST}$), il risparmio di emissioni equivalenti che l’edificio, a cui sono applicati gli interventi proposti ($CO_{2,eq}^{SP}$), comporta. Tale indicatore è definito dalla relazione:

$$\Delta CO_{2,\%} = \frac{CO_{2,eq}^{ST} - CO_{2,eq}^{SP}}{CO_{2,eq}^{ST}} \cdot 100 \quad \text{eq 4.2}$$

4.1.3 Indici per l’analisi del comfort indoor

La condizione di benessere termoisometrico viene definita come quello “stato psicofisico in cui il soggetto esprime soddisfazione nei riguardi del microclima”, oppure come “la condizione in cui il soggetto non ha né sensazione di caldo né di freddo” e si trova quindi in una condizione di neutralità termica ed isometrica. Tale condizione deve essere raggiunta senza interventi massicci del sistema di termo-regolazione del corpo, in quanto questi sono di solito fonte di disagio. Una trattazione completa delle condizioni di comfort microclimatico indoor e dell’analisi della qualità dell’aria richiederebbe studi dedicati in accordo agli standard [91, 203], ma ciò esula dagli obiettivi delle analisi condotte.

In questo lavoro, pertanto, l’analisi sarà fatta attraverso indici specifici per evidenziare i principali aspetti relativi all’efficacia delle tecnologie installate. In particolare, gli indici utilizzati sono: il not-overheating time (t_{NoH}) e il Performance Index for Temperature (PI_T) and Umidity (PI_{RH}).

Il primo indica la percentuale di tempo, rispetto a profilo di occupazione, caratterizzato da una temperatura media radiante nel range ritenuto di comfort. Gli indici PI_T e PI_{RH} , introdotti da Ascione *et al.* in [204, 205] rappresentano il tempo in cui la temperatura e l’umidità relativa si mantengono nel range considerato di comfort nel periodo di occupazione dei locali. I range di comfort per i diversi indici saranno definiti per ciascun caso studio in base alla particolare destinazione d’uso.

4.1.4 Indici per l'analisi economica

Infine, l'analisi economica dovrà consentire di valutare l'effettiva convenienza dell'intervento proposto, che deve garantire, grazie ai risparmi energetici che permette di conseguire, un rientro economico dell'investimento in tempi accettabili.

Tale analisi ha consentito di paragonare gli interventi proposti in termini di costo d'acquisto e di esercizio, considerando il panorama tariffario dei vettori energetici, ricavati e specificati per ciascun caso studio in accordo ai dati dell' *Europe's Energy Portal* [206], e quello normativo rivolto agli incentivi economici e fiscali.

Un metodo semplice per una valutazione immediata della convenienza economica dell'investimento consiste nel valutare il costo del kWh risparmiato (rapporto tra il costo d'investimento e il risparmio di energia primaria annuale) e di considerare il numero di anni necessari affinché i risparmi conseguiti eguaglino il costo d'investimento iniziale, attraverso il calcolo del *Simple Pay Back period* (SPB). Tale parametro, definito nell'equazione 4.3, esprime il numero di anni necessari affinché i risparmi conseguiti nei costi di esercizio (ΔCE) eguaglino i costi d'investimento iniziali (C_I).

$$SPB = \frac{C_I}{\Delta CE} \quad \text{eq 4.3}$$

Tale indice può essere usato per effettuare una preselezione delle possibili alternative d'intervento, in quanto il numero di anni impiegato a recuperare l'investimento può essere discriminante nell'accettazione di un progetto; tuttavia esso non fornisce alcuna indicazione sulla redditività dell'investimento in quanto i flussi di cassa relativi ai costi di esercizio non tengono conto né del valore temporale del denaro (attualizzazione) né dell'evoluzione dei prezzi dei vettori energetici.

Pertanto in questo lavoro di tesi, sono stati utilizzati altri due indici: il *Discounted Pay Back Period* (DPB – tempo di ritorno attualizzato) e il *Net Present Value* (VAN - Valore attuale netto), definiti rispettivamente nelle equazioni 4.4 e 4.5.

$$DPB = N : \sum_{k=1}^N \frac{F_k}{(1+a)^k} = C_I \quad \text{eq 4.4}$$

$$VAN = \sum_{k=1}^N \frac{F_k}{(1+a)^k} - C_I \quad \text{eq 4.5}$$

In tale metodo, i flussi di cassa (F_k cioè il confronto tra esborsi e disponibilità), di diverso ammontare e distribuzione nel tempo, sono riportati ad uno stesso istante di

tempo assunto come riferimento; per tale operazione si opera in regime deterministico, fissando i tassi (a) relativi agli N anni di vita stimata così che la serie di flussi di cassa, previsti nel periodo considerato, siano riportati al loro valore attuale. Il numero di anni che consente di eguagliare i costi iniziali rappresenta il DSP, mentre il valore attuale dell'investimento (VAN), calcolato sugli N anni utile, è calcolato, con riferimento ad un intervento di efficienza energetica, sommando i flussi di cassa attualizzati (risparmi economici conseguiti) cui si sottrae l'esborso iniziale.

Per valutare l'effettiva redditività dell'intervento, i valori ricavati sono confrontati con la vita utile prevista per ciascun tipo di intervento di retrofit, in accordo allo standard UNI EN 15459 [51]. La Tabella 4.1 riporta i principali interventi che saranno analizzati e la relativa vita utile stimata secondo documenti esemplificativi a supporto della EBD Recast.

Intervento	Vita utile
Isolamento termico	50 anni
Riduzione dell'infiltrazione	50 anni
Componenti finestrati	35 anni
Sottosistema di distribuzione	35 anni
Sottosistema di generazione	20 anni
Pompe di calore	50 anni

Tabella 4.1: Vita utile attesa per i principali interventi di retrofit.

4.2 Analisi di interventi per l'incremento dell'efficienza energetica

L'evoluzione delle tecnologie edilizie, necessaria per l'incremento delle prestazioni energetiche e per il raggiungimento degli obiettivi comunitari di abbattimento delle emissioni inquinanti, ha condotto alla ricerca di nuovi materiali e soluzioni costruttive per l'involucro opaco e trasparente. È necessario però sottolineare che attualmente nel panorama delle *energy efficiency measures* ci sono interventi che sono pronti e non diffusi (PCM), altri che sono diffusi ma non sono studiati ad un livello soddisfacente (tetti verdi e pareti ventilate), soprattutto per quanto concerne la efficacia e le metodologie per valutarne le prestazioni.

In particolare, i Phase-Changing Materials (PCMs) sono stati riconosciuti come una delle tecnologie più promettenti per il miglioramento dell'efficienza energetica e della sostenibilità degli edifici. L'integrazione di questi materiali con quelli tradizionalmente in uso comporta enormi potenziali in termini di risparmio energetico e di miglioramento delle condizioni di comfort per gli occupanti. La legislazione vigente in termini di efficienza energetica ha condotto a progettazioni di involucri edilizi ermetici e iper-isolati. Tuttavia, le correlate tecnologie non sembrano particolarmente idonee ad essere trasferite tout-court in un clima mediterraneo, in cui le condizioni climatiche

estive e i correlati fabbisogni di condizionamento richiedono involucri molto più permeabili e attivi. Sebbene tutti gli studi condotti finora abbiano mostrato che i materiali a cambiamento di fase hanno buone potenzialità per la riduzione dei carichi di raffreddamento, essi non hanno ancora trovato l'applicazione che le loro enormi potenzialità avrebbero fatto presagire. Ciò è dovuto essenzialmente al fatto che manca ancora una valutazione della loro efficacia in condizioni reali di utilizzo sia in termini di risparmi energetici conseguibili che di conseguenze strutturali - a lungo termine - dei ripetuti cicli di carica e scarica poiché la maggior parte di tali studi è fatta su singole zone termiche, in assenza di carico interno e per limitati intervalli di valutazione.

L'analisi presentata nel seguito del paragrafo quindi è orientata all'ottimizzazione degli interventi di retrofit, mediante l'applicazione di materiali con proprietà di cambiamento di fase per la riduzione dei fabbisogni, analizzando anche l'aspetto relativo ai costi. La scarsa diffusione, infatti, penalizza una proficua economia di scala e dunque sovente i benefici energetici conseguibili non sono ripagati in orizzonti temporali accettabili.

Nella seconda sezione del paragrafo, invece, saranno analizzate le prestazioni energetiche e la convenienza economica di tetti verdi, oggi oggetto di elevato interesse da parte della comunità tecnica italiana. Molto spesso, la diffusione di soluzioni progettuali innovative non è accompagnata da un'analisi accurata dei reali potenziali di risparmio energetico e quello dei *green roof* ne è il classico esempio. Sistemi vegetali, terreno di coltura, tecnologie e condizioni di installazione devono essere opportunamente valutati soprattutto quando l'intervento riguarda regioni a clima mediterraneo. Come sarà mostrato in seguito, infatti, in un'analisi accurata di convenienza economica oltre che tecnica, le coperture a verde mostrano rilevanti limiti, dovuti al costo d'installazione e nei climi caratterizzati da bassa intensità di precipitazioni, a quelli connessi all'irrigazione poiché per garantire l'evapotraspirazione vegetale e quindi la riduzione del fabbisogno di raffrescamento estivo, questa tecnologia richiede abbondanza di acqua.

4.2.1 Applicazione dei materiali a cambiamento di fase in interventi di retrofit energetico non invasivo

I materiali a cambiamento di fase (PCMs) sono materiali accumulatori di calore latente, che sfruttano il fenomeno della transizione di fase per assorbire i flussi energetici entranti, immagazzinando un'elevata quantità di energia e mantenendo costante la propria temperatura. I PCM sono solidi a temperatura ambiente e il passaggio di fase è determinato dalla temperatura di fusione, che varia a seconda del materiale. Quando la sollecitazione esterna provoca una temperatura che supera la

temperatura di fusione, il PCM liquefa e, poiché la reazione è endotermica, esso assorbe energia termica (calore latente di liquefazione). Allo stesso modo, quando la temperatura scende, la fase del materiale cambia da liquido a solido con una reazione esotermica e l'energia accumulata viene ceduta (calore latente di solidificazione). La Figura 4.1 schematizza in maniera esemplificativa il ciclo di funzionamento teorico (a) e quello determinato sperimentalmente (b) con la calorimetria differenziale a scansione (DSC).

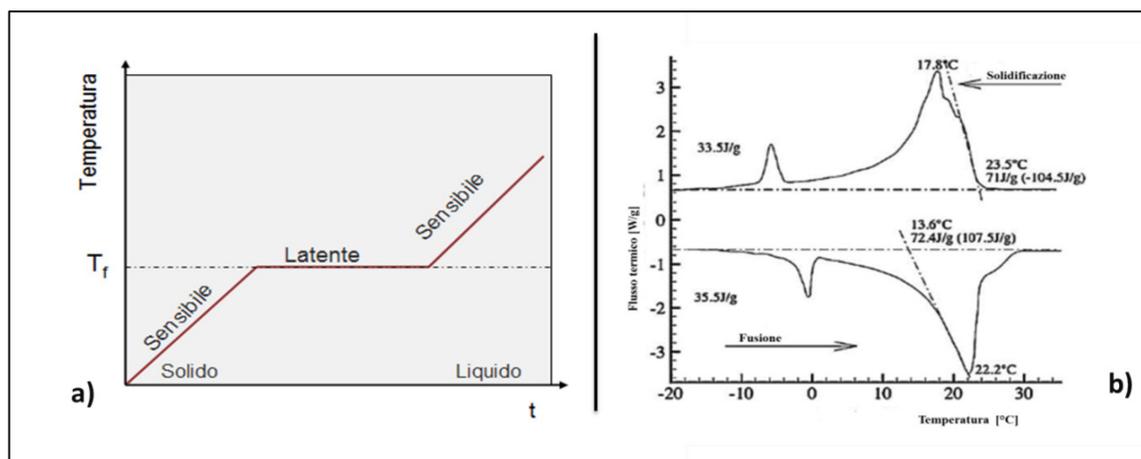


Figura 4.1: Ciclo di funzionamento (a) ideale e sperimentale (b) di un PCM.

Attualmente, i PCM più sperimentati in edilizia sono i composti organici paraffinici, gli acidi grassi e idrocarburi ottenibili come sottoprodotti della raffinazione del petrolio o per polimerizzazione, e alcuni inorganici come i sali idrati. Questi presentano un range di fusione compatibile con quello del condizionamento ambientale. Risultano altresì compatibili con i materiali da costruzione convenzionali, senza rischi di tossicità. Tre sono le principali tecniche con cui questi materiali possono essere integrati nell'involucro edilizio. Il più semplice è l'incorporazione del PCM nei materiali da costruzione convenzionali. Questa può avvenire o per incorporazione diretta o per immersione, in cui componenti quali gesso, mattoni o cemento assorbono PCM fuso nei loro pori interni, o per macro-incapsulamento in tubi, sfere o pannelli. Il secondo metodo consiste nella micro-incapsulazione, che consiste nel racchiudere il PCM in una capsula di polimero di dimensioni micro e la terza consiste nello stabilizzare una miscela liquida di PCM in un materiale di supporto.

Dal punto di vista della ricerca scientifica, ad oggi molti sono i progetti di ricerca avviati. Essenzialmente approccio numerico e sperimentale stanno procedendo di pari passo, anche se molti restano gli aspetti da chiarire. Relativamente all'approccio numerico, il cambiamento di fase viene modellato utilizzando il metodo della capacità

termica o il metodo dell'entalpia. Molti sono i lavori sperimentali, ma questi studi sono stati condotti quasi sempre in condizioni esterne reali ma senza considerare le reali o quantomeno realistiche dinamiche di carico termico interno. La temperatura di fusione dei materiali testati varia tra 20 e 32°C, e l'effetto principalmente indagato è quello del comfort termico degli occupanti. Le misurazioni riguardano perciò principalmente la temperatura operativa dell'aria e, talvolta, la temperatura superficiale delle pareti, utilizzando la temperatura media radiante come indice di comfort/discomfort.

L'attenzione per questi due parametri ha consentito di valutare per diverse realtà climatiche, la riduzione delle fluttuazioni di temperatura e lo spostamento del picco di temperatura massima. Uno degli aspetti più interessanti dell'integrazione dei materiali a cambiamento di fase è, infatti, la possibilità di migliorare l'inerzia termica delle struttura sia per progettazioni ex-novo sia per interventi di retrofit energetico, intervenendo sul comportamento dinamico dell'edificio in termini di smorzamento e sfasamento dell'onda termica tra l'ambiente condizionato e l'esterno. Questi due fenomeni hanno notevoli ripercussioni tecniche ed economiche sul sistema edificio-impianto.

Le ricerche già sviluppate hanno dimostrato che la temperatura ambiente si mantiene nella zona di comfort per lunghi periodi di tempo anche dopo lo spegnimento degli impianti, mentre il picco massimo di temperatura può essere ridotto tra i 2 e i 7°C con applicazioni di rivestimenti integrati, e il carico termico di picco può essere ridotto tra il 20-30% rispetto ad una soluzione costruttiva con rivestimento tradizionale.

Tuttavia, non sono numerosi i lavori scientifici in cui viene quantificata l'efficacia in termini di risparmio energetico; nel seguito si citano i principali. Per mezzo di un approccio sperimentale e numerico, Diaconu et al. [207] hanno studiato come variava la richiesta annuale di energia al variare della temperatura e del calore latente di fusione in una camera di prova le cui pareti erano costituite da: intonaco interno ed esterno a cambiamento di fase e nella parte centrale un isolante termico convenzionale. Essi hanno ricavato che il picco del carico di riscaldamento e raffreddamento può essere ridotto circa del 35.4% con un risparmio energetico annuo per il riscaldamento e il raffreddamento rispettivamente intorno al 12.8% e 1.0%. Avendo utilizzato una camera di prova però, il materiale non è stato testato in condizioni di carico interno reali. Pertanto, lo stesso Diaconu in [208] ha analizzato, al variare della temperatura di fusione, l'effetto che gli occupanti e il carico di ventilazione hanno sul potenziale di risparmio energetico riferito al fabbisogno energetico per un mese nelle condizioni climatiche di Iasi (Romania). Da questo lavoro, emerge che la scelta delle caratteristiche del materiale è strettamente connessa alla destinazione

d'uso e alle condizioni di carico interne previste per l'edificio oltre che dai profili di temperatura e irradiazione esterni.

Quareshi et al. [209] hanno valutato attraverso prove sperimentali che l'applicazione di un intonaco PCM sulle pareti e sul solaio di copertura consente di ridurre il fabbisogno in riscaldamento del 31%, considerando un periodo di prova di dodici giorni e le condizioni climatiche di Tamaki (New Zealand). Essi inoltre hanno evidenziato come il massimo potenziale del materiale venga espresso durante i giorni caratterizzati da una temperatura media esterna non elevata ma con elevata radiazione solare.

Castell et al. [210] hanno testato sperimentalmente nelle condizioni climatiche di Puigverd de Lleida (Spain) l'efficacia dell'incorporazione di un PCM macro-incapsulato in tecnologie costruttive tipicamente mediterranee. In particolare essi hanno riscontrato che considerando una temperatura di st-point pari a 24°C l'accoppiamento di paraffina e poliuretano consente una riduzione del fabbisogno del 15% rispetto all'utilizzo del solo poliuretano (-2.2 kWh/m²anno).

Tutti gli studi presenti in letteratura dunque hanno dimostrato che l'uso dei PCMs può fornire vantaggi in termini di comfort termico interno e inerzia termica, con particolare riferimento alle strutture leggere.

L'attività di ricerca svolta durante il dottorato quindi si è focalizzata sullo studio sistematico, bibliografico e numerico, delle prestazioni ottenibili con l'integrazione dei materiali a cambiamento di fase, con particolare attenzione alla quantificazione dei risparmi energetici conseguibili durante la stagione estiva. Questo è un aspetto fondamentale sia nei climi caratterizzati da forti escursioni termiche giornaliere sia laddove la tendenza costruttiva attuale ha portato ad un proliferare di strutture "leggere" (cioè con massa superficiale minore di 230 kg/ m²).

L'obiettivo della ricerca condotta è quello di una valutazione più sistematica delle potenzialità di tali materiali, attraverso lo studio del fabbisogno energetico in condizioni reali di utilizzo. Infatti, le prestazioni dei pannelli di rivestimento con proprietà di cambiamento di fase dipendono da diversi fattori: la temperatura di fusione, la capacità latente d'accumulo, la tecnica di incorporazione, le condizioni climatiche, la radiazione solare incidente, le condizioni di carico interno. Un'ottimizzazione della progettazione e della scelta del materiale è possibile solo considerando tutti questi parametri. I carichi interni e il profilo di utilizzo dell'impianto infatti influiscono in modo determinante sull'attivazione del materiale, che quindi può essere sovrastimata se questi non sono presi debitamente in considerazione.

Due casi studio saranno descritti nel prosieguo di questo lavoro; questi sono stati oggetto delle pubblicazioni scientifiche riportate in bibliografia [211, 212]. Prima di entrare nel dettaglio delle analisi, occorre sottolineare che per simulare il

comportamento dei PCMs è stato utilizzato EnergyPlus (nelle versioni v7.2.0 e v.8.1.0), validato per questo tipo di analisi da Tabares-Velasco et al. [213] per diverse tecniche di integrazione nei materiali da costruzione, tra cui l'intonaco.

Per integrare, ad esempio, un intonaco con proprietà a cambiamento di fase nel modello di simulazione dell'edificio, occorre definire prima un materiale tradizionale in termini di proprietà termofisiche e spessore. In seguito, poi viene richiamato un modulo dedicato (*Material: Property: Phase Change*), in cui viene associata al materiale la funzione che lega il calore latente di fusione alla variazione di temperatura. Relativamente all'algoritmo di simulazione, in accordo alle indicazioni sulla validazione del codice, è necessario scegliere un passo temporale opportuno e comunque inferiore a 180 s. EnergyPlus può simulare materiali con proprietà variabili come i PCM utilizzando un algoritmo di risoluzione alle differenze finite (CondFD), scegliendo tra due diverse formulazioni:

- uno schema semi-implicito basato sulla formalizzazione di Crank- Nicholson (equazione 4.6);
- uno schema globalmente implicito (equazione 4.7).

$$C_p \rho \Delta x \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} = \frac{1}{2} \left[\left(\lambda_w \frac{T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} + \lambda_E \frac{T_{i-1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} \right) + \left(\lambda_w \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{\Delta x} + \lambda_E \frac{T_{i-1}^j - T_i^j}{\Delta x} \right) \right] \quad \text{eq 4.6}$$

$$C_p \rho \Delta x \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} = \left(\lambda_w \frac{T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} + \lambda_E \frac{T_{i-1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} \right) \quad \text{eq 4.7}$$

Con riferimento alle equazioni riportate, è stata adottata la seguente nomenclatura: "i" è il nodo modellato, "i+1" è il nodo adiacente sul lato interno dell'edificio, "i-1" è il nodo adiacente rispetto al lato esterno, "j+1" è il timestep corrente di simulazione e "j" è quello precedente. Inoltre, "T" è la temperatura del nodo, "Δt" e "Δx" sono rispettivamente l'intervallo di tempo in cui si effettua il calcolo e lo spessore dello strato nel modello alle differenze finite, "ρ" è la densità del materiale, "λ_w" e "λ_E" sono le conducibilità termiche, rispettivamente per le interfacce tra i nodi "i" e "i + 1" e tra i nodi "i" e "i-1".

Il calore specifico è variabile (C_p), e il suo valore viene "aggiornato" ad ogni iterazione, secondo l'equazione 4.8, in cui "h" rappresenta l'entalpia il cui valore viene specificato dall'utente costruendo una funzione che ne descriva il valore al variare della temperatura.

$$C_p = \frac{h_i^j - h_i^{j-1}}{T_i^j - T_i^{j-1}} \quad \text{eq 4.8}$$

Nei casi studio presentati, la funzione temperatura/entalpia è stata definita in forma tabellare nell'intervallo tra -20°C e 100°C, specificando sedici valori per la coppia temperatura/entalpia utilizzando un intervallo di variazione pari a 0.4°C in corrispondenza della temperatura di passaggio di fase. Ad esempio la Figura 4.2 mostra la curva costruita nei casi studio con riferimento ad una temperatura di fusione pari a 26°C.

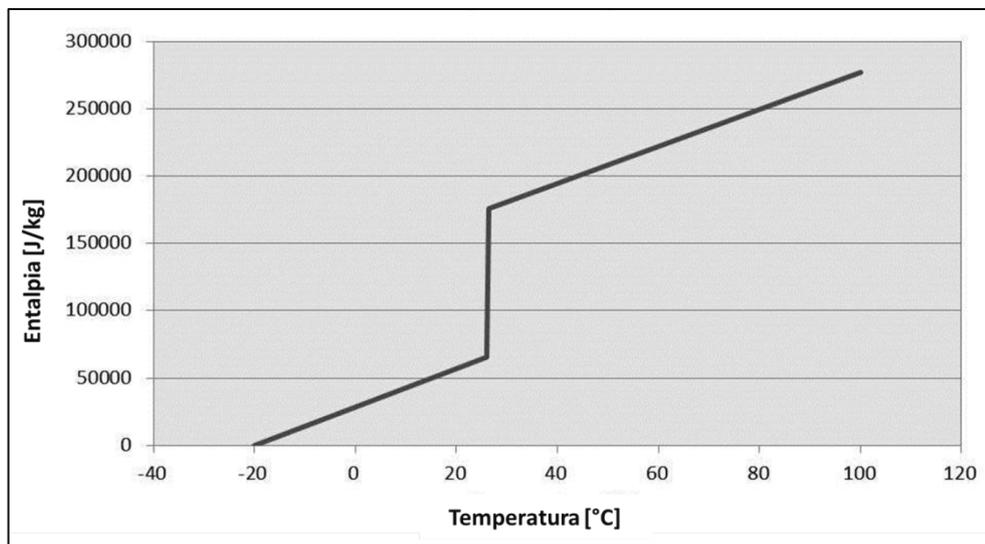


Figura 4.2: Funzione temperatura/entalpia per un intonaco con proprietà a cambiamento di fase e temperatura di fusione pari a 26°C.

Il modello richiede anche che sia specificato il "*Temperature Coefficient for Thermal Conductivity*", cioè il coefficiente che consente di descrivere in che modo varia la conducibilità del materiale al variare della temperatura, partendo da un valore di riferimento assunto a 20°C. L'equazione che descrive la conducibilità termica è quella riportata.

$$k = k_0 + k_1(T - 20) \quad \text{eq 4.9}$$

dove:

- k_0 è la conducibilità termica ad temperatura pari a 20°C;
- k_1 è la variazione di conducibilità, per ogni grado di differenza dalla temperatura di 20°C.

4.2.1.1 Retrofit energetico di un edificio del terziario adibito ad uffici

Il primo caso studio presentato consiste nella riqualificazione energetica di un edificio adibito ad uso uffici attraverso l'applicazione, sul lato interno, di un intonaco PCM con una temperatura di fusione di 26°C e un entalpia di fusione pari a 110 kJ/kg. L'obiettivo delle analisi sviluppate è stato quello di definire delle linee guida per la scelta del materiale a cambiamento di fase tali da consentire di minimizzare la richiesta energetica per la climatizzazione estiva, migliorando allo stesso tempo le condizioni di comfort indoor, in climi caratterizzati da richieste per il raffrescamento estivo comparabili se non superiori a quelle per il fabbisogno di riscaldamento. Simulazioni preliminari hanno dimostrato che l'applicazione è ottimizzata se avviene sul lato interno piuttosto che quello esterno, perché le ampie escursioni della temperatura esterna causerebbero una fusione troppo veloce del materiale. L'efficienza dell'azione di retrofit è stata valutata simulando il comportamento dell'edificio in cinque città caratterizzate da clima tipicamente mediterraneo o semi-arido: Ankara (Turchia), Atene (Grecia), Napoli (Italia), Marsiglia (Francia), Siviglia (Spagna). I principali dati climatici relativi alla stagione estiva per ciascuna città, sono riassunti nella Tabella 4.2.

ANKARA						
Mese	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Anno
Massima temperatura mensile [°C]	22.2	26.6	30.2	30.2	26.0	17.8
Minima temperature mensile [°C]	9.7	13.0	16.0	16.0	11.9	6.5
ATENE						
Mese	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Anno
Massima temperatura mensile [°C]	26.0	31.1	33.5	33.2	29.2	22.5
Minima temperature mensile [°C]	13.9	18.2	20.8	20.7	17.3	12.3
MARSIGLIA						
Mese	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Anno
Massima temperatura mensile [°C]	22.9	27.1	30.2	29.7	25.5	20.2
Minima temperature mensile [°C]	13.1	16.6	19.4	19.0	15.7	10.8
NAPOLI						
Mese	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Anno
Massima temperatura mensile [°C]	22.6	26.2	29.3	29.5	26.3	20.4
Minima temperature mensile [°C]	5.9	15.6	18.0	17.9	25.3	10.4
SIVIGLIA						
Mese	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Anno
Massima temperatura mensile [°C]	26.4	31.0	35.3	35.0	31.6	24.9
Minima temperature mensile [°C]	13.1	16.7	19.4	19.5	17.5	12.7

Tabella 4.2: Principali dati climatici estivi per le località climatiche considerate.

Con riferimento alla geometria dell'edificio, le dimensioni in pianta sono 14 m × 28 m, con un'altezza lorda complessiva di 7m (2 piani). La tipologia costruttiva è caratteristica degli edifici europei costruiti nella seconda metà del '900, con struttura portante in conglomerato cementizio armato (pilastri, travi e travetti) e blocchi forati con

pannello isolante per le pareti ($0.40 \text{ W/m}^2\text{K}$). Il calpestio dei piani intermedi e quello contro terra nonché la copertura dell'edificio sono costituiti da un solaio piano dello spessore di 30 cm, realizzato con struttura mista di travetti in c.a. gettati in opera e pignatte di laterizio con sovrastante soletta in calcestruzzo armato e rete in acciaio elettrosaldato. Il solaio è isolato e la trasmittanza termica calcolata è pari a $U=0.37 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

I serramenti sono costituiti da finestre con telaio in alluminio dotate di vetrocamera chiaro 6-12-6 con aria come riempimento. La trasmittanza termica media complessiva del serramento è di $2.1 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Complessivamente, l'edificio ha cinque finestre, con dimensione $3.0 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$, sulle esposizioni est e ovest, di ogni piano, due finestre delle stesse dimensioni e una di dimensioni $0.7 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ sulle esposizioni Sud e Nord.

Per simulare le reali condizioni di funzionamento dell'edificio e quindi per valutare l'effetto dei carichi interni sul ciclo di carica/scarica del PCM sono state definite quattro zone termiche differenti, cui sono stati assegnati carichi realistici in termini di occupazione e macchinari (L_{int}) e sistema di illuminazione (L_{lig}) come riportato nella Tabella 4.3. Il fabbisogno termico per la climatizzazione estiva è garantito da una pompa di calore elettrica aria/acqua mentre i terminali sono dei ventilconvettori. Il coefficiente di prestazione in condizioni nominali della pompa di calore è stato assunto pari a $2.5 W_{\text{TH}}/W_{\text{EL}}$, e la determinazione dei coefficienti di prestazione a carico parziale si basa sulle polinomiali implementate nel codice di simulazione.

	A [m ²]	L_{int} [W/m ²]	L_{lig} [W/m ²]
Ufficio	490	12	4.0
Corridoio-scale-Ingresso	132	1.9	4.0
Sala d'attesa	54	6.2	4.0
Toilet	60	5.5	3.0

Tabella 4.3: Principali dati relativi alle zone termiche dell'edificio.

Diverse sono le configurazioni simulate per lo strato a cambiamento di fase (Figura 4.3), modificando i seguenti parametri:

- Posizione dell'intonaco PCM: a) sul lato interno delle pareti di tutte le esposizioni (P_{Aw}); b) solo sulle pareti esposte a sud e ad est (P_{SEw}); c) sul lato interno delle pareti di tutte le esposizioni e 1 cm di PCM sul solaio di copertura (P_{AwR}).
- Spessore dell'intonaco nel range 0.5 – 3.0 cm. Nel seguito si indicherà con N_{PCM} l'edificio prima dell'intervento di retrofit e con P_{x} l'edificio

ristrutturato, dove "x" è lo spessore dell'intonaco in cm. La Tabella 4.4 sintetizza le stratigrafie risultanti.

- Temperatura di fusione del PCM nel range $26 \div 29^{\circ}\text{C}$. L'intervento sarà indicato con "T_n" dove "n" è il valore del punto di fusione selezionato ($^{\circ}\text{C}$).

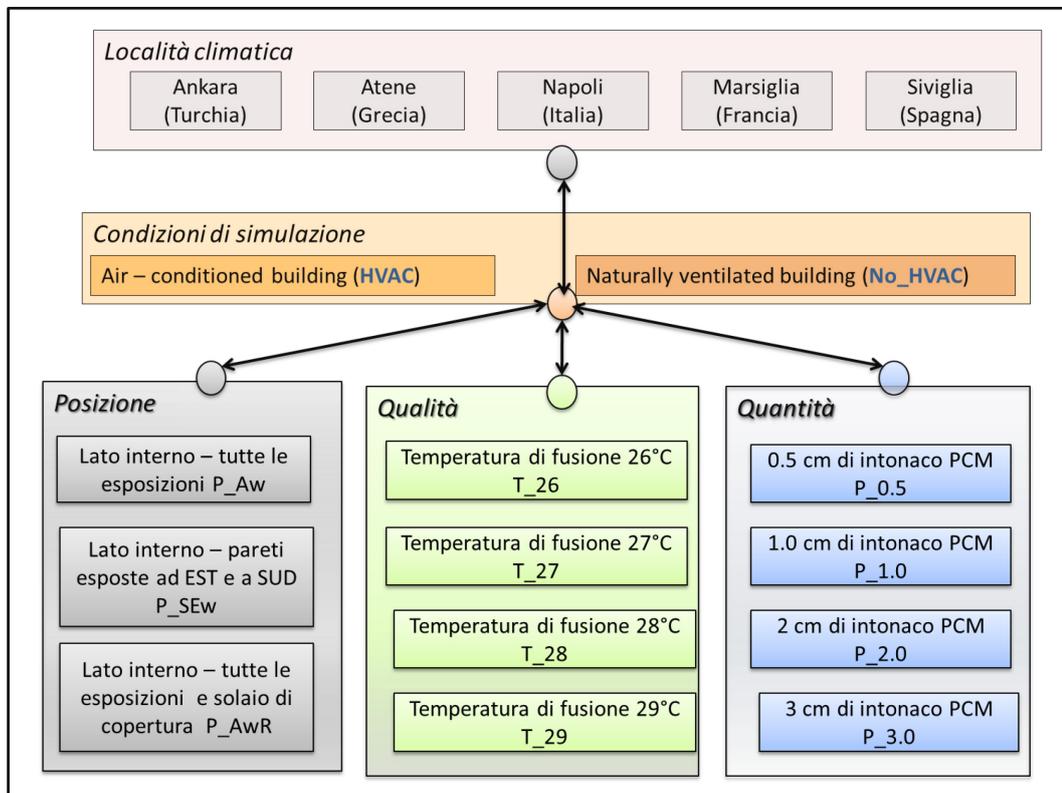


Figura 4.3: Configurazioni di retrofit analizzate: condizioni climatiche, condizioni di simulazione, spessore e temperatura di fusione del materiale a cambiamento di fase.

Con riferimento al microclima interno, le simulazioni sono state condotte per due configurazioni:

- *Air-conditioned building (HVAC)*: il fabbisogno viene valutato considerando un regime di funzionamento ordinario dell'impianto (dal lunedì al venerdì, dalle 8:00 alle 18:00);
- *Naturally ventilated building (No_HVAC)*: sono analizzati i profili di temperatura interni con l'impianto spento in modo da valutare l'effettiva capacità del PCM di migliorare il microclima interno.

Il periodo considerato è la stagione di raffrescamento, convenzionalmente assunta dal 1 Maggio al 30 Settembre. Le principali condizioni al contorno assegnate sono:

- Temperatura di set-point pari a 26°C ;

Capitolo 4: La progettazione della riqualificazione energetica: analisi delle prestazioni del sistema edificio/impianti

- Tasso di rinnovo dell'aria (ACH) pari a $0,5 \text{ h}^{-1}$, durante l'orario lavorativo 8:00-18:00;
- Ventilazione naturale pari a 3 ACH quando gli uffici sono chiusi (19:00- 7:00) al fine di favorire il processo di solidificazione del PCM.

Attraverso l'analisi delle molteplici variabili presentate e spesso non sufficientemente investigate nei lavori scientifici già presenti, il caso studio cerca di suggerire linee guida per la scelta del materiale al fine di ridurre il fabbisogno estivo complessivo della stagione di raffrescamento. Come si vedrà, in realtà la scelta ottima non è univoca e il materiale scelto non riesce a garantire prestazioni costanti in tutto il periodo di riferimento.

P_0.5	x [m]	C_p [J/kg K]	λ [W/m K]	ρ [kg/m ³]
Intonaco interno	0.025	800	0.70	1400
PCM	0.005	-	0.23	1400
Mattoni forati	0.300	840	0.43	1200
Polistirene espanso	0.060	1200	0.04	25
Intonaco esterno	0.030	800	0.90	1800

P_1.0	x [m]	C_p [J/kg K]	λ [W/m K]	ρ [kg/m ³]
Intonaco interno	0.02	800	0.70	1400
PCM	0.01	-	0.23	1400
Mattoni forati	0.30	840	0.43	1200
Polistirene espanso	0.06	1200	0.04	25
Intonaco esterno	0.03	800	0.90	1800

P_2.0	x [m]	C_p [J/kg K]	λ [W/m K]	ρ [kg/m ³]
Intonaco interno	0.01	800	0.70	1400
PCM	0.02	-	0.23	1400
Mattoni forati	0.300	840	0.43	1200
Polistirene espanso	0.060	1200	0.04	25
Intonaco esterno	0.030	800	0.90	1800

P_3.0	x [m]	C_p [J/kg K]	λ [W/m K]	ρ [kg/m ³]
Intonaco interno	0.01	800	0.70	1400
PCM	0.03	-	0.23	1400
Mattoni forati	0.30	840	0.43	1200
Polistirene espanso	0.06	1200	0.04	25
Intonaco esterno	0.03	800	0.90	1800

Tabella 4.4: Stratigrafia della parete esterna al variare dello spessore dell'intonaco PCM.

a. Air-conditioned building: risparmio di energia primaria per la climatizzazione estiva

Con riferimento alle configurazioni di retrofit analizzate, si è valutato il risparmio di energia primaria conseguibile in valore assoluto nella stagione di raffrescamento (ΔEP_C) come precedentemente definito e il risparmio percentuale ($\Delta E_{C,\%}$).

Come accennato, la maggior parte degli studi presenti in letteratura indaga il comportamento dei materiali a cambiamento di fase rispetto a intervalli di tempo ristretti (ad esempio, pochi giorni o settimane), e questo non ha permesso un'interpretazione esaustiva delle loro capacità. In particolare, al fine di ottimizzare la scelta di un PCM, è importante capire che effetto che può indurre durante tutta la stagione raffreddamento (o di riscaldamento).

Nella Tabella 4.5, si riporta il valore degli indici considerati quando 1 cm di intonaco T_26 viene applicato ai vari componenti edilizi e si evince come la migliore configurazione di retrofit sia quella che, per ciascuna località climatica, prevede l'applicazione dell'intonaco a cambiamento di fase su tutte le pareti verticali esterne.

Città	P_SEw		P_Aw		P_AwR	
	ΔEP_C [kWh]	$\Delta E_{C,\%}$ [%]	ΔEP_C [kWh]	$\Delta E_{C,\%}$ [%]	ΔEP_C [kWh]	$\Delta E_{C,\%}$ [%]
Ankara	139.0	1.1%	290.6	2.4%	159.0	1.3%
Atene	132.0	0.6%	272.7	1.3%	253.2	1.2%
Marsiglia	173.6	1.0%	304.0	1.8%	258.1	1.5%
Napoli	6.1	0.03%	142.6	0.8%	96.6	0.5%
Siviglia	33.6	0.2%	160.0	0.8%	145.1	0.7%

Tabella 4.5: Effetto di differenti configurazioni di retrofit sul risparmio di energia primaria.

In Tabella 4.6, sono riportati i risultati ottenuti per ciascuna città considerata al variare dello spessore dell'intonaco considerato, avendo fissato le P_Aw e T_26.

Città	P_0.5		P_1.0		P_2.0		P_3.0	
	ΔEP_C [kWh]	$\Delta E_{C,\%}$ [%]						
Ankara	240.8	2.0%	290.6	2.4%	285.1	2.3%	415.7	3.4%
Atene	222.0	1.1%	272.7	1.3%	347.1	1.7%	485.0	2.3%
Marsiglia	405.9	2.4%	304.0	1.8%	355.4	2.1%	496.5	2.9%
Napoli	97.3	0.5%	142.6	0.8%	204.7	1.1%	244.0	1.3%
Siviglia	116.3	0.6%	160.0	0.8%	196.2	1.0%	258.4	1.3%

Tabella 4.6: Effetto di differenti spessori di intonaco PCM sul risparmio di energia primaria.

Il fabbisogno diminuisce all'aumentare dello spessore, risultando massimo con l'adozione di 3 cm di intonaco PCM. Alcuni studi di letteratura indicano che un ulteriore incremento dello spessore PCM non sia in grado di determinare miglioramenti significativi della temperatura operativa interna, mentre sicuramente i costi di investimento aumentano.

Inoltre, è stata analizzata l'influenza della temperatura di fusione per le diverse configurazioni di retrofit ipotizzate. La Figura 4.4 riporta il confronto tra l'edificio N_PCM e quello in cui 1 cm di intonaco è stato applicato su diversi componenti dell'involucro opaco, nel caso di Ankara. Invece la Figura 4.5 riporta il confronto per Marsiglia al variare dello spessore del materiale per le diverse configurazioni studiate. In entrambi i casi, i risultati sono riportati con riferimento al mese di luglio.

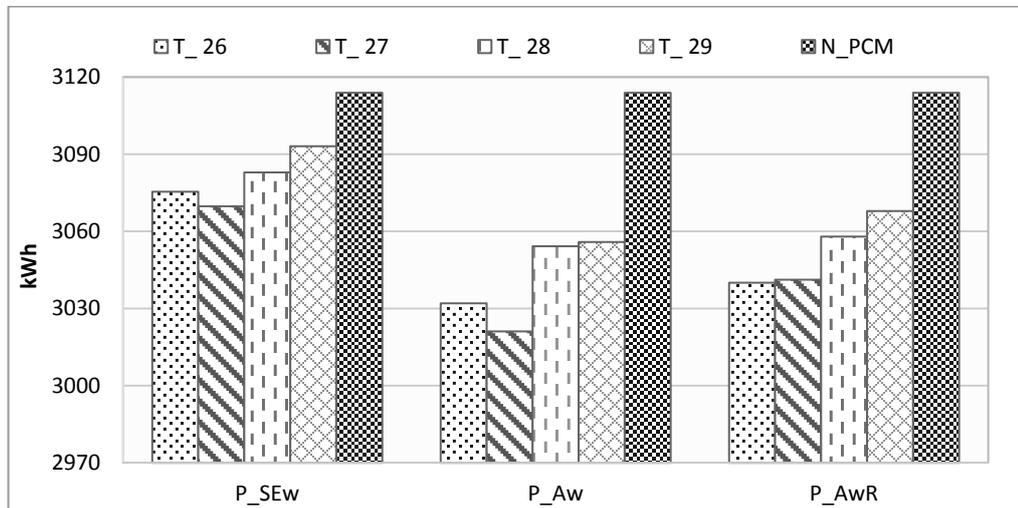


Figura 4.4: Ankara – Effetto di diverse configurazioni di retrofit sul fabbisogno estivo di energia primaria.

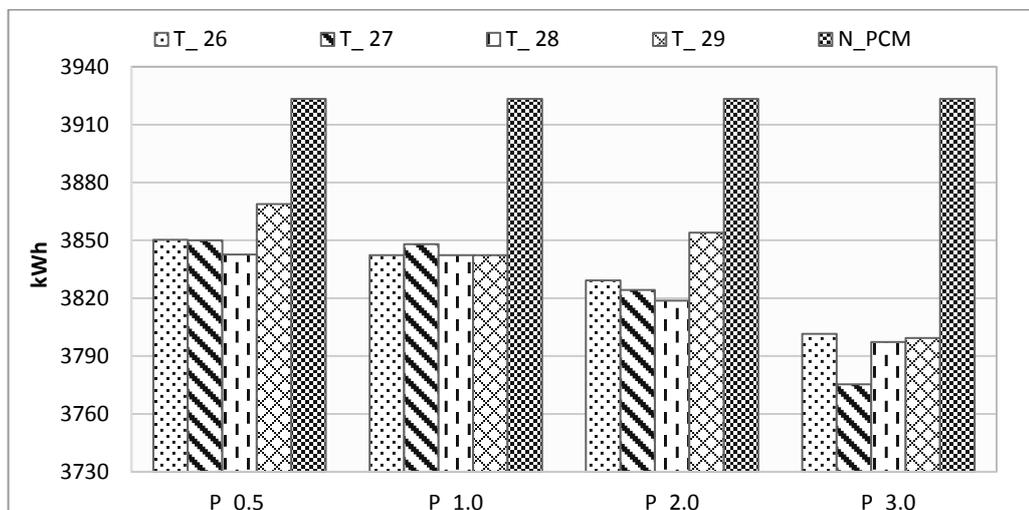


Figura 4.5: Marsiglia – Effetto di differenti spessori di intonaco PCM sul fabbisogno estivo di energia primaria

In dettaglio, si può osservare che ad Ankara la riduzione percentuale del fabbisogno di energia primaria varia tra 1.4% (0.7%) per P_SEw e 3.0% (1.9%) per P_Aw, quando la temperatura di fusione è di 27°C (29°C). A Marsiglia invece con temperature di fusione di 26°C e 27°C, il risparmio di energia primaria risulta rispettivamente pari a 121 kWh e 148 kWh, quando sono applicati 3 cm di intonaco PCM.

Le stesse analisi nelle altre città forniscono risultati simili. Da questi studi si evince dunque che il tipo di materiale (in termini di temperatura di fusione) e la quantità (in termini di spessore) sono fattori rilevanti per l'efficacia dell'intervento e l'entità del risparmio energetico. Si nota pure che, fissato il calore latente di fusione, il parametro più influente è la temperatura di passaggio di fase, la cui scelta è funzione della località climatica e del periodo in cui si intende ottimizzare la scelta del materiale.

Scelta la configurazione ottimale (P_3.0 and P_Aw) , sono stati calcolati i risparmi conseguibili per ciascun mese della stagione considerata al variare della temperatura di fusione. Si riportano le tabelle (4.7 a 4.8) con i risultati riferiti a ciascuna città.

Mese	T_26		T_27		T_28		T_29	
	ΔEP_c [kWh]	$\Delta E_{c,\%}$ [%]						
Maggio	74.3	8.3%	99.1	11%	81.1	9.1%	124.9	14%
Giugno	59.5	2.6%	125.0	5.4%	78.6	3.4%	175.9	7.6%
Luglio	113.6	3.6%	153.0	4.9%	86.8	2.8%	177.9	5.7%
Agosto	100.3	3.0%	162.7	4.8%	97.5	2.9%	202.7	6.0%
Settembre	67.9	2.7%	141.9	5.6%	89.3	3.5%	196.5	7.7%
Totale	415.7	3.4%	681.6	5.6%	433.4	3.5%	877.8	7.2%

Tabella 4.7: Ankara, effetto del valore della temperatura di fusione sul fabbisogno di energia primaria.

Mese	T_26		T_27		T_28		T_29	
	ΔEP_c [kWh]	$\Delta E_{c,\%}$ [%]						
Maggio	72.0	2.3%	88.9	2.8%	35.3	1.1%	166.2	5.3%
Giugno	184.2	4.6%	189.2	4.7%	127.5	3.2%	172.6	4.3%
Luglio	96.7	2.0%	124.4	2.6%	71.7	1.5%	171.0	3.6%
Agosto	79.6	1.5%	91.4	1.7%	56.2	1.1%	127.8	2.4%
Settembre	52.5	1.5%	71.5	2.0%	25.0	0.7%	82.1	2.3%
Totale	485.0	2.3%	565.4	2.7%	315.7	1.5%	719.8	3.5%

Tabella 4.8: Atene, effetto del valore della temperatura di fusione sul fabbisogno di energia primaria.

Mese	T_26		T_27		T_28		T_29	
	ΔEP_C [kWh]	$\Delta E_{C,\%}$ [%]						
Maggio	97.7	3.5%	136.8	4.9%	103.1	3.7%	183.9	6.5%
Giugno	137.2	4.2%	134.8	4.2%	78.1	2.4%	142.3	4.4%
Luglio	121.8	3.1%	148.0	3.8%	126.1	3.2%	124.0	3.2%
Agosto	91.5	2.3%	107.1	2.7%	71.8	1.8%	124.7	3.1%
Settembre	48.3	1.7%	76.3	2.7%	42.7	1.5%	119.4	4.2%
Totale	496.5	2.9%	603.0	3.6%	421.8	2.5%	694.4	4.1%

Tabella 4.9: Marsiglia, effetto del valore della temperatura di fusione sul fabbisogno di energia primaria.

Mese	T_26		T_27		T_28		T_29	
	ΔEP_C [kWh]	$\Delta E_{C,\%}$ [%]						
Maggio	28.2	0.8%	63.1	2.0%	39.2	1.3%	136.8	4.4%
Giugno	142.1	4.2%	144.6	4.2%	72.4	2.1%	112.8	3.3%
Luglio	61.8	1.5%	135.9	3.3%	128.0	3.1%	78.5	1.9%
Agosto	22.2	0.5%	50.0	1.1%	31.0	0.7%	69.0	1.5%
Settembre	22.2	0.7%	39.1	1.3%	0.9	0.0%	112.1	3.8%
Totale	244.0	1.3%	432.7	2.4%	271.5	1.5%	509.2	2.8%

Tabella 4.10: Napoli, effetto del valore della temperatura di fusione sul fabbisogno di energia primaria.

Mese	T_26		T_27		T_28		T_29	
	ΔEP_C [kWh]	$\Delta E_{C,\%}$ [%]						
Maggio	38.7	1.3%	81.6	2.7%	44.4	1.5%	134.3	4.5%
Giugno	119.7	3.2%	139.1	3.8%	86.5	2.3%	103.5	2.8%
Luglio	79.1	1.7%	119.3	2.6%	90.4	1.9%	146.2	3.1%
Agosto	12.4	0.3%	35.2	0.7%	11.8	0.2%	31.9	0.7%
Settembre	8.5	0.2%	38.7	1.0%	15.3	0.4%	83.9	2.3%
Totale	258.4	1.3%	413.9	2.1%	248.4	1.3%	499.8	2.5%

Tabella 4.11: Siviglia, effetto del valore della temperatura di fusione sul fabbisogno di energia primaria.

Da questi dati si ricava che i materiali a cambiamento di fase non garantiscono lo stesso risultato in tutti i mesi della stagione considerata e in particolare la maggiore efficienza si ottiene in climi semi-aridi con estati umide.

Infatti, ad Ankara il risparmio annuale di energia primaria oscilla tra il 3.4%÷7.2%. il miglior risultato si ottiene con una temperatura di fusione di 29°C, e il risparmio netto di energia primaria è circa 880 kWh. Le minori potenzialità invece si hanno a Siviglia e Napoli, dove il risparmio è sempre inferiore al 3.0% (con i migliori risultati per T₂₉). Partendo da questi risultati, si può notare che spesso non è possibile definire una temperatura di fusione ottimale con riferimento all'intero periodo estivo. Per esempio, a Napoli, una temperatura di fusione di 27°C consente il massimo risparmio nei mesi di giugno e luglio, mentre nei restanti mesi la temperatura di fusione migliore è di 29°C. Per ogni temperatura di fusione, i risultati peggiori sono raggiunti in agosto, probabilmente perché il PCM non riesce a solidificare completamente.

I risultati ottenuti non sono di immediata comprensione poiché diversi sono i fenomeni che concorrono al ciclo di funzionamento del materiale. Innanzitutto occorre precisare che, anche se negli edifici climatizzati il controllo termostatico induce limitate fluttuazioni della temperatura dell'aria interna, la posizione del materiale a cambiamento di fase sulle pareti interne risulta vantaggiosa in quanto l'andamento della temperatura all'interno dello strato di PCM dipende anche da altri fattori. Infatti, il flusso termico attraverso le pareti dipende dalle condizioni climatiche esterne in termini di temperatura, radiazione solare diretta, diffusa e globale e dell'extra-flusso termico dovuto alla radiazione infrarossa verso la volta celeste. A questo si aggiunge l'effetto dovuto al carico interno in termini di dispositivi e profili di occupazione, che influenza la temperatura interna media dell'aria e quindi la temperatura operativa. Inoltre, lo scambio termico è legato alla composizione globale della stratigrafia, perché i fenomeni di sfasamento e attenuazione sono anche legati ai parametri termo-fisici stazionari e dinamici dell'involucro dell'edificio.

Poiché l'attivazione del PCM dipende dall'interazione di questi fenomeni, la scelta di una temperatura di fusione bassa conduce ad una sottoutilizzazione del materiale nei mesi più caldi. D'altra parte, una temperatura di fusione troppo elevata può causare una scarsa efficienza durante le stagioni intermedie, poiché il materiale potrebbe non raggiungere la temperatura di attivazione. Inoltre, il volume di PCM installato deve essere scelto in modo che tutta la sua massa possa liquefare e ri-solidificare completamente in un ciclo giornaliero. Ad esempio, se la quantità (spessore) di materiale è troppo elevata, il tempo necessario per scaricarsi potrebbe essere maggiore di quello in cui la forzante del processo concorre a creare le condizioni necessarie alla solidificazione.

È importante sottolineare che i risultati ottenuti sono il prodotto di uno studio prettamente numerico, pertanto i risparmi calcolati devono essere intesi come valori tendenziali volti a fornire linee guida, utili per orientare il processo di retrofit mediante applicazioni di materiali a cambiamento di fase. I dati raccolti sono comunque funzionali a futuri studi sperimentali.

b. Naturally ventilated building: condizioni di comfort microclimatico

La seconda analisi riguarda la capacità del PCM di ridurre i picchi della temperatura operativa e della temperatura media radiante, quando l'impianto di climatizzazione è spento.

L'indice utilizzato è il *not-overheating time* (t_{Noh}), considerando una temperatura media radiante nel range ritenuto di comfort e quindi $24 \div 28^\circ\text{C}$. La Figura 4.6 mostra i risultati che si ottengono per una parete di un ufficio esposta ad est.

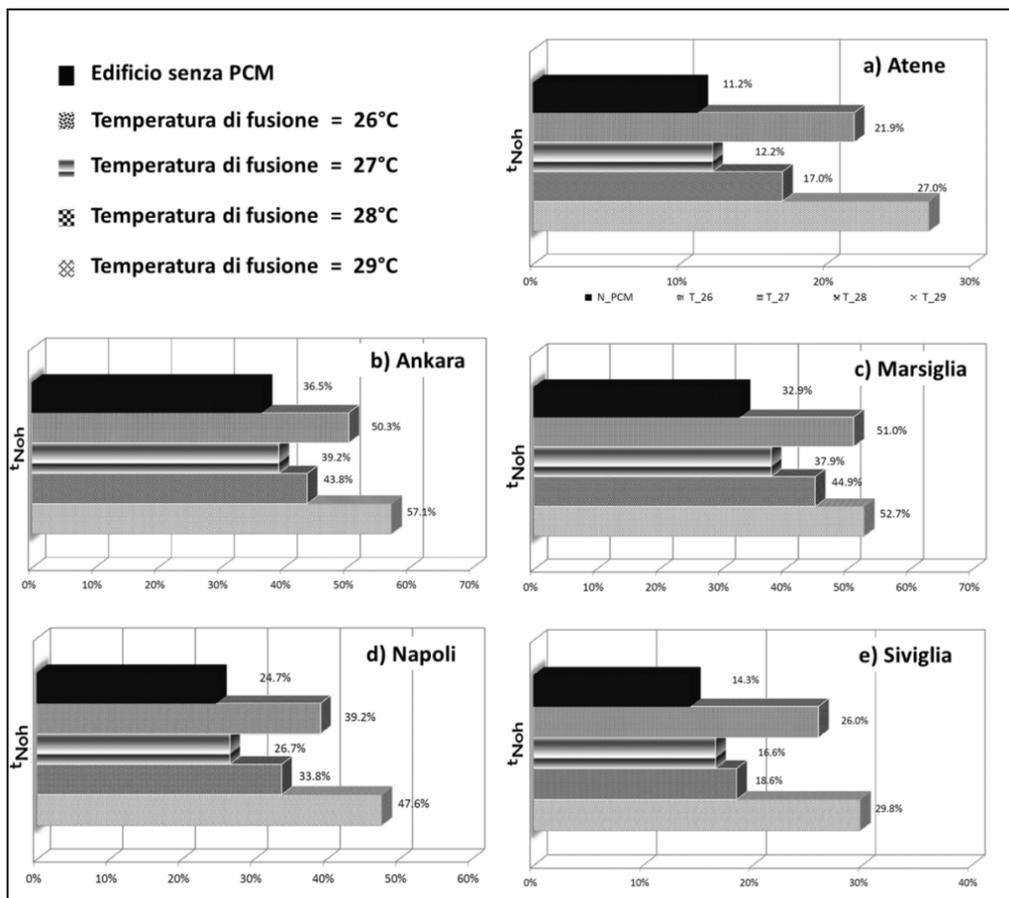


Figura 4.6: "Not overheating time" al variare della temperature di fusione e della località climatica.

Si ricava che la percentuale di tempo caratterizzata da una temperatura media radiante nel campo di comfort è maggiore per T₂₆ e T₂₉. I principali vantaggi vengono raggiunti in maggio e settembre. In questi mesi, infatti, il ciclo di

funzionamento del materiale viene favorito da una maggiore riduzione notturna della temperatura esterna, tale che il flusso convettivo aumenta causando una maggiore riduzione della temperatura media radiante e dunque della temperatura operativa. In definitiva, una temperatura di fusione di 29°C consente di portare l'indice considerato a circa il 57% nella città di Ankara e ad ottenere un incremento delle ore di comfort del 15.4% e del 22.9% rispettivamente a Siviglia e a Napoli. Il risultato meno rilevante si ottiene a Siviglia e Atene con le soluzioni T_27 e T_28.

Come ulteriore, analisi sono stati confrontati i profili di temperatura operativa e temperatura media radiante per l'edificio pre/post-intervento. Nelle Figure seguenti, viene mostrato tale confronto per un ufficio di cui si considera la parete esposta ad est per la temperatura media radiante.

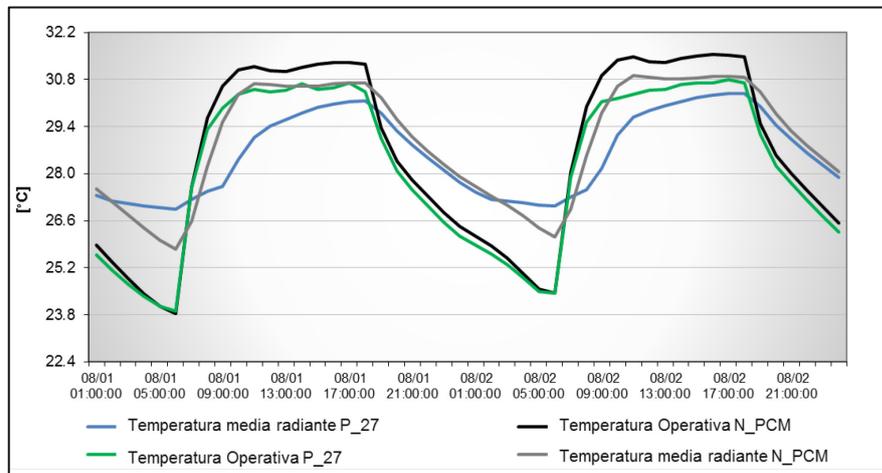


Figura 4.7: Ankara – Confronto tra i profili di temperatura operativa e temperatura media radiante.

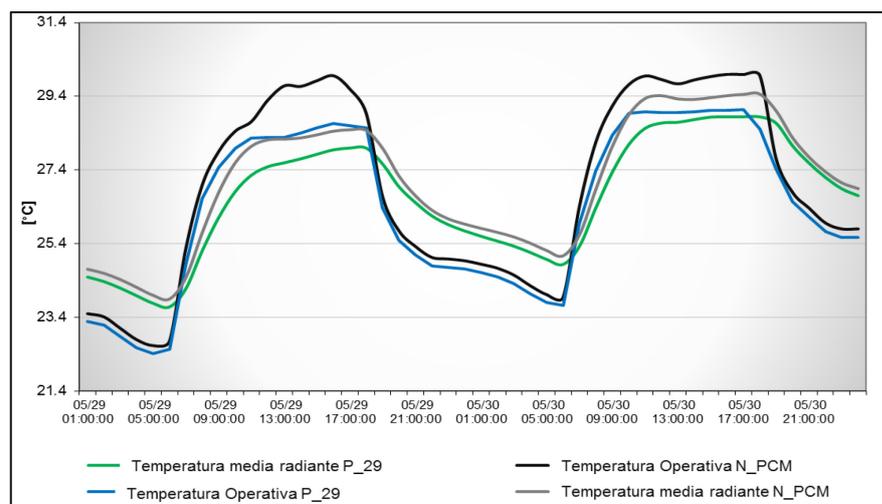


Figura 4.8: Atene - Confronto tra i profili di temperatura operativa e temperatura media radiante.

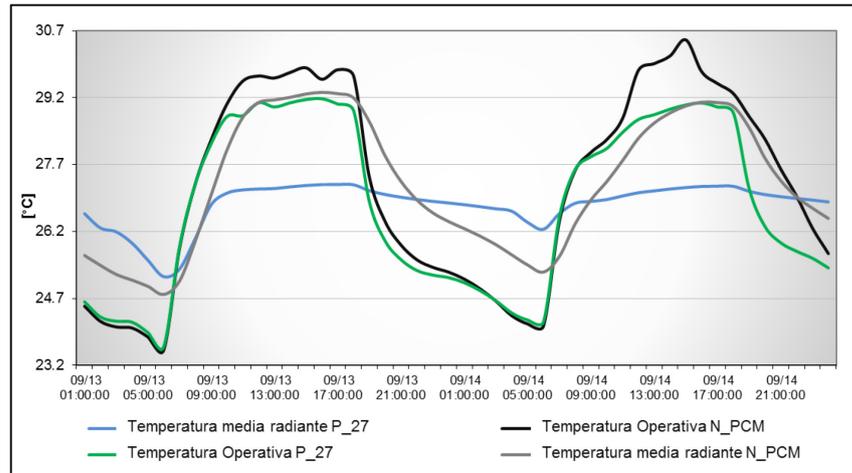


Figura 4.9: Marsiglia - Confronto tra i profili di temperatura operativa e temperatura media radiante.

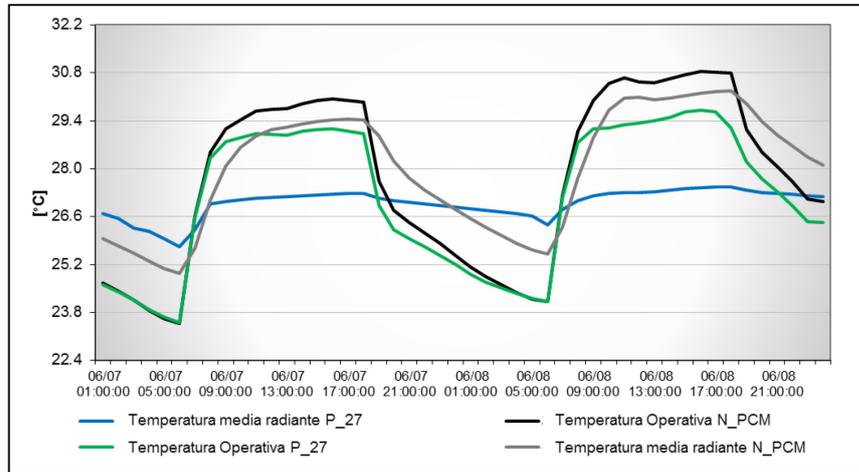


Figura 4.10: Napoli - Confronto tra i profili di temperatura operativa e temperatura media radiante

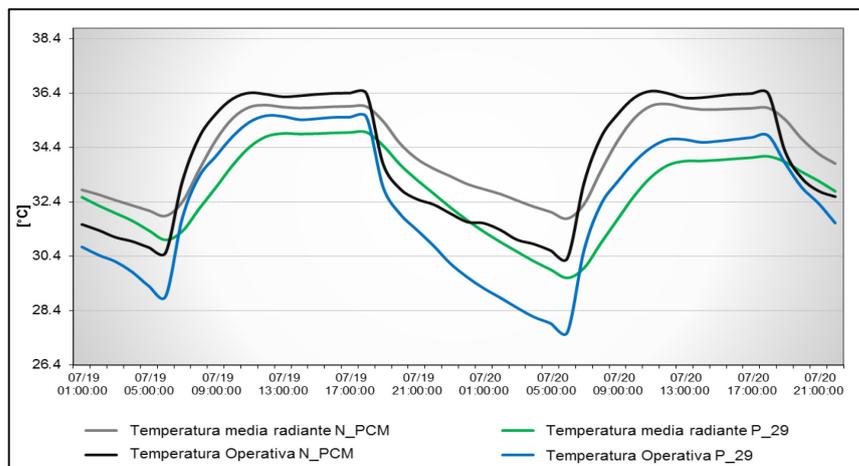


Figura 4.11: Siviglia - Confronto tra i profili di temperatura operativa e temperatura media radiante

In particolare, viene riportato l'andamento per due giorni considerando la soluzione di retrofit ottima per ciascuna località climatica e quindi applicazione su tutte le esposizioni, di 3 cm di intonaco e una temperatura di fusione di 29°C a Marsiglia e Siviglia e di 27°C per gli altri climi.

Dagli andamenti riportati nelle figure di cui sopra, si evince che per l'edificio riqualificato i profili di temperatura sono sempre inferiori rispetto all'edificio prima dell'intervento. Questo consente di sottolineare che le potenzialità di questa tecnologia possono essere ancora maggiori se si utilizza un approccio "adattativo" nella gestione del controllo microclimatico in condizioni estive.

Richiamando dunque l'approccio della UNI EN 15251 [91] e considerando come temperatura media esterna quella massima per il periodo estivo (Tabella 4.2), gli intervalli di comfort su cui settare la temperatura sono:

- Atene - 25.4 ÷ 29.4°C,
- Napoli - 25.4 ÷ 29.4°C,
- Siviglia 28.4÷32.4°C,
- Ankara – 26.8 ÷ 30.8°C,
- Marsiglia 25.2 ÷ 29.2°C.

Utilizzando questi range per la temperatura operativa, si ricava che spesso l'intervento dell'impianto per assicurare condizioni di comfort non è necessario. Ad esempio, a maggio per Atene la temperatura operativa è sempre inferiore a 29.4°C e quindi considerando un approccio adattativo l'impianto non dovrebbe mai essere acceso. Fenomeni simili si registrano ad Ankara. Per Napoli e Marsiglia, poi, si osserva che la temperatura medi radiante è prossima al valore del punto di fusione e inferiore di circa 2÷3°C rispetto al N_PCM. Inoltre, a Napoli, la temperatura operativa rimane spesso nei mesi di maggio, giugno e settembre nell'intervallo comfort ed è richiesto il funzionamento del sistema HVAC solo per poche ore durante la giornata.

Infine, si vuole sottolineare come per la città di Siviglia anche con un approccio adattativo la temperatura operativa resta al di fuori del range di comfort e quindi l'intervento dell'impianto è sempre necessario.

4.2.1.2 Retrofit di un edificio adibito ad attività commerciale e residenziale

In questo secondo caso studio, implementato in EnergyPlus v.8.1.0, si procede al retrofit di un edificio con due intonaci PCM, le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 4.12, nella quale T_f e Δh_f sono rispettivamente la temperatura e il calore latente di fusione, λ la conducibilità termica del materiale e C_p il calore specifico allo stato solido. In particolare:

- il "PCM_H", ha un punto di fusione prossimo alla temperatura di set-point per il riscaldamento ed è dunque attivo solo durante tale periodo (15 Novembre - 31 Marzo);
- il "PCM_C", ha una temperatura di fusione più alta ed è attivo durante il periodo di raffrescamento (15 Maggio - 30 Settembre).

L'obiettivo, quindi, è stato quello di valutare il potenziale di risparmio energetico con riferimento ai consumi annuali e di individuare logiche di progettazione e selezione dei materiali a cambiamento di fase in funzione della tipologia di edificio e del contesto climatico in cui questo è inserito.

	T_f	Δh_f	C_p	λ
	[°C]	[kJ/kg]	[J/kg K]	[W/m K]
PCM_H	26	110	1400	0.3
PCM_C	20	24.5	1200	0.7

Tabella 4.12: Proprietà termofisiche degli intonaci PCM considerati.

L'edificio utilizzato come caso studio, ha una forma rettangolare e un'altezza complessiva di circa 10.5 m (3 piani). La superficie netta condizionata dell'edificio è pari a 685.5 m², mentre il rapporto di forma (S/V) è pari a 0.54 m⁻¹. La Tabella 4.13 riassume il rapporto superficie finestrata/opaca per le diverse esposizioni.

	Totale	Nord	Est	Sud	Ovest
Superficie Laterale totale [m ²]	904.6	371.9	80.5	371.9	80.5
Superficie trasparente [m ²]	172.4	23.21	1.99	145.2	1.97
Rapporto finestrato-opaco [%]	19.1	6.24	2.48	39.1	2.45

Tabella 4.13: Descrizione geometrica dell'involucro edilizio.

L'edificio, sia per tipologia edilizia che destinazione d'uso (Figura 4.12), è caratteristico dei centri urbani di molte città europee. Secondo lo studio [215], il settore del terziario commerciale costituisce la percentuale (28%) più elevata di edifici non residenziali. Gli edifici ad uso ufficio sono la seconda categoria per diffusione, con circa il 25% della superficie totale non residenziale, seguiti dagli edifici scolastici (20%), alberghi e ristoranti (11%), ospedali (7%), impianti sportivi (4%) e altre destinazioni d'uso (5%). Pertanto, questo studio si concentra su una configurazione edilizia tipica delle città europee, con un edificio di tre piani in cui al piano terra sono situati quattro negozi di abbigliamento con magazzini privati al primo piano. Al secondo piano,

invece, ci sono due appartamenti con due camere da letto, due bagni e un soggiorno con cucina. L'edificio dispone anche di aree di circolazione comuni, come il blocco scale appena fuori dagli appartamenti.



Figura 4.12: a), b) Esempi di edifici a destinazione d'uso commerciale/residenziale; c) Caso studio.

Al fine di riprodurre condizioni reali di funzionamento per il PCM, sono state create nove tipologie di zone termiche (Tabella 4.14). Il tasso di rinnovo dell'aria è stato fissato a 1.5 ACH per i negozi e a 0.8 ACH per gli appartamenti, al fine di garantire le condizioni di comfort in accordo alla norma UNI EN 15251 [91].

L'efficienza dell'azione di retrofit è stata analizzata per diverse località con condizioni climatiche diverse, in modo che la varietà di climi in Europa fosse ben rappresentata: Napoli (Italia), Francoforte (Germania), Bordeaux (Francia), Copenaghen (Danimarca) e Stoccolma (Svezia).

L'obiettivo dello studio è valutare l'efficienza dei PCMs in strutture multistrato, caratterizzate sia da un'alta resistenza termica (nelle regioni ad alte latitudini) che a media resistenza termica (ad esempio Napoli dove le esigenze di raffreddamento sono paragonabili o superiori alle richieste in riscaldamento).

Zona	Occupazione [persone/m ²]	Carico di illuminazione [W/m ²]	Carico interno [W/m ²]
Toilet negozi	0.10	5.0	3.00
Negozio	0.10	8.0	8.00
Deposito	0.05	5.0	3.00
Scala interna negozio	0.05	5.0	2.00
Scala esterna	0.05	5.0	2.00
Bagno	0.10	5.0	3.00
Stanza da letto	0.04	5.0	4.00
Cucina	0.10	5.0	10.0
Salotto	0.04	5.0	4.00

Tabella 4.14: Dati relativi alle zone termiche.

In sintesi, secondo la classificazione climatica di Köppen [215], Bordeaux ha un clima oceanico, anche se le estati tendono ad essere più calde e gli inverni più miti rispetto alla maggior parte delle aree con una classificazione simile. Copenaghen ha un clima tipicamente oceanico, mentre Francoforte ha un clima temperato oceanico, con inverni moderatamente freddi ed estati calde. Stoccolma ha un clima continentale umido e infine Napoli ha un clima mediterraneo, con inverni miti ed umidi ed estati calde e piuttosto secche.

L'edificio simulato è stato definito secondo tecnologie costruttive comuni della seconda metà del '900 e quindi con struttura portante in cemento armato e mattoni forati per l'involucro opaco verticale mentre le strutture orizzontali sono di latero-cemento. Lo spessore di isolamento (polistirene espanso, EPS) è stato differenziato in modo da definire edifici rappresentativi dello stock edilizio delle diverse regioni europea considerate nella simulazione. La Tabella 4.15 riassume i valori della trasmittanza termica (U) dei diversi componenti d'involucro al variare dello spessore (dx) d'isolante.

Città	dx [m]	U [W/m ² K]	
	EPS	Parete	Solaio
Bordeaux	0.10	0.17	0.28
Copenaghen	0.20	0.12	0.15
Francoforte	0.15	0.14	0.20
Napoli	0.05	0.23	0.46
Stoccolma	0.25	0.10	0.13

Tabella 4.15: Trasmittanza termica dei componenti d'involucro opachi per le diverse località climatiche.

Le pareti divisorie sono costituite da due lastre di cartongesso con intercapedine d'aria (U=1.64 W/m²K), mentre i componenti finestrati sono in vetrocamera (4 mm di vetro con rivestimento basso-emissivo/12 millimetri argon/4 mm vetro non rivestito) con telaio metallico e taglio termico e persiane esterne. Per questi è stata calcolata una trasmittanza termica complessivo pari a 2.55 W/m²K.

L'edificio è servito da una caldaia ad alta efficienza per il riscaldamento e da una pompa di calore elettrica aria/acqua in raffrescamento (coefficienti di prestazioni, in condizioni nominali, pari a $3.1 W_{TH}/W_{EL}$), mentre i terminali in ambiente sono ventilconvettori.

In inverno, i negozi sono riscaldati (raffrescati) a 20°C (26°C), dal lunedì al sabato, dalle 10:00 alle 20:00. Con le stesse temperature di set-point invece le abitazioni sono riscaldate dalle ore 6.00 alle 09:00 e dalle 16:00 alle 23:00, mentre l'impianto si accende d'estate dalle 16:00 alle 22:00. Durante il periodo di raffrescamento, sono stati considerati 3 ACH in free-cooling dalle 23:00 alle 08:00 per favorire il processo di "scarica" del materiale a cambiamento di fase.

Per l'edificio descritto, sono state valutate diverse soluzioni di retrofit al variare dei seguenti parametri:

- Posizione: a) 3 cm di PCM_H sul lato interno e 3 cm di PCM_C sul lato esterno ("P_IE"), b) 1.5 cm di entrambi i PCM applicati sul lato esterno ("P_E"), c) 1.5 cm di entrambi i PCM applicati sul lato interno ("P_I"). Le configurazioni sono mostrate in Figura 4.13.
- Temperatura di fusione, nell'intervallo $18-22^{\circ}\text{C}$ per PCM_H e nell'intervallo $26-32^{\circ}\text{C}$ per PCM_C. L'edificio ristrutturato sarà indicato nel seguito con "T_n/m", dove "n" è il valore del punto di fusione selezionato ($^{\circ}\text{C}$) per il periodo di riscaldamento e la "m" è il valore assunto per la stagione di raffreddamento.

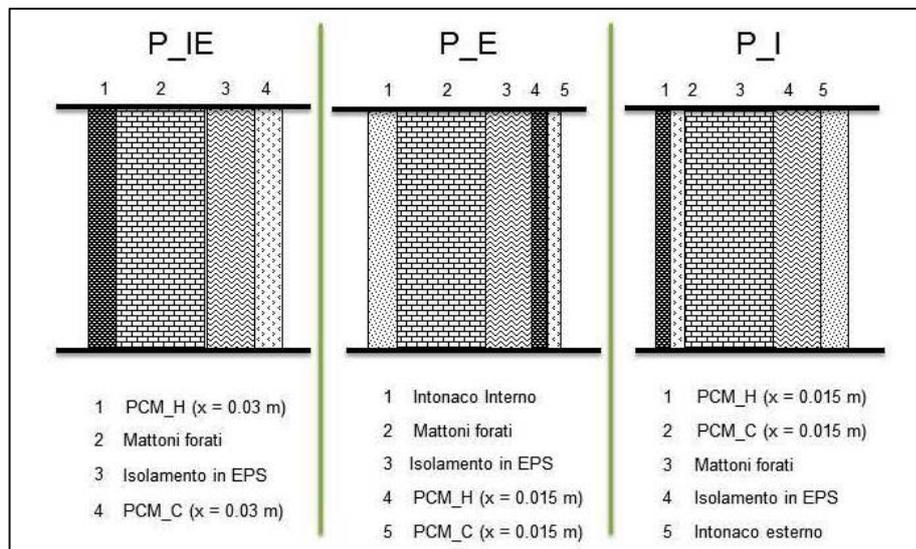


Figura 4.13: Configurazioni simulate per la posizione degli strati PCM.

Secondo l'approccio proposto, l'ottimizzazione di un intervento di ristrutturazione - per mezzo di materiali a cambiamento di fase - dovrebbe prendere in considerazione

almeno i quattro aspetti che sono stati sviluppati con riferimento al caso studio proposto:

- risparmio annuale di energia primaria annuo (ΔEP_H se riferito alla stagione di riscaldamento, ΔEP_C se riferito ai mesi di raffrescamento);
- emissioni inquinanti evitate ($\Delta CO_{2,\%}$);
- condizioni di comfort interne (Performance Index for temperature);
- fattibilità economica (SPB, VAN, DPB).

Tali indici sono quelli definiti nella prima parte del capitolo. In particolare, per questo caso studio gli “LCA emission factor”, relativi al fabbisogno elettrico, con riferimento a ciascuna città, sono quelli riportati nella Tabella 4.16.

	Bordeaux	Copenaghen	Francoforte	Napoli	Stoccolma
[tCO _{2,eq} /MWh _{el}]	0.146	0.760	0.706	0.708	0.079

Tabella 4.16: LCA Emission factor per l'energia elettrica.

Tutte le analisi fatte mostrano che l'applicazione di due PCMs può indurre una effettiva riduzione del fabbisogno energetico annuale dell'edificio. Per alcune condizioni non è necessario l'intervento dell'impianto di climatizzazione per interi periodi, come ad esempio a Copenaghen, dove nei mesi di maggio e settembre il fabbisogno dell'edificio si annulla, con 352 kgCO_{2,eq} evitate rispetto all'edificio.

Analizzando l'effetto delle diverse configurazioni, si è trovato che per Napoli, Copenaghen, Bordeaux e Stoccolma, i maggiori risparmi si ottengono con l'installazione del PCM_H sul lato interno e del PCM_C sul lato esterno per qualunque combinazione delle temperature dei due materiali. Si deve pure sottolineare, però, che questa soluzione non è ugualmente efficiente in tutti i mesi dell'anno. La Figura 4.14 mostra l'incidenza sul fabbisogno di energia primaria rispetto all'edificio prima dell'intervento, di diverse configurazioni di retrofit per la città di Bordeaux, quando per PCM_H è stata scelta una temperatura di fusione di 22°C e per PCM_C una temperatura di 29°C. Da questi andamenti si vede che l'applicazione di 3 cm di PCM_H lato interno e PCM_C lato esterno consente il maggior risparmio energetico durante il periodo di riscaldamento ($\Delta EP_H \approx 748$ kWh). A marzo, ad esempio, le altre due configurazioni non garantiscono alcun risparmio energetico. Invece, durante il periodo estivo, si trova che le condizioni climatiche esterne causano una fusione troppo veloce del PCM_C che pertanto non riesce ad essere efficace ($\Delta EP_C \approx 2064$ kWh for P_{IE}) come potrebbe esserlo invece se fosse applicato sul lato interno and ($\Delta EP_C \approx 2488$ kWh for P_I).

La stessa analisi per diverse combinazioni i temperature di fusione e per le città di Copenaghen, Napoli e Stoccolma porterebbe ad analoghe conclusioni. Annualmente, però, la soluzione P_IE resta quella che garantisce il maggior risparmio di energia primaria.

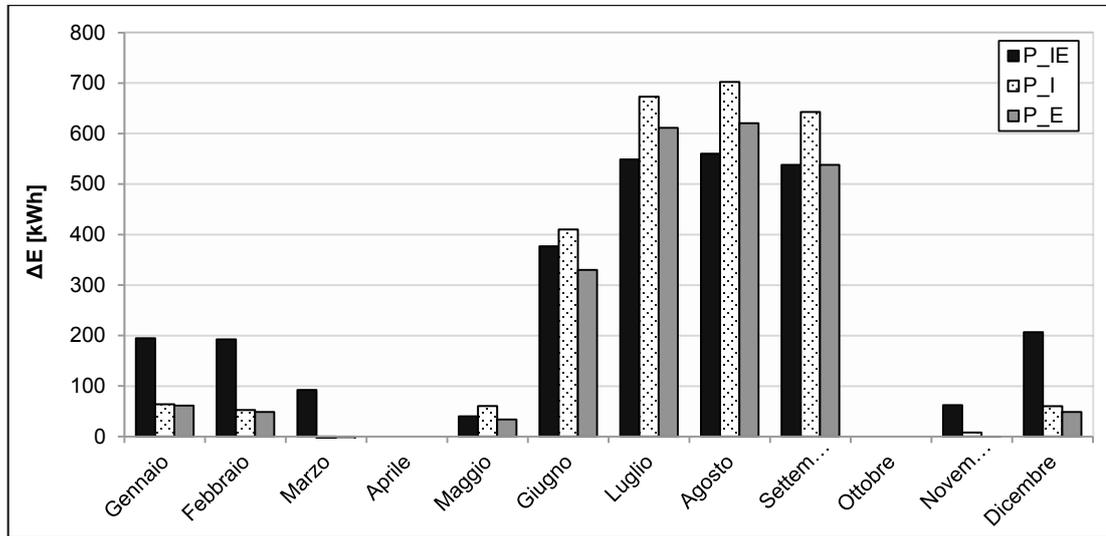


Figura 4.14: Bordeaux (Francia) - Effetto di diverse configurazioni di PCM (T_{22/29}) sulle richieste energetiche annuali.

Diversamente, considerando le condizioni climatiche Francoforte, la configurazione ottimale dipende dalla combinazione delle temperature di fusione dei due materiali. La Tabella 4.17 mostra i principali risultati ottenuti al variare della posizione e delle temperature di fusione dei due materiali.

Intervento		Annuale	Inverno	Estate
Temperature di fusione	Posizione	ΔEP [kWh]		
T _{22/26}	P _{IE}	1'870	138	1'732
	P _I	1'880	265	1'615
	P _E	1'709	294	1'415
T _{22/29}	P _{IE}	2'432	958	1'474
	P _I	1'892	269	1'623
	P _E	3'171	434	2'737

Tabella 4.17: Francoforte (Germania): Riduzione annuale e stagionale di energia primaria per diverse soluzioni di retrofit.

L'installazione dei due PCM sul lato esterno con temperature di fusione di 22°C (PCM_H) e 29°C (PCM_C) consente il massimo risparmio di energia primaria durante il periodo estivo. Infatti, le diverse forzanti interne ed esterne presenti determinano sovente la fusione di entrambi gli strati che dunque contribuiscono in diverse fasce orarie e periodi della stagione ad attenuare e sfasare il flusso termico in parete. In particolare, lo strato con una temperatura di fusione di 22°C risulta attivo durante le

prime ore del mattino e somma il suo effetto a quello del secondo strato (29°C) che invece fonde durante le ore centrali della giornata e nei periodi in cui il carico esterno raggiunge i valori di picco. Tuttavia, è anche evidente che il massimo risparmio energetico durante il periodo di riscaldamento si verifica quando i due intonaci PCM sono collocati alternativamente sul lato interno ed esterno della parete. In questo modo, il PCM_H risulta attivo con una frequenza maggiore e contribuisce ad aumentare il comfort termico interno e a ridurre al minimo l'accensione degli impianti di riscaldamento.

Alcune considerazioni interessanti possono essere fatte analizzando i risparmi di energia primaria conseguibili al variare delle temperature di fusione. Le Figure 4.15 e 4.16 riportano rispettivamente i risultati conseguibili nella città di Napoli quando la configurazione scelta è P_IE.

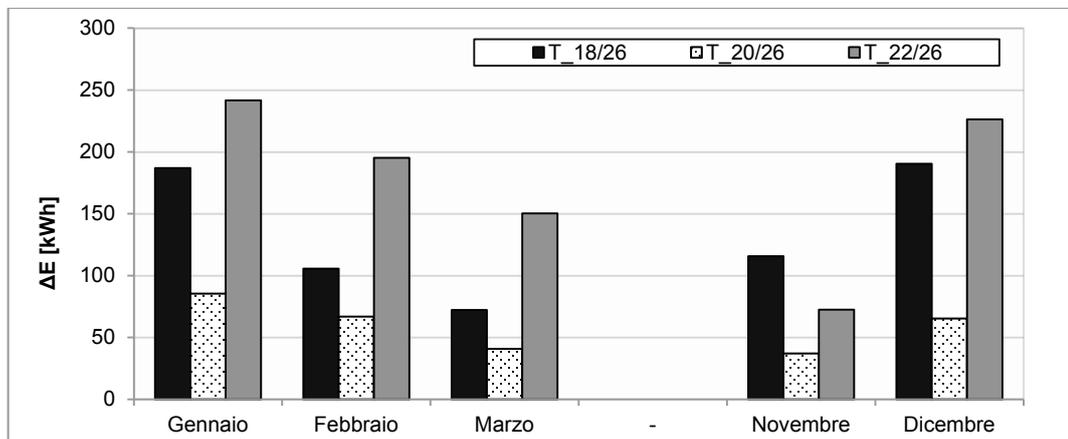


Figura 4.15: Napoli (Italia) - Effetto della temperatura di fusione di PCM_H sul fabbisogno di energia primaria in riscaldamento.

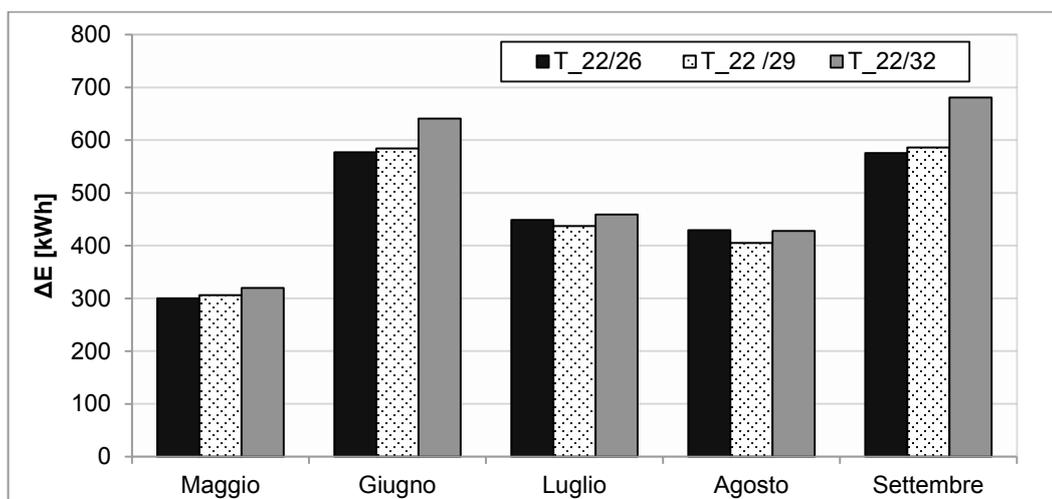


Figura 4.16: Napoli (Italia) - Effetto della temperatura di fusione di PCM_C sul fabbisogno di energia primaria in raffrescamento.

Dalla Figura 4.15 si evince che una temperatura di fusione di 20°C consente il minor risparmio nel periodo invernale ($\Delta EP_H \approx 295$ kWh), mentre la migliore configurazione è quella con una temperatura di fusione di 22°C ($\Delta EP_H \approx 886$ kWh).

Invece, d'estate, se l'intonaco PCM_C è posto sul lato esterno dell'involucro edilizio, il risparmio energetico conseguibile aumenta all'aumentare del valore della temperatura di fusione, il cui valore ottimale nell'intervallo selezionato è 32°C. Un commento simile vale per Francoforte dove la temperatura di fusione ottimale risulta 29°C. Nelle città con un clima oceanico (Bordeaux e Copenaghen) e a Stoccolma (clima continentale umido), il fabbisogno energetico per la climatizzazione estiva invece non si riduce all'aumentare della temperatura di fusione anche quando l'intonaco PCM_C è posto sul lato esterno. Questo è dovuto al fatto che le temperature massime giornaliere estive si mantengono nel range 20-27°C e le temperature minime giornaliere invece variano tra 9-15°C. Pertanto, la temperatura di fusione che consente di sfruttare pienamente il potenziale accumulo termico dell'intonaco è 26°C.

La Tabella 4.18 mostra i principali risultati energetici e ambientali quando la posizione dei due intonaci e la temperatura di fusione per ciascuno è stata scelta in modo da ottimizzarne il funzionamento.

Città	Azione		EP [kWh]	ΔE [kWh/a]	Annuale	Inverno	Estate	Annuale	
	Posizione	T _f [°C]						ΔCO_2 [kg]	ΔCO_2 [%]
Bordeaux	P_IE	T_22/26	45'517	2'816	5.8%	2.1%	17%	363	4.4%
Copenaghen	P_IE	T_22/26	69'777	1'968	2.7%	1.0%	34%	773	4.3%
Francoforte	P_E	T_22/29	70'467	3'171	4.3%	1.0%	31%	900	3.6%
Napoli	P_IE	T_22/32	50'709	3'225	6.0%	3.6%	7.9%	900	5.6%
Stoccolma	P_IE	T_22/26	90'431	2'016	2.2%	1.0%	21%	300	1.6%

Tabella 4.18: Analisi energetica e ambientale per le migliori configurazioni di riqualificazione energetica ipotizzate.

Da questi dati si evince che l'applicazione dei materiali a cambiamento di fase in interventi di retrofit non invasivi, ha le massime potenzialità in termini di riduzione del fabbisogno annuale a Napoli. Questa, infatti, è la città caratterizzata dal maggior carico di raffrescamento e dunque sul risultato annuale incide in maniera preponderante il contributo che l'applicazione del materiale a cambiamento di fase fornisce nel ridurre il fabbisogno per la climatizzazione estiva.

Relativamente all'analisi delle condizioni di comfort, Figura 4.17, è stato utilizzato come parametro il *Performance Index for temperature* per la stagione di riscaldamento (PI_H) e di raffrescamento (PI_C), avendo assunto come range di benessere termico per la temperatura dell'aria interna:

Capitolo 4: La progettazione della riqualificazione energetica: analisi delle prestazioni del sistema edificio/impianti

- nel periodo invernale: $18 \div 22^{\circ}\text{C}$,
- nel periodo estivo: $24 \div 28^{\circ}\text{C}$.

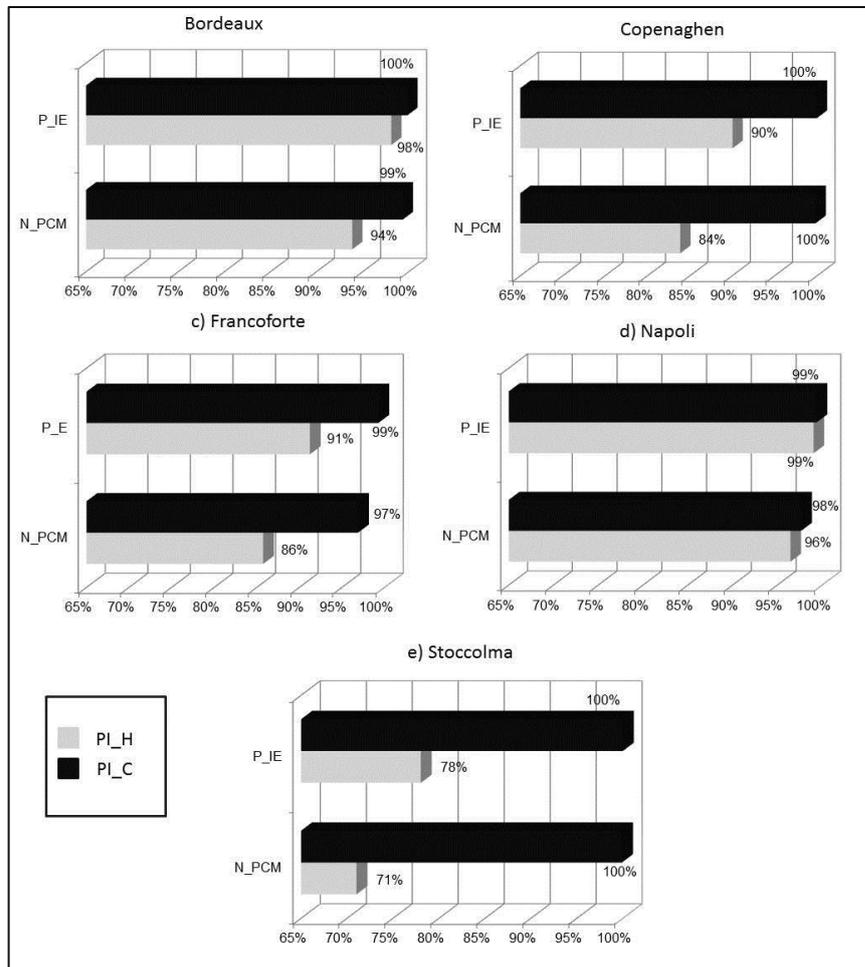


Figura 4.17: Performance Index of temperature per le migliori soluzioni di retrofit di ogni città.

Con riferimento a ciascuna condizione climatica, si trova che la percentuale di tempo caratterizzata da condizioni interne soddisfacenti per l'edificio riqualificato con PCM risulta maggiore sia nel periodo di riscaldamento che di raffrescamento rispetto all'edificio "ante intervento".

L'ultima parte dello studio riguarda l'analisi economica, anche se attualmente non sono disponibili molte informazioni circa gli effettivi costi d'acquisto di tali materiali. I dati a cui ci si è riferiti dunque sono quelli riportati da Soares et al. [216] e nel lavoro di Peippo et al. [217], che, nel valutare l'effetto dei PCM per le condizioni climatiche di Helsinki, assume un costo di 1,5 \$/kg per il PCM, calcolando un tempo di ritorno dell'investimento di circa 18 anni. Lo stesso studio a Boston porta ad un SPB dai 3 ai 5 anni. Basandosi dunque sui pochi dati presenti nella letteratura scientifica e nella

biblioteca di materiali disponibili nell'ultima versione del software di progettazione DesignBuilder, si ricava che il costo medio d'investimento varia tra i 30.0 – 42.5 €/m².

Si è proceduto quindi all'analisi economica per Napoli, assumendo per i costi dei vettori energetici quelli derivati da [206] e per l'intervento, includendo anche la messa in opera, un costo di 45 €/m². L'investimento complessivo pertanto risulta di 40'700 €. Poiché il risparmio annuo di energia primaria ricavato dalle simulazioni è di 3'225 kWh/anno, i costi di esercizio si riducono di 332 €/anno con un periodo di ammortamento (senza attualizzazione), molto più alto dei soliti 25-30 anni considerati come riferimento per retrofit dell'involucro edilizio. Negli altri climi, la fattibilità economica porta a risultati anche meno favorevoli.

Evidentemente, l'aspetto economico dell'intervento richiede un'analisi più dettagliata, ma l'obiettivo del lavoro svolto è stato anche quello di sottolineare come la peculiarità innovativa di questa tecnologia, sebbene efficace dal punto di vista energetico ed economico, non fornisce ancora una redditività economica. Tuttavia, l'aumento della domanda di tecnologie di risparmio energetico e il consolidamento dei risultati scientifici in questo campo, contribuiranno sicuramente alla diffusione di questa tecnologia, in modo da determinare una riduzione dei costi di installazione. Alcuni studi infatti ipotizzano una crescita del mercato di materiali a cambiamento di fase da 460 milioni dollari nel 2013 a \$ 1'150 milioni nel 2018, con un tasso di crescita valutato intorno al 20.1% [218]. È evidente che l'introduzione di opportune misure in forma di incentivazioni fiscali o in conto capitale potrebbero incidere positivamente sulla diffusione di tali tecnologie.

4.2.2 Sostenibilità energetica mediante coperture a verde

Le coperture a verde rappresentano un particolare sistema tecnologico di struttura orizzontale, in cui lo strato vegetale è parte integrante del tetto (Figura 4.18); in generale si distinguono le coperture a verde intensivo (giardini pensili, con piante di medio fusto, non installabili in riqualificazione) e verde estensivo, più semplice tecnologicamente e tale da richiedere una minore manutenzione.

Una corretta progettazione determina vantaggi energetici ed ambientali, sia per quanto concerne il microclima interno e il fabbisogno energetico dell'edificio, sia in riferimento a tematiche di interesse urbano, quali il miglioramento del potere fonoisolante del tetto, un migliore filtraggio delle polveri, la riduzione dell'effetto isola di calore e il minore carico sulla rete fognaria per lo smaltimento delle acque piovane [219, 220]. Studi recenti hanno anche dimostrato attraverso l'applicazione della metodologia del Life Cycle Assessment (LCA), che nei climi mediterranei (in particolare in Spagna) un tetto verde estensivo ha un impatto minore rispetto ad una soluzione

progettuale tradizionale senza isolamento, con una riduzione anche del 7% dell'impatto totale sul ciclo di vita [221].

Ad oggi, sono diffuse e commercializzate prettamente soluzioni "multi-strato" (Figura 4.18 B); queste, pur richiedendo costi iniziali maggiori, determinano migliori prestazioni energetiche.

Sostanzialmente 4 sono i meccanismi attraverso cui un tetto verde interviene sul bilancio di energia tra edificio ed ambiente:

- utilizzo della massa capacitiva del terreno come elemento di accumulo termico;
- processi di fotosintesi vegetale che determinano assorbimento di energia;
- evapotraspirazione foliare e del terreno, che determina raffreddamento evaporativo in copertura;
- riduzione dello scambio termico convettivo che interessa la superficie esterna del tetto.

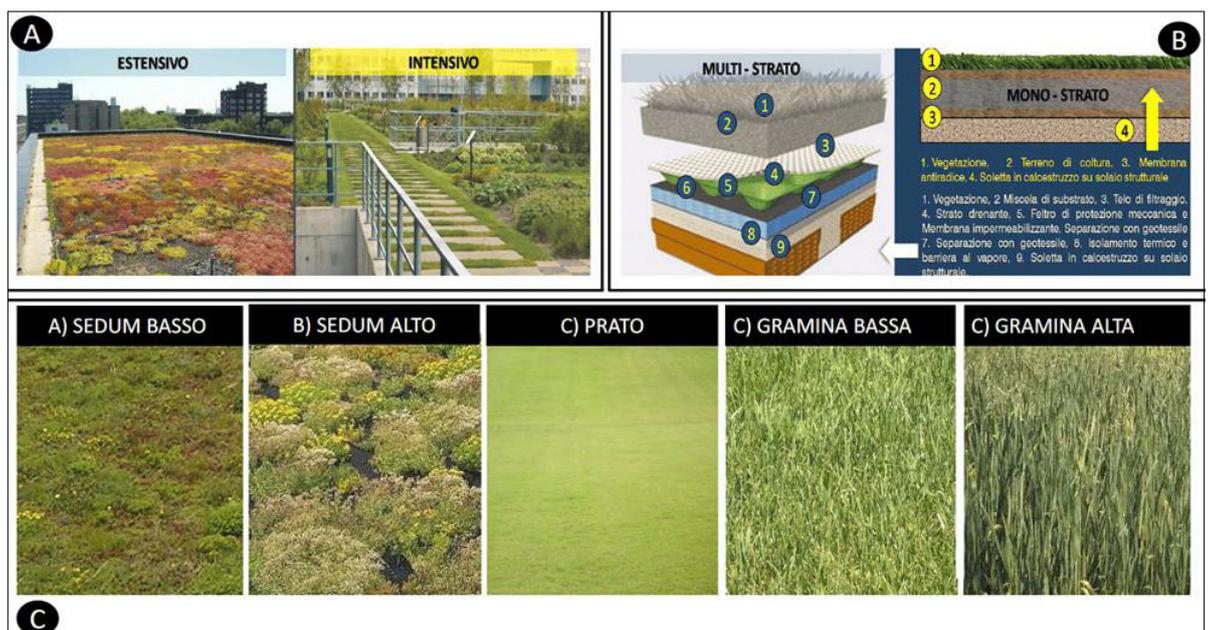


Figura 4.18: Verde pensile estensivo ed intensivo (A), mono- e multi-strato (B), vegetazioni considerate (C).

I tetti verdi, principalmente diffusi soprattutto nelle regioni dell'Europa centro-settentrionale, oggi trovano una buona applicazione anche nei climi mediterranei. Seppur sia indubbia la capacità di tali sistemi nell'attenuare la trasmissione del calore dall'esterno verso l'interno, in regime estivo, essendo favorito il raffrescamento evaporativo e l'assorbimento di energia solare necessario per i processi vegetativi delle colture [222], un'accurata determinazione quantitativa di tali benefici è di estrema

importanza in fase di progettazione, poiché le coperture a verde richiedono anche un costo di funzionamento, connesso alla necessità di irrigazione, ed un onere manutentivo connesso per il 55% alla necessità di aggiungere annualmente una certa quantità di substrato per mantenere il suo spessore omogeneo nel tempo [223].

In sintesi, la fattibilità economica dei tetti verdi è influenzata dalla tecnologia scelta principalmente per quanto riguarda il tipo di piante e dall'efficienza dell'integrazione che deve tener conto sia delle condizioni climatiche specifiche che delle caratteristiche termofisiche dell'edificio.

Nei climi con estati calde e secche quali i paesi dell'Europa meridionale la fattibilità economica di un tetto verde potrebbe essere difficile da giustificare [224]. Sun et al. [225] hanno recentemente proposto un interessante approfondimento su come le prestazioni dei tetti verdi siano strettamente legate allo spessore del terreno e al contenuto di umidità delle tipologie erbacee presenti; questi due fattori evidentemente possono essere controllati solo attraverso l'irrigazione. La loro analisi, a Pechino, indica che il costo di irrigazione è ripagato dalla maggiore efficienza assicurata da una copertura a verde con irrigazione rispetto ad un'analoga soluzione senza sistema di irrigazione. Altri studi confermano il fatto che l'irrigazione artificiale aumenta l'efficienza del sistema sia in termini di biodiversità che di evapotraspirazione [226]. Tuttavia, l'obiettivo, poi, è scegliere l'opportuno metodo per un'innaffiatura sufficiente e senza sprechi, massimizzando l'efficienza dell'irrigazione.

È evidente, da queste premesse, che i tetti verdi non possono essere una risposta adeguata ambientale in tutte le condizioni. Pertanto, lo studio condotto confronta cinque soluzioni di copertura a verde rispetto ad un tetto tradizionale ed una copertura con trattamento alto-riflettente in diverse regioni climatiche; tutte le soluzioni presentano la medesima trasmittanza termica. L'obiettivo è quello di determinare non solo le prestazioni energetiche ma anche la fattibilità economica dell'intervento.

L'edificio modellato (Figura 4.19) presenta le caratteristiche tecnologiche e costruttive tipiche dell'edilizia europea contemporanea, caratterizzato da un telaio strutturale in calcestruzzo armato, con isolamento a cappotto e impianti termici efficienti; in particolare, i ventilconvettori sono alimentati da una caldaia a condensazione per l'adduzione del fluido termo-vettore caldo e una macchina frigorifera aria/acqua per la produzione del freddo. L'impianto, in funzione 10 ore al giorno, assicura 20°C in inverno e 26°C in estate.

Le principali caratteristiche dell'edificio ed i principali parametri identificativi degli impianti sono riportati in Tabella 4.19.

L'edificio ha un unico piano con una superficie netta di 927 m² ed un volume lordo di 3988 m³.

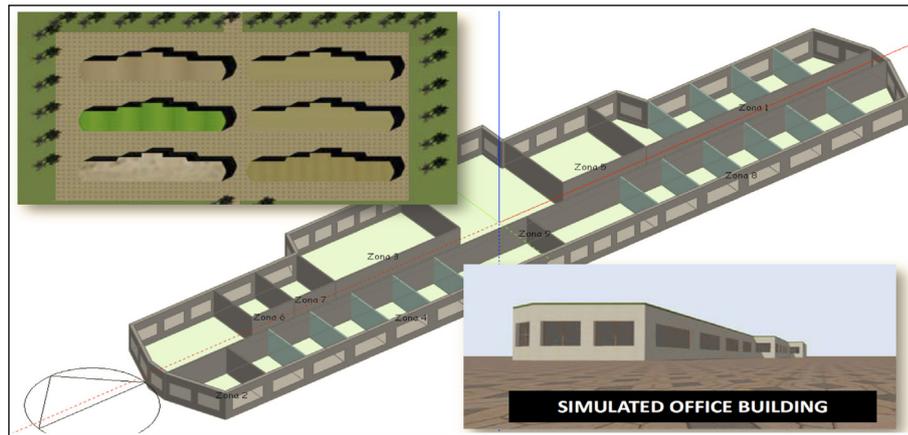


Figura 4.19: Planimetrie e viste tridimensionali dell'edificio simulato.

Larghezza (Dir. N-S)	min 12.7 m - max 17.7 m	Lunghezza (Dir. E-O)	min 66.7 m - max 70.7 m
Altezza	3.6 netta - 4.3 lorda	Area netta in pianta e volume	927.5 m ² - 3339 m ³
Rapporto di forma S/V	0.67	Ventilazione naturale	0.928 m ³ /s (1 ACH)
T _{PROGETTO ESTIVA} (no raffrescamento dopo le ore di lavoro)	26 °C (7.00 h - 17.00 h)	T _{PROGETTO INVERNALE} (16°C dopo le ore di occupazione)	20 °C (7.00 h - 17.00 h)
U _{FINESTRE}	1.499 W m ⁻² K ⁻¹	U _{PARETI}	0.298 W m ⁻² K ⁻¹
U _{COPERTURA}	0.377 W m ⁻² K ⁻¹	U _{BASAMENTO}	0.250 W m ⁻² K ⁻¹
Efficienza in Raffrescamento (fan coil + chiller ad acqua)	η_{el} = funzione del paese SEER = 2.5 Wh _{TH} /Wh _{EL}	Rendimento globale riscaldamento (fan coil + caldaia a condensazione)	$\eta_{OVERALL}$ = 0.75
Costo Energia elettrica	funzione del paese	Costo del Gas naturale	funzione del paese

Tabella 4.19: Caratteristiche dell'edificio e degli impianti di riscaldamento/raffrescamento installati.

Varie soluzioni per la copertura a verde sono state confrontate con una struttura tradizionale (base rispetto cui condurre le analisi, Figura 4.20 A). La stessa struttura, in un'altra scelta progettuale, è sprovvista di vegetazione e caratterizzata da un rivestimento alto-riflettente (cool-roof, Figura 4.20 B) rispetto alla radiazione solare ($\alpha_{SOLARE} = 0.05$) e alto-emissivo allo spettro infrarosso ($\epsilon_{INFRARED} = 0.9$) (SRI - Solar Reflectance Index = 100).

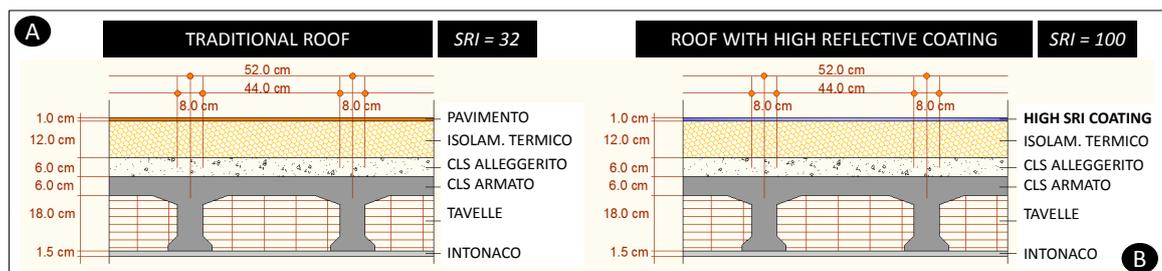


Figura 4.20: Copertura tradizionale (A) e con trattamento riflettente (B).

Relativamente alle diverse tipologie di tetto verde, queste differiscono per strato colturale e vegetazione, trattandosi di:

- a) sedum basso/rado,
- b) sedum alto/folto,
- c) prato,
- d) graminacee a taglio corto,
- e) graminacee a taglio lungo.

I parametri di progettazione sono riportati in Tabella 4.20.

Tipologie di tetto verde						
	Unità di misura	Sedum basso	Sedum alto	Prato	Graminacee basse	Graminacee alte
Altezza delle piante (m)	(m)	0.1	0.3	0.18	0.1	0.4
Indice di copertura (LAI)	(-)	0.8	3.0	2.0	2.5	5.0
Riflettenza foliare	(-)	0.22	0.22	0.40	0.30	0.30
Emissività foliare	(-)	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
Minima resistenza stomatale	(s/m)	300	300	80	120	120
Acqua del terreno a saturazione	(-)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

Tabella 4.20: Caratteristiche delle coperture a verde.

Il sistema è stato simulato con EnergyPlus (v. 6.0.0) e nella soluzione dei bilanci si basa sul modello numerico di Sailor [222]. In particolare, la procedura prevede due analisi: una per lo stato di foglie (eq. 4.10) e un altro per quello di terreno (eq.4.11).

$$F_f = \sigma_f \left[I_s^\downarrow (1 - \alpha_f) + \varepsilon_f I_{ir}^\downarrow - \varepsilon_f \sigma T_f^4 \right] + \frac{\sigma_f \varepsilon_f \varepsilon_g \sigma}{\varepsilon_g + \varepsilon_f - \varepsilon_f \varepsilon_g} (T_g^4 - T_f^4) + H_f + L_f \quad \text{eq 4.10}$$

$$F_g = (1 - \sigma_f) \left[I_s^\downarrow (1 - \alpha_g) + \varepsilon_g I_{ir}^\downarrow - \varepsilon_g \sigma T_g^4 \right] - \frac{\sigma_f \varepsilon_f \varepsilon_g \sigma}{\varepsilon_g + \varepsilon_f - \varepsilon_f \varepsilon_g} (T_g^4 - T_f^4) + H_g + L_g + K \frac{\partial T_g}{\partial z} \quad \text{eq 4.11}$$

In dettaglio, nelle equazioni 4.10 e 4.11 i diversi termini sono di seguito descritti:

F_f	Somma dei contributi di scambio termico relativi alle foglie	[W m ⁻²]
F_g	Somma dei contributi di scambio termico relativi al terreno	[W m ⁻²]
H_f	flusso termico sensibile tra le foglie e l'aria esterna	[W m ⁻²]
H_g	flusso termico sensibile il terrendo e l'aria esterna	[W m ⁻²]

Capitolo 4: La progettazione della riqualificazione energetica: analisi delle prestazioni del sistema edificio/impianti

L_f	flusso termico latente tra le foglie e l'aria esterna	[W m ⁻²]
L_g	flusso termico latente tra il terreno e l'aria esterna	[W m ⁻²]
σ_f	fattore di copertura dovuto alle foglie, variabile tra 0 ed 1	[-]
I_s^\downarrow	radiazione solare totale incidente	[W m ⁻²]
α_f	coefficiente di assorbimento delle foglie	[-]
α_g	albedo (coefficiente di riflettività del terreno)	[-]
ε_f	coefficiente di emissione nell'infrarosso delle foglie	[-]
ε_g	coefficiente di emissione nell'infrarosso del terreno	[-]
I_{ir}^\downarrow	radiazione infrarossa solare totale incidente	[W m ⁻²]
σ	costante di Stefan-Boltzmann pari a 5.67 10 ⁻⁸	[W m ⁻² K ⁻⁴]
T_f	temperatura delle foglie	[K]
T_g	temperatura del terreno	[K]
z	Spessore dello strato	[m]

In questo bilancio, il contributo sensibile (H_f and H_g) e latente (L_f and L_g) viene calcolato secondo la metodologia di Frankenstein and Koenig, cui si rimanda per un maggior dettaglio sulle metodologie di calcolo [227].

La posizione geografica e i dati climatici relativi alle precipitazioni meteoriche, con riferimento alle città in cui sono state fatte le simulazioni, sono riportati in Tabella 4.21.

	Precipitazioni meteoriche [m ³ acqua / m ² superficie]												TOT
	Gen.	Feb.	Mar.	Apr.	Mag.	Giu.	Lug.	Ago.	Set.	Ott.	Nov.	Dic.	
Tenerife	0.036	0.038	0.028	0.013	0.005	0.000	0.000	0.000	0.003	0.030	0.046	0.051	0.249
Siviglia	0.070	0.061	0.064	0.052	0.037	0.015	0.001	0.005	0.018	0.057	0.078	0.076	0.534
Roma	0.103	0.099	0.068	0.065	0.048	0.034	0.023	0.033	0.068	0.094	0.130	0.111	0.876
Amsterdam	0.079	0.044	0.089	0.039	0.050	0.060	0.073	0.060	0.080	0.104	0.076	0.072	0.826
Londra	0.059	0.037	0.047	0.047	0.052	0.048	0.046	0.051	0.058	0.060	0.057	0.060	0.622
Oslo	0.059	0.046	0.048	0.051	0.062	0.078	0.083	0.094	0.092	0.095	0.092	0.068	0.868

Tabella 4.21: Contesti climatici considerati: precipitazioni di acqua piovana [228].

	Unità di misura	Spagna	Italia	Olanda	Regno unito	Norvegia
Efficienza conversione	($kWh_{\text{electric}}/kWh_{\text{thermal}}$)	0.484	0.405	0.432	0.438	0.477
Costo gas naturale	(€/GJ)	15.00	21.87	19.84	11.72	19.40
Costo energia elettrica	(€/kWh _{elettrico})	0.185	0.192	0.170	0.145	0.1901
Costo dell'Acqua	(€/m ³)	1.348	1.330	3.101	1.753	0.773

Tabella 4.22: Efficienza parchi termo-elettrici nazionali e costo dei prodotti energetici [229]

In climi caldi (Figura 4.21), è evidente che le soluzioni migliori sono quelle che minimizzano il fabbisogno estivo, riducendo la rientrata termica solare, senza penalizzare eccessivamente il fabbisogno di riscaldamento invernale, pressoché assente (Tenerife) o molto limitato (Siviglia).

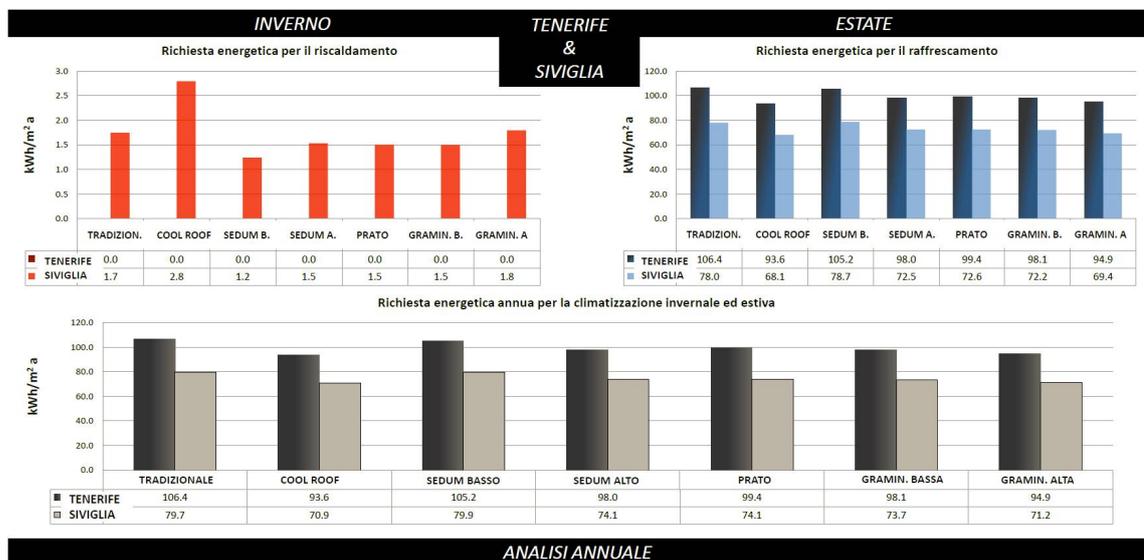


Figura 4.21: Tenerife e Siviglia: energia primaria annua per la climatizzazione al variare del tetto.

In raffrescamento, i tetti verdi inducono una riduzione della domanda di energia variabile tra 1.1%÷10.8% (Tenerife) e il -0.9%÷11.0% (Siviglia), rispetto alla soluzione tradizionale.

Ciononostante, la soluzione migliore, per la riduzione dei consumi energetici, è rappresentata dai cool-roof, che, a fronte di una drastica riduzione del fabbisogno frigorifero estivo, inducono solo un modesto incremento del fabbisogno di riscaldamento nella stagione invernale. In definitiva, a parità di trasmittanza ($U_{\text{ROOF}} = 0.377 \text{ W/m}^2\text{K}$):

- Tenerife: essendo pressoché nullo il fabbisogno energetico in inverno, l'adozione di cool-roof è la più appropriata, con un risparmio annuo intorno al 12% rispetto alla copertura tradizionale.

Capitolo 4: La progettazione della riqualificazione energetica: analisi delle prestazioni del sistema edificio/impianti

- **Siviglia:** tetti riflettenti (utili in estate) e coperture a verde con graminacee alte (funzionali in entrambe le stagioni) riducono il fabbisogno energetico annuo intorno al 11% rispetto alla soluzione base.

In climi moderati, inizia a diventare rilevante anche la prestazione energetica invernale. Figura 4.22 mostra le prestazioni, stagionali ed annue, per Roma ed Amsterdam, al variare della copertura.

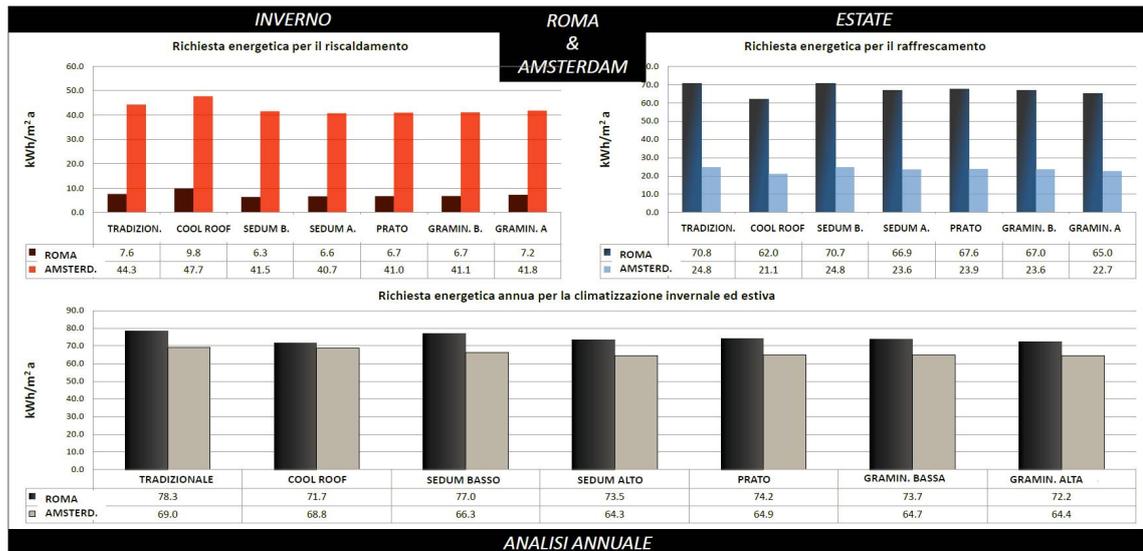


Figura 4.22: Roma e Amsterdam: energia primaria annua per la climatizzazione al variare del tetto

In entrambe le città, è chiaro il peggioramento della prestazione invernale conseguente alla adozione di cool-roof, determinandosi perdita del guadagno solare con un'extra-richiiesta energetica pari a +8.9% (Roma) e +7.7% (Amsterdam). Per quanto concerne la prestazione estiva, nessun vantaggio deriva dall'adozione di coperture a verde con sedum rado, mentre una vegetazione più alta/folta, caratterizzata da maggiore evapo-traspirazione (graminacee alte), determina una richiesta di raffrescamento ridotta di oltre l'8% in entrambe le città.

In ogni caso, in maniera opposta a quanto avveniva in inverno, la migliore prestazione estiva è indotta dal cool-roof, con una riduzione della richiesta pari al 12.5% in Roma, al 14.9% ad Amsterdam. Su base annua, emerge quanto segue:

- **Roma:** un edificio caratterizzato da elevati carichi endogeni (uffici) ha una richiesta di raffrescamento maggiore di quella per il riscaldamento; pertanto, cool-roof (richiesta di energia annua decurtata del 8.4%) e folte coperture a verde (graminacee alte, -7.8%) sono le soluzioni preferibili.
- **Amsterdam:** la spesa energetica invernale è preponderante. Pertanto, su base annua, la soluzione migliore è quella di compromesso, e quindi tetti verdi (sedum

folto e graminacee alte) che, senza penalizzare (anzi migliorando lievemente) il comportamento invernale, inducono una buona prestazione estiva. Entrambe queste soluzioni comportano una riduzione annua pari al 6.8% rispetto al tetto tradizionale.

In Figura 4.23 sono rappresentate le analisi energetiche relative a Londra e Oslo. La capitale inglese mostra che la perdita del guadagno solare invernale (tetti verdi) è meno rilevante della riduzione dello scambio termico convettivo superficiale, cosicché talune coperture a verde (sedum e graminacee) forniscono prestazioni invernali soddisfacenti.

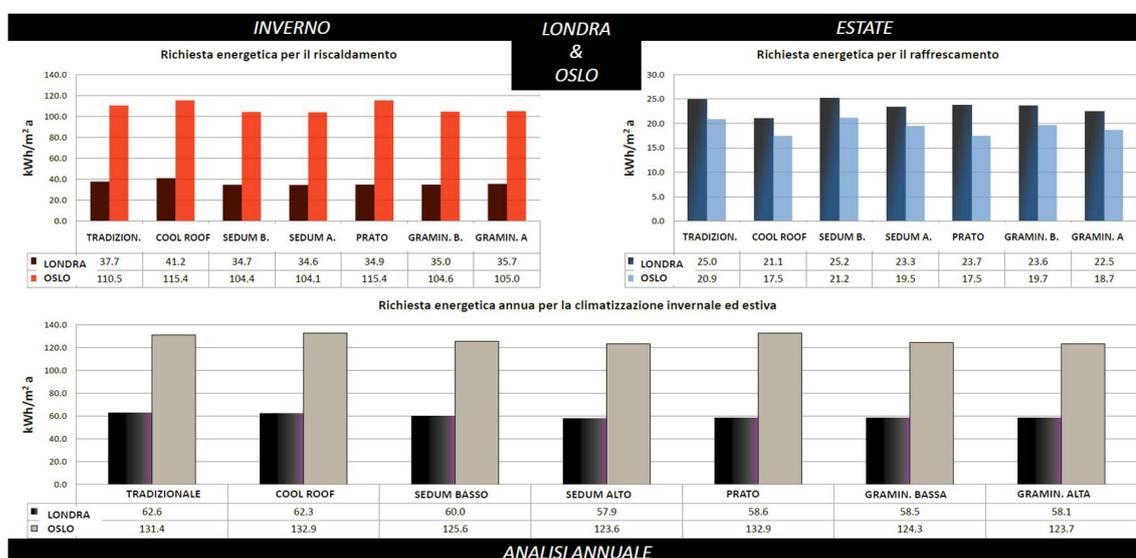


Figura 4.23: Londra e Oslo: en. energia primaria annua per la climatizzazione al variare del tetto.

Ad Oslo, invece, la minore richiesta energetica invernale compete alla copertura tradizionale che, irradiata, innalza la propria temperatura riducendo le dispersioni. In entrambe le città, la migliore prestazione estiva scaturisce dall'adozione di coperture riflettenti e tetti verdi con graminacee alte. Su base annua, emerge che:

- **Londra:** le coperture a verde con graminacee, migliorano lievemente la prestazione invernale e presentano ottime prestazioni estive, con una richiesta annua ridotta del 7.2% rispetto alla copertura tradizionale. Anche le altre soluzioni investigate presentano prestazioni migliori di quella base.
- **Oslo:** il riscaldamento invernale è predominante, cosicché la peggiore prestazione compete ai cool-roof. Coperture a verde con graminacee, sia a basso che ad alto taglio, inducono miglioramento rispetto alla soluzione tradizionale, con una riduzione della domanda di energia primaria pari rispettivamente al 5.9% e 5.4%.

Capitolo 4: La progettazione della riqualificazione energetica: analisi delle prestazioni del sistema edificio/impianti

In Figura 4.24 (si riporta solo il grafico relativo a Roma ed Amsterdam) è raffigurato l'andamento delle temperature esterne e superficiali interne indotte da di differenti soluzioni di copertura, con riferimento a giorni centrali dei periodi estivi e invernali.

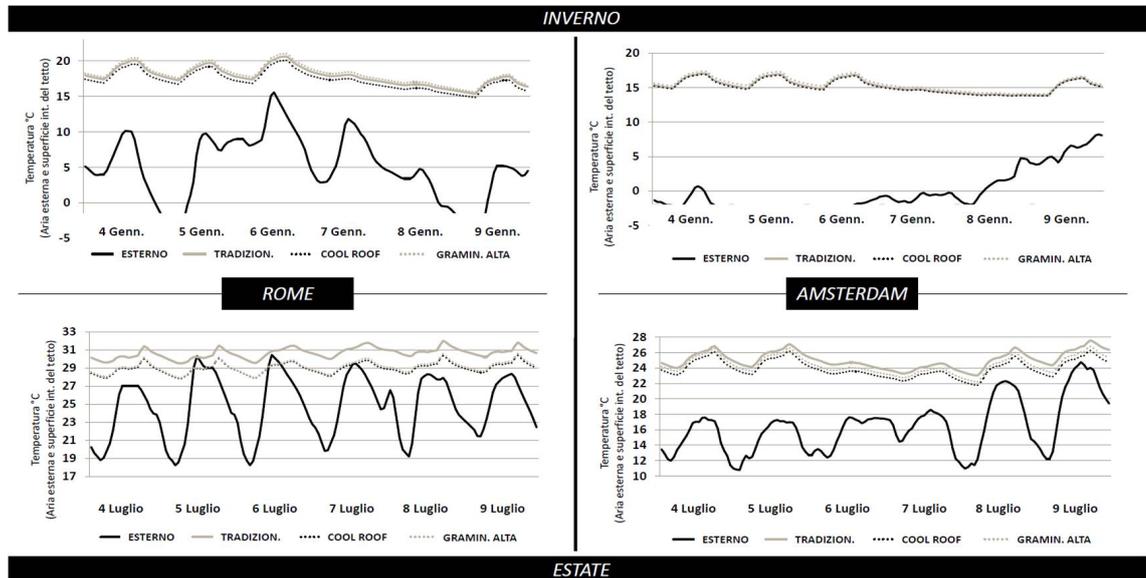


Figura 4.24: Roma e Amsterdam: Temperature esterne e superficiali interne per differenti soluzioni di copertura.

Emerge come, ben progettando una copertura a verde (specie graminacee, dotate di media resistenza stomatale e significativa evapotraspirazione dato l'elevato "Leaf Area Index"), si riesca ad ottenere una copertura, in inverno, altrettanto calda di quella tradizionale, molto più fresca, però, in regime estivo.

Oltre alla manutenzione, come precedentemente accennato, i tetti verdi richiedono irrigazione, la qual cosa determina un costo connesso all'acqua utilizzata. In particolare, oltre al quantitativo minimo per la sopravvivenza delle specie vegetali, una congrua irrigazione, ad integrazione delle piogge, è necessaria per il funzionamento della copertura, e quindi per garantire l'evapotraspirazione foliare e colturale che determina raffrescamento evaporativo.

Nelle righe seguenti, è proposta un'analisi di convenienza tecnica ed economica che, oltre a contemplare il costo dei prodotti energetici (gas per il riscaldamento ed elettricità per il raffrescamento), preveda anche stima del costo dell'acqua, variabile, così come le altre tariffe, in relazione ai paesi esaminati.

In Tabella 4.23 si riassumono le richieste energetiche per le varie coperture e le diverse città, diversificando la richiesta energetica per il riscaldamento ed il raffrescamento. Come già anticipato, è visibile come la destinazione d'uso, che prevede elevate potenze endogene, determini una richiesta in raffrescamento generalmente superiore a quella propria della climatizzazione invernale.

Capitolo 4: La progettazione della riqualificazione energetica: analisi delle prestazioni del sistema edificio/impianti

a)	Tenerife		Siviglia		Roma	
	Riscald.	Raffresc.	Riscald.	Raffresc.	Riscald.	Raffresc.
	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]
Tradizionale	0	104'925	1'721	76'869	7'475	69'761
Cool Roof	0	92'332	2'753	67'184	9'624	61'096
Sedum basso	0	103'749	1'223	77'567	6'250	69'704
Sedum alto	0	96'657	1'509	71'529	6'522	65'966
Prato	0	98'045	1'482	71'545	6'565	66'607
Gramina bassa	0	96'680	1'478	71'161	6'644	66'042
Gramina alta	0	93'611	1'770	68'446	7'118	64'098

b)	Amsterdam		Londra		Oslo	
	Riscald.	Raffresc.	Riscald.	Raffresc.	Riscald.	Raffresc.
	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]
Tradizionale	43'638	24'427	37'142	24'607	108'994	20'604
Cool Roof	47'037	20'806	40'625	20'764	113'780	17'216
Sedum basso	40'949	24'413	34'245	24'869	102'942	20'891
Sedum alto	40'136	23'262	34'131	23'004	102'633	19'239
Prato	40'420	23'530	34'392	23'368	113'780	17'216
Gramina bassa	40'483	23'315	34'477	23'236	103'092	19'431
Gramina alta	41'196	22'341	35'156	22'175	103'576	18'418

Tabella 4.23: a), b) energia primaria richiesta per il riscaldamento ed il raffrescamento, per diverse coperture e climi.

Per quanto concerne la quantità d'acqua di irrigazione, per ciascuna città e soluzione, sono stati elaborati calcoli come quelli riportati in Tabella 4.24, in cui, al netto della pioggia, si valuta l'ammontare di acqua necessario per il funzionamento del tetto verde.

Siviglia: Copertura a Graminacea a taglio alto (LAI - LEAF AREA INDEX - INDICE DI COPERTURA FOLIARE = 5.0)								
Mese	Pioggia media mensile	Numero di giorni con pioggia > 5 mm	Pioggia intercettata (mese)	Pioggia intercettata (giorno)	Pioggia netta assorbita	Evapo-traspirazione	Irrigazione giornaliera	Irrigazione mensile
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm/day]	[kg/m ²]	[kg/m ²]	[kg/m ²]
Genn.	66	2.6	25.09	0.836	1.36	0.860	0.000	0.000
Feb.	60	2.6	24.53	0.818	1.18	1.591	0.408	11.427
Mar.	90	2.4	25.00	0.833	2.17	2.465	0.298	9.240
Apr.	52	2.6	23.64	0.788	0.95	4.012	3.067	91.995
Mag	40	1.6	15.38	0.513	0.82	5.517	4.697	145.602
Giu.	10	0.6	5.17	0.172	0.16	6.910	6.749	202.469
Lug.	5	0.3	2.59	0.086	0.08	8.133	8.053	249.642
Ago.	6	0.5	3.85	0.128	0.07	7.683	7.612	235.961
Set.	20	2.0	14.29	0.476	0.19	5.238	5.048	151.426
Ott.	70	3.3	30.47	1.016	1.32	2.770	1.453	45.039
Nov.	67	4.0	34.54	1.151	1.08	1.202	0.119	3.584
Dic.	73	3.2	30.10	1.003	1.43	0.860	0.000	0.000

Tabella 4.24: Graminacea alta a Siviglia: calcolo pioggia assorbita, dell'evapo-traspirazione e dell'irrigazione necessaria.

Secondo i costi unitari proposti in Tabella 4.22, in Tabella 4.25 sono riportati i costi di gestione annui, considerando gas, elettricità e acqua.

Ancora, in Tabella 4.26, aggregando i dati, si riporta il costo globale annuo, evidenziando, mediante sottolineatura, il costo più basso per il controllo microclimatico e quindi la soluzione di maggior convenienza.

	Tenerife		Siviglia		Roma		Amsterdam		Londra		Oslo	
	Costo Energia	Costo Irrigaz.										
	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]
Tradizionale	19'411	----	14'314	----	13'983	----	7'269	----	5'135	----	11529	----
Cool Roof	17'082	----	12'578	----	12'488	----	6'897	----	4'725	----	11219	----
Sedum basso	19'194	1'514	14'416	849	13'875	457	7'075	33	5'051	62	11161	35
Sedum alto	17'882	2'199	13'314	1'266	13'179	832	6'821	504	4'776	356	10825	153
Prato	18'138	2'045	13'316	1'161	13'305	724	6'887	311	4'839	243	11219	110
Gramina bassa	17'886	2'119	13'245	1'202	13'203	770	6'855	413	4'824	305	10894	130
Gramina alta	17'318	2'486	12'758	1'524	12'867	1'097	6'740	892	4'699	606	10735	266

Tabella 4.25: Costi di esercizio dell'edificio per il controllo microclimatico (energia e acqua di irrigazione).

	Tenerife	Siviglia	Roma	Amsterdam	Londra	Oslo
Costo netto annuo per il controllo microclimatico dell'edificio						
	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]
Tradizionale	19'411	14'314	13'983	7'269	5'135	11'529
Cool Roof	17'082	12'578	12'488	6'897	4'725	11'219
Sedum basso	20'708	15'265	14'332	7'108	5'113	11'196
Sedum alto	20'081	14'580	14'011	7'325	5'132	10'978
Prato	20'183	14'477	14'029	7'198	5'082	11'329
Gramina bassa	20'005	14'447	13'973	7'268	5'129	11'024
Gramina alta	19'804	14'282	13'964	7'632	5'305	11'001

Tabella 4.26: Costi di esercizio dell'edificio per il controllo microclimatico (dati aggregati).

E' evidente come le coperture a verde, sebbene garantiscano una riduzione del fabbisogno energetico estivo e spesso per l'intera climatizzazione annua, hanno un costo di gestione rilevante, cosicché convergono solo in climi molto freddi (Londra e Oslo) dove, oltre a garantire ottime performance estive, hanno anche un buon comportamento invernale e, soprattutto - data l'abbondante acqua piovana - non presentano significativi costi di irrigazione.

Al contrario, i tetti verdi sono assolutamente non convenienti in regioni mediterranee; a Tenerife, Siviglia e Roma, infatti, questi presentano costi di gestione globali superiori (considerando la differenza tra risparmio in climatizzazione e costi di irrigazione) molto superiori a quelli che competono all'adozione di cool-roof.

Infine, considerando anche i costi di installazione (Tabella 4.27) tale "non convenienza" – come desumibile da Tabella 4.28 - è ancora più evidente, determinandosi tempi di ritorno degli investimenti non accettabili e in molti casi anche con sovra-costi di esercizio.

		Cool-Roof	Sedum basso	Sedum alto	Prato	Gramina bassa	Gramina alta
Costo Unitario	[€/m ²]	20	80	80	100	75	75
Costo per 986 m ²	[€]	19'720	78'880	78'880	98'600	73'950	73'950

Tabella 4.27: Extracosti per installazione delle soluzioni analizzate rispetto alla copertura tradizionale base.

	Tenerife		Siviglia		Roma		Amsterdam		Londra		Oslo	
	ΔCE	SPB	ΔCE	SPB	ΔCE	SPB	ΔCE	SPB	ΔCE	SPB	ΔCE	SPB
	[€]	[year]	[€]	[year]	[€]	[year]	[€]	[year]	[€]	[year]	[€]	[year]
Tradizionale	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
Cool Roof	2'330	8.5	1'736	11.4	1'494	13.2	373	52.9	410	48.1	310	63.7
Sedum basso	-1296	Neg.	-951	Neg.	-350	Neg.	161	488.8	22	> 500	333	236.8
Sedum alto	-670	Neg.	-267	Neg.	-28	Neg.	-56	Neg.	3	> 500	551	143.2
Prato	-772	Neg.	-163	Neg.	-47	Neg.	71	> 500	53	> 500	200	493.8
Gramina bassa	-594	Neg.	-133	Neg.	9	> 500	1	> 500	6	> 500	505	146.4
Gramina alta	-393	Neg.	31	> 500	18	> 500	-363	Neg.	-170	Neg.	528	140.1

Tabella 4.28: Risparmi economici rispetto alla soluzione di riferimento e tempo di rientro degli investimenti.

4.3 La riqualificazione energetica: implementazione di casi studio e analisi degli interventi

Il procedimento adottato e presentato nel terzo capitolo (*diagnosi energetica*) ha consentito di individuare le "patologie" dell'edificio e di definire le possibili "cure" (*energy efficiency measures*) con un procedimento analogo a quello seguito in campo medico. Per ciascuna situazione, ricorrente per tipologia edilizia e destinazione di uso, si riescono ad individuare una serie di interventi "tradizionali" per l'involucro edilizio la cui efficacia è consolidata: isolamento termico (interno/esterno), utilizzo di intonaci termo-isolanti, installazione di componenti finestrati performanti con sistemi schermanti integrati e possibili interventi di isolamento dei cassonetti. Analogamente, per gli impianti termotecnici installati, è possibile e comune sostituire le caldaie tradizionali con caldaie a condensazione o pompe di calore, sostituzione dei corpi scaldanti, isolamento delle condutture dei fluidi termovettori etc.

In questa sezione, dunque, utilizzando questo approccio, partendo dalla diagnosi energetica eseguita sui tre casi studio precedentemente analizzati, si presenta la simulazione del rendimento energetico del sistema edificio/impianti per la valutazione energetica, ambientale ed economica di possibili interventi di retrofit, mediante azione sia sull'involucro edilizio che sugli impianti termotecnici installati.

Nello specifico, la “cura” nei casi studio presentati è rappresentata prima dall’analisi dell’efficacia di singole azioni di retrofit e poi nella ricombinazione in pacchetti di misure, la cui selezione è basata su un’analisi costi-benefici. Come precedentemente presentato, avendo però condotto durante il dottorato approfondimenti sulle tecnologie innovative per l’efficienza energetica sia relativamente all’involucro edilizio che agli impianti, ove possibile è stata considerata anche l’integrazione di misure di efficienza energetiche non tradizionali.

In conclusione di questa premessa, si sottolinea che questa metodologia di analisi di soluzioni di retrofit è coerente con il procedimento introdotto a livello comunitario dal “Cost Optimal”, secondo la Direttiva EPBD Recast, e dunque i casi studio possono utilmente essere considerati un punto di partenza per l’applicazione di tale metodologia al settore terziario e all’edilizia storica, settori ancora non approfonditamente investigati.

4.3.1 Retrofit energetico di Palazzo Dell’Aquila Bosco Lucarelli

Sulla base dei risultati ottenuti dalla simulazione del modello energetico dell’edificio, e tenendo conto delle indicazioni rilevate durante i diversi sopralluoghi effettuati, sono stati individuati una serie di possibili interventi sul sistema edificio/impianti di Palazzo dell’Aquila Bosco Lucarelli. Come già accennato, la progettazione del retrofit riguarderà solo i due piani dell’edificio di pertinenza dell’Università degli Studi del Sannio.

In particolare, alla luce di quanto precedentemente esposto, sono stati ipotizzati i seguenti interventi:

- modifica delle temperature operative impostate;
- riduzione delle infiltrazioni;
- aumento dell’isolamento termico delle pareti;
- sostituzione della caldaia tradizionale con una a condensazione;
- sostituzione dei componenti finestrati con altri caratterizzati da maggiore resistenza termica;
- sostituzione dei sistemi di illuminazione.

Relativamente alla problematica dei vincoli dovuti alla natura storico-artistica del palazzo, la caratterizzazione degli interventi proposti non incide sugli aspetti formali e compositivi di facciata, né comporta esecuzione di opere edilizie che arrechino danno o pregiudizio al carattere di pregio dell’immobile.

Due sono gli scenari di retrofit ipotizzati. Nel primo, i singoli interventi sono stati analizzati singolarmente in termini di risparmio di energia primaria ($\Delta E_{\%}$) e di emissioni evitate ($\Delta CO_{2,\%}$). Per ciascun intervento poi è stato valutato un prezzo accurato di

realizzazione, nonché il tempo di ritorno attualizzato del capitale investito (DPB). Il secondo scenario di retrofit invece prevede l'abbinamento di tutti gli interventi che si possono ritenere realizzabili sulla base del valore dell'indice di efficacia definito come €/kWh_{risparmiato}. Per tale configurazione, ritenuta ottimale, è stata poi effettuata anche un'analisi di tipo "Asset Rating" per valutare la classe di prestazione attuale e potenziale dell'edificio.

4.3.1.1 Descrizione degli interventi e dei risultati delle analisi effettuate

Brevemente verranno descritti i singoli interventi ipotizzati per poi soffermarsi più dettagliatamente sullo scenario ottimizzato di riqualificazione energetica.

a. Modifica delle temperature di set-point impostate

Il primo intervento proposto riguarda l'adeguata gestione del sistema di regolazione dei livelli di temperatura degli ambienti interni. In accordo a [30, 91, 203] le temperature di set-point sono state fissate al valore di 20°C per la stagione invernale e a 26°C per la stagione estiva.

L'intervento consente di ridurre il fabbisogno di energia primaria annuale del 10% rispetto al fabbisogno annuale attualmente richiesto dall'edificio e di ridurre in maniera equivalente le emissioni inquinanti del 10%. Relativamente all'analisi economica, sono ipotizzabili due tipi di investimenti per ottenere una regolazione ottimale delle condizioni microclimatiche: a) installazione di termostati in ciascuna stanza, con un costo di circa 60 € per ogni dispositivo, atti a gestire l'accensione e lo spegnimento dei ventilatori dei ventilconvettori; b) installazione di una valvola servo-comandata a tre vie in corrispondenza di ciascun terminale, con un costo di 210 € per ogni installazione. Tale costo include il termostato ambiente. Il DPB nel caso del primo intervento è di circa 9 mesi. Il secondo intervento, di maggior pregio (e per tale ragione sarà questo ad essere selezionato), si ripagherà dopo 4 anni e qualche mese.

b. Riduzione delle infiltrazioni

Il secondo intervento ipotizzato riguarda la riduzione delle infiltrazioni; ciò significa essenzialmente andare ad intervenire sulla tenuta dei serramenti attraverso l'applicazione di nuove guarnizioni ed eventuale rettifica di qualche infisso particolarmente ammalorato. L'intervento ha un costo che può essere stimato intorno ai 40 €/m² di finestra, che per l'edificio considerato significano complessivamente 7600 €.

La riduzione delle infiltrazioni consente di ottenere globalmente un risparmio di energia primaria dell'11% (30% se considerato rispetto ai solo mesi invernali), cui corrisponde una equivalente riduzione delle emissioni inquinanti.

L'analisi economica indica che l'investimento è sicuramente fattibile, poiché il capitale investito è completamente ripagato dai risparmi nei costi di esercizio in un tempo pari a 3 anni, sia che si consideri una procedura economica semplificata, sia se si tenga in considerazione l'attualizzazione del valore del denaro.

c. Efficienza dell'involucro edilizio

Relativamente all'efficientamento dell'involucro edilizio, un primo intervento valutato è stata l'applicazione di 5 cm di termointonaco sul lato interno dell'edificio (con opportuna barriera al vapore), con una conducibilità termica (λ) pari a 0.058 W/(m.K), una resistenza alla diffusione del vapore acqueo (μ) pari a 9.04 e una densità a secco pari a 150 kg/m³. L'intervento riguarda solo le pareti dei due piani di pertinenza dell'università, su cui si sta progettando l'intervento, per una superficie complessiva di 600 m². L'applicazione del termointonaco, comporta una riduzione del valore della trasmittanza termica delle pareti d'interesse che diviene 0.556 W/(m²K). Il costo complessivo dell'intervento, considerando anche gli oneri per la manodopera e le opere accessorie (ponteggi, oneri di sicurezza) è di circa 31 €/m².

Nella stagione invernale, il risparmio conseguibile si mantiene mensilmente intorno al 9%, invece l'aumento dell'isolamento comporta un peggioramento della prestazione energetica nei mesi estivi, per cui complessivamente si ottiene un risparmio di energia primaria e delle emissioni inquinanti del 2%.

Relativamente a tale costo, valutando il SPB, si trova che l'investimento si ripaga in 29 anni e questo è un tempo considerevolmente lungo, soprattutto per le aspettative dei committenti.

Come si riesce facilmente a capire, tale risultato dipende soprattutto dal fatto che l'intervento proposto è migliorativo in termini di riqualificazione energetica, ma va ad incidere su un aspetto dell'edificio che anche allo stato attuale si può considerare sostanzialmente soddisfacente. La struttura esistente, infatti, assicura già un soddisfacente isolamento termico, essendo costituita da mura di notevole spessore e quindi discreta resistenza termica.

d. Sostituzione della caldaia esistente con una caldaia a condensazione

Relativamente all'impianto di riscaldamento/raffrescamento, guardando in questo caso al solo sistema di generazione, si è ipotizzato di sostituire la caldaia esistente con una caldaia a condensazione, che consente di ottenere un rendimento globale medio stagionale, con riferimento all'intero sistema, del 93% nel regime di funzionamento invernale. Dall'andamento mensile delle richieste energetiche, considerando il solo

fabbisogno termico per la climatizzazione invernale, si trova che con tale intervento si riuscirebbe ad ottenere ad un risparmio di energia primaria del 15%

Considerando invece i fabbisogni annuali, si ottiene una riduzione del 4% sul fabbisogno di energia primaria e analoga percentuale di riduzione delle emissioni inquinanti.

Per quanto riguarda la stima degli indici economici, si è assunto un costo dell'investimento pari a 17'000 €, valore comprensivo di installazione desunto da cataloghi tecnici per le caldaie a condensazione tra i 150-200 kW. Con tale costo, già il SPB mostra una certa criticità per quanto riguarda i tempi di ritorno. Considerando poi l'attualizzazione del valore del denaro, si passa dai 15 ai 20 anni. Pertanto, per quanto concerne il calcolo del VAN, questo risulta circa nullo su un periodo di calcolo ventennale.

e. Sostituzione dei componenti finestrati

Relativamente ai componenti finestra, un intervento possibile è la sostituzione degli elementi esistenti con un vetrocamera composto da due lastre di vetro chiaro (data la natura storico artistica del palazzo non si può pensare di utilizzare soluzioni particolarmente innovative), con spessore di 6 mm e separate da un intercapedine di 13 mm riempita di argon, con un telaio in legno e alluminio, per una trasmittanza totale pari a 1.493 W/(m²K). Dalle simulazioni effettuate in regime di calcolo dinamico, si ottiene però una riduzione del fabbisogno comparabile a quello per l'intervento sulle guarnizioni dei serramenti, con un costo decisamente elevato, nel range 400÷600 €/m² di finestra.

L'intervento, dal punto di vista del risparmio energetico, mostra buone potenzialità in termini di riduzione delle richieste ed emissione di anidride carbonica equivalente. L'analisi economica tuttavia non è favorevole.

Con riferimento a ciascuno degli interventi sopra-descritti, in Figura 4.25 si riporta il costo del kWh risparmiato. E' questo un indicatore di immediata comprensione per far emergere, da un semplice confronto, le tecnologie più idonee per la riqualificazione di uno specifico progetto.

Da questa comparazione e dai risultati precedenti si evince che l'intervento di sostituzione dei componenti finestrati sarebbe il più oneroso e non comporterebbe un congruo risparmio energetico. Si considera, quindi, come scenario di riqualificazione ottimizzato quello in cui siano cumulati tutti gli altri interventi, scegliendo per la regolazione delle temperature l'intervento di installazione delle valvole a tre vie sui fan-coil in ogni ambiente.

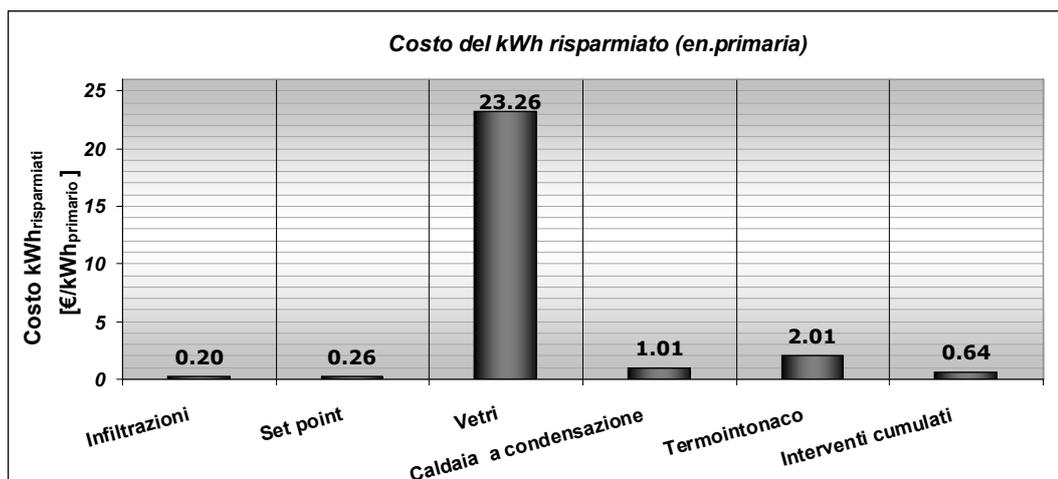


Figura 4.25: Costo del kWh risparmiato per gli interventi proposti.

Le Figure 4.26 e 4.27 riportano il confronto tra i fabbisogni allo stato attuale e nella condizione che l'edificio raggiungerebbe dopo l'intervento di riqualificazione energetica ottimizzata.

Da tali andamenti si intuisce subito quale sia l'efficacia dell'azione di riqualificazione proposta. Sul fabbisogno di energia termica per il riscaldamento, si riescono ad ottenere dei risparmi mensili tra il 60- 90%, con un valore annuale del 67% che significa passare, ad esempio nei due mesi di maggiore carico, a gennaio da 30 a 10 MWh, e a dicembre da 28 a circa 10 MWh.

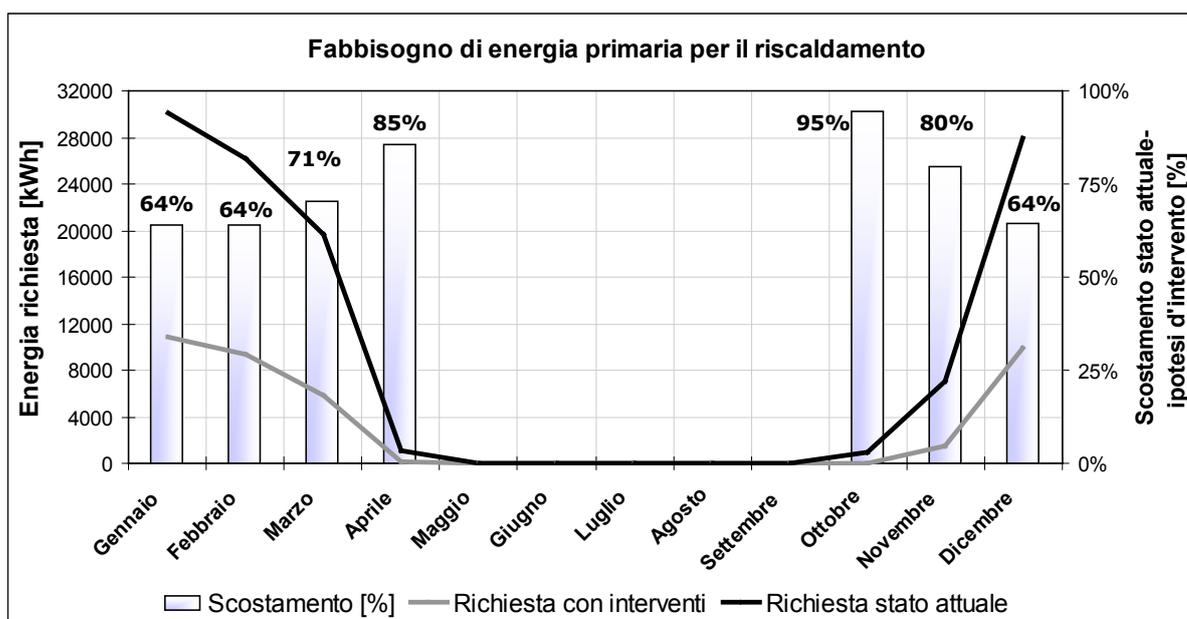


Figura 4.26: Fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento e risparmio percentuale su base mensile.

Poiché gli interventi proposti sono soprattutto relativi agli aspetti di efficientamento termico del comportamento dell'involucro edilizio, chiaramente sul fabbisogno di energia elettrica si avranno risparmi percentuali più contenuti. È importante soffermarsi sull'andamento della richiesta energetica durante i mesi estivi. Considerando, infatti, che i carichi interni sono mantenuti costanti in entrambi i modelli, così come il carico di illuminazione, la riduzione del fabbisogno si può quasi interamente attribuire alle riduzione delle esigenze di raffrescamento. Senza intervenire sull'impianto, infatti, si riesce comunque tra luglio e agosto a ridurre del 10% il fabbisogno, e a giugno e settembre la riduzione è circa del 5%.

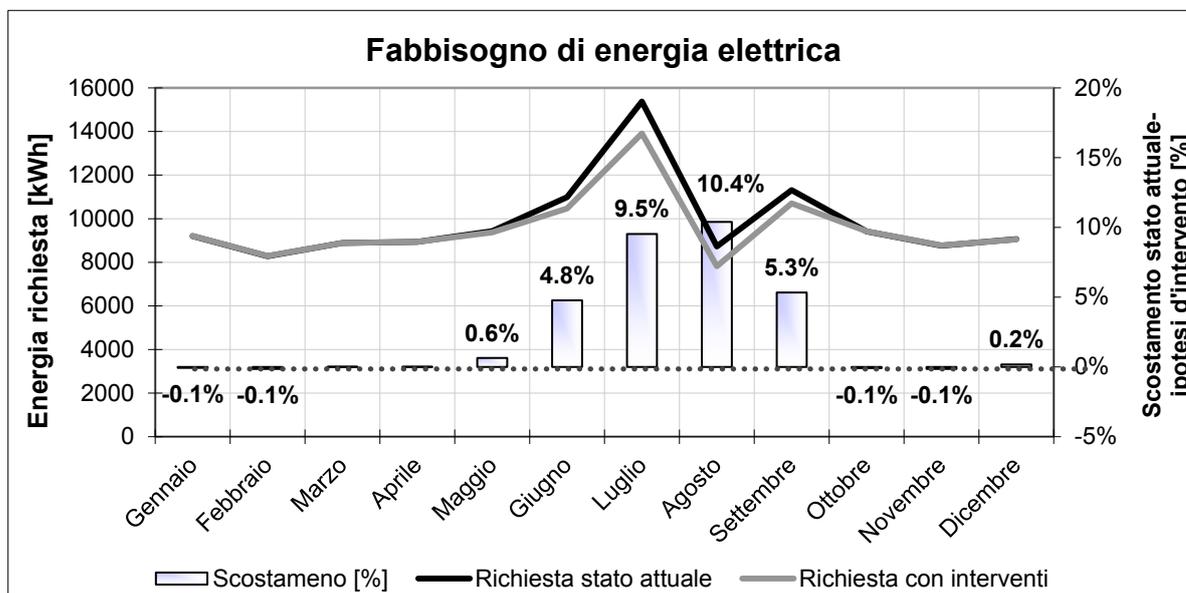


Figura 4.27: Fabbisogno di energia elettrica e risparmio percentuale su base mensile.

Nella Tabella 4.29, si riporta il fabbisogno elettrico di energia primaria (EP_{el}), quello di riscaldamento (EP_{gas}), il risparmio di energia primaria netto annuale (EP_{tot}) e le emissioni di anidride carbonica equivalente $CO_{2,eq}$. Sommando i benefici precedentemente analizzati, si ottiene una riduzione del fabbisogno di energia primaria complessivamente pari al 22%, cui corrisponde una riduzione delle emissioni del 21%.

	EP_{el}	EP_{gas}	EP_{tot}	$\Delta E_{\%}$	$CO_{2,eq}$ [kg]	$\Delta CO_2 \%$
Riqualificazione energetica	249'669	37'635	287'304	22 %	61'505	21 %
Stato attuale	257'368	113'129	370'497		78'269	

Tabella 4.29: Risultati dell'analisi energetica, (interventi cumulati).

L'investimento necessario per tale efficientamento energetico è del tutto compensato. Considerando anche la attualizzazione del costo del denaro, ad un tasso

di sconto annuo del 3%, l'intervento di riqualificazione - dal costo complessivo di 53'280 € - si ripagherà in circa 11 anni (flussi di cassa in Figura 4.28), che, considerando la destinazione d'uso e l'importanza storico artistica dell'edificio, è un tempo pienamente accettabile. È importante anche considerare che al ventesimo anno il VAN risulta positivo e pari a 30'748 €.

Altri due interventi sono stati considerati ma non presentati nell'analisi cumulata, perché considerati troppo esosi. Il primo riguarda la sostituzione dei corpi illuminanti e il secondo un intervento di isolamento dall'esterno.



Figura 4. 28: Flussi di cassa attualizzati (interventi cumulati).

4.3.1.2 Analisi in condizioni standard ed etichetta energetica

Infine, come precedentemente accennato, è stata svolta un'analisi con approccio di tipo *Asset Rating* per determinare la qualità dell'edificio in termini di Attestato di Prestazione Energetica. Questo tipo di valutazione prevede, per il periodo invernale, un calcolo standard con temperatura a 20 °C per tutte le 24 ore. Per gli apporti endogeni, il carico dovuto all'illuminazione degli ambienti e alle varie apparecchiature presenti, gli indici di affollamento e il tasso di ventilazione, sono state impostate le condizioni standard come richiesto dalle specifiche tecniche UNI/TS 11300 [33, 34].

Per quel che riguarda la simulazione nel funzionamento estivo, è stato impostato un set-point pari a 26°C per le 24 ore ed è stato mantenuto invariato il contributo dovuto agli apporti endogeni.

Relativamente al funzionamento dell'impianto di climatizzazione ai fini della simulazione, è stato scelto per il regime invernale il periodo che va dal 15 novembre al 31 marzo, che risulta essere il periodo convenzionale di riscaldamento per la città di

Benevento [30], mentre per il regime estivo è stato scelto il periodo che va dal 1 giugno al 30 settembre.

Per l'indice di prestazione per la climatizzazione invernale (EP_i), avendo l'edificio in esame un rapporto di forma S/V pari 0.3 ed essendo i Gradi Giorno di Benevento 1316, tramite la doppia interpolazione, si ricava un valore dell' EP_i limite di 7.16 kWh/(m³ anno).

Considerando che per Palazzo Bosco Lucarelli il volume lordo riscaldato è di 11'157 m³, nello stato attuale il suo EP_i è pari a 23.6 kWh/(m³ anno), cui corrisponde la classe energetica G. Con gli interventi di retrofit proposti, invece, la classe di prestazione diventa la D, con un indice di prestazione di 8.65 kWh/(m³ anno). Senza ledere alla sua natura architettonica e monumentale, questo sicuramente è un ottimo risultato, considerando anche che non comporta interventi economici particolarmente gravosi.

Nel funzionamento estivo, si procede alla determinazione dell'indice di prestazione termica dell'edificio per il raffrescamento, $EP_{e, invol}$, il cui valore limite, considerando destinazione d'uso e zona climatica, è 10 kWh/(m³anno). Dai risultati ottenuti per l'edificio allo stato attuale (4.89 kWh/(m³anno)) e per la condizione raggiunta dopo la riqualificazione (4.14 kWh/(m³anno)), il limite risulta rispettato e la prestazione termica estiva rientra nella classificazione "buona".

4.3.2 Retrofit energetico di Palazzo EX-INPS

Anche per Palazzo EX-INPS, gli interventi di riqualificazione proposti sono stati desunti dalle criticità emerse dall'audit energetico descritto nel precedente paragrafo. Nel dettaglio, tali interventi consistono in:

- riduzione delle infiltrazioni d'aria;
- sostituzione dei componenti finestrati con soluzioni tecnologiche più efficienti;
- incremento dell'isolamento termico;
- incremento dell'inerzia termica attraverso materiali a cambiamento di fase.

Anche in questo caso, è stata fatta prima un'analisi approfondita sui singoli interventi e poi la fattibilità tecnico economica della riqualificazione è stata valutata confrontando il costo del kWh risparmiato per ciascun intervento, rapportando poi gli indicatori economici alla vita utile dell'intervento stesso. Per valutare le emissioni equivalenti, il fattore considerato è 0.523 kgCO₂/kWh_{el} [201].

Con riferimento agli indicatori economici utilizzati (DPB e VAN), è stato assunto un prezzo standard per il consumo di energia elettrica così come riportato da [206] con riferimento al 2013, pari a 0.23 €/kWh_{el}. Poiché, come sottolineato dagli ultimi provvedimenti europei, un'analisi economica dovrebbe considerare simultaneamente

l'evoluzione dei prezzi dell'energia e dei tassi di attualizzazione, per questo caso studio sono stati ipotizzati diversi scenari, riportati nella Tabella 4.30, al fine di valutare nel modo più verosimile possibile la convenienza economica degli interventi. Inoltre, nello studio di fattibilità, è stata valutata la possibilità di accedere agli incentivi previsti dal Decreto Ministeriale 28 Dicembre 2012 [39], il cosiddetto "Conto Termico", che incentiva anche opere di riqualificazione su edifici pubblici e ad uso pubblico.

Anche in questo caso, un'ultima analisi ha riguardato la valutazione della classe di prestazione energetica attraverso un approccio del tipo Asset Rating.

	Tasso di attualizzazione [%]	Incremento del prezzo dell'energia elettrica [%]	Tasso netto di attualizzazione [%]
Molto sfavorevole	5	1	4
Sfavorevole	4	2	2
Neutro	3	3	0
Favorevole	2	4	-2
Molto favorevole	1	5	-4

Tabella 4.30: Scenari di attualizzazione per l'analisi economica.

4.3.2.1 Analisi delle soluzioni di retrofit ipotizzate

Seguendo lo stesso approccio precedente, saranno prima brevemente sintetizzati i risultati dei singoli interventi.

a. Riduzione delle infiltrazioni

La prima misura di miglioramento è il controllo delle infiltrazione di aria esterna. L'intervento di ripristino richiede la sostituzione del blocco di ancoraggio vetro, la sostituzione o manutenzione dei telai rovinati e l'adozione di nuove guarnizioni se necessario. Per tale intervento si può stimare un costo medio di circa 40 €/m² (come visto anche nella sezione precedente), che significano intorno a 8'160 € per l'intero edificio. Con tale intervento, la domanda di energia per il riscaldamento degli ambienti è ridotta - mensilmente - tra il 22 ÷ 30%. Il fabbisogno energetico annuale e le emissioni di anidride carbonica equivalente invece si riducono del 21%. Il SPB è di circa cinque anni in tutti gli scenari, anche se l'intervento non può accedere agli incentivi, mentre il valore attuale netto varia da 19'234 € (scenario meno sfavorevole) a 55'456 € (scenario più favorevole).

b. Sostituzione dei componenti finestrati

Diverse soluzioni tecnologiche sono state considerate per la sostituzione dei componenti finestrati attuali. La Tabella 4.31 ne riassume le principali caratteristiche

tecniche e il costo inclusivo di messo in opera. Per tutte le tipologie di componente finestrato, si è considerato un telaio in legno e alluminio.

Ancora, è stata valutata anche la possibilità di differenziare la scelta del componente finestrato per esposizione; in particolare, si è ipotizzato di installare vetrocamera selettivi per le finestre a sud e vetrocamera basso-emissivi sulle restanti esposizioni. Il costo complessivo di questo intervento è 66'147 €. La massima riduzione del fabbisogno di energia primaria in riscaldamento è ottenuto utilizzando doppi vetri basso-emissivi ($\approx -29\%$). In estate, invece, la soluzione migliore è il vetro a controllo solare ($\approx -24\%$). Con riferimento al fabbisogno di energia primaria annuale, anche se l'edificio ha molti componenti trasparenti con esposizione a sud e sud-est, l'effetto prevalente è quello delle perdite per trasmissione (e ventilazione ovvero per infiltrazione), legate ad un alto valore della trasmittanza attuale. Pertanto, la soluzione ottimale è quella che massimizza la riduzione del fabbisogno in riscaldamento e quindi vetrocamera senza rivestimento e vetrocamera con rivestimento basso-emissivo.

Soluzioni	Intercapedine	U_w [W/m ² K]	Fattore solare [%]	Costo [€/m ²]
Vetrocamera senza rivestimento 4/16/4	Argon	2.2	76	310
Vetrocamera basso-emissivo 4/16/4	Argon	1.5	61	325
Vetrocamera a controllo solare 6/12/6	Argon	1.7	32	321
Vetrocamera selettivo 6/16/6	Argon	1.6	43	326

Tabella 4.31: Caratteristiche tecniche e costi di investimento per la sostituzione dei component finestrati.

Relativamente all'aspetto economico, tutte le soluzioni hanno costi elevati ma, ad eccezione dei vetrocamera chiari, tutte possono accedere all'incentivo del 40% del costo totale degli investimenti, suddiviso in 5 anni, poiché il valore di trasmittanza ed i costi calcolati sono inferiori ai limiti fissati dal decreto [39] ($U \leq 1.75$ W/m²K; Costo ≤ 350 €/m²). Nello *scenario neutro*, il DPB (che coincide con il SPB) è di 16 anni, con un VAN di 9'356 €. Con lo *scenario più favorevole* invece, il DPB è di circa 11 anni , con un VAN di 41'264 €.

c. Miglioramento dell'isolamento termico dell'involucro edilizio

Due sono gli interventi di isolamento termico dell'involucro opaco valutati: l'isolamento delle pareti verticale e l'isolamento del solaio di copertura.

La conservazione dell'attuale aspetto delle facciate esterne vincola l'intervento di isolamento all'applicazione di 5.0 cm di termo-intonaco (e annessa barriera al vapore ove necessario) sul lato interno, con un costo globale dell'investimento di 34'410 €. Il

materiale utilizzato ha una conducibilità termica pari a 0.058 W/(m K) , pertanto la trasmittanza termica della parete diventa $0.46 \text{ W/(m}^2\text{/K)}$.

Il migliore isolamento termico riduce il fabbisogno di energia primaria in riscaldamento, mensilmente, di circa il 10%, determinando un peggioramento, anche se minimo, durante il periodo estivo. Complessivamente, il risparmio energetico annuo è pari al 6.0%. L'analisi economica è molto sfavorevole, poiché non potendo beneficiare di incentivi, il VAN a vent'anni è negativo con tutti gli scenari ipotizzati.

L'isolamento termico del solaio di copertura può essere incrementato senza compromettere le caratteristiche dell'edificio. In particolare, si è considerata l'applicazione di una lastra di 10 cm di polistirene espanso che consente di ottenere una trasmittanza complessiva del solaio di $0.27 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Il risparmio annuo ottenibile è di circa 7.2%, cui corrispondono emissioni evitate di anidride carbonica equivalente di circa 1'571 kg. Il costo di questa azione retrofit, inclusi gli oneri di demolizione e preparazione della posa, è pari a 22'900 €. Questa azione può accedere agli incentivi governativi, determinando un DPB inferiore a 20 anni per lo scenario "più favorevole" (13 anni), "favorevole" (16 anni) e "neutro" (19 anni).

d. Applicazione di un intonaco PCM

L'ultimo intervento ipotizzato consiste nell'applicazione, lato interno, di un intonaco a cambiamento di fase con un punto di fusione di 27°C ed una entalpia latente di fusione pari a 110 kJ/kg . Avendo dunque previsto una ventilazione notturna (3 ACH), il risparmio energetico per il condizionamento estivo degli ambienti è del 12.3%, con il valore percentuale maggiore di decremento in agosto (15%). Su base annuale però, il risparmio energetico e le emissioni evitate sono di circa il 2.3%. Utilizzando, per i costi, i valori stimati nel precedente lavoro sui materiali a cambiamento di fase, si ottiene che il costo complessivo di 33'855 €, in assenza di incentivi, non può essere recuperato in un tempo minore di 25-30 anni. Attualmente dunque, la peculiarità innovativa della tecnologia non fornisce una vantaggiosa redditività economica.

In sintesi, attualmente, l'edificio presenta un fabbisogno di energia primaria pari a 99.1 MWh. La Tabella 4.32, con riferimento alle singole misure di efficienza energetica in esame, sintetizza i risultati dei parametri energetici, ambientali ed economici utilizzati. Da queste analisi e da quelle del costo del $\text{kWh}_{\text{risparmato}}$ (riportato in Figura 4.29), è emerso che gli interventi più convenienti, considerando anche la vita utile stimata [51], sono l'isolamento del solaio di copertura e la sostituzione dei componenti vetrati con infissi in legno e alluminio e vetrocamera basso-emissivo.

Intervento	EP	Totale	Inverno	Estate	Scenario Neutro	
	[kWh]	$\Delta E \approx \Delta CO_2$ [%]			DPB [anni]	VAN [€]
Termointonaco	93'175	6.0%	10.2%	-11.9%	<20	-22'960
Isolamento del tetto	91'951	7.2%	9.5%	-2.6%	19	74
Infiltrazioni	78'235	21.1%	24.9%	4.7%	5	32'153
Vetrocamera basso-emissivo	73'668	25.7%	28.8%	12.1%	11	9'356
Vetrocamera chiaro	75'159	24.2%	27.8%	8.8%	17	8'312
Vetrocamera selettivo	78'051	21.2%	21.4%	20.5%	20	767
Vetrocamera differenziati per esposizione	77'159	22.1%	23.5%	16.2%	19	2'705
Vetrocamera a controllo solare	79'030	20.3%	19.3%	24.2%	<20	-514
Intonaco PCM	96'792	2.3%	0.0%	12.3%	<20	-29'393

Tabella 4.32: Sintesi dell'analisi energetica, economica e di impatto ambientale per le azioni di retrofit.

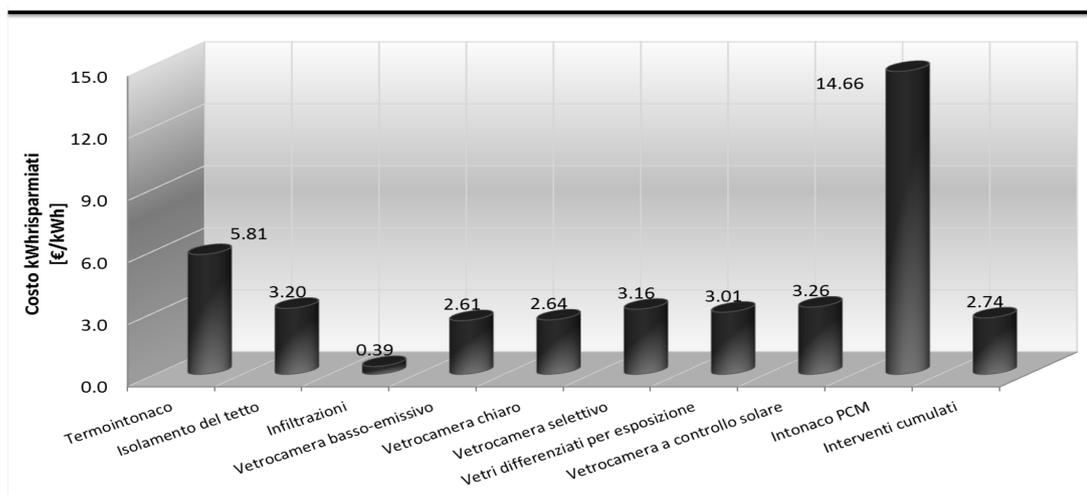


Figura 4.29: Costo del kWh risparmiato per ciascun intervento (en. primaria).

Simulando il retrofit dell'edificio con questi due interventi (Figura 4.30), si ricava una riduzione del fabbisogno annuo di energia primaria del 33%, con una conseguente riduzione equivalente di emissioni climalteranti. Analizzando i risultati parziali, invece, si è ottenuto che con riferimento al riscaldamento invernale, il risparmio mensile che si otterrebbe è nell'intervallo 30-45%.

In estate, si verificano i benefici minori, poiché anche in questo caso gli interventi scelti ottimizzano le prestazioni solo in regime invernale. Per ridurre il carico in raffrescamento, è necessario ipotizzare interventi che riguardano il sistema di illuminazione, o strategie di controllo e regolazione dei sistemi HVAC installati.

Ad oggi si sta lavorando alla messa a punto di un modello di simulazione dell'Impianto di Solar Heating and Cooling che, a breve, dovrebbe entrare in esercizio (tutti i sistemi e componenti sono installati ed in attesa di collaudo). Pertanto, gli interventi riguardanti il sistema HVAC saranno presentati in lavori futuri.

Capitolo 4: La progettazione della riqualificazione energetica: analisi delle prestazioni del sistema edificio/impianti

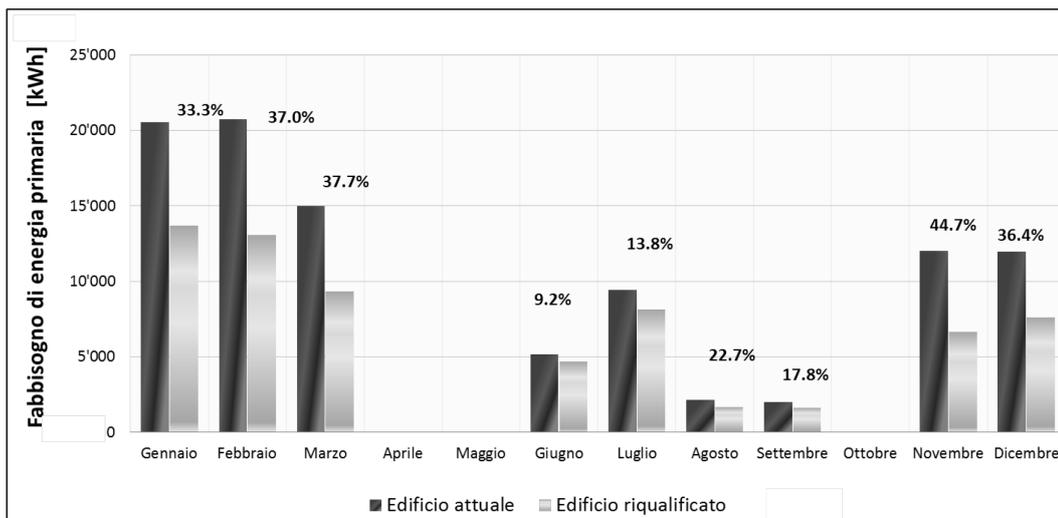


Figura 4.30: Fabbisogno di energia primaria e risparmio mensile percentuale.

Considerando la riqualificazione energetica sopra proposta, il costo totale dell'investimento ipotizzato è di circa 89'200 €.

La Figura 4.31 mostra i flussi di cassa in funzione degli scenari ipotizzati per l'andamento del tasso di sconto, assumendo che per i primi cinque anni si possa usufruire degli incentivi previsti dal Conto Termico.

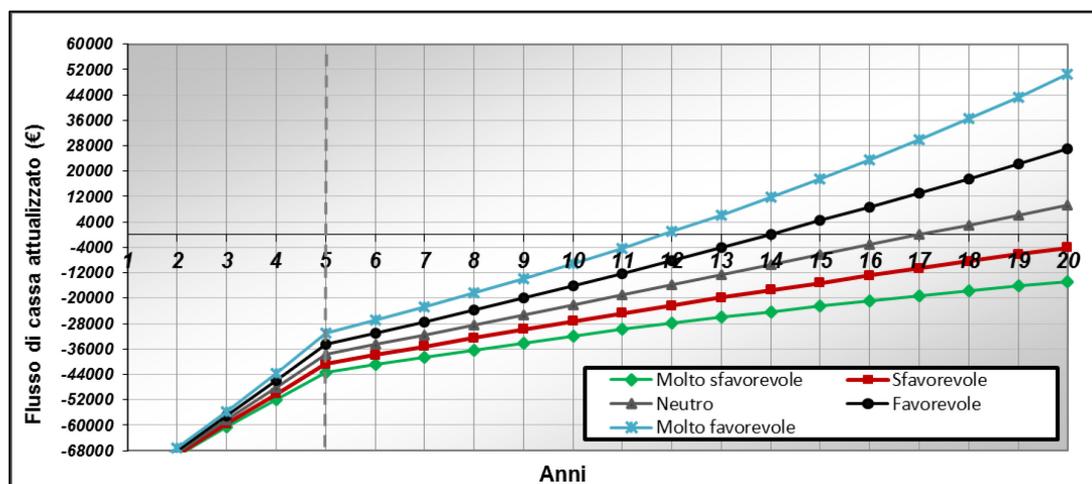


Figura 4.31: Flussi di cassa attualizzati per lo scenario di retrofit ipotizzato.

Considerando lo scenario neutro, il DPB è di 17 anni con un VAN a 20 anni di 9'385 €; questo risultato è ragionevole se si tiene conto della vite utile stimata delle misure di retrofit scelte (50 anni per l'isolamento e 35 per i sistemi trasparenti). Risultati ancora migliori si ottengono con gli scenari più favorevoli. Tali scenari, però, per l'investitore sono anche i più rischiosi, immaginandosi un prezzo dell'energia elettrica caratterizzato

da crescita più rapida rispetto al tasso di attualizzazione di denaro, connesso all'inflazione.

Nello scenario *favorevole* e *molto favorevole*, dunque, il DPB è rispettivamente 14 e 12 anni e il VAN è 27'024 € e 50'463 € .

4.3.2.2 La classe di prestazione energetica dell'edificio

Al fine di fornire informazioni qualitative delle azioni di ristrutturazione, un'ulteriore analisi è stata fatta assumendo condizioni di simulazione convenzionali (Asset Rating), per definire la classe di prestazione energetica dell'edificio. Il valore massimo ammesso per l'indice di prestazione per la climatizzazione invernale $EP_{i,lim}$ è pari a 8.72 kWh/(m³ anno). Nelle condizioni attuali, l'edificio analizzato ha un $EP_i \approx 30.9$ kWh/(m³ anno), con una classe energetica "G". Diversamente, l'edificio sottoposto a retrofit migliora notevolmente le prestazioni con riferimento alla stagione invernale, raggiungendo un EP_i pari a 7.05 kWh/(m³ anno) e quindi una classe energetica "C" .

Le prestazioni estive sono buone in entrambe le configurazioni, con un leggero miglioramento per l'edificio riqualificato, poiché l' $EP_{e,invol}$ passa da 5.71 kWh/(m³ anno) nella configurazione attuale a 5.52 kWh/(m³ anno) per l'edificio ristrutturato.

4.3.3 Retrofit energetico del Day-Hospital dell'Istituto G. Pascale

Un involucro edilizio efficace (nel contenere le dispersioni termiche, nell'attenuare gli effetti della variabilità impulsiva del carico esterno ed endogeno, nel limitare le oscillazioni di temperatura), impianti di climatizzazione adeguati (nelle funzioni di stabilità microclimatica richiesta, qualità e quantità della ventilazione, efficacia di filtrazione e trattamento delle portate volumetriche congrue nel garantire salubrità), sistemi di conversione energetica e trasporto dei fluidi-termovettori idonei sono tutti aspetti imprescindibili per il risparmio energetico e lo stringente controllo microclimatico richiesto dall'edilizia ospedaliera.

Come evidenziato dai risultati del caso studio analizzato (al precedente capitolo 3), la riqualificazione energetica dell'involucro edilizio costituisce il punto di partenza dell'ottimizzazione delle prestazioni energetiche di un edificio ospedaliero esistente. La resistenza e l'inerzia termica dell'involucro, infatti, concorrono alla determinazione di condizioni microclimatiche stabili e controllabili all'interno degli ambienti, oltre che a risparmi energetici che comunque possono anche risultare significativi, soprattutto in casi di obsolescenza edilizia. La chiave per il risparmio energetico, però, è un'accurata progettazione dell'impianto di climatizzazione, poiché l'aspetto maggiormente "energy-intensive" in questo settore è l'elevato carico di ventilazione e il controllo igrometrico ad

esso correlato, dovuto a ricambi d'aria elevati e fortemente differenziati per le diverse destinazioni d'uso individuabili in una struttura ospedaliera.

Per quanto riguarda il mero involucro edilizio, l'adozione di tecnologie tradizionali - quali l'isolamento a cappotto e l'adozione di componenti trasparenti performanti - può costituire soluzione valida, sia per il risparmio energetico che per l'ottenimento di una maggiore stabilità microclimatica. Tuttavia, i risparmi energetici ottenibili sono considerevoli se riferiti al fabbisogno imputabile al solo involucro edilizio ed al carico di infiltrazione, mentre, considerando, anche il carico di ventilazione, il ruolo primario è rivestito dalla riqualificazione degli impianti di climatizzazione.

In generale, si può dire che configurazione migliore è quella che assicura la massima flessibilità operativa. Infatti, le funzioni ospitate all'interno di un ospedale sono molto variegata, da quelle amministrative (in cui sono idonei impianti tradizionali, anche misti aria/acqua con ventilconvettori), ai reparti di degenza (con ricorso ad impianti a tutt'aria o misti, con pannelli radianti a soffitto che necessitano di minore manutenzione), ai blocchi operatori e camere sterili (laddove si rende necessario il ricorso esclusivo ad impianti a tutt'aria esterna). Ancora, una struttura ospedaliera è in continua attività, e pertanto non possono trascurarsi aspetti a ciò correlati, come la facilità di intervento sugli impianti, ad esempio prevedendo la riduzione al minimo delle interferenze con l'attività medica ed i possibili adeguamenti delle destinazioni d'uso degli spazi.

L'analisi sviluppata e presentata mira dunque ad evidenziare questi due differenti aspetti della progettazione della riqualificazione dell'edilizia ospedaliera. In una prima sezione, l'analisi è finalizzata a valutare l'efficacia di interventi di efficientamento "tradizionali" per l'involucro edilizio. In particolare sarà valutata l'incidenza di tali interventi al variare delle condizioni microclimatiche impostate e della tipologia impiantistica. Nella seconda parte, invece, sarà condotto un approfondimento sull'efficientamento del sistema impiantistico, valutando nuove combinazioni delle tecnologie esistenti e strategie di controllo del microclima che consentano di massimizzare il risparmio energetico.

4.3.3.1 Efficacia di interventi di retrofit sull'involucro edilizio

Relativamente al retrofit del Day-Hospital dell'Istituto G. Pascale, sulla base dei risultati ottenuti dalla simulazione del modello energetico dell'edificio precedentemente presentato, e tenendo conto delle indicazioni rilevate durante i diversi sopralluoghi effettuati, sono stati individuati i seguenti interventi sull'involucro opaco e trasparente, per un costo complessivo pari a 1'200'556 €:

- isolamento dall'esterno delle pareti verticali e del solaio di copertura;

- sostituzione dei componenti finestrati comprensivi di infissi e adozione di schermature mobili.

Più nel dettaglio, l'intervento di isolamento delle tamponature esterne consta di 3 diverse azioni che consentono di raggiungere una trasmittanza termica globale media della parete esterna di $0.34 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ con un costo complessivo di 321'000 €:

- ✓ isolamento a cappotto dell'intelaiatura esterna dell'edificio, con polistirene estruso in lastre (celle chiuse), 10 cm, conducibilità termica (λ) = $0.04 \text{ W}/\text{mK}$, posto in opera mediante tasselli;
- ✓ isolamento in intercapedine delle tamponature, mediante insufflaggio di perlite espansa, (isolante granulare leggero, atossico, con $\lambda = 0.04\text{--}0.06 \text{ W}/\text{mK}$) nella cavità tra i due tavolati in laterizio;
- ✓ riempimento dei vani sottofinestra con lastre in polistirene estruso (spessore 10 cm, $\lambda = 0.04 \text{ W}/\text{mK}$), previo utilizzo, dall'interno, di idonea barriera al vapore.

L'intervento sulla copertura (costo 178'000 €) prevede invece l'adozione, sul lato esterno, di cappotto termico costituito da 10 cm di polistirene estruso in lastre, conducibilità termica ($\lambda = 0.04 \text{ W}/\text{mK}$), con trasmittanza termica complessiva di calcolo pari a $0.35 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Per i componenti trasparenti dell'involucro, la proposta progettuale consiste nell'adozione di infissi in legno e vetrocamera basso-emissivo con riempimento in argon ($U = 1.95 \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}$). Inoltre, per il regime estivo, si prevede adozione di schermature esterne mobili, in alluminio, con adozione di sistemi a lamelle orizzontali con trattamento alto-riflettente rispetto alle lunghezze d'onde dello spettro solare. Il costo di questo intervento è di 314'000 €.

Nelle Tabelle 4.33 e 4.34, sono riportati i carichi in riscaldamento e raffrescamento con riferimento alla sola aliquota sensibile. Si vede che, con riferimento al periodo di riscaldamento, l'aumento dell'isolamento termico riduce le dispersioni attraverso i componenti opachi del 44%. D'estate, i materiali selezionati contribuiscono a sfasamento e attenuazione della trasmissione del calore, per cui, se si considera il carico di picco (es alle 16:00), mentre l'involucro attuale presenta guadagni per trasmissione significativi, l'edificio riqualificato, avendo una maggiore inerzia, non ha un carico di trasmissione positivo.

Relativamente alle infiltrazioni, la migliore tenuta dei componenti installati comporta un'effettiva riduzione del 40% circa del carico relativo sia in inverno che in estate. Avendo evidenziato l'efficacia da punto di vista della riduzione del carico sensibile, gli interventi sull'involucro proposti sono stati analizzati al variare della tipologia

impiantistica, per valutare la convenienza economica dell'intervento ed effettuare un'analisi di impatto ambientale.

Carico termico di picco (RISCALDAMENTO)	Edificio attuale	Edificio Riqualificato
Carico interno (persone, macchinari, etc.) (kW)	21.18	21.18
Dispersione componenti finestrati (kW)	-57.06	-40.21
Infiltrazioni (kW)	-240.42	-148.96
Dispersione componenti opachi (kW)	-505.25	-286.44
Carico sensibile di riscaldamento (kW)	781.55	454.41
Potenza sensibile di riscaldamento (W/m²)	77	45

Tabella 4.33: Carico sensibile di riscaldamento per l'edificio attuale e quello riqualificato.

Carico termico di picco (RAFFRESCAMENTO)	Edificio attuale	Edificio Riqualificato
Carico interno (persone, macchinari, etc.) (kW)	217.51	217.51
Dispersione componenti finestrati (kW)	150.82	100.47
Infiltrazioni (kW)	73.00	45.86
Dispersione componenti opachi (kW)	99.06	-53.05
Carico sensibile di raffrescamento (kW)	-540.38	-310.80
Potenza sensibile in raffrescamento (W/m²)	-53	30

Tabella 4.34: Carico sensibile di raffrescamento per l'edificio attuale e quello riqualificato.

Per fare questo, si considerano per entrambi gli edifici (stato attuale e riqualificato), tre tipologie impiantistiche caratterizzate da un pregio crescente:

- × sistema ad acqua (FC-NoOA);
- × sistema misto aria /acqua (FC-OA);
- × sistema misto aria primaria /acqua con recupero termico laddove possibile (FC+DOAS).

Il primo è un sistema che opera il solo bilanciamento del carico sensibile. Acqua calda in inverno e fredda d'estate viene veicolata ad unità fan-coils a quattro tubi, che operano il bilanciamento del carico sensibile; a questi sono associati sistemi di regolazione operanti su singole zone termiche. Poiché non è prevista aria esterna, il carico latente e la qualità dell'aria è regolata attraverso l'apertura e chiusura delle finestre. Questa situazione è tipica di ancora molti reparti delle strutture ospedaliere non moderne, quali ad esempio le degenze.

Il secondo è un sistema a ventilconvettori, in cui questi hanno griglie di aspirazione dell'aria esterna, con associato sistema di regolazione zona per zona. Infine FC+DOAS

e un sistema misto acqua/aria primaria in cui l'unità di trattamento ha un recuperatore sensibile (non essendo ammesso il recupero latente nell'edilizia ospedaliera, per ragioni connesse al possibile scambio di massa contaminata tra aria esausta e aria di rinnovo), di tipo a piastre, con efficienza del 70%. L'aria è costituita da sola aria esterna, in quantità sufficiente a soddisfare il richiesto livello di qualità dell'aria in ambiente. Per ogni locale, si può individuare la portata di aria esterna necessaria che viene opportunamente trattata in una U.T.A. (unità di trattamento dell'aria) ed inviata ai locali da climatizzare tramite canalizzazioni, in modo che bilanci il carico termico latente. L'aria primaria garantisce quindi sia i necessari ricambi d'aria sia il controllo dell'umidità in ambiente. Il secondo fluido vettore (acqua calda in inverno e fredda d'estate), invece, è inviato mediante tubazioni ai terminali idronici nei singoli ambienti per il bilanciamento del solo carico termico sensibile.

Queste tre tipologie impiantistiche sono state scelte perché rappresentative delle principali tecnologie che si possono riscontrare nelle strutture ospedaliere italiane. Nella Tabella 4.35 vengono sintetizzati i principali risultati ottenuti.

Per la soluzione FC-NoOA, il fabbisogno di energia primaria prima dell'intervento è 4'937 GJ, e il contributo principale è dovuto al fabbisogno di riscaldamento (2'277 GJ) e di raffrescamento (2'130 GJ). Poiché il sistema non consente il controllo del carico latente, il fabbisogno relativo alla sezione di umidificazione è nullo. Il fabbisogno annuale netto dunque è di 135 kWh/m² che si riduce del 50% dopo l'intervento di riqualificazione. In particolare, il retrofit consente di ridurre il fabbisogno di riscaldamento del 69% (-1568 GJ). Per la seconda soluzione, invece, l'intervento di retrofit consente di ridurre il fabbisogno annuale di 2'887 GJ e cioè del 31%. In particolare, la riduzione del fabbisogno di riscaldamento si riduce del 32% grazie all'incremento del livello di isolamento, mentre l'installazione di schermature esterne consente di ridurre il fabbisogno di raffrescamento del 31%. Infine, il sistema FC+DOAS comporta in entrambi i casi (edificio attuale e riqualificato), il maggiore fabbisogno energetico, poiché il controllo del carico latente comporta un elevato consumo per la deumidificazione e il sotto-raffreddamento (e connesso post-riscaldamento); evidentemente, anche il fabbisogno degli ausiliari è maggiore.

L'accoppiamento del controllo sensibile e latente con un sistema dedicato per l'aria di rinnovo comporta un fabbisogno di circa 18'587 GJ nelle condizioni attuali e di 15'642 GJ nel caso di edificio riqualificato, con una riduzione di circa il 16%.

Confrontando il sistema FC-OA rispetto al sistema ad acqua senza controllo del carico latente, si trova che il fabbisogno annuale aumenta del 47% (61%) per l'edificio attuale (riqualificato). Sempre utilizzando come riferimento il sistema FC-NoOA, la

terza tecnologia adottata comporta un incremento del fabbisogno annuale del 73% e dell'84% rispettivamente per l'edificio attuale e riqualificato.

Soluzioni	Energia primaria		CO _{2,eq}	
	Edificio Attuale	Edificio Riqualificato	ΔE%	ΔCO _{2,%}
FC-NoOA	135 kWh/m ²	68 kWh/m ²	50%	46%
FC-OA	255 kWh/m ²	176 kWh/m ²	31%	31%
FC+DOAS	507 kWh/m ²	426 kWh/m ²	16%	15%

Tabella 4.35: Fabbisogno di energia primaria annuale per le tre configurazioni impiantistiche.

La Tabella 4.35, per ciascun sistema, riporta le emissioni evitate considerando i seguenti come *LCA emission factors*:

- 0.708 ton/MWh_{el} per l'energia elettrica [214];
- 0.237 ton/MWh_{th} per il gas naturale [214].

Oltre all'analisi energetica, è stata condotta un'analisi delle condizioni microclimatiche interne. In particolare le Figure 4.32 e 4.33 riportano l'andamento della temperatura interna e dell'umidità relativa in una zona termica caratteristica e cioè una stanza per degenze che si trova al terzo piano, con riferimento a due tipiche giornate invernali (8 e 9 Gennaio) e due giornate estive (18 e 19 Luglio). Nella didascalia, "OldEnv" di riferisce all'edificio attuale e "NewEnv" all'edificio riqualificato.

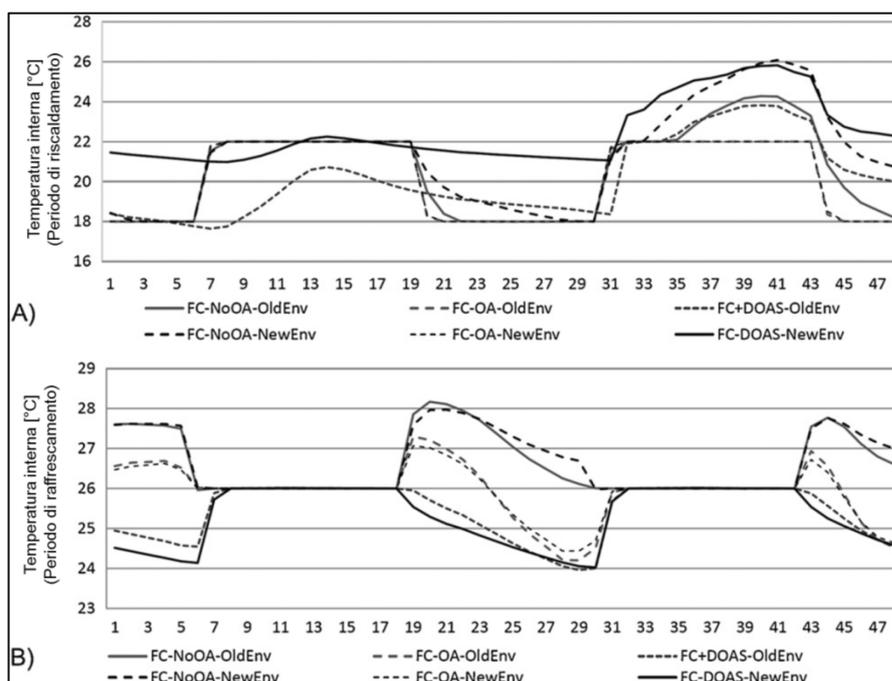


Figura 4.32: Andamento della temperatura interna:
A) periodo di riscaldamento; B) periodo di raffreddamento.

Da questi andamenti, si evince che l'intervento di retrofit condiziona poco gli andamenti della temperatura interna nel caso delle prime due soluzioni impiantistiche (FC-NoOA e FC-OA). Relativamente all'umidità relativa, si vede invece che le prime due soluzioni non prevedono il controllo del carico latente e infatti le oscillazioni giornaliere del parametro controllato sono considerevoli.

Il terzo sistema, invece, assicura il controllo del carico latente, attraverso un sistema di ventilazione dedicato che provvede ai processi di umidificazione/deumidificazione in unità di trattamento aria, per cui l'umidità relativa resta costantemente nel range di progetto e in generale sempre inferiore al 60%. Da ciò, ovviamente, emerge il maggiore pregio del sistema. Durante il periodo invernale, il carico latente interno connesso agli occupanti contribuisce a incrementare il contenuto di umidità dell'aria. Pertanto, il beneficio del controllo microclimatico di un sistema FC+DOAS è meno evidente. Invece, d'estate, il controllo del carico latente è efficace sono con l'ultima sistema analizzato, e le migliori condizioni di comfort sono evidenti dai profili riportati in Figura 4.33.

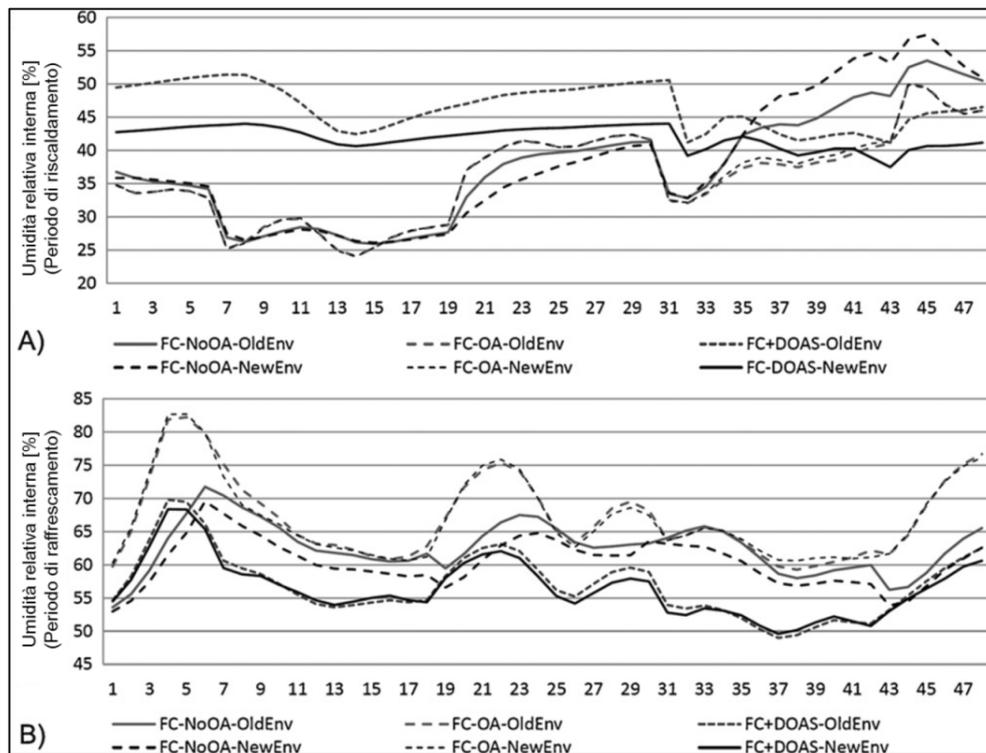


Figura 4.33: Andamento dell'umidità relativa: A) periodo di riscaldamento; B) periodo di raffrescamento

In Figura 4.34, invece, sono riportati gli andamenti del Performance Index for temperature (PI_T) e for umidity (PI_{RH}).

Gli assunti range di benessere termico ed igrometrico sono:

- Inverno: Temperatura tra 19.5÷23.5°C e umidità relativa 35÷55%;
- Estate: Temperatura tra 23.5÷27.0°C e umidità relativa 40÷60%.

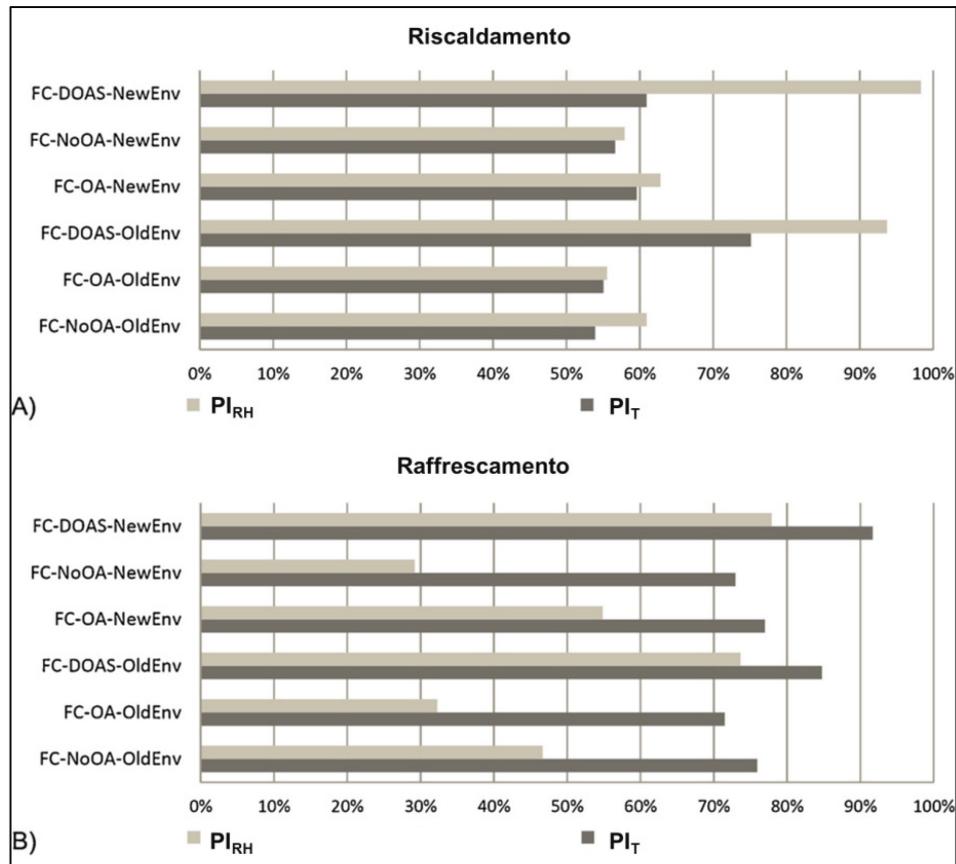


Figura 4.34: Performance Index for temperature and for umidity: A) periodo di riscaldamento; B) periodo di raffrescamento.

E' evidente che, in inverno, la soluzione FC+DOAS garantisce le migliori condizioni climatiche sia per l'edificio nelle sue attuali condizioni che nell'edificio riqualificato. In particolare, per l'edificio riqualificato, in estate il PI_T raggiunge il 91.7% mentre in inverno il PI_{RH} aggiunge il 98.3%.

Si conclude, dunque, che certamente gli interventi sull'involucro edilizio garantiscono condizioni climatiche più stabili che sono più facilmente gestibili dagli impianti asserviti all'edificio.

Infine, si possono analizzare i costi per il retrofit dell'involucro edilizio. In particolare avendo calcolato un costo d'intervento di 1'200'556 € e avendo assunto per i costi dell'energia elettrica e del gas naturale rispettivamente 0.25 €/kWh e 0.07 €/kWh [206] (nota bene, i costi dei vettori e prodtti energetici sono riferiti al periodo in cui si sono effettuati gli studi), si ottengono i seguenti risparmi nei costi di esercizio (Δ CE), con riferimento al solo costo per il retrofit d'involucro:

- Retrofit d'involucro - sistema FC-NoOA: Δ CE \approx 55'964 e SPB \approx 21.4 anni;

- Retrofit d'involucro - sistema FC-OA: $\Delta CE \approx 62'987$ e SPB ≈ 19.1 anni;
- Retrofit d'involucro - sistema FC+DOAS: $\Delta CE \approx 77'310$ e SPB ≈ 15.5 anni.

Da questa analisi degli effetti di un intervento di retrofit sull'involucro, si è visto come i tempi di ritorno dell'investimento sono abbastanza alti, anche se del tutto compatibili con la vita media attesa per i vari interventi, così come riportato nello standard [51]. Quello che si vuole sottolineare, però, è che anche se il risparmio energetico ottenibile è notevole, gli interventi ipotizzati non presentano margini di redditività nel breve-medio periodo. Infatti, in strutture come gli ospedali, in cui sono richieste condizioni di comfort molto spinte, con ricambi orari dell'aria molto più elevati rispetto a quelli propri dell'edilizia civile abitativa, intervenire sull'involucro edilizio è meno efficace che intervenire con un efficientamento degli impianti di climatizzazione.

In ogni caso, la riqualificazione dell'involucro è la "*conditio sine qua non*". Infatti, è comunque necessaria la riqualificazione energetica anche dell'involucro edilizio poiché questo non solo è una barriera rispetto a dispersioni e rientrate termiche, bensì è anche l'elemento inerziale atto alla stabilizzazione delle condizioni microclimatiche interne. Pertanto, una sua riqualificazione è necessaria per ottimizzare anche l'efficientamento degli impianti.

4.3.3.2 Analisi di interventi sull'impianto e strategie di controllo microclimatico

Dopo una prima parte di studio concentrata sull'applicazione di interventi tradizionali sull'involucro edilizio volti a stabilizzare le condizioni interne e rimuovere le attuali criticità, si è passati quindi all'analisi di possibili soluzioni per la riqualificazione impiantistica. In particolare, tale fase nasce da preliminari studi relativi a:

- × *analisi delle esigenze specifiche dell'area servita dagli impianti;*
- × *esame delle possibili variazioni legate allo sviluppo della tecnologia medica.*

Relativamente al primo aspetto, si deve sottolineare che, negli ospedali, gli impianti HVAC devono non solo garantire le condizioni di comfort termo-igrometrico e di qualità dell'aria per gli occupanti (pazienti, personale, visitatori), ma devono soddisfare anche le esigenze di processo legate alle diverse attività mediche previste, considerando che, in molti ambienti, il rispetto di taluni valori minimi è la condizione necessaria allo svolgimento dell'attività stessa. Inoltre, poiché una struttura ospedaliera è in continua attività, non possono trascurarsi aspetti correlati alla gestione stessa degli impianti, quali la facilità di intervento per la manutenzione (ordinaria e/o straordinaria), al fine di ridurre al minimo le interferenze con l'attività medica.

Poiché i valori dei parametri ambientali attesi e talvolta prescritti cambiano da reparto a reparto, seguendo la linea tracciata dagli standard recentemente pubblicati da ASHRAE con ASHE (*American Society for Healthcare Engineering of the American Hospital Association*) [230], gli impianti di climatizzazione asserviti alle strutture ospedaliere dovrebbero essere progettati attraverso un'attenta analisi delle esigenze della destinazione d'uso dei diversi ambienti, in modo da prevedere un'opportuna differenziazione nella tipologia di condizionamento in funzione delle patologie o dell'intensità di cure.

A tale proposito, AICARR [161] suggerisce di introdurre l'approccio prestazionale (e non meramente prescrittivo, limitandosi a verificare il rispetto dei valori limite di alcuni parametri di funzionamento degli impianti), che presuppone una preventiva analisi dei rischi dal punto di vista clinico per le varie patologie e per i vari reparti, consentendo di ottimizzare gli impianti e di non fossilizzarsi al mero rispetto delle prescrizioni, che, in mancanza di detta analisi, risultano spesso troppo cautelative.

L'altro aspetto da considerare è che - in conseguenza dei continui progressi tecnologici in campo medico - all'interno degli ospedali si ha un frequente adeguamento delle destinazioni d'uso degli spazi interni e conseguentemente rearrangiamenti delle dotazioni impiantistiche, il cui risultato è spesso la totale inefficienza energetica del sistema edificio-impianti [169]. Quando si interviene su una struttura esistente, quindi, ci si deve confrontare con una complessità del sistema edificio/impianti spesso imprevedibile e difficilmente interpretabile anche per un progettista esperto. In tale contesto, risulta spesso difficile anche solo reperire informazioni certe circa le variazioni strutturali e funzionali che hanno portato alla situazione attuale.

Chiarita, seppur con estrema sinteticità, la complessità del problema, nel seguito di questa paragrafo si descrive la riqualificazione del caso studio considerato, con attenzione posta alla evidenza dei contrasti sopra evidenziati.

Per il primo confronto sono ipotizzate due soluzioni impiantistiche con controllo microclimatico standard:

- Impianto a fan-coil con ventilazione meccanica controllata (FC_V)
- Impianto misto del tipo aria/acqua, (S_AA).

Il primo schema, Figura 4.35 A, prevede un sistema di ventilazione meccanica controllata e il controllo del carico sensibile attraverso un sistema ad acqua con ventilconvettori che sono dotati di una serranda di miscelazione di aria esterna (OA) e aria di ricircolo (RA). La quantità di aria esterna varia ampiamente a seconda della

specifica zona termica (ad esempio, 2.5 ACH per reparti e ambulatori, 2.0 ACH per l'ingresso e corridoi, 1.0 ACH per scale e magazzini, ecc.)

La seconda soluzione, Figura 4.35 B, è un impianto a ventilconvettori ed aria primaria, particolarmente indicato in ambienti con locali diversi per la capacità intrinseca di controllare i parametri termo-igrometrici ambiente per ambiente. Le ipotesi di progetto prevedono che l'U.T.A. non sia dotata di recuperatore di calore e che il Set-Point di umidità relativa (ϕ) sia fissato al 45% in inverno e 55% d'estate. Per quanto riguarda i ricambi d'aria ed i Set-Point di temperatura (T), per ciascuna zona termica questi sono stati fissati in conformità a quanto previsto dalla normativa di settore. In particolare, si è fatto riferimento ai dati riportati nella Tabella 3.9, commentata nel capitolo precedente.

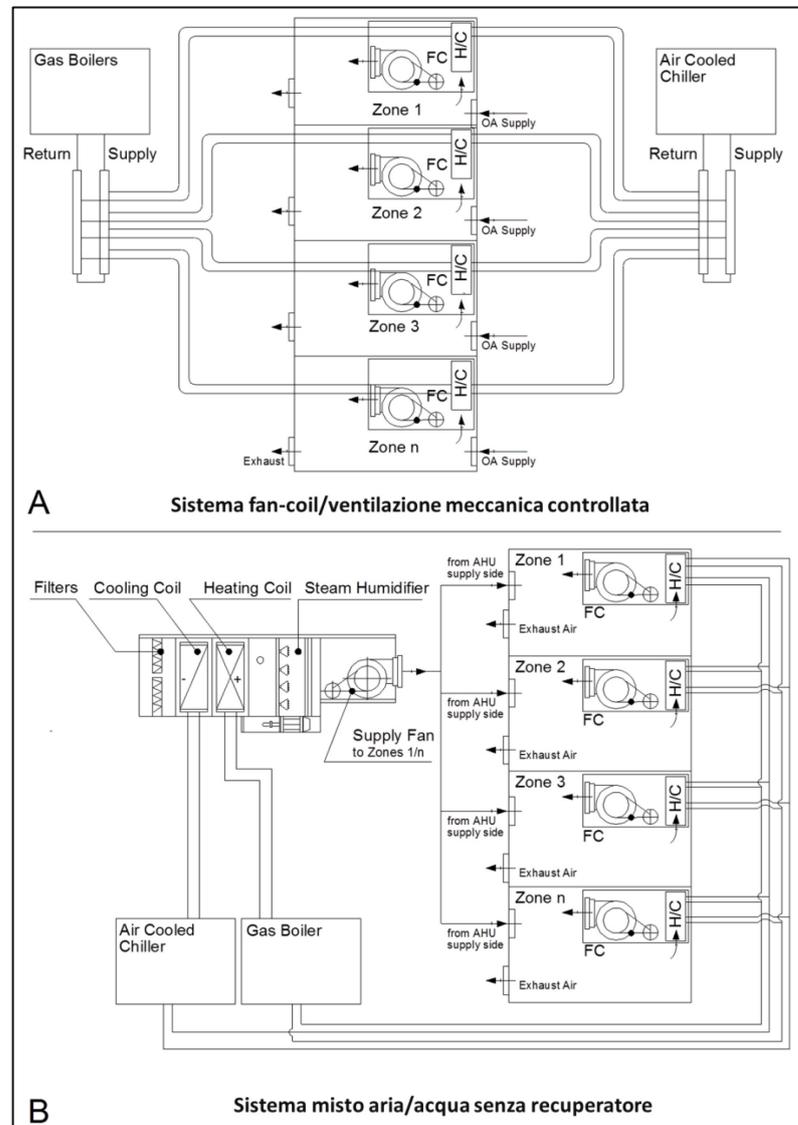


Figura 4.35: Schema delle due soluzioni impiantistiche: a) sistema fan-coil/ventilazione meccanica controllata; b) sistema misto aria/acqua senza recupero termico.

In Tabella 4.36, si evince che il controllo del carico latente è particolarmente complesso in utenze in cui sono richiesti elevati tassi di rinnovo dell'aria, soprattutto durante il periodo estivo. L'elevato tasso di aria di rinnovo, infatti, comporta elevate spese per i processi di deumidificazione e raffreddamento, nonché per il post-riscaldamento. In definitiva il controllo del carico latente in tutte le zone, accoppiato ad elevati tassi di ventilazione, comporta un fabbisogno circa 3 volte superiore rispetto ad un sistema per il controllo del solo carico sensibile e la qualità dell'aria (511.7 kWh/m² contro 187.3 W/m²).

Energia primaria	FC_V	S_AA	ΔE [%]
Riscaldamento [kWh]	1'250'833	2'485'000	99%
Raffrescamento [kWh]	473'333	1'831'111	287%
Ventilatori [kWh]	48'056	592'778	1131%
Pompe [kWh]	98'611	244'722	148%
Umidificazione [kWh]	0	74'444	-
Totale [kWh]	1'870'833	5'228'056	179%
Totale [kWh/m ²]	183.6	512.9	179%

Tabella 4.36: Fabbisogno di energi primaria per le due tipologie impiantistiche

Tuttavia, occorre considerare che anche se un ospedale richiede un controllo stringente delle condizioni termo-igrometriche, in molte zone non è strettamente necessario il controllo dell'umidità e si può ritenere tollerabile anche un range di temperature più ampio.

Pertanto, nelle analisi presentate di seguito, secondo le effettive necessità della specifica zona termica, sono state considerate le seguenti linee guida per l'ottimizzazione del controllo microclimatico:

- a) variazione dei set-point di temperatura in funzione della zona termica;
- b) controllo del grado igrometrico solo in zone termiche selezionate;
- c) recuperatori di calore sensibili nelle Unità di Trattamento dell'Aria.

A proposito dell'ultimo punto esplicitato, il recupero di calore, sebbene debba essere tale da evitare qualunque scambio di massa e quindi rischio di possibile contaminazione, tuttavia non è escluso. Nelle utenze ospedaliere vanno però evitati i sistemi rotativi.

Più nel dettaglio, per il Day-Hospital dell'Istituto "G. Pascale", sono state confrontate altre due configurazioni impiantistiche con controllo microclimatico ottimizzato (Figura 4.36):

- I. Impianto misti del tipo aria/acqua con recupero di calore, (S_AAR);
- II. Impianti misti del tipo aria/espansione diretta, (S_VRF).

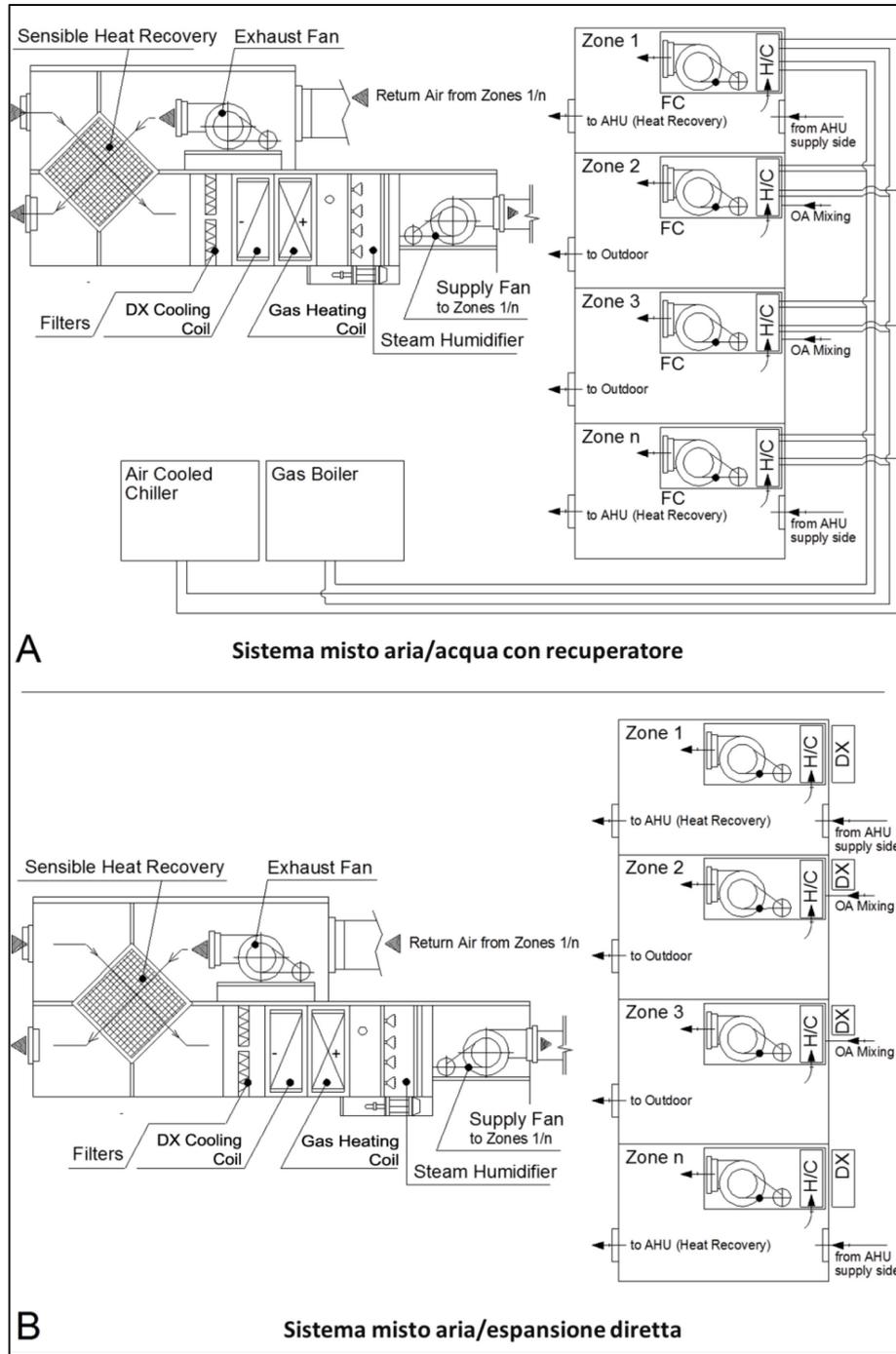


Figura 4.36: Schema delle due soluzioni impiantistiche: a) sistema misto aria/acqua; b) sistema misto aria/espansione diretta.

Si precisa che il controllo del carico latente avviene solo in talune zone termiche. Diversamente, la qualità dell'aria è sempre controllata. Infatti, laddove non vi è immissione di aria primaria trattata in U.T.A., i terminali ambiente (ad acqua o

espansione diretta) funzionano con miscelazione aria interna di ricircolo ed aria esterna. La soluzione indicata con S_AAR (Figura 4.36 A), è ancora un sistema misto, in cui però si introduce un recuperatore di calore statico a piastre. Lo scambio di calore, esclusivamente sensibile, avviene per convezione e conduzione attraverso le piastre. Questi recuperatori sono caratterizzati da valori di efficienza di norma compresi tra il 50% ed il 75%. I passaggi per l'aria sono sigillati, con soluzioni appropriate onde impedire ogni possibile contaminazione fra l'aria espulsa e l'aria immessa, sia in condizioni di normale esercizio, sia in condizioni di guasto.

L'ultima alternativa (Figura 4.36 B) considerata è un sistema ad espansione diretta VRF (Variable Refrigerant Flow) in cui la regolazione della potenza erogata/sottratta avviene modulando il flusso del refrigerante. Il sistema è formato da una unità esterna dotata di compressore e di batteria di scambio in grado di funzionare da condensatore e da evaporatore, cui sono collegate molteplici unità interne dotate di ventilatore e batteria di scambio termico. Si tratta, nella sostanza di un'evoluzione piuttosto spinta dei sistemi multi-split.

Con riferimento alle zone termiche, si considerano tre tipologie di controllo microclimatico i cui parametri operativi sono riassunti in Tabella 4.37, e nello specifico:

- Profilo alto: blocchi operatori, camere bianche, ematologia e altri reparti specialistici;
- Profilo medio: ingresso, corridoi, ambulatori normali, banca, laboratorio informatica, atrio, logoterapia e simili;
- Profilo basso: scale, WC, locali tecnici e piano parzialmente interrato.

	Periodo di riscaldamento			Periodo di raffrescamento		
	Set-Point	Range di comfort		Set-Point	Range di comfort	
	T [°C]	T [°C]	φ [%]	T [°C]	T [°C]	φ [%]
Profilo alto	22	21-23.5	45-65	26	24-27	45-65
Profilo medio	21	19-23.5	35-65	26	24-28	35-65
Profilo basso	20	18-24.0	35-65	26	23-29	35-65

Tabella 4.37: Controllo microclimatico ottimizzato: Set-Point e Range di comfort.

Con questa gestione, se le due soluzioni sono confrontate con la soluzione precedente mista aria/acqua senza recupero termico e con controllo del carico latente in tutte le zone, le richieste energetiche sono decisamente inferiori:

- Impianto S_AAR: fabbisogno per la climatizzazione annuale pari a circa 204 kWh/m²;
- Impianto S_VRF: fabbisogno per la climatizzazione annuale pari a circa 157 kWh/m².

Nella Tabella 4.38 sono confrontate le prestazioni energetiche conseguibili con i due sistemi ottimizzati.

Energia primaria (kWh)	S_AAR	S_VRF	ΔE (%)
Riscaldamento	1'006'833	785'333	-22%
Raffrescamento	693'806	487'806	-30%
Ventilatori	289'056	314'778	9%
Pompe	78'833	0	---
Sezione umidificazione	14'278	14'278	0%
Totale	2'082'806	1'602'167	-23%

Tabella 4.38: Confronto in termini di energia primaria tra impianto misto aria/acqua con recupero termico ed impianto aria/espansione diretta.

Il confronto tra queste ultime due tipologie impiantistiche mostra che il sistema ad espansione diretta risulta più vantaggioso, con una riduzione del 23% relativamente al fabbisogno di energia primaria.

Dal punto di vista della capacità di controllo microclimatico, per le due configurazioni impiantistiche ottimizzate, con riferimento a tre ambienti tipo caratterizzanti le zone termiche riportate in Tabella 4.37, è stato confrontato il microclima interno, attraverso gli indici di prestazione per la temperatura e l'umidità relativa: $PI(T)$ e $PI(\varphi)$, già precedentemente definiti come la percentuale di tempo caratterizzata da condizioni interne nel range di comfort considerato.

Per i due sistemi descritti, sono state riscontrate condizioni indoor tendenzialmente equivalenti durante l'intero periodo di riscaldamento (Figura 4.37 a) e raffrescamento (Figura 4.37 b), sia con riferimento alla temperatura dell'aria interna che per l'umidità relativa. Si evince che con entrambi i sistemi si ottengono condizioni di comfort accettabili.

Infine, dall'analisi di fattibilità economica, considerando per S_AAR un costo di 1'076'336 € e per il sistema S_VRF un costo di 1'177'243 €, si deduce che l'extra-costi per l'installazione di un sistema ad espansione diretta in abbinamento ad un impianto ad aria, piuttosto che un impianto misto dalle analoghe caratteristiche, è ampiamente ripagato - *almeno per quanto riguarda il caso studio qui esaminato* - dalla maggiore efficienza. Infatti, considerando un tasso di attualizzazione del 3.0%, il tempo di ritorno dell'investimento (extra-costi) è circa 3 anni mentre il valore attuale netto (VAN), e cioè la somma attualizzata dei flussi di cassa su un periodo utile di valutazione di 15 anni, risulta 275'195 € (186'036 € con un tasso di attualizzazione del 7%).

Capitolo 4: La progettazione della riqualificazione energetica: analisi delle prestazioni del sistema edificio/impianti

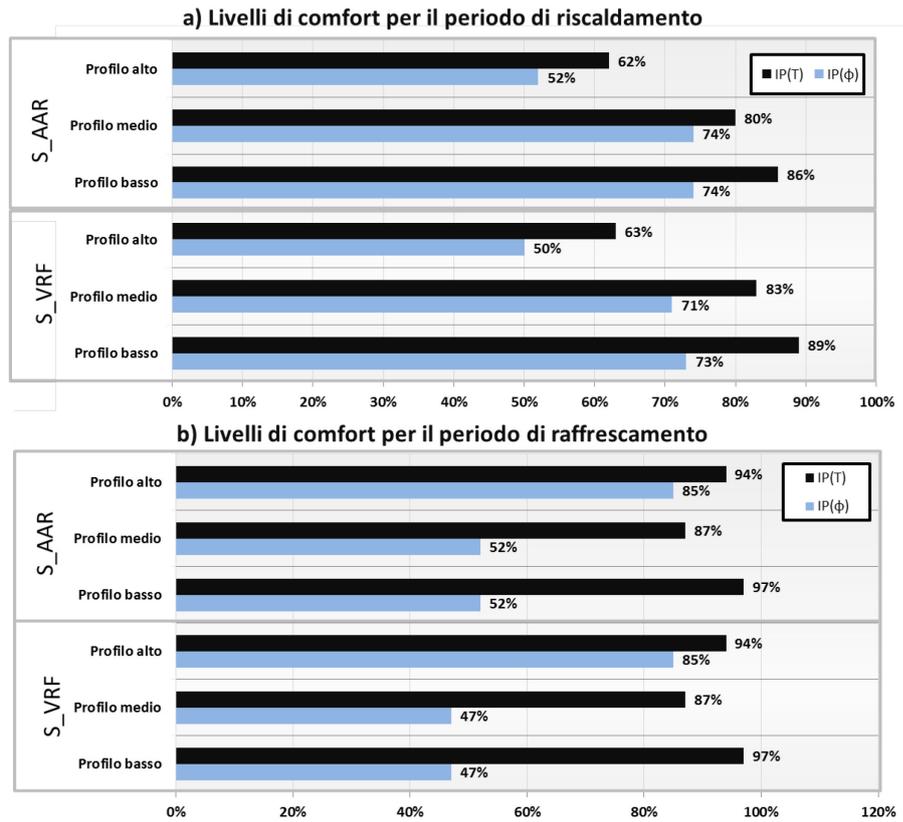


Figura 4.37: Confronto tra le condizioni di comfort con impianto misto aria/acqua e misto aria/acqua ad espansione diretta, in riscaldamento (a) e raffrescamento (b).

Da questi dati emerge che la soluzione analizzata è tecnicamente ed economicamente fattibile. I flussi di cassa attualizzati sono riportati in Figura 4.38.

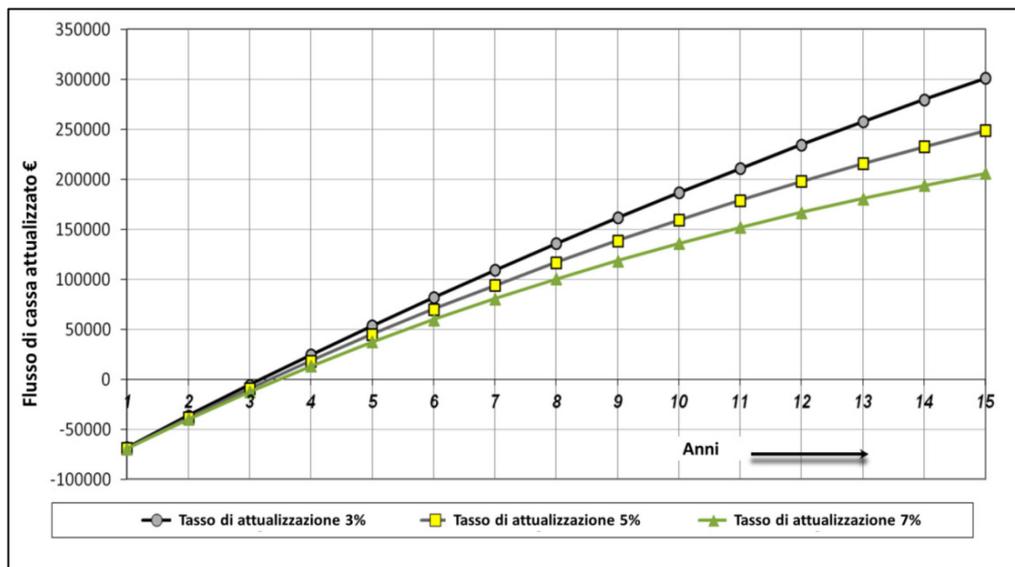


Figura 4.38: Flusso di cassa attualizzato per il sistema misto aria/acqua ad espansione diretta.

In conclusione, con riferimento al caso studio analizzato in questa sezione, per quanto riguarda il mero involucro edilizio, l'adozione di tecnologie tradizionali - quali l'isolamento a cappotto e l'adozione di componenti trasparenti performanti - può costituire soluzione valida, sia per il risparmio energetico che per l'ottenimento di una maggiore stabilità microclimatica. È evidente, però, che il ruolo primario nella riduzione dei fabbisogni è da attribuire alla riqualificazione degli impianti di climatizzazione.

In generale, si può dire che la configurazione migliore è quella che assicura la massima flessibilità operativa. Infatti, le funzioni ospitate all'interno di un ospedale sono molto variegata, da quelle amministrative (in cui sono idonei impianti tradizionali), ai reparti di degenza (con ricorso ad impianti a tutt'aria o misti, con pannelli radianti e in ogni caso terminali a bassa manutenzione), ai blocchi operatori e camere sterili (laddove si rende necessario il ricorso esclusivo ad impianti a tutt'aria esterna). Relativamente al caso studio indagato, l'ottimo delle analisi tecnico-economiche effettuate è rappresentato da soluzioni impiantistiche con controllo del carico latente e sensibile disaccoppiato, con idoneo sistema di recupero del calore dall'aria di espulsione (senza contaminazione tra aria di rinnovo ed aria esausta). In definitiva, cospicui risparmi energetici si possono ottenere con una gestione differenziata delle zone termiche, sia in termini di controllo della temperatura che dell'umidità relativa.

In particolare, l'adozione di un impianto misto aria primaria/espansione diretta, con recupero termico, set-point variabili e controllo del carico latente solo laddove necessario, consente di risparmiare quasi il 70% dell'energia primaria richiesta da un tradizionale impianto misto aria/acqua, senza recupero di calore e indistinto controllo del microclima in ciascuna zona termica. Tale configurazione risulta, con riferimento al caso di studio qui esaminato, anche più efficiente di un impianto misto aria/acqua dalle analoghe caratteristiche, per quanto riguarda il recupero di calore e la differenziazione del controllo sensibile e latente. In particolare, ai risparmi energetici conseguono soddisfacenti indici economici, con extra-costi contenuti e ripagabili in periodi di tempo pienamente fattibili rispetto alla vita ipotizzata per i componenti di impianto.

Infine, qualche osservazione generale può essere fatta sul sottosistema di generazione. Centrali termiche e frigorifere non possono essere ricondotte a tipologie tipiche, essendo le scelte progettuali strettamente connesse alle potenze di dimensionamento, al numero di centrali diverse da predisporre, alle tecnologie da adottare in funzione della taglia dell'impianto e dell'epoca in cui questo è stato realizzato. In utenze ospedaliere di significative dimensioni, solitamente l'energia termica è convertita da generatori di vapore a gas, diesel o olio combustibile. Questi, mediante scambiatori di calore, trasferiscono energia termica sia ai circuiti di riscaldamento sia ai boiler di accumulo dell'acqua calda sanitaria. Tale soluzione,

piuttosto diffusa (è quella ad esempio adottata oggi all'Istituto "G. Pascale") è idonea laddove i circuiti e le reti sono complessi ed estesi, consentendo la riduzione dei diametri delle condutture.

Relativamente alle centrali termo-frigorifere, la scelta solitamente ricade su macchine a compressione di vapore ad azionamento elettrico, con generazione centralizzata dell'acqua refrigerata poi veicolata alle diverse unità di trattamento e sistemi idronici. La scelta delle macchine ad assorbimento è anche diffusa, ma strettamente legata alla presenza di sistemi di cogenerazione (soluzione, questa, particolarmente idonea, data la presenza di richiesta termica elevata e costante, indipendentemente dal giorno della settimana, in tutte le stagioni dell'anno, con, evidentemente, picchi invernali dovuti all'esigenza di riscaldamento). Analogamente, anche la richiesta elettrica non varia durante la settimana, con elevate potenze assorbite e contraddistinte da precise curve di carico.

Dunque, l'abbinamento di cogenerazione e produzione del freddo mediante assorbitori consente un prelievo di energia termica anche in regime estivo, facendo lavorare al meglio il sistema di cogenerazione, attraverso cui si provvede, pertanto, anche all'energia frigorifera necessaria per la climatizzazione ambientale estiva e, in talune funzioni (laboratori, conservazione farmaci), anche nelle stagioni intermedie.

Relativamente alla selezione di un sistema di cogenerazione unico o più unità, la scelta è legata al tipo di utenza e alla variabilità dei carichi che la contraddistingue. In ogni caso, allorché si preveda un unico cogeneratore, questo consiste in turboalternatori a gas naturale o diesel, con recupero termico dal sistema di raffreddamento dei motori e dai fumi prodotti di combustione.

Per quanto riguarda l'assorbitore, a singolo effetto o doppio stadio, anche in questo caso la scelta è connessa al tipo di output termico fornito dal cogeneratore (acqua calda ad alta temperatura o vapore ad alta pressione).

4.4 Sistema di Trigenerazione per una rete urbana di teleriscaldamento/teleraffrescamento

Come sottolineato nella caratterizzazione energetica del centro storico di Benevento già presentata, poter disporre di supporti informativi integrati, quali le MEU (Mappe Energetiche Urbane), rappresenta un'ulteriore possibilità per i decisori di mettere a punto opportune politiche di governo del "sistema città", improntate al risparmio energetico e ispirate al più generale obiettivo dello sviluppo urbano sostenibile.

Tra le potenzialità indagate, durante gli anni di dottorato, in applicazione a questo mezzo di gestione delle aree urbane, c'è la progettazione impiantistica. Infatti, il GIS rappresenta un mezzo efficace per il coordinamento delle scelte a livello territoriale e

ambientale, permettendo l'elaborazione e la visualizzazione di numerose informazioni, la cui diretta correlazione può fornire un valido supporto ad esempio alla progettazione di reti di teleriscaldamento/teleraffrescamento per un distretto urbano.

Infatti, a partire dalla caratterizzazione del territorio urbano con la creazione di Mappe Energetiche è possibile:

- stimare le volumetrie teleriscaldabili/teleraffrescabili teoriche (con dettaglio alla singola sezione di censimento);
- individuare l'ubicazione delle centrali di produzione;
- individuare le strutture del terziario (scuole superiori, ospedali e case di cura);
- analizzare il territorio per la progettazione della rete (orografia, corsi d'acqua, principali vie di comunicazione, vincoli strutturali o paesaggistici);
- mappare eventuali reti di teleriscaldamento esistenti o in fase di realizzazione.

Un sistema di riscaldamento/raffrescamento urbano consiste essenzialmente in una rete di distribuzione dell'energia termica, che permette di servire contemporaneamente più edifici, servita da una o più centrali termiche. Questa è una soluzione efficiente e alternativa rispetto alla produzione di energia termica attraverso sistemi di produzione localizzati direttamente presso l'utenza, e può garantire una riduzione dell'impatto ambientale, un risparmio di energia primaria e costi di esercizio inferiori. Attraverso questi sistemi è possibile soddisfare le richieste di energia termica (riscaldamento e raffrescamento ambientale, acqua calda sanitaria) e nel caso di utilizzo di impianti di cogenerazione a servizio della rete è possibile soddisfare anche le richieste di energia elettrica, consentendo ulteriori vantaggi energetici, economici e di impatto ambientale rispetto alla soluzione che prevede conversione di energia termica da caldaie autonome o di condominio e approvvigionamento elettrico della rete di distribuzione urbana, connessa ai grossi impianti centralizzati costituenti il parco termoelettrico italiano.

Progettare un tale sistema non significa limitarsi a dimensionare correttamente le tubazioni o la centrale termica, ma anche tutti i sotto-componenti del sistema (sottostazioni, reti di collegamento, eventuali sistemi per la produzione di acqua refrigerata), soprattutto per reti di "piccole" dimensioni.

I sistemi di teleriscaldamento urbano rappresentano un'importante opportunità di utilizzazione razionale dell'energia e un doveroso contributo al contenimento della spesa energetica, alla riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra e al controllo dell'inquinamento locale. La centrale di teleriscaldamento può utilizzare tecnologie

cogenerative e/o basate sullo sfruttamento delle fonti rinnovabili, garantendo in entrambi i casi una riduzione nello sfruttamento delle fonti fossili per fini energetici. Nel caso si preveda l'utilizzo di impianti di cogenerazione alimentati a gas naturale si garantiscono significativi risparmi di energia primaria rispetto alla produzione di energia elettrica e termica delle medesime quantità di energia. Se la centrale di produzione è alimentata da una fonte rinnovabile, si ha una corrispondente riduzione dell'apporto di combustibili fossili.

Per evidenziare i benefici ambientali connessi all'utilizzo di un sistema di cogenerazione alimentato a gas naturale a servizio di reti di teleriscaldamento/teleraffrescamento occorre tener conto dei vantaggi associati all'utilizzo di entrambe le tecnologie. Per quanto riguarda la cogenerazione, si ha, rispetto alla produzione separata, una significativa riduzione dell'impatto ambientale legata essenzialmente al risparmio energetico dovuto all'elevata efficienza di conversione energetica. Inoltre, l'uso del gas naturale permette un ulteriore vantaggio sull'impatto ambientale in confronto al mix di combustibili utilizzato nelle centrali elettriche convenzionali e nelle caldaie distribuite. Inoltre, l'eliminazione delle caldaie distribuite grazie all'utilizzo di una sola centrale permette l'adozione delle migliori tecnologie di abbattimento degli inquinanti. Così è possibile intervenire con efficacia anche sugli ossidi di azoto prodotti dall'utilizzo del gas naturale. In definitiva, una sola fonte di emissioni è più facilmente controllabile e può essere facilmente sottoposta ad interventi migliorativi con il progredire della tecnologia di abbattimento degli inquinanti.

Come applicazione delle potenzialità delle MEU per la progettazione impiantistica efficiente, con riferimento al centro storico di Benevento, partendo dalle mappe relative al fabbisogno energetico per la climatizzazione invernale ed estiva, si è studiata la fattibilità di una rete di teleriscaldamento/teleraffrescamento, attraverso i seguenti step:

- analisi del territorio e scelta delle utenze;
- stima della domanda termica dell'area individuata;
- localizzazione della centrale e definizione del tracciato della rete;
- scelta della tecnologia e dimensionamento della centrale;
- analisi energetica ed ambientale delle soluzioni.

Partendo dalla caratterizzazione energetica visualizzata con le MEU, si è ritenuto opportuno dimensionare una micro-rete a servizio di due sezioni censuarie vicine (Figura 4.39). Gli edifici appartenenti alle due sezioni, per la loro destinazione d'uso, sono caratterizzati da profili di carico utilmente accoppiabili. Nella Figura 4.39 si vede pure il possibile posizionamento della centrale termica (Blocco A).

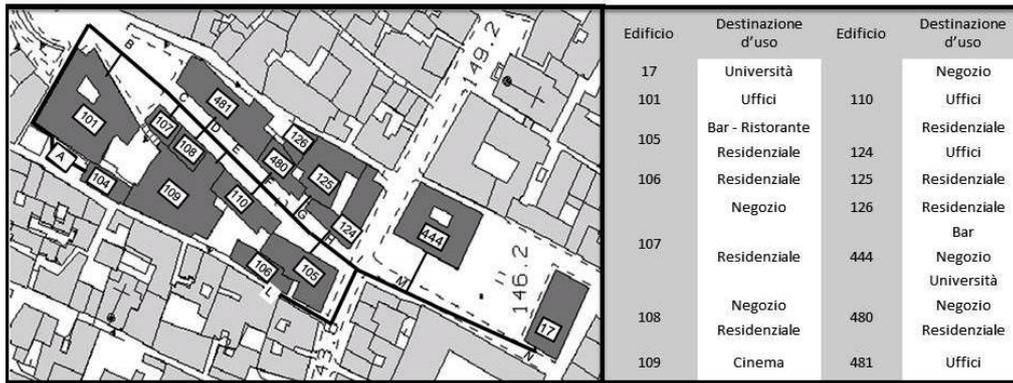


Figura 4.39: Micro rete a servizio di due sezioni censuarie e dettaglio della destinazione d'uso degli edifici.

Il carico termico nella stagione invernale ed estiva è stato determinato per ciascun edificio a partire dai fabbisogni calcolati precedentemente. L'analisi è stata fatta considerando tre giorni tipo per ciascuna stagione. Per il carico elettrico, invece, ci si è basati sui dati medi disponibili in letteratura in funzione della destinazione d'uso.

La micro-rete dimensionata ha una struttura ramificata, in cui si individua una direttrice principale in corrispondenza delle grandi utenze e dei baricentri delle utenze medie e piccole, da cui si dipartono le diramazioni. La rete è dimensionata (Tabella 4.39) in modo che possa lavorare sia in regime invernale che estivo. Il diametro delle tubazioni è stato dimensionato in modo che il fluido termovettore (acqua calda) abbia una velocità nel range $1 \div 2.5$ m/s. Le perdite di calore lungo la rete sono assunte pari a $0.7 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Rete	AO	AB	BC	CD	DE	EF	FG	GH	HI	IL	IM	MN
Tratto [m]	14	89	36	16	13	18	20	16	21	47	20	64
Diametro [m]	0.05	0.16	0.16	0.16	0.12	0.12	0.10	0.10	0.10	0.05	0.10	0.07

Tabella 4.39: Diametro e lunghezza dei tratti di rete.

In condizioni di progetto di riscaldamento, la temperatura dell'acqua di mandata è di 80°C , con un ΔT di 10°C , mentre in raffreddamento la temperatura di mandata è di 7°C , con una differenza tra la mandata e il ritorno di 5°C .

L'unità cogenerativa (CHP) considerata, gestita a pilotaggio termico, è formata da:

- Sistema con motore a combustione interna a gas naturale con una potenza nominale di 400 kW e un'efficienza elettrica del 38%;
- Caldaia d'integrazione con un rendimento del 90%.

Nel periodo di riscaldamento, il sistema di cogenerazione fornisce energia termica al fine di soddisfare i carichi termici delle utenze connesse alla rete. Nel periodo di raffrescamento, l'unità cogenerativa è accoppiata ad una pompa di calore ad assorbimento monostadio (AHP), aumentando il numero di ore di funzionamento annuali del sistema che quindi più propriamente è un *Combined Cooling, Heating and Power* (CCHP) system. Al fine di soddisfare i carichi di picco in raffrescamento, si sono analizzate due configurazioni d'integrazione per il sistema CCHP:

- Soluzione_1: AHP alimentata da una caldaia;
- Soluzione_2: pompa di calore elettrica (EHP).

Definiti tutti gli input necessari, si è passati alla simulazione del funzionamento del sistema ipotizzato con Trnsys [231], adottando per le macchine le curve di prestazione desunte dall'ASHRAE Handbook per descriverne il funzionamento a carico parziale [232]. In dettaglio, le equazioni utilizzate per determinare i diversi contributi all'energia primaria dell'unità cogenerativa (E^{CHP}) sono quelle sotto-riportate, da 4.12 a 4.17.

$$E_{th}^{gas} / EP^{CHP} = -2.21 \cdot 10^{-7} \cdot PLR^3 + 4.66 \cdot 10^{-5} \cdot PLR^2 - 3.17 \cdot 10^{-3} \cdot PLR + 0.32 \quad \text{eq 4.12}$$

$$E_{th}^{water} / EP^{CHP} = -3.76 \cdot 10^{-7} \cdot PLR^3 + 8.88 \cdot 10^{-5} \cdot PLR^2 - 7.15 \cdot 10^{-3} \cdot PLR + 0.41 \quad \text{eq 4.13}$$

$$E_{th}^{radiation} / EP^{CHP} = -7.88 \cdot 10^{-8} \cdot PLR^3 + 2.22 \cdot 10^{-5} \cdot PLR^2 - 1.56 \cdot 10^{-3} \cdot PLR + 0.16 \quad \text{eq. 4.14}$$

$$E_{th}^{oil} / EP^{CHP} = -1.81 \cdot 10^{-7} \cdot PLR^3 + 4.23 \cdot 10^{-5} \cdot PLR^2 - 3.30 \cdot 10^{-3} \cdot PLR + 0.12 \quad \text{eq. 4.15}$$

$$\eta_{el} = -7.27 \cdot 10^{-9} \cdot PLR^4 + 2.31 \cdot 10^{-6} \cdot PLR^3 - 2.89 \cdot 10^{-4} \cdot PLR^2 + 1.68 \cdot 10^{-2} \cdot PLR \quad \text{eq 4.16}$$

$$\dot{m}_{PLR}^{gas} / \dot{m}_{nom}^{gas} = 3.31 \cdot 10^{-5} \cdot PLR^2 + 4.56 \cdot 10^{-3} \cdot PLR + 0.21 \quad \text{eq. 4.17}$$

Nel set di equazioni di cui sopra, i termini indicano rispettivamente:

- energia recuperata dai gas esausti (E_{th}^{gas});
- energia recuperata dall'acqua di raffreddamento del motore (E_{th}^{water});
- energia recuperata dalle perdite radiative ($E_{th}^{radiation}$);
- energia recuperata dagli oli di lubrificazione (E_{th}^{oil});
- efficienza elettrica (η_{el}).

L'equazione 4.17 consente di calcolare la portata di combustibile in condizioni di carico parziale (\dot{m}_{PLR}^{gas}) rispetto al valore nominale (\dot{m}_{nom}^{gas}) ed è valida solo per PLR (fattori di carico parziale, "part load ratio") maggiori di 0.20. Per lo scambiatore di recupero di energia dai gas di scarico, si considera un'efficienza di 0.80, mentre l'energia termica recuperata dall'olio di lubrificazione e dall'acqua di raffreddamento è completamente trasferita alla rete.

Per la simulazione sono stati considerati tre periodi:

- Riscaldamento (novembre - marzo);
- Spegnimento del cogeneratore (aprile-maggio);
- Raffrescamento (giugno – settembre).

Le due configurazioni proposte sono state confrontate con una configurazione impiantistica tradizionale, in cui si prevede che per ciascun edificio il fabbisogno in riscaldamento sia fornito da una caldaia a gas naturale (efficienza del 90%) e in raffrescamento da una pompa di calore elettrica (SEER = 3.0). Il confronto è fatto in termini di risparmio di energia primaria (PES) e di emissioni evitate ($\Delta CO_{2,\%}$), avendo assunto per il parco termoelettrico italiano un'efficienza pari a 0.461 mentre per le emissioni un fattore pari a 0.523 kgCO₂/kWh_{el} per l'energia elettrica, per il gas naturale pari a 0.20 kgCO₂/kWh. Nell'analisi è stata trascurata la richiesta energetica per il pompaggio del fluido termovettore nella rete.

La Tabella 4.40 riporta i risultati delle simulazioni, avendo indicato con (1) i risultati riferiti alla Soluzione_1 e (2) quelli riferiti alla Soluzione_2.

	Riscaldamento	Raffrescamento	Totale
OH _{CHP} [h]	2'076	1'235	3'311
E _{th} ^{User} [MWh]	1'289	-	1'289
E _{th} ^{grid_loss} [MWh]	42.8	-	42.8
E _{th} ^{CHP} [MWh]	797.6	441.6	1'239
E _{th} ^b [MWh]	534.1	181.7 ⁽¹⁾	716.8 ⁽¹⁾ 534.1 ⁽²⁾
E _{el} ^{user} [MWh]	320.4	127.4	660.9
E _{el} ^{CHP} [MWh]	751.7	400.3	1'157.9
E _{el} ⁱⁿ [MWh]	52.7	55.4	320.4
E _{el} ^{out} [MWh]	484.1	324.6	808.0
EP ^{CHP} [MWh]	1'983	1'075	3'058
E _C ^{user} [MWh]	-	486.5	486.5
E _{user} ^{grid_loss} [MWh]	-	9.3	9.3
E _C ^{AHP (1)} [MWh]	-	495.7	495.7
E _C ^{AHP (2)} [MWh]	-	323.4	323.4
E _C ^{EHP (2)} [MWh]	-	172.8	172.8
E _{el} ^{tower (1)} [MWh]	-	3.8	3.8
E _{el} ^{tower (2)} [MWh]	-	2.1	2.1

Tabella 4.40: Risultati della simulazione.

In dettaglio, l'energia primaria richiesta in raffrescamento dalle utenze è indicata con E_C^{user} e quella fornita dalla pompa di calore ad assorbimento alimentata dal cogeneratore e dalla caldaia ad integrazione per la Soluzione_1 è indicata con $E_C^{AHP(1)}$.

Con riferimento alla Soluzione_2, l'energia fornita dalla pompa di calore ad assorbimento è indicata con $E_C^{AHP(2)}$ e quella della pompa di calore elettrica è indicate con $E_C^{EHP(2)}$. In entrambi i casi, si considera la richiesta elettrica della torre di raffreddamento (E_{el}^{tower}).

Inoltre, con "OH" sono state indicate le ore di funzionamento dell'unità cogenerativa, gestita a pilotaggio termico. Pertanto, se l'energia elettrica resa disponibile dal cogeneratore E_{el}^{CHP} è maggiore di quella richiesta dalle utenze (E_{el}^{user}), l'eccesso è ceduto alla rete (E_{el}^{out}). Al contrario, quando il fabbisogno di energia finale termica richiesta (E_{th}^{user}) è maggiore di quello che il cogeneratore riesce a fornire (E_{th}^{CHP}), la differenza viene soddisfatta con la caldaia d'integrazione (E_{th}^b).

Come detto, durante le stagioni intermedie il cogeneratore è spento, e l'energia richiesta è 213 MWh_{el}. Le perdite sulla rete termica (E_{th}^{user}) sono il 3.2% dell'energia trasferita. La Figura 4.40 riporta il confronto nel caso della prima soluzione di integrazione per il raffrescamento.

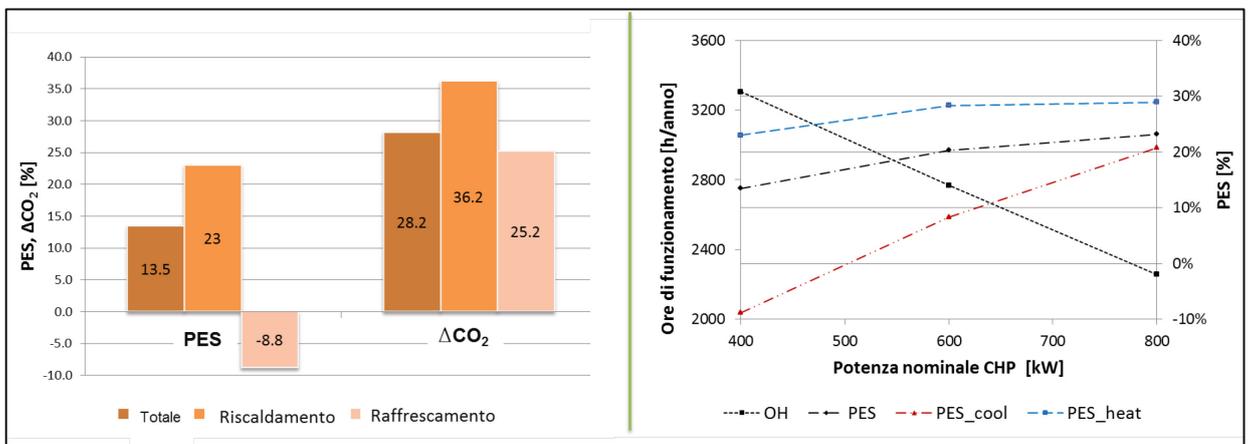


Figura 4.40: Analisi energetica ed ambientale delle soluzioni proposte

Durante la stagione invernale, le ore di funzionamento del cogeneratore sono 2'076 e, comparando le prestazioni con il sistema tradizionale scelto, il risparmio di energia primaria è pari al 23.0%, che comporta una riduzione delle emissioni di anidride carbonica equivalente del 36.2%.

Durante il periodo estivo, il CHP risulta attivo per 1'235 ore e il PES è -8.8% e dunque il sistema proposto ha prestazioni peggiori rispetto a quello tradizionale in

termini energetici mentre comporta una riduzione delle emissioni del 25.2%. Aumentando la capacità nominale dell'unità cogenerativa, le prestazioni del sistema migliorano durante il periodo estivo, ma di conseguenza le ore di funzionamento annuali dell'unità cogenerativa si riducono drasticamente (Figura 4.40). Ne consegue che non conviene aumentare la taglia del cogeneratore e dunque che con la configurazione proposta annualmente si riesce a ridurre il fabbisogno di energia primaria del 13.5% con una riduzione delle emissioni evitate circa del 28%.

Quando l'integrazione invece viene fatta con la pompa di calore elettrica, durante il periodo invernale si ottengono evidentemente gli stessi risultati, mentre nel periodo estivo il fabbisogno di energia primaria si riduce del 10% rispetto al sistema tradizionale, poiché mediante integrazione con la pompa di calore vengono massimizzate le ore di funzionamento del sistema.

In definitiva, considerando il funzionamento per tutto l'anno, la migliore configurazione è quella con la EHP in integrazione al fabbisogno di raffrescamento, per cui il CHP lavora 3'311 ore e il PES riferito all'intero anno vale 17.1% mentre la riduzione delle emissioni climalteranti è del 31.1%.

In conclusione, il caso studio proposto è esemplificativo delle potenzialità offerte dai sistemi informativi territoriali in associazione a politiche di gestione energetica del territorio.

Infatti, gli interventi finalizzati al risparmio energetico attuabili in un contesto urbano possono riguardare edifici o quartieri nuovi oppure opere di riqualificazione di edifici o aree urbane già esistenti.

Mentre nel primo caso la libertà di scelta fra varie soluzioni dipende prevalentemente da vincoli tecnico-economici abbastanza facilmente identificabili e quantificabili, nel secondo caso, invece, i vincoli devono tenere conto anche di altri elementi, che un'analisi poco approfondita non permette di individuare per quanto concerne gli aspetti relativi all'efficacia tecnica ed economica.

In particolare, l'installazione di un sistema di teleriscaldamento costituisce una grossa opportunità nel caso di un quartiere nuovo, mentre la sua introduzione in un contesto urbano esistente presenta, oltre a problematiche legate ad aspetti tecnici ed economici, anche altri importanti fattori di valutazione, quali, ad esempio, il disagio che un tale intervento comporta al traffico veicolare, il rischio di interferenza e di danni agli impianti già esistenti nel sottosuolo, il rischio sulla stabilità degli edifici. Questi fattori non sono facilmente valutabili in termini economici, se non attraverso un'approfondita analisi finalizzata a determinare se il miglioramento conseguibile giustifica l'intervento. Non è detto, infatti, che la realizzazione della rete nel contesto urbano considerato sia perseguibile senza costi non sostenibili, pur garantendo vantaggi energetici e di

impatto ambientale. In tal caso, è preferibile, rispetto a sistemi che prevedano la presenza di reti di teleriscaldamento, una soluzione basata sull'utilizzo di sistemi di poligenerazione e cogenerazione di piccola taglia, collocati presso utenze singole (sistemi autonomi) o multiple (impianti condominiali).

Ulteriori studi, affiancati ad analisi economiche accurate, potranno consentire di confrontare queste diverse soluzioni di progettazione impiantistica alla scala urbana, di edificio ed utenza.

Conclusioni

L'attività di ricerca svolta in questi anni di Dottorato, presso il DING dell'Università degli Studi del Sannio di Benevento e il DII dell'Università degli Studi di Napoli Federico, ha condotto al lavoro di Tesi presentato, dal titolo "*Prestazioni energetiche degli edifici: metodologie, componenti e tecnologie per la riduzione della domanda di energia primaria del sistema edificio/impianti*".

Tale lavoro si inquadra nell'ambito della ricerca sul risparmio energetico connesso al controllo del microclima all'interno degli edifici, ampiamente dettagliata come tematica nel primo capitolo di questo lavoro di Tesi, in cui sono stati evidenziati i settori d'uso a maggior incidenza nel bilancio energetico nazionale e internazionale e i principali provvedimenti legislativi/normativi in materia di cambiamenti climatici e sviluppo sostenibile. L'approfondimento di queste tematiche ha consentito di analizzare criticamente il contesto normativo e legislativo riguardante l'efficienza energetica in edilizia, mettendo in evidenza le potenzialità di questo settore sia con riferimento alla progettazione ex-novo che soprattutto alla riqualificazione energetica del patrimonio edilizio.

In dettaglio, l'attività di ricerca condotta è stata prevalentemente di tipo modellistico e numerico, concentrandosi complessivamente su un duplice obiettivo:

- nel metodo: proporre un approccio complesso alla diagnosi delle prestazioni di edifici del terziario sia con valore storico che a destinazione d'uso complessa come gli edifici ospedalieri, incrociando procedure sperimentali e numeriche tali da garantire la completezza e l'affidabilità dei modelli su cui testare l'efficacia tecnica ed economica di interventi di retrofit sul sistema edificio/impianti;
- nel merito: analizzare componenti e tecnologie per la riduzione della domanda di energia primaria del sistema edificio/impianti in termini di strumenti numerici di simulazione e di parametri di prestazione, attraverso l'implementazione di casi studio reali, con un approccio prima di dettaglio sul singolo elemento di progettazione e poi globale sull'efficacia di "energy efficiency packages".

Tuttavia, l'approccio metodologico e applicativo all'analisi delle prestazioni del singolo edificio è solo una parte del lavoro sviluppato in questi anni di Dottorato. Infatti, il raggiungimento degli obiettivi comunitari in termini di sviluppo sostenibile richiede un'analisi che guardi l'efficienza energetica in termini di trinomio edificio/città/territorio. Pertanto, come discusso in questo elaborato, è stato sviluppato un nuovo approccio

metodologico che consenta la comprensione delle prestazioni energetiche di un intero territorio urbanizzato nonché sono state introdotte le “mappe energetiche urbane” quale strumento per un’evoluta pianificazione energetica a livello di distretto.

In queste conclusioni, si sintetizzeranno i principali aspetti della ricerca evidenziati nel lavoro di Tesi, mantenendo separati, solo per linearità di trattazione, i tre aspetti evidenziati:

- metodologia di analisi delle prestazioni del singolo edificio,
- analisi di componenti e tecnologie anche innovative per l’efficientamento del sistema edificio/impianti,
- strumenti di analisi delle prestazioni alla macro scala urbana.

Evidentemente, questi aspetti concorrono in maniera simultanea ad uno sviluppo integrato del sistema edificio/impianti, tale da superare l’obiettivo di un’edilizia “energeticamente efficiente”, per mirare, con più ambizione, ad un’edilizia “ad elevata qualità ambientale”, ritenuta la forma più evoluta del progettare sostenibile.

Una metodologia per l’analisi delle prestazioni del sistema edificio/impianti

Alla base della valutazione delle prestazioni energetiche di un edificio esistente è necessaria una accurata diagnosi energetica - cioè un’individuazione critica e documentata degli usi finali e dei consumi dell’edificio oggetto di studio, volta ad individuare e quantificare le opportunità di risparmio –necessaria per ogni accurato studio di fattibilità energetico/economico relativo alla ristrutturazione dell’edificio. Dall’esperienza maturata rispetto ai numerosi casi studio affrontati in questi anni, si ritiene che una diagnosi energetica debba prevedere due macro-fasi convergenti. La prima consiste nella caratterizzazione energetica dell’edificio, attraverso un accurato audit energetico supportato anche da misure in situ per stimare i parametri che condizionano significativamente i flussi energetici. In questo lavoro, pertanto, sono stati descritti i principali aspetti metodologici relativi all’analisi dell’utenza, alla raccolta dei dati sull’involucro edilizio e sugli impianti termo-tecnici installati. La seconda fase è rappresentata dalla simulazione tramite modello energetico dell’edificio, che, se opportunamente calibrato, consente risposte precise sugli effetti dell’installazione di tecnologie efficienti per il sistema edificio/impianti.

Dagli approfondimenti condotti sulle attuali metodologie di calcolo per gli indici di prestazione energetica, si è riscontrato che il calcolo del fabbisogno di energia, così come definito dalla norma EN ISO 13790, “*Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling*”, non consente di delineare con sufficiente grado di dettaglio il comportamento nel tempo del sistema

edificio/impianti. Una progettazione in grado di valutare le interazioni tra i diversi sottosistemi che interagiscono nel sistema edificio/impianti e di prevederne il comportamento al variare delle condizioni al contorno, necessita di strumenti di calcolo più avanzati di quanto richiesto dalla normativa. La simulazione numerica delle prestazioni degli edifici (*Building Energy Performance Simulation, BEPS*) costituisce, in questo senso, una possibile risposta. Nei casi studio sviluppati durante il dottorato, il motore di simulazione utilizzato è EnergyPlus (fino all'ultima versione v.8.1.0), con riferimento al quale sono state approfondite le procedure di calcolo relative all'implementazione ad esempio di materiali con proprietà termo-fisiche variabili, utilizzando un algoritmo di risoluzione alle differenze finite, o di schemi impiantistici e tecniche di gestione del microclima indoor non tradizionali e con un elevato grado di dettaglio dei dati di input.

In particolare, nel lavoro di Tesi presentato è stata discussa l'applicazione della metodologia di diagnosi energetica individuata a tre casi studio:

- Palazzo Dell'Aquila Bosco Lucarelli: sede amministrativa/didattica del Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi del Sannio, a Benevento;
- Palazzo Ex-Inps: sede amministrativa/didattica del Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi del Sannio, a Benevento;
- Edificio Day-Hospital dell'azienda ospedaliera "G. Pascale" di Napoli.

Tali casi studio sono rappresentativi di edifici del settore terziario, con diversa destinazione d'uso, epoca di costruzione e tecnologia costruttiva e quindi hanno consentito di evidenziare le peculiarità che si riscontrerebbero in ciascuna condizione e di generalizzare la metodologia di analisi e diagnosi delle prestazioni attuali messa a punto in applicazione a diverse situazioni.

Inoltre, nell'ottica di ottimizzare gli strumenti a disposizione per la diagnosi energetica, è stato presentato un modello numerico di risoluzione dei ponti termici implementato in Matlab che mira a semplificare (nell'ottica di ridurre, garantendo comunque un elevato grado di dettaglio), i metodi numerici ad oggi disponibili basati sulla risoluzione di funzioni di trasferimento nella rappresentazione in spazio di stato. La semplificazione consisterà nell'assumere che il vettore rappresentativo delle variabili di sistema sia minimamente legato alla variazione dei parametri ambientali, considerando time step simulativi sufficientemente ridotti. Di tale modello si è presentata la validazione attraverso il confronto con le soluzioni ottenute dall'applicazione di codici propri della termo fluidodinamica computazionale e attraverso indagini sperimentali con flussimetri e termo-camera ad infrarossi. L'analisi è stata condotta per diverse tipologie di ponte termico, tipiche degli edifici in cemento

armato, caratteristiche dello stock costruttivo Europeo, e in particolare: lo spigolo fra due muri esterni di uguale struttura; un pilastro d'angolo inserito in una muratura esterna; l'innesto a T tra una muratura esterna ed una muratura interna di differente struttura. I test di validazione, hanno evidenziato come al variare del numero di celle della griglia di calcolo, dei timesteps della simulazione, delle condizioni ambientali e del tipo di geometria analizzata per la determinazione del flusso termico, il metodo proposto ha un errore massimo mai superiore al 5% rispetto ai risultati che si otterrebbero con algoritmi di soluzione ai volumi finiti. Inoltre, è emerso che i tempi di calcolo, e quindi la potenza computazionale necessaria, sono estremamente contenuti rispetto alle analisi condotte mediante risolutori commerciali CFD. La validità del metodo proposto e l'applicazione, con risultati soddisfacenti, ai casi studio presentati, rappresentano elemento che incoraggia ulteriori studi. Infatti, come si evince dalla formulazione fisico-matematica, la possibile implementazione del metodo in programmi di analisi energetica dell'edificio risulta ragionevole e praticabile, consentendo di ottenere risultati più verosimili e vicini, rispetto alle attuali versioni di tali codici commerciali, alla reale prestazione energetica dell'involucro edilizio.

Componenti e tecnologie per la riduzione della domanda di energia primaria

L'evoluzione della normativa sul risparmio energetico ha portato alla diffusione di componenti e tecnologie anche innovative per l'ottimizzazione delle prestazioni del sistema edificio/impianti. Due sono gli elementi che tuttavia è necessario sottolineare. In primis, la legislazione vigente in termini di efficienza energetica ha condotto a progettazioni di involucri edilizi ermetici e iper-isolati e alla diffusione di componenti e tecnologie che non sembrano particolarmente idonei ad essere trasferite tout-court in un clima mediterraneo, in cui le condizioni climatiche estive e i correlati fabbisogni di condizionamento richiedono involucri molto più permeabili e attivi. Il secondo aspetto è relativo al fatto che l'attenzione al tema della progettazione e riqualificazione energetica efficiente talvolta non è affrontato con la necessaria attenzione, né in termini di metodologie di calcolo né di indicatori di prestazione. Questo è il caso ad esempio dei *Phase-Changing Materials (PCMs)* e dei *Green Roofs*, globalmente riconosciuti tra le tecnologie più promettenti per il miglioramento dell'efficienza energetica soprattutto con riferimento alla climatizzazione estiva. Proprio di queste due tecnologie, in questo elaborato di Tesi, sono state discusse metodologie di calcolo per l'analisi delle prestazioni energetiche ottenibili, anche mediante diversi studi di analisi di fattibilità, con l'obiettivo di valutarne l'efficacia in condizioni reali di utilizzo.

Relativamente ai PCM, due sono i casi studio presentati. Il primo prevede l'analisi dell'applicazione di un intonaco PCM su lato interno di un edificio adibito ad uso uffici

con struttura portante in cemento armato, per diverse località climatiche mediterranee (Ankara, Atene, Marsiglia, Napoli e Siviglia). Dalle simulazioni sviluppate in EnergyPlus si ricava che i materiali a cambiamento di fase non garantiscono lo stesso risultato in tutto il periodo di climatizzazione estiva e, in particolare, la maggiore efficienza si ottiene in climi semi-aridi con estati umide. Infatti, ad Ankara, il risparmio di energia primaria riferito alla climatizzazione estiva oscilla tra il 3.4%÷7.2%, mentre a Siviglia e Napoli il risparmio è sempre inferiore al 3.0%. Inoltre, è stato evidenziato che, fissato il calore latente di fusione, il parametro più influente sulla prestazione energetica è la temperatura di passaggio di fase, la cui scelta è funzione della località climatica e del periodo in cui si intende ottimizzare la scelta del materiale anche se, spesso, non è possibile definire un livello termico di passaggio di fase univoco e ottimale. Inoltre, analizzando i profili della temperatura operativa, si è evidenziato che l'applicazione di un intonaco a cambiamento di fase comporta livelli termici indoor (ad impianto spento) sempre inferiori rispetto all'edificio con intonaco tradizionale. Questo ha consentito di sottolineare che le potenzialità di questa tecnologia possono essere ancora maggiori se si utilizza un approccio "adattativo" nella gestione del controllo microclimatico in condizioni estive.

Il secondo caso studio, invece, ha riguardato il retrofit non invasivo di un edificio a destinazione d'uso mista commerciale e residenziale, attraverso l'applicazione di due intonaci PCM, le cui temperature di fusione sono state scelte affinché i due materiali potessero attivarsi alternativamente durante l'inverno e l'estate. L'edificio rappresentativo dello stock europeo dell'edilizia del '900 è stato simulato in cinque città: Bordeaux, Copenaghen, Napoli, Francoforte e Stoccolma.

Tutte le analisi fatte - al variare delle temperature di fusione, della posizione degli intonaci e del loro spessore - hanno mostrato che l'applicazione di due PCMs può indurre una effettiva riduzione del fabbisogno energetico annuale dell'edificio. Per alcune condizioni non è necessario l'intervento dell'impianto di climatizzazione per interi periodi, come ad esempio a Copenaghen, dove nei mesi di maggio e settembre il fabbisogno in raffrescamento si annulla, con 352 kg di anidride carbonica equivalente evitate rispetto all'edificio base. Le massime potenzialità in termini di riduzione del fabbisogno annuale sono state riscontrate a Napoli. Questa, infatti, è la città caratterizzata dal maggior carico di raffrescamento e dunque sul risultato annuale incide in maniera preponderante il contributo che l'applicazione del materiale a cambiamento di fase fornisce nel ridurre il fabbisogno per la climatizzazione estiva. L'analisi economica, inoltre, ha consentito di sottolineare come la peculiarità innovativa di questa tecnologia, sebbene efficace dal punto di vista energetico ed ambientale, non fornisce ancora una redditività economica (tempi di ritorno dell'investimento tre 25-30

anni). Tuttavia, l'aumento della domanda di tecnologie di risparmio energetico e il consolidamento dei risultati scientifici in questo campo, contribuiranno sicuramente alla diffusione di questa tecnologia, in modo da determinare una riduzione dei costi di installazione.

Infine, si vuole sottolineare come, partendo dai dati raccolti e dalla calibrazione dei modelli di simulazione utilizzati, i risultati della ricerca potranno confluire in una ricerca sperimentale che consenta di lavorare parallelamente alla progettazione del materiale, ottimizzandone i parametri prestazionali, e ai modelli di simulazione del comportamento di tali tecnologie, mediante sviluppo di appropriati algoritmi di calcolo e validando quelli attualmente in uso.

Con riferimento alle coperture a verde, cinque soluzioni diverse sono state confrontate, rispetto ad un tetto tradizionale ed una copertura con trattamento alto-riflettente. Dalle analisi energetiche, mediante simulazioni dinamiche, con riferimento a diversi climi europei, emerge che, su base annua:

- in climi caldi, le coperture riflettenti sono le più idonee per la riduzione del fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione;
- in climi moderati, le coperture a verde mostrano un'ottima prestazione estiva, senza penalizzare la richiesta energetica invernale;
- in climi freddi, i tetti verdi risultano idonei nel contrastare le perdite energetiche per scambio termico convettivo dovuto all'azione del vento, contribuendo anche alla riduzione del bisogno di raffrescamento.

In un'analisi di convenienza economica oltre che tecnica, le coperture a verde mostrano però rilevanti limiti, dovuti al costo connesso alla irrigazione, principalmente in climi caratterizzati da bassa intensità di precipitazioni. In conclusione, l'estesa analisi condotta suggerisce la necessità di un'accurata valutazione preventiva delle prestazioni ottenibili mediante ricorso a coperture a verde, i cui benefici sono presenti solo se la progettazione è calata nel contesto climatico/territoriale.

Come accennato, oltre all'analisi delle singole misure di efficienza energetica, per i casi studio di cui si è presentata la diagnosi energetica, è stato proposto un approccio globale alla riqualificazione energetica, coerente con il procedimento introdotto a livello comunitario dal "Cost Optimal", secondo la Direttiva EPBD Recast. Pertanto, i casi studio possono essere considerati un punto di partenza per l'applicazione di tale metodologia al settore terziario e all'edilizia storica, settori ancora non approfonditamente investigati.

Retrofit energetico di Palazzo Dell'Aquila Bosco Lucarelli

Relativamente alla progettazione del retrofit di Palazzo Dell'Aquila Bosco Lucarelli, il problema è stato duplice, essendo non solo una preesistenza, ma anche un edificio storico caratterizzato da un valore artistico ed architettonico importante. In particolare, sulla base dei risultati ottenuti dalla simulazione del modello energetico dell'edificio e tenendo conto delle indicazioni rilevate durante i diversi sopralluoghi effettuati, sono stati individuati e analizzati sette interventi. Ciascuno di questi ha mostrato buoni margini di riduzione dei fabbisogni di energia primaria (e analogamente delle emissioni di anidride carbonica equivalente), passando dal 2% per il miglioramento dell'isolamento dell'involucro attraverso l'applicazione di termo-intonaco interno, fino al 11% ottenuto attraverso la riduzione delle infiltrazioni. Qualche criticità si è riscontrata, invece, nella valutazione degli indici economici, poiché, come spesso accade, nelle progettazioni di involucri ad alta efficienza energetica, o anche negli interventi di riqualificazione, i costi sono abbastanza elevati.

Individuati gli interventi caratterizzati da maggiore efficacia e redditività, si sono valutate le prestazioni energetiche dell'edificio mediante applicazione integrata dell'intero pacchetto di misure di efficienza energetica selezionate (ad esclusione, quindi, della sostituzione dei vetri, dell'intervento di isolamento esterno e della sostituzione dei corpi illuminanti, per i quali il costo del kWh_{risparmiato}, utilizzato come indice di efficacia dell'investimento, è risultato molto sfavorevole). A questa configurazione di retrofit corrisponde una riduzione del fabbisogno di energia primaria e delle emissioni climalteranti complessivamente pari al 22%. Il costo economico di un tale miglioramento energetico (53'280 euro), considerando congrui tassi di attualizzazione, consente di essere recuperato in circa 11 anni, che, considerando la destinazione d'uso e l'importanza storico artistica dell'edificio, rappresentano un tempo accettabile e comunque molto inferiore al tempo di vita degli interventi stessi. I flussi di cassa attualizzati inoltre, rispetto ad un periodo temporale ventennale, sono risultati positivi, con un VAN di oltre 30'000 euro.

Infine, per ottenere un risultato di sintesi del lavoro svolto, si è analizzata la prestazione dell'edificio ad una valutazione del tipo Asset Rating. Gli interventi di riqualificazione proposti, qualora fossero applicati, permetterebbero di portare l'indice di prestazione per la climatizzazione invernale da 23.6 kWh/(m³a) a 8.65 kWh/(m³a), determinando un passaggio dalla classe energetica "G" dello stato attuale, riferita alle prestazioni invernali, alla classe "D", senza recare danno o pregiudizio alla natura architettonica e monumentale dell'edificio.

Retrofit energetico di Palazzo EX-INPS

Anche per Palazzo EX-INPS, gli interventi di riqualificazione proposti sono stati desunti dalle criticità emerse dall'audit energetico. In particolare, dalle analisi fatte, è emerso che gli interventi più convenienti sono l'isolamento del solaio di copertura e la sostituzione dei componenti vetrati con infissi in legno e alluminio e vetrocamera basso-emissivo. Simulando il retrofit dell'edificio con questi due interventi, si è ricavata una riduzione del fabbisogno annuo di energia primaria del 33%, con una conseguente riduzione equivalente di emissioni climalteranti. Analizzando i risultati parziali, invece, si è valutato che - con riferimento al riscaldamento invernale - il risparmio mensile che si otterrebbe è nell'intervallo 30-45%. In estate, si verificano i benefici minori, poiché gli interventi scelti ottimizzano le prestazioni prettamente nella stagione di riscaldamento. Per ridurre il carico in raffrescamento, è necessario ipotizzare interventi che riguardino il sistema di illuminazione, o strategie di controllo e regolazione dei sistemi HVAC installati (ambiti questi oggetto di lavori futuri). Infatti, ad oggi si sta lavorando alla messa a punto del modello di simulazione dell'Impianto di Solar Heating and Cooling installato sull'edificio e che, a breve, dovrebbe entrare in esercizio.

Considerando la riqualificazione energetica proposta, il costo totale dell'investimento ipotizzato è di circa 89'200 €. Assumendo che per i primi cinque anni si possa usufruire degli incentivi previsti dal Conto Termico, il SPB è di 17 anni con un VAN a 20 anni di superiore a 9'000 €; questo risultato è ragionevole se si tiene conto della vite utile stimata delle misure di retrofit scelte (50 anni per l'isolamento e 35 per i sistemi trasparenti, in accordo ad esempi applicativi del "Buildings Performance Institute Europe"). Risultati ancora migliori si ottengono con scenari di attualizzazione più favorevoli (per l'investitore) ma più rischiosi, in cui si è immaginato un prezzo dell'energia elettrica caratterizzato da crescita più alta rispetto al tasso di attualizzazione di denaro.

Utilizzando un approccio standard all'analisi delle prestazioni energetiche, si è ricavato che, nelle condizioni attuali, l'edificio analizzato ha un indice di prestazione per la climatizzazione invernale $EP_i \approx 30.9 \text{ kWh}/(\text{m}^3 \text{ anno})$, con una classe energetica "G". Diversamente, l'edificio sottoposto a retrofit migliora notevolmente le prestazioni con riferimento alla stagione invernale, raggiungendo un EP_i pari a $7.05 \text{ kWh}/(\text{m}^3 \text{ anno})$ e quindi una classe energetica "C".

Retrofit energetico del Day-Hospital dell'Istituto G. Pascale

Nell'ambito dello studio di edifici a destinazione d'uso complessa, rispetto ai quali è stata indagata la prestazione energetica dell'edificio Day-Hospital dell'Istituto G. Pascale, l'adozione di tecnologie tradizionali - quali l'isolamento a cappotto e

l'adozione di componenti trasparenti performanti – costituisce una soluzione valida, sia per il risparmio energetico che per l'ottenimento di una maggiore stabilità microclimatica. Tuttavia, i risparmi energetici ottenibili sono considerevoli se riferiti al fabbisogno imputabile al solo involucro edilizio (es. l'aumento dell'isolamento termico riduce le dispersioni attraverso i componenti opachi del 44%), mentre, considerando, anche il carico di ventilazione, il ruolo primario è rivestito dalla riqualificazione degli impianti di climatizzazione. Relativamente al caso studio indagato, l'ottimo delle analisi di tecnico-economiche effettuate è rappresentato da soluzioni impiantistiche con controllo del carico latente e sensibile disaccoppiato, con idoneo sistema di recupero del calore dall'aria di espulsione (senza rischi di contaminazione tra aria di rinnovo ed aria esausta). Cospicui risparmi energetici si possono ottenere con una gestione differenziata delle zone termiche, sia in termini di controllo della temperatura che dell'umidità relativa.

In particolare, l'adozione di impianti misti del tipo ad aria primaria/espansione diretta, con recupero termico, set-point variabili e controllo del carico latente solo laddove necessario, consente di risparmiare quasi il 70% dell'energia primaria richiesta da un tradizionale impianto misto aria/acqua, senza recupero di calore e indistinto controllo del microclima in ciascuna zona termica. Tale configurazione è risultata anche più efficiente di un impianto misto aria/acqua (aria primaria/ventilconvettori) dalle analoghe caratteristiche, per quanto riguarda il recupero di calore e la differenziazione del controllo sensibile e latente. In particolare, ai risparmi energetici sono associati soddisfacenti indici economici. Infatti, considerando un tasso di attualizzazione del 3.0%, il tempo di ritorno dell'investimento è risultato di circa 3 anni mentre il valore attuale netto (su un periodo utile di valutazione di 15 anni) è risultato 275'195 € (186'036 € con un tasso di attualizzazione del 7%).

Mappe energetiche urbane: elementi innovativi di gestione del patrimonio edilizio e di pianificazione di interventi di razionalizzazione energetica

Partendo dall'approfondimento delle tematiche relative ad una pianificazione urbana improntata a criteri di sostenibilità ambientale, e sfruttando il potenziale insito nei Sistemi Informativi Geografici, è stata formalizzata una procedura di analisi che, applicata al trinomio edificio-città-territorio, consente la caratterizzazione energetica del patrimonio edilizio di ampi contesti urbani. La metodologia, presentata, con applicazione al centro storico della città di Benevento, modifica e semplifica gli schemi proposti dalle normative per il calcolo delle prestazioni energetiche, in modo da renderle applicabili in maniera rapida ad un numero elevato di edifici.

Nel merito, l'utilizzo del Sistema Informativo Territoriale e un'accurata indagine censuaria hanno permesso l'acquisizione, l'archiviazione, l'analisi e la visualizzazione geo-referenziata di dati relativi alle caratteristiche geometriche e termo-fisiche di ciascun edificio, alla destinazione d'uso, all'epoca costruttiva e allo stato abitativo. La domanda di energia, per ogni architettura, è stata determinata incrociando i dati acquisiti con le informazioni ricavabili dalle indagini censuarie (ISTAT / ENEA) e i risultati di correlazioni fisiche predittive, partendo, ad esempio, dall'incidenza della compattezza di un edificio rispetto alla sua domanda di energia per il riscaldamento e la climatizzazione estiva. Per stabilire la veridicità dei risultati ottenuti, questi sono stati confrontati con i dati disponibili rispetto a fabbisogni energetici misurati di edifici reali e con lo scostamento che si avrebbe con studi di dettaglio condotti mediante simulazione termo-energetica dinamica. Il confronto ha mostrato scostamenti mai superiori al 10%.

Il metodo, i risultati, e la loro affidabilità hanno portato all'elaborazione di "mappe energetiche urbane", (MEU), che costituiscono un'ulteriore possibilità per i decisori di mettere a punto opportune politiche di governo del "sistema città", improntate al risparmio energetico e ispirate al più generale obiettivo dello sviluppo urbano sostenibile. Infatti, la visualizzazione geo-referenziata consente di individuare subito l'identificativo e la posizione degli edifici caratterizzati dai fabbisogni più elevati, nonché la relativa classificazione, in modo da delineare opportune strategie d'intervento.

Tra le potenzialità indagate, durante gli anni di dottorato, in applicazione a questo mezzo di gestione delle aree urbane, c'è la progettazione impiantistica. Infatti, il GIS rappresenta un mezzo efficace per il coordinamento delle scelte a livello territoriale e ambientale, permettendo l'elaborazione e la visualizzazione di numerose informazioni, la cui diretta correlazione può fornire un valido supporto ad esempio alla progettazione di reti di teleriscaldamento/teleraffrescamento per un distretto urbano.

Nel dettaglio, per il centro storico di Benevento è stata dimensionata, e simulata con Trnsys, una rete servita da un *Combined Cooling, Heating and Power (CCHP) system* e asservita a due sezioni censuarie. Il sistema proposto consente risparmi di energia primaria dell'ordine del 17% e riduzioni delle emissioni climalteranti del 31% rispetto ad una configurazione tradizionale, in cui ciascun edificio è dotato di impianto autonomo con caldaia a gas e pompa di calore elettrica.

Evidentemente, il caso studio proposto vuole essere esemplificativo delle potenzialità offerte dai sistemi informativi territoriali in associazione a politiche di gestione energetica del territorio. Infatti, gli interventi finalizzati al risparmio energetico attuabili in un contesto urbano possono riguardare edifici o quartieri nuovi oppure opere di riqualificazione di edifici o aree urbane già esistenti. Mentre nel primo caso la libertà di scelta, tra varie soluzioni, dipende prevalentemente da vincoli tecnico-

economici abbastanza facilmente identificabili e quantificabili, nel secondo caso, invece, i vincoli devono tenere conto anche di altri elementi, che un'analisi poco approfondita non permette di individuare per quanto concerne gli aspetti relativi all'efficacia tecnica ed economica.

In conclusione, il progetto di ricerca sviluppato in questi anni di Dottorato, presentato in questo elaborato finale, potrebbe avere sia un riscontro attuativo come metodologia da esportare per l'analisi delle prestazioni reali e potenziali degli edifici a sostegno di una progettazione e riqualificazione integrata, sia potrebbe costituire punto di partenza per individuare le basi teoriche e metodologiche per la definizione Reference Building per il settore terziario. La normativa sul risparmio energetico in edilizia, infatti, sta subendo una progressiva e radicale trasformazione dovuta all'esigenza sempre più frequente di stabilire valori di riferimento (benchmark) per la valutazione delle prestazioni energetiche reali dei sistemi edifici/impianti e di stimare i costi energetici ed economici di consumo per la stesura di contratti di gestione del servizio energia. La definizione di Reference Building costituisce, in tal senso, lo start-up per l'applicazione della nuova metodologia di classificazione delle prestazioni prescritta a livello europeo dal Regolamento delegato n. 244/2012 della Commissione Europea del 16 gennaio 2012, da recepire, nell'immediato futuro, dalle legislazioni nazionali dei paesi membri.

Segue, alle pagine successive, un elenco dei lavori scientifici prodotti, in collaborazione con il gruppo di ricerca, durante il Triennio di Scuola di Dottorato.

Elenco delle pubblicazioni

- [1] Valutare la domanda di energia nella pianificazione urbanistica: le mappe energetiche urbane (in collaborazione con: L. Bellia, F. Ascione, F. de' Rossi, R. Fistola, G. P. Vanoli), Memoria presentata al Convegno Nazionale "Città - Energia", Napoli, 20 - 21 gennaio 2012.
- [2] Energy assessment in town planning: Urban Energy Maps (in collaborazione con F. Ascione, F. de' Rossi, R. Fistola, G.P. Vanoli). Negli Atti del Convegno Internazionale Sustainable City 2012 - 7th International Conference on Urban Regeneration and Sustainability, Wessex Institute of Technology, Ancona, 7 - 9 maggio, 2012.
- [3] Diagnosi energetica per la riqualificazione dell'edilizia abitativa esistente nei climi italiani. Analisi di convenienza tecnica, economica e di sostenibilità ambientale (in collaborazione con: F. Ascione, F. de' Rossi, T. Perone, G.P. Vanoli). Rivista Nazionale La Termotecnica (Organo Ufficiale del Comitato Termotecnico Italiano), Gennaio / Febbraio 2012, n. 8 pagine.
- [4] Trasmissione del calore attraverso ponti termici. Verifica di un metodo numerico di risoluzione, per l'integrazione in codici dinamici di simulazione (in collaborazione con: F. Ascione, N. Bianco, F. de' Rossi, G. Mauro, G.P. Vanoli). Pubblicazione negli Atti del 67° Congresso Nazionale ATI, Trieste, 11 - 14 Settembre 2012.
- [5] Rehabilitation of the building envelope of hospitals: Achievable energy savings and microclimatic control on varying the HVAC systems in Mediterranean climates (in collaborazione con: F. Ascione, N. Bianco, G.P. Vanoli). Rivista Internazionale Energy and Buildings, Volume 60, 2013, pp. 125 - 138. Editor Elsevier, Impact Factor (attuale) 2.386.
- [6] Distributed generation systems for thermal and electrical demands of urban districts: experimental and numerical application to an italian historical center (in collaborazione con: F. Ascione, M. Canelli, M. Sasso, G.P. Vanoli). Proceedings of "Microgen III" International Conference, Napoli, 15 - 17 aprile 2013.
- [7] Analysis and diagnosis of the energy performance of buildings and districts: Methodology, validation and development of Urban Energy Maps (in collaborazione con: F. Ascione, F. de' Rossi, R. Fistola, M. Sasso, G.P. Vanoli).

- Rivista Internazionale Cities, Volume 35, 2013, pp.270 - 283. Editor Elsevier, Impact Factor (attuale) 1.143.
- [8] Energy-oriented refurbishment for the largest health care facility of South Italy. Surveys, modeling, energy optimization of building envelopes and HVAC systems (in collaborazione con: F. Ascione, N. Bianco, F. de' Rossi, C. De Stasio, G. Improta, G.P. Vanoli, C. Verdoliva). Proceedings of 31st UIT Heat Transfer Conference, Como, 25 – 27 giugno 2013.
- [9] Energy refurbishment of existing buildings through the use of phase change materials: Energy savings and indoor comfort in the cooling season (in collaborazione con: F. Ascione, N. Bianco, F. de' Rossi, G.P. Vanoli). Rivista Internazionale Applied Energy, Volume 113, 2014, pp. 990 – 1007. Editor Elsevier, Impact Factor (attuale) 4.781.
- [10] Simplified state space representation for evaluating thermal bridges in building: Modelling, application and validation of a methodology (in collaborazione con: F. Ascione, N. Bianco, F. de' Rossi, G.P. Vanoli). Rivista Internazionale Applied Thermal Engineering, Volume 61, 2013, pp. 344 - 354. Editor Elsevier, Impact Factor (attuale) 2.127.
- [11] Riqualficazione dell'involucro edilizio di ospedali in climi mediterranei: risparmio energetico e controllo microclimatico al variare della tipologia di impianto di climatizzazione (in collaborazione con: F. Ascione, N. Bianco, F. de' Rossi, G. P. Vanoli). Memoria presentata al 5° Congresso Nazionale S.I.A.I.S, Firenze (Careggi), 24 - 26 ottobre 2013.
- [12] Combined cooling, heating and power for small urban districts: An Italian case-study (in collaborazione con: F. Ascione, M. Canelli, M. Sasso, G.P. Vanoli). Rivista Internazionale Applied Thermal Engineering, In Press, Corrected Proof, Available online 5 November 2013, <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.10.058>. Editor Elsevier, Impact Factor (attuale) 2.127.
- [13] Energy retrofit of an educational building in the ancient center of Benevento. Feasibility study of energy savings and respect of the historical value (in collaborazione con F. Ascione, N. Bianco, F. de' Rossi, G. P. Vanoli). Proceedings of 49th Edition of AiCARR International Conference, Historical and existing buildings: designing the retrofit, Roma, 26 - 28 Febbraio 2014.

- [14] Energy retrofit of tertiary buildings by installation of a double PCM wallboard: Sensitivity analysis for common European climates (in collaborazione con F. Ascione, N. Bianco, C. De Stasio, G. P. Vanoli). Proceedings of 8th International Conference Improving Energy Efficiency in Commercial Buildings (IEECB'14), Francoforte, 2 – 4 aprile 2014.
- [15] Energy-oriented refurbishment of a Railway Station in Mediterranean climates: a case study of cost optimal analysis (in collaborazione con F. Ascione, N. Bianco, F. de' Rossi, A. Romano, G. P. Vanoli). Proceedings of 8th International Conference Improving Energy Efficiency in Commercial Buildings (IEECB'14), Francoforte, 2 – 4 aprile 2014.
- [16] Experimental validation of a numerical code by thin film heat flux sensors for the resolution of thermal bridges in dynamic conditions (in collaborazione con F. Ascione, N. Bianco, G. Mauro, M. Musto, G. P. Vanoli). Sottomesso alla Rivista Internazionale Applied Energy, ad oggi (17 marzo 2014) formalmente accettato dai revisori. In attesa di assegnazione DOI.

Bibliografia

- [1] Commission of the European Communities. Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European economic and social Committee and the Committee of the regions: 20 20 by 2020, Europe's climate change opportunity. COM (2008) 30, 23 Gennaio 2008.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2007: I Principi Fisici di Base. Disponibile online (www.ipcc.ch/pdf/reports-nonUN-translations/italian/ar4-wg1-spm.pdf)
- [3] European Parliament. European Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC, 25 Ottobre 2012.
- [4] European Parliament. European Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings, 16 Dicembre 2002.
- [5] European Parliament. European Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings (recast), 19 Maggio 2010.
- [6] Parlamento della Repubblica Italiana. Decreto legislativo del 19 Agosto 2005, n. 192. Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia (G.U. n. 222 del 03.09.2005).
- [7] Parlamento della Repubblica Italiana. Legge del 3 Agosto 2013, n.90. Conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 4 giugno 2013, n. 63, recante disposizioni urgenti per il recepimento della Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica nell'edilizia per la definizione delle procedure d'infrazione avviate dalla Commissione europea, nonché' altre disposizioni in materia di coesione sociale (GU Serie Generale n.181 del 3-8-2013).
- [8] Parlamento della Repubblica Italiana. Legge del 30 Aprile 1976, n. 373. Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici (GU n.148 del 7-6-1976).
- [9] European Parliament. Guidelines accompanying Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings by establishing a comparative methodology framework for calculating cost-optimal levels of minimum energy performance requirements for buildings and building elements.
- [10] Parlamento della Repubblica Italiana. SEN. Strategia Energetica Nazionale: per un'energia più competitiva e sostenibile, Marzo 2013.

Riferimenti bibliografici

- [11] BP Statistical Review of World Energy 2012, Giugno 2013. Disponibile online (www.bp.com).
- [12] Odysee. Energy efficiency policies in the EU/Lessons from the Odysee-Mure Project, 13 Settembre 2013. Disponibile online (www.odyssee-indicators.org/publications/PDF/MURE-Overall-Policy-Brochure.pdf).
- [13] European Parliament. Commission of the European Communities. Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European economic and social Committee and the Committee of the regions: Energy Efficiency Plan 2011. COM(2011) 119, 8 Marzo 2011.
- [14] UNEP. Bridging the Emissions Gap. A UNEP Synthesis Report, Novembre 2011. Disponibile online (www.unep.org/pdf/unep_bridging_gap.pdf).
- [15] Commission of the European Communities. Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European economic and social Committee and the Committee of the regions: A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050. COM (2011) 112, 8 Marzo 2011.
- [16] Ministero dello sviluppo economico. Bilancio di Sintesi dell'energia in Italia, dati provvisori del 26 Aprile 2013.
- [17] ENEA. RAEE 2011 - Rapporto Annuale Efficienza Energetica, Dicembre 2012.
- [18] Ministero dello Sviluppo Economico. PAEE 2007: Piano d'Azione Efficienza Energetica, Luglio 2007.
- [19] Ministero dello Sviluppo Economico. PAEE 2011: Piano d'Azione Efficienza Energetica, Luglio 2011.
- [20] CRESME. Il potenziale (espresso e inespresso) dell'attività di riqualificazione, 6 Giugno 2012.
- [21] ISTAT: 15° Censimento generale della popolazione e delle abitazioni, 2011.
- [22] ENEA. Le detrazioni fiscali del 55% per la riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente: 2011, Marzo 2013.
- [23] ENEA. QSN. Quadro Strategico Nazionale 2007-2013. Valutazione dell'impatto potenziale dei programmi operativi FESR sulla riduzione delle emissioni di gas serra, 2010.
- [24] POI. Programma Operativo Interregionale. Disponibile online (www.poienergia.gov.it).
- [25] ENEA. Rapporto Energia e Ambiente 2009-2010. I dati: Statistiche regionali.
- [26] PEAR. Proposta di Piano Energetico Ambientale Regionale per la Campania. Bollettino Ufficiale della Regione Campania n. 27 Speciale del 6 maggio 2009.

Riferimenti bibliografici

- [27] European Parliament. European Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC, 23 Aprile 2009.
- [28] European Parliament. European Directive 2009/29/EC of the European Parliament and of the Council amending Directive 2003/87/EC so as to improve and extend the greenhouse gas emission allowance trading scheme of the Community, 23 Aprile 2009.
- [29] Parlamento della Repubblica Italiana. Legge del 9 Gennaio 1991, n. 10. Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia (Supplemento Ordinario n. 6, GU n.13 del 16.1.1991).
- [30] Parlamento della Repubblica Italiana. Regolamento di esecuzione D.P.R. del 26 Agosto 1993, n. 412. Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della Legge 9 gennaio 1991, n. 10 (Supplemento Ordinario n. 6, GU n.242 del 14.10.1993).
- [31] Parlamento della Repubblica Italiana. Decreto legislativo del 29 Dicembre 2006, n. 311. Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia (Supplemento Ordinario n.26, GU n. 26 del 1.2.2007).
- [32] Parlamento della Repubblica Italiana. Regolamento di esecuzione D.P.R. del 2 Aprile 2009, n. 59. Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del decreto legislativo 19 Agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia (GU n. 132 del 10.6.2009).
- [33] UNI - Italian Organization for Standardization. Standard UNI/TS 11300 - Parte I: Prestazione energetica degli edifici-Determinazione del fabbisogno di energia dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale. Errata corrige del 22 Luglio 2010.
- [34] UNI - Italian Organization for Standardization. Standard UNI/TS 11300 - Parte II: Prestazione energetica degli edifici-Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria. Errata corrige del 25 Novembre 2010.
- [35] UNI - Italian Organization for Standardization. Standard UNI TS 11300 - Parte III: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva. Pubblicata a marzo 2010 e attualmente in revisione.
- [36] UNI - Italian Organization for Standardization. Standard UNI TS 11300 - Parte IV: Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria. Pubblicata il 10 maggio 2012.

Riferimenti bibliografici

- [37] Parlamento della Repubblica Italiana. Decreto Ministeriale del 26 Giugno 2009. Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici (G.U. n. 158 del 10.7.2009).
- [38] Parlamento della Repubblica Italiana. Decreto legislativo del 3 marzo 2011, n. 28. Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE (Supplemento Ordinario n. 81 GU n.71 del 28.3.2011).
- [39] Parlamento della Repubblica Italiana. Decreto Ministeriale del 28 dicembre 2012. Incentivazione della produzione di energia termica da fonti rinnovabili ed interventi di efficienza energetica di piccole dimensioni (Supplemento Ordinari n. 1 GU n.1 del 2.1.2013).
- [40] AICARR. Posizione di AICARR sul D.Lgs. 28/11 per gli aspetti riguardanti le rinnovabili termiche, Novembre 2011.
- [41] Comitato Termotecnico Italiano. Raccomandazione. CTI 14/2013: Prestazioni energetiche degli edifici - Determinazione dell'energia primaria e della prestazione energetica EP per la classificazione dell'edificio, 18 Febbraio 2013.
- [42] UNI - Italian Organization for Standardization. UNI EN 15193: Prestazione energetica degli edifici - Requisiti energetici per illuminazione, 2008 (con Errata corrige del 22-02-2011).
- [43] UNI - Italian Organization for Standardization. UNI EN 14501: Tende e chiusure oscuranti - Benessere termico e visivo - Caratteristiche prestazionali e classificazione, 2006.
- [44] U.S. Department of Energy Commercial. Reference Building Models of the National Building Stock. Report Tecnico, Febbraio 2011.
- [45] Corgnati S.P., Fabrizio E., Filippi M., Monetti V. Livelli di prestazione energetica ottimali per edifici a energia quasi zero: creazione degli edifici di riferimento. Contributo in Atti di Convegno: 67° Congresso Nazionale ATI, Trieste, 11-14 Settembre 2012.
- [46] ASHRAE. Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1, 2004. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- [47] ASHRAE. Energy Efficient Design of New Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1, 1989. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- [48] Building Performance Institute Europe (BPIE). Principles for Nearly Zero Energy Buildings. Paving the way for effective implementation of policy requirements. Report di Novembre 2011.
- [49] Ballarini I., Corgnati S.P., Corrado V., Talà, N. Building Typology Brochure – Italy. Fascicolo sulla Tipologia Edilizia Italiana, Italian TABULA. Report di Ottobre 2011.

- [50] Spiekman M., Westerlaken N. Reference buildings for EP calculation studies. Report of ASIEPI WP2, Ottobre 2009.
- [51] UNI - Italian Organization for Standardization. UNI EN 15459: Prestazione energetica degli edifici - Procedura di valutazione economica dei sistemi energetici degli edifici, 2008.
- [52] Building Performance Institute Europe (BPIE). Implementing the cost-optimal methodology in EU countries. Lessons learned from three case studies. Report di Marzo 2013.
- [53] Kurnitski J., Saari A., Kalamees T., Vuolle M., Niemelä J., Tark T. Cost optimal and nearly zero (nZEB) energy performance calculations for residential buildings with REHVA definition for nZEB national implementation. *Energy and Buildings* 43, pp. 3279–3288, 2011.
- [54] Becchio C., Fabrizio E., Monetti V. Livelli di prestazione energetica ottimali per edifici a energia quasi zero: il caso di un edificio multifamiliare. Contributo in Atti di Convegno: 67° Congresso Nazionale ATI, Trieste, 11-14 Settembre 2012.
- [55] Fabbri K., Tronchin L., Tarabusi V. The “cost-optimal levels” of energy performance requirements: rules and case study applications. Contributo in Atti di Convegno: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, Francia, 26-28 Agosto 2013.
- [56] European Council and Parliament. M/480 EN: Mandate to CEN, CENELEC and ETSI for the elaboration and adoption of standards for a methodology calculating the integrated energy performance of buildings and promoting the energy efficiency of buildings, in accordance with the terms set in the recast of the directive on the energy performance of buildings (2010/31/EU), 14 Dicembre 2010.
- [57] CEN – European Committee for Standardization. EN 15603: Energy performance of buildings - Overall energy use and definition of energy ratings, 2008.
- [58] CTI - Italian Thermotechnical Committee Energy and Environment. UNI EN ISO 13790: Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling, 2008.
- [59] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE Handbook – Fundamentals, Atlanta GA, USA, 2013.
- [60] U.S. Department of Energy, Energy Plus simulation software (varie versioni fino alla v.8.1.0).
- [61] European Council and Parliament. M/343 EN: Mandate to CEN, CENELEC and ETSI for the elaboration and adoption of standards for a methodology calculating the integrated energy performance of buildings and estimating the environmental impact, in accordance with the terms set forth in Directive 2002/91/EC, 30 Gennaio 2004.

- [62] CEN – European Committee for Standardization. CEN/BT WG 173 EPBD: Explanation of the general relationship between various CEN standards and the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) ("Umbrella document"), N. 36 Versione V5, 2005.
- [63] CEN – European Committee for Standardization. CEN/TR 15615: Explanation of the general relationship between various European Standards and the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) - Umbrella document, 2008.
- [64] CEN – European Committee for Standardization. EN 15217: Energy performance of buildings - Methods for expressing energy performance and for energy certification of buildings, 2007.
- [65] CEN – European Committee for Standardization. EN 13790: Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling, 2008.
- [66] CEN – European Committee for Standardization. EN 15316-1: Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 1: General, 2007.
- [67] CEN – European Committee for Standardization. EN 15316-2.1: Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 2-1: Space heating emission systems, 2007.
- [68] CEN – European Committee for Standardization. EN 15316-2.3: Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 2-3: Space heating distribution systems, 2007.
- [69] CEN – European Committee for Standardization. EN 15316-3.1: Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 3-1: Domestic hot water systems, characterisation of needs (tapping requirements), 2007.
- [70] CEN – European Committee for Standardization. EN 15316-3.2: Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 3-2: Domestic hot water systems, distribution, 2007.
- [71] CEN – European Committee for Standardization. EN 15316-3.3: Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 3-3: Domestic hot water systems, generation, 2007.
- [72] CEN – European Committee for Standardization. EN 15316-4.1: Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 4-1: Space heating generation systems, combustion systems (boilers), 2008.
- [73] CEN – European Committee for Standardization. EN 15316-4.2: Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 4-2: Space heating generation systems, heat pump systems, 2008.

- [74] CEN – European Committee for Standardization. EN 15316-4.3: Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 4-3: Heat generation systems, thermal solar systems, 2007.
- [75] CEN – European Committee for Standardization. EN 15316-4.4: Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 4-4: Heat generation systems, building-integrated cogeneration systems, 2007.
- [76] CEN – European Committee for Standardization. EN 15316-4.5: Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 4-5: Space heating generation systems, the performance and quality of district heating and large volume systems, 2007.
- [77] CEN – European Committee for Standardization. EN 15316-4.6: Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 4-6: Heat generation systems, photovoltaic systems, 2007.
- [78] CEN – European Committee for Standardization. EN 15316-4.7: Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 4-7: Space heating generation systems, biomass combustion systems, 2008.
- [79] CEN – European Committee for Standardization. EN 15243: Ventilation for buildings - Calculation of room temperatures and of load and energy for buildings with room conditioning systems, 2007.
- [80] CEN – European Committee for Standardization. EN 15241: Ventilation for buildings - Calculation methods for energy losses due to ventilation and infiltration in commercial buildings, 2007.
- [81] CEN – European Committee for Standardization. EN 15193: Energy performance of buildings - Energy requirements for lighting, 2007.
- [82] CEN – European Committee for Standardization. EN 15232: Energy performance of buildings - Impact of Building Automation, Controls and Building Management, 2007.
- [83] CEN – European Committee for Standardization. EN 15378: Heating systems in buildings - Inspection of boilers and heating systems, 2007.
- [84] CEN – European Committee for Standardization. EN ISO 15239: Ventilation for buildings - Energy performance of buildings - Guidelines for inspection of ventilation systems, 2007.
- [85] CEN – European Committee for Standardization. EN 15240: Ventilation for buildings - Energy performance of buildings - Guidelines for inspection of air-conditioning systems, 2007.
- [86] CEN – European Committee for Standardization. EN 15255: Energy performance of buildings - Sensible room cooling load calculation - General criteria and validation procedures, 2007.

- [87] CEN – European Committee for Standardization. EN 15265: Energy performance of buildings - Calculation of energy needs for space heating and cooling using dynamic methods - General criteria and validation procedures, 2007.
- [88] CEN – European Committee for Standardization. EN 15242: Ventilation for buildings - Calculation methods for the determination of airflow rates in buildings including infiltration, 2007.
- [89] CEN – European Committee for Standardization. EN ISO 13789: Thermal performance of buildings - Transmission and ventilation heat transfer coefficients - Calculation method (ISO 13789:2007), 2008.
- [90] CTI - Italian Thermotechnical Committee Energy and Environment. UNI EN 13363-1: Solar protection devices combined with glazing - Calculation of solar and light transmittance - Part 1: Simplified method, Errata Corrige 2010.
- [91] CEN – European Committee for Standardization. EN 15251: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics, 2007.
- [92] CEN – European Committee for Standardization. EN ISO 6946: Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method (ISO 6946:2007), 2007.
- [93] CEN – European Committee for Standardization. EN ISO 13786: Thermal performance of building components - Dynamic thermal characteristics - Calculation methods, 2007.
- [94] CEN – European Committee for Standardization. EN ISO 10456: Building materials and products - Hygrothermal properties - Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values (ISO 10456:2007), 2007.
- [95] CEN – European Committee for Standardization. EN ISO 10077-1: Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance - Part 1: General (ISO 10077-1:2006), 2006.
- [96] CEN – European Committee for Standardization. EN ISO 13370: Thermal performance of buildings - Heat transfer via the ground - Calculation methods (ISO 13370:2007), 2007.
- [97] CEN – European Committee for Standardization. EN ISO 10211: Thermal bridges in building construction - Heat flows and surface temperatures - Detailed calculations (ISO 10211:2007), 2007.
- [98] CEN – European Committee for Standardization. EN ISO 14683: Thermal bridges in building construction - Linear thermal transmittance - Simplified methods and default values (ISO 14683:2007), 2007.
- [99] CEN – European Committee for Standardization. EN 13779: Ventilation for non-residential buildings - Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems, 2007.

Riferimenti bibliografici

- [100]CEN – European Committee for Standardization. EN 1264-1: Water based surface embedded heating and cooling systems - Part 1: Definitions and symbols, Errata Corrige 2011.
- [101]CEN – European Committee for Standardization. EN 1264-2: Water based surface embedded heating and cooling systems - Part 2: Floor heating: Prove methods for the determination of the thermal output using calculation and test methods, Errata Corrige 2012.
- [102]CEN – European Committee for Standardization. EN 1264-3: Water based surface embedded heating and cooling systems - Part 3: Dimensioning, 2009.
- [103]CEN – European Committee for Standardization. EN 1264-4: Water based surface embedded heating and cooling systems - Part 4: Installation, 2009.
- [104]CEN – European Committee for Standardization. EN 1264-5: Water based surface embedded heating and cooling systems - Part 5: Heating and cooling surfaces embedded in floors, ceilings and walls - Determination of the thermal output, 2008.
- [105]CEN – European Committee for Standardization. EN ISO 13791: Thermal performance of buildings - Calculation of internal temperatures of a room in summer without mechanical cooling - General criteria and validation procedures (ISO 13791:2004), 2004.
- [106]CEN – European Committee for Standardization. EN ISO 15927-4: Hygrothermal performance of buildings - Calculation and presentation of climatic data - Part 4: Hourly data for assessing the annual energy use for heating and cooling (ISO 15927-4:2005), 2005.
- [107]Parlamento della Repubblica Italiana. Decreto legislativo del 30 Maggio 2008, n. 115. Attuazione della direttiva 2006/32/CE relativa all'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e abrogazione della direttiva 93/76/CEE (GU n.154 del 3.7.2008).
- [108]UNI - Italian Organization for Standardization. UNI 10339: Impianti aeraulici al fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti, 1995.
- [109]CEN – European Committee for Standardization. EN 14825: Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps, with electrically driven compressors, for space heating and cooling - Testing and rating at part load conditions and calculation of seasonal performance, 2013.
- [110]CTI - Italian Thermotechnical Committee Energy and Environment. UNI EN 14511- Part I: Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling - Part 1: Terms, definitions and classification, 2013.
- [111]CTI - Italian Thermotechnical Committee Energy and Environment. UNI EN 14511- Part II: Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling - Part 2: Test conditions, 2013.

Riferimenti bibliografici

- [112]CTI - Italian Thermotechnical Committee Energy and Environment. UNI EN 14511- Part III: Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling - Part 3: Test methods, 2013.
- [113]CTI - Italian Thermotechnical Committee Energy and Environment. UNI EN 14511- Part IV: Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling - Part 4: Operating requirements, marking and instructions, 2013.
- [114]CTI - Italian Thermotechnical Committee Energy and Environment. Relazione sulle attività CTI 2012 e sul programma di lavoro 2013-2014, Dicembre 2013
- [115]UNI - Italian Organization for Standardization. UNI 10349: Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici, Errata corrige 2 del 02.02.2012 alla UNI 10349:1994.
- [116]UNI - Italian Organization for Standardization. UNI 10351: Materiali da costruzione. Conduttività termica e permeabilità al vapore, 1994.
- [117]CTI - Italian Thermotechnical Committee Energy and Environment. UNI EN ISO 10456: Building materials and products - Hygrothermal properties - Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values, Errata corrige del 07.10.2010 alla UNI EN ISO 10456:2008.
- [118]CEN – European Committee for Standardization. EN 13788 Hygrothermal performance of building components and building elements - Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation - Calculation methods (ISO 13788:2012), 2012.
- [119]Parlamento della Repubblica Italiana. Regolamento d'esecuzione D.P.R. del 16 aprile 2013, n. 74. Regolamento recante definizione dei criteri generali in materia di esercizio, conduzione, controllo, manutenzione e ispezione degli impianti termici per la climatizzazione invernale ed estiva degli edifici e per la preparazione dell'acqua calda per usi igienici sanitari, a norma dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e c), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192).
- [120]Spitler J. D., McQuiston F. C., Lindsey K. Development of a Revised Cooling and Heating Load Calculation Manual. ASHRAE Transactions 99(1), pp.175-182, 1993,.
- [121]Department of Energy Program. DOE-2, Lawrence Berkeley National Laboratory, Hirsch & Associates, DOE release 2.1E, California, 1994.
- [122]BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics), program users manual. Volume 1: Supplement (version 3.0), Final Report Army Construction Engineering Research Lab., Champaign, IL, 1992.
- [123]Commission of the European Communities. Directorate General XII for Science, Research and Development. Data sets for computer simulations of solar Energy Systems and Energy Consumptions in Buildings. Test Reference Year, Try, 1985.

- [124]ASHRAE. International Weather for Energy Calculations (IWEC), International Weather for Energy Calculations (IWEC Weather Files) Users Manual and CD-ROM, Atlanta, ASHRAE, 2001.
- [125]National Renewable Energy Laboratory (NREL). Typical Meteorological Year 2 (TMY2), User's Manual for TMY2s, NREL/SP-463-7668, and TMY2s, Typical Meteorological Years Derived from the 1961-1990 National Solar Radiation Data Base, Golden, Colorado, 1995.
- [126]Mitalas G.P. Room dynamic Thermal Response. Contributo in Atti di Convegno: 4th International Symposium on the Use of Computers for Environmental Engineering Related to Buildings, Tokyo, Giappone, 30 Marzo - 2 Aprile 1983.
- [127]Wurtz E., DEque F., Mora L., Bozonnet E., Trompezinsky S. SIM_ZONAL: a software to evacuate the risk of discomfort: coupling with an energy engine, comparison with CFD codes and experimental measurements. Contributo in Atti di Convegno: 8th International IBPSA Conference, Agosto 2003.
- [128]AiCARR. Introduzione alla simulazione termo-energetica dinamica degli edifici. Guida AiCARR. Editoriale Delfino. Milano, Marzo 2012.
- [129] Beccali M., Mazzarella L., Motta M. Simplified models for building cooling energy requirement Contributo in Atti di Convegno: 7th IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil, 13–15 Agosto 2001.
- [130] Dijk H., Spiekman M., de Wilde P. A monthly method for calculation energy performance in the context of European building regulations. Contributo in Atti di Convegno: 9th IBPSA Conference, Montreal, Canada, 15–18 Agosto 2005.
- [131]Corrado V., Fabrizio E. Assessment of building cooling energy need through a quasi-steady state model: simplified correlation for gain-loss mismatch. *Energy and Buildings* 39 (5), pp. 569–579, 2007.
- [132]Jokisalo J., Kurnitski J. Performance of EN ISO 13790 utilization factor heat demand calculation method in a cold climate. *Energy and Buildings* 39 (2), pp. 236–247, 2007.
- [133]Kokogiannakis G., Strachan P., Clake J. Comparison of the simplified approach of the ISO 13790 standard and detailed modeling programs in a regulatory context. *Journal of Building Performance Simulation* 1 (4), pp. 209–219, 2008.
- [134]Kim Y.J., Yoon S.H., Park C.S. Stochastic comparison between simplified energy calculation and dynamic simulation *Energy and Buildings* 64, pp. 332–342, 2013.
- [135]Fistola R. Ecourbanistica: toward a new sustainable town planning. Contributo in Atti di Convegno: The Sustainable City VI, A Coruna, 14-16 Aprile 2010.
- [136]MC-Loughlingj B. La Pianificazione urbana e regionale, Marsilio Editori, Padova, 1973.
- [137]Bertuglia C.S. La città come sistema. Atti del 10° Corso: Processi di sviluppo dei sistemi urbani: modelli e strumenti di governo dell'economia del Territorio, Capri, 9-15 Aprile 1989.

Riferimenti bibliografici

- [138]Azzena G. Questioni terminologiche – e di merito – sui GIS in archeologia in Gottarelli A. (a cura di), Sistemi Informativi e reti geografiche in archeologia: GIS e Internet, VII Ciclo di Lezioni sulla Ricerca applicata in Archeologia. Certosa di Pontignano (Siena), 11-17 Dicembre 1995, Firenze 1997, pp. 33-43.
- [139]Favretto A. Nuovi strumenti per l'analisi geografica i G.I.S., Bologna 2000.
- [140]Fistola R. GIS - Teoria ed applicazione per la pianificazione, la gestione e la protezione della città, Gangemi Editore, Roma, 2009.
- [141]Ascione F., Bellia L., De Masi R.F., de' Rossi F., Fistola R., Vanoli G. P. Valutare la domanda di energia nella pianificazione urbanistica: le mappe energetiche urbane. Contributo in Atti di Convegno: Convegno Nazionale "Città - Energia", Napoli, 20 - 21 Gennaio 2012.
- [142]Ascione F., De Masi R.F., de' Rossi F., Fistola R., Vanoli G.P. Energy assessment in town planning: Urban Energy Maps. Contributo in Atti di Convegno: Sustainable City 2012 - 7th International Conference on Urban Regeneration and Sustainability, Wessex Institute of Technology, Ancona, 7 - 9 Maggio 2012.
- [143]Ascione F., De Masi R.F., de' Rossi F., Fistola R., Sasso M., Vanoli G.P. Analysis and diagnosis of the energy performance of buildings and districts: Methodology, validation and development of Urban Energy Maps. Cities 35, Dicembre 2013, pp. 270–283.
- [144]Bollettino ufficiale della regione Campania n.27: "Proposta di Piano Energetico Ambientale Regionale della Campania e avvio delle attività di consultazione, di valutazione ambientale e di stesura del Piano d'azione per l'Energia e l'Ambiente".
- [145]ISTAT: 14° Censimento generale della popolazione e delle abitazioni, 2001.
- [146]Ascione F., de' Rossi F., Vanoli G.P. Energy retrofit of historical buildings: theoretical and experiment investigations for the modelling of reliable performance scenarios. Energy and Buildings 43 (8), pp-1925-1936, 2011.
- [147]ENEA. Rapporto Energia e Ambiente: Analisi e scenari 2006.
- [148]CTI - Italian Thermotechnical Committee Energy and Environment. UNI CEI/TR 11428: Gestione dell'energia - Diagnosi energetiche - Requisiti generali del servizio di diagnosi energetica, 2011.
- [149]CTI - Italian Thermotechnical Committee Energy and Environment. UNI CEI EN 16247-1: Diagnosi energetiche - Parte 1: Requisiti generali, 2012.
- [150]ISO - International Organization for Standardization. ISO 9869: Thermal insulation, Building elements, In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance, 1994.

- [151]ASHRAE Guideline 14/2002. Measurement of Energy and Demand Savings. Approved by the ASHRAE Standards Committee, 22 Giugno 2002, and by the ASHRAE Board of Directors, 27 Giugno 2002.
- [152]Kreider J., Haberl J. Predicting Hourly Building Energy Usage: The Great Energy Predictor Shootout: Overview and Discussion of Results, ASHRAE Transactions Technical Paper 100, Giugno 1994.
- [153]Kreider J., Haberl J. Predicting Hourly Building Energy Usage: The Results of the 1993 Great Energy Predictor Shootout Identify the Most Accurate Method for Making Hourly Energy Use Predictions, ASHRAE Journal, pp. 72-81, Marzo 1994.
- [154]Haberl J., Thamilsaran S. Predicting Hourly Building Energy Use: The Great Energy Predictor Shootout II, Measuring Retrofit Savings – Overview and Discussion of Results, ASHRAE Transactions, Giugno 1996.
- [155]Ascione F., de' Rossi F., Vanoli G.P. Palazzo dell'Aquila Bosco-Lucarelli in Benevento. Analisi energetica in regime dinamico per la modellazione di scenari prestazionali realistici volti al retrofit energetico dell'edilizia storica. Capitolo del Libro "La Simulazione termoenergetica degli Edifici". Curatori: M. Filippi, E. Fabrizio. Collana Tecnica AICARR - Associazione italiana Condizionamento dell'Aria, Riscaldamento e Refrigerazione.
- [156]Ascione F., de' Rossi F., Vanoli G.P. Energy retrofit of historical buildings: theoretical and experimental investigations for the modelling of reliable performance scenarios. Energy and Buildings 43 (8), pp. 1925-1936, 2011.
- [157]Fabbri K. Energy incidence of historic building: Leaving no stone unturned. Journal of Cultural Heritage 14, pp.25–27, 2013.
- [158]Ascione F., Bianco N., De Masi R.F., de' Rossi F., Vanoli G.P. Energy retrofit of an educational building in the ancient center of Benevento. Feasibility study of energy savings and respect of the his-torical value. Contributo in Atti di Convegno: 49th Edition of AiCARR International Conference, Historical and existing buildings: designing the retrofit, Roma, 26-28 Febbraio 2014.
- [159]TERNA. Nota di sintesi, Dati statistici sull'energia elettrica. Disponibili on line (www.terna.it).
- [160]Grassi W., Testi D., Menchetti E., Della Vista D., Bandini L., Niccoli G., Grassini L. Valutazione dei consumi nell'edilizia esistente e M. benchmark mediante codici semplificati: analisi di edifici ospedalieri. Report ENEA, Marzo 2009.
- [161]AICARR. Posizione di AICARR sulla possibilità di risparmio energetico nelle strutture sanitarie esistenti, con particolare riferimento agli ospedali, Dicembre 2012.
- [162]Circ. Min. LL. PP. 13011 del 22 novembre 1974 "Requisiti fisico tecnici per le costruzioni edilizie ospedaliere: proprietà termiche, igrometriche, di ventilazione e di illuminazione".

Riferimenti bibliografici

- [163]Parlamento Italiano. Legge 135 - 5 Giugno 1990, Piano degli interventi urgenti in materia di prevenzione e lotta all'AIDS (G U n. 132, 8.6.1990).
- [164]Decreto del Presidente della Repubblica 14 gennaio 1997, Approvazione dell'atto di indirizzo e coordinamento alle regioni e alle province autonome di Trento e di Bolzano, in materia di requisiti strutturali, tecnologici ed organizzativi minimi per l'esercizio delle attività sanitarie da parte delle strutture pubbliche e private, 1997 (Supplemento Ordinario G.U. n. 42 del 20.02.1997).
- [165]ISPESL, Istituto Superiore per la Prevenzione e la Sicurezza dei Lavoro "Linee Guida per la definizione degli standard di sicurezza e di igiene ambientale dei reparti operatori", Approvato dal Consiglio Superiore di Sanità il 26-07-2002.
- [166]AIA Guidelines for Design and Construction of Hospital and Health Care Facilities, The American Institute of Architects Press, Washington, DC, 2006.
- [167]ASHRAE. Standard 62, Ventilation for Acceptable Indoor Air quality, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA, 1999.
- [168]Health care facilities, in: HVAC Applications Handbook, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., Atlanta, GA, 2011 (Chapter 8).
- [169]Stefanutti L. Applicazioni di impianti di climatizzazione, Capitolo 14, Ospedali, Tecniche Nuove, 1996.
- [170]Kosny J., Christian J. E. Thermal evaluation of several configurations of insulation and structural materials for some metal studs, *Energy and Buildings* 22, pp. 157-163, 1995.
- [171]Kosny J., Kossecka E. Multi-dimensional heat transfer through complex buildings envelope assemblies in hourly energy simulation programs, *Energy and Buildings* 34, pp. 445-454, 2002.
- [172]Kosny J., Kossecka E. Multi-dimensional heat transfer through complex buildings envelope assemblies in hourly energy simulation programs, *Energy and Buildings* 34, pp. 445-454, 2002.
- [173]Larbi B. Statistical modeling of heat transfer for thermal bridges of buildings, *Energy and Buildings* 37, pp. 945-951, 2005.
- [174]Déque F., Ollivier F., Poblador A. Grey boxes used to represent buildings with a minimum number of geometric and thermal parameters, *Energy and buildings* 31, pp. 29-35, 2000.
- [175]Déque F., Ollivier F., Roux J.J. Effect of 2D modeling thermal bridges on the energy performance of buildings Numerical application on the Matisse apartment, *Energy and buildings* 33, pp. 583-587, 2001.
- [176]Stephenson D. G., Mitalas G. P. Calculation of heat conduction transfer functions for multi-layered slabs, *ASHRAE Transactions* 77, part II, 1971.

- [177]Hittle D.C. Calculating building heating and cooling loads using the frequency response of multilayered slabs, Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, IL, 1981.
- [178]Hittle D.C., Bishop R. An improved root-finding procedure for use in calculating transient heat flow through multilayer slabs, *International Journal of Heat Mass Transfer* 26 (1), pp. 1685-1693, 1983.
- [179]Ascione F., Bianco N., de' Rossi F., Turni G., Vanoli G.P. Different methods for the modelling of thermal bridges into energy simulation programs: comparisons of accuracy for flat heterogeneous roofs in Italian climates, *Applied Energy* 97, pp. 405-418, 2012.
- [180]Zhai Z., Chen Q., Haves P., Klems J.H. On approaches to couple energy simulation and computational fluid dynamics programs, *Building and Environment* 37, pp. 857-864, 2002.
- [181]Zhai Z.J., Chen Q.I. Performance of coupled building energy and CFD simulations, *Energy Buildings* 37, pp. 333-344, 2005.
- [182]Zhai Z.J., Chen Q.I. Sensitivity analysis and application guides for integrated building energy and CFD simulation, *Energy Buildings* 38, pp. 1060-1068, 2006.
- [183]Seem J.E. Modelling of heat transfer in buildings, Ph.D. Thesis, University of Wisconsin, 1989.
- [184]Seem J.E., Klein S.A., Beckman W.A. and Mitchell J.W. Transfer function for efficient calculation of multidimensional transient heat transfer, *ASME Journal of Heat Transfer* 111, pp. 5-12, 1989.
- [185]Ceylan H.T., Myers G.E. Long-time solutions to heat conduction transient with time-dependent inputs. *ASME Journal of Heat Transfer* 102, pp. 115–120, 1980.
- [186]Ouyang K., Haghghat F. A procedure for calculating thermal response factors of multi-layered walls—state space method, *Building and Environment* 26, pp. 173–177, 1991.
- [187]Renon O. Thermal bridges modeling in EnergyPlus, *Building Energy Simulation user news* 23(4), 2002.
- [188]White F.M. Heat and mass transfer, Addison Wesley, Reading, MA, 1988.
- [189]Brogan W.L. Modern control theory, Prentice Hall, 1991.
- [190]Box G.E.P., Jenkins G.M., Time Series Analysis Forecasting and Control, prima edizione, Holden-Day, San Francisco, 1970.
- [191]Wiberg D.M., State Space and Linear Systems, prima edizione, McGraw-Hill Book Company, New York, 1971.
- [192]Zheng B., Wang G. Leverrier's algorithm and Cayley–Hamilton theorem for 2-D system, *Applied Mathematics and Computation* 160, pp. 725-738, 2005.
- [193]Marshall S.A. An approximate method for reducing the order of a linear system, *Control* 10, pp. 642-643, 1966.

- [194]Moore B. Principal Component Analysis in Linear Systems: Controllability, Observability and Model Reduction, IEEE Transactions on Automatic Control 26 (1), pp. 3-17, 1981.
- [195]Ghao Y., Roux J.J., Zhao L.H., Jiang Y. Dynamical building simulation: A low order model for thermal bridges losses, Energy and buildings 40, pp. 2236-2243, 2008
- [196]Matlab - MATrix LABORatory - 7.10.0. User's Guide, MathWorks, 2010.
- [197]Ascione F., Bianco N., De Masi R.F., de' Rossi F., Mauro G.M., Vanoli G.P. Trasmissione del calore attraverso ponti termici. Verifica di un metodo numerico di risoluzione, per l'integrazione in codici dinamici di simulazione. 167° Congresso Nazionale ATI – Trieste, 11-14 Settembre 2012
- [198]Ascione F., Bianco N., De Masi R.F., de' Rossi F., Vanoli G.P. Simplified state space representation for evaluating thermal bridges in building: Modelling, application and validation of a methodology. Applied Thermal Engineering 61, pp. 344-354, 2013.
- [199]Fluent 6.2., User Manual, Ansys Inc., Canonsburg, Pennsylvania, 2005.
- [200]ASHRAE. Handbook 2005. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc.; 2005.
- [201]The Covenant of Mayors, Committed to local sustainable energy. Technical annex to the SEAP template instructions document: the emission factors. Disponibile on line (<http://www.eumayors.eu>).
- [202]ISPRA. Produzione termoelettrica e produzione di CO₂, 2011, disponibile online (www.isprambiente.gov.it).
- [203]CTI - Italian Thermotechnical Committee Energy and Environment. UNI EN ISO 7730: Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale, 2006.
- [204]Ascione F., Bellia L., Capozzoli A., Minichiello F. Energy saving strategies in air-conditioning for museums. Applied Thermal Engineering 29 (4), pp. 676-686, 2009,.
- [205]Ascione F., Minichiello F. Microclimatic control in the museum environment: Air diffusion performance. International Journal of Refrigeration 33 (4), pp. 806-814, 2010.
- [206]Eurostat (2013), Energy Price Statistics (13 December 2013), Disponibile on line (http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Energy_price_statistics).
- [207]Diaconu B.M., Cruceru M. Novel concept of composite phase change material wall system for year-round thermal energy savings. Energy and Buildings 42, pp. 1759–1772, 2010.
- [208]Diaconu B.M. Thermal energy savings in buildings with PCM-enhanced envelope: Influence of occupancy pattern and ventilation. Energy and Buildings 43, pp. 101–107, 2011.

- [209]Qureshi W.A., Nair N.K.C., Farid M.M. Impact of energy storage in buildings on electricity demand side management. *Energy Conversion and Management* 52, pp. 2110–2120, 2011.
- [210]Castell A., Martorell I., Medrano M., Pe´ rez G., Cabeza .L.F. Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling. *Energy and Buildings* 42, pp. 534–540, 2010.
- [211]Ascione F., Bianco N., De Masi R.F., de Rossi F., Vanoli G.P. Energy refurbishment of existing buildings through the use of phase change materials: Energy savings and indoor comfort in the cooling season *Applied Energy* 113, pp. 990–1007, 2014.
- [212]Ascione F., Bianco N., De Masi R.F., De Stasio C., Vanoli G.P. Energy retrofit of tertiary buildings by installation of a double PCM wallboard: Sensitivity analysis for common European climates. *Proceedings of 8th International Conference "Improving Energy Efficiency in Commercial Buildings (IEECB'14)"*, Francoforte, 2-4 April 2014.
- [213]Tabares-Velasco P.C., Christensen C., Bianchi M. Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies. *Building and Environment* 54, pp. 186 -196, 2012.
- [214]Lessons from the ODYSSEE-MURE project. *Energy Efficiency Trends in Buildings in the EU*. Disponibile online (<http://www.odyssee-indicators.org/publications/PDF/Buildings-brochure-2012.pdf>).
- [215]Giamalaki K., Mohammad F. Thysell M. *Global Climate Classifications According to The Köppen Climate Classification*. Lundus University. Disponibile online (<http://www.univsul.org>).
- [216]Soares N., Costa J.J., Gaspar A.R., Santos P. Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency. *Energy and Buildings* 59, pp. 82–103, 2013.
- [217]Peippo K., Kauranen P., Lund PD. A multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating. *Energy and Buildings* 17 (4), pp. 259–270, 1991.
- [218]Markets and Markets, *Advanced Phase Change Material (PCM) Market By Type (Inorganic, Organic & Bio-Based) & Application (Building & Construction, Cold Storage, HVAC, Textile, Thermal Energy Storage, Electronics) – Global Trends & Forecast To 2018*, Aprile 2013
- [219]Saadatian O., Sopian K., Salleh E., Lim C.H., Riffat S., Saadatian E., Toudeshki A., Sulaiman M.Y. A review of energy aspect of green roofs, *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 23, pp. 155-178, 2013.
- [220]Castleton H.F., Stovin V., Beck S.B.M., Davison J.B. Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit, *Energy and Buildings* 42, pp.1582-1591, 2010.

- [221]Rincón L., Coma J., Pérez G., Castell A., Boer D., Cabeza L.F. Environmental performance of recycled rubber as drainage layer in extensive green roofs. A comparative Life Cycle Assessment, *Building and Environment* 74, pp. 22-30, 2014.
- [222]Sailor D.J. A green roof model for building energy simulation programs, *Energy and Buildings* 40 (8), pp. 1466–1478, 2008.
- [223]Peri G., Traverso M., Finkbeiner M. Rizzo G. The cost of green roofs disposal in a life cycle perspective: Covering the gap. *Energy* 48, pp. 406-414, 2010.
- [224]Ascione F., Bianco N., de' Rossi F., Turni G., Vanoli G.P. Green roofs in European climates. Are effective solutions for the Energy savings in air-conditioning?, *Applied Energy* 104, pp. 845-859, 2013.
- [225]Sun T., Bou-Zeid E., Ni G. "To irrigate or not to irrigate: Analysis of green roof performance via a vertically-resolved hygrothermal model, *Building and Environment* 73, pp. 127-137, 2014.
- [226]Rowe D.B., Kolp M.R., Greer S.E., Getter K.L. Comparison of irrigation efficiency and plant health of overhead, drip, and sub-irrigation for extensive green roofs, *Ecological Engineering* 64, pp.306–313, 2014.
- [227]Frankenstein S., Koenig G. FASST Vegetation Models, US. Army Corps of Engineers– Engineer Research and Development Center, 2004.
- [228]Euro Weather Statistics. Disponibile online (<http://www.eurometeo.com/english/home>).
- [229]European Energy Agency. Disponibile online (<http://eea.europa.eu>).
- [230]ANSI/ASHRAE/ASHE. Addendum to ANSI/ASHRAE/ASHE Standard 170-2008: Ventilation of Health Care Facilities, Giugno 2012.
- [231]Martinazzoli G. Gli Impianti Ospedalieri. Guida alla progettazione integrata. Editore La Nuova Italia Scientifica. Roma, 1995.
- [232]TRNSYS 17, a TRaNsient SYstem Simulation program, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 2010.
- [233]ASHRAE. Handbook - Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Systems and Equipment (I-P Edition), (2012). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Available at: www.knovel.com. Last access of authors: June 30th, 2013.

Indice delle figure

CAPITOLO 1: TRE VOLTE 20 PER IL 2020: L'EFFICIENZA ENERGETICA IN EDILIZIA

Figura 1.1: Proiezione al 2050 delle potenziali riduzioni delle emissioni di gas serra dell'UE.	25
Figura 1.2: Domanda di energia primaria per fonte, anno 2012.	26
Figura 1.3: Suddivisione dei consumi energetici nel settore residenziale.	28
Figura 1.4: Variazione consumo totale, elettrico e riscaldamento per abitazione (2000-2010).	28
Figura 1.5: Confronto consumi specifici edifici terziario per diverse destinazioni d'uso.	29
Figura 1.6: Indici di efficienza energetica (1990=100).	30
Figura 1.7: Riduzioni nei consumi finali di energia attesi al 2016 e 2020 (Mtep).	31
Figura 1.8: Il superamento degli impegni ambientali europei al 2020.	32
Figura 1.9: Costo medio risparmio energetico, €/tep, esempi.	33
Figura 1.10: Stock per epoca di costruzione.	35
Figura 1.11: Dati relativi alle documentazioni pervenute ad ENEA per detrazioni del 55%.	38
Figura 1.12: Risparmio energetico ed emissioni inquinanti: risultati cumulati per i diversi anni.	39
Figura 1.13: Consumi finali di fonti energetiche per settore economico - Anno 2008 (ktep).	44
Figura 1.14: Flow-chart dei principali provvedimenti relativi all'efficienza energetica in edilizia.	48
Figura 1.15: Modello di Attestato di certificazione energetica per edifici residenziali.	64
Figura 1.16: Modello di edificio per una scuola secondaria.	84
Figura 1.17: Pianta e prospetti del palazzo residenziale di riferimento.	85
Figura 1.18: Matrice tipologia edilizia della zona climatica E (progetto TABULA).	86
Figura 1.19: Matrice tipologia degli elementi d'involucro (progetto TABULA).	87
Figura 1.20: Schema riassuntivo per il calcolo del costo globale.	92
Figura 1.21: Esempio di determinazione della prestazione ottimale in funzione dei costi.	93
Figura 1.22: Relazione tra Cost Optimal e target energetico al 2020 (nZEB).	94
Figura 1.23: Flowchart della metodologia, con riferimento al contesto italiano.	95
CAPITOLO 2: LE METODOLOGIE DI CALCOLO DEGLI INDICI DI PRESTAZIONE ENERGETICA	
Figura 2.1: Classi energetiche per stabilire le prestazioni energetiche di un edificio.	105
Figura 2.2: Schema della normativa tecnica europea per il calcolo della prestazione energetica degli edifici.	109
Figura 2.3: Definizione di confine dell'edificio per l'applicazione della definizione di nZEB.	119
Figura 2.4: Relazione tra legislazione e normativa tecnica.	123
Figura 2.5: Determinazione del sistema edificio/impianto.	127
Figura 2.6: Esempio di angolo dell'orizzonte ombreggiato da un'ostruzione esterna.	129
Figura 2.7: Esempio di trasmittanza per una muratura a cassa vuota .	130
Figura 2.8: Catena di conversione energetica per impianti di riscaldamento in condominio.	134
Figura 2.9: Esempio di andamento dei valori di EER di una macchina frigorifera in funzione del fattore di carico.	137
Figura 2.10: Confine del sistema edificio.	141
Figura 2.11: Schema esemplificativo di sistema polivalente o pluri-energetico.	142

Figura 2.12: Successione dei processi in una simulazione termo-energetica non integrata.	152
Figura 2.13: Architettura del codice EnergyPlus.	153
Figura 2.14: Struttura, moduli di calcolo e logica operativa di EnergyPlus.	155
Figura 2.15: Struttura, moduli di calcolo e logica operativa di EnergyPlus.	159
Figura 2.16: Percentuale per numero di piani degli edifici del centro storico di Benevento.	167
Figura 2.17: Immagine reale e schema semplificato di due edifici contigui Benevento.	169
Figura 2.18: Modelli di simulazione per l'ombreggiamento.	177
Figura 2.19: Classificazione delle prestazioni energetiche del centro storico di Benevento.	180
Figura 2.20: Mappa delle prestazioni invernali del centro storico di Benevento.	181
Figura 2.21: Mappa delle prestazioni estive del centro storico di Benevento.	181
CAPITOLO 3: DEFINIZIONE DI UN MODELLO DI DIAGNOSI ENERGETICA PER GLI EDIFICI DEL TERZIARIO	
Figura 3.1: Schema generale per la diagnosi energetica di un edificio.	187
Figura 3.2: Metodi di valutazione della trasmittanza termica.	191
Figura 3.3: Schema di installazione dei sensori di misura.	192
Figura 3.4: Flow Chart del metodo per la costruzione / validazione del modello numerico.	198
Figura 3.5: Palazzo Dell'Aquila Bosco Lucarelli: a) vista frontale; b) vista dell'atrio a piano terra.	200
Figura 3.6: Pianta del primo piano.	201
Figura 3.7: Sezioni: a) longitudinale; b) trasversale.	201
Figura 3.8: Particolare muratura: a) piano terra; b) primo e secondo piano.	203
Figura 3.9: Solaio: a) particolare della copertura a falde; b) particolare della copertura del cortile.	204
Figura 3.10: Misure: a) endoscopia piano terra; b) posizionamento dei sensori lato esterno; c) termografia edificio.	205
Figura 3.11: Sistema di acquisizione: a) datalogger; b) dispositivo FE01.	206
Figura 3.12: Andamento delle temperature misurate.	207
Figura 3.13: Andamento del flusso termico.	207
Figura 3.14: Andamento della conduttanza termica.	208
Figura 3.15: Stratigrafia solaio e particolare della trave IPE ad ali parallele.	208
Figura 3.16: Andamento della conduttanza termica per la misura sul solaio.	209
Figura 3.17: Edificio reale (a) e modello di simulazione (b): vista dal lato Palazzo Giannone.	212
Figura 3.18: Edificio reale (a) e modello di simulazione (b): vista dal lato di Piazza Roma.	213
Figura 3.19: Fabbisogno di energia primaria riscaldamento: richieste reali e modello da simulazione.	215
Figura 3.20: Fabbisogno di energia elettrica: richieste reali e modello di simulazione.	216
Figura 3.21: Progetto originale: a) prospetto frontale, b) prospetto laterale.	218
Figura 3.22: Architettura attuale: a) planimetria del piano terra; b) vista dell'edificio dal lato di piazza Roma.	218
Figura 3.23: Fabbisogno di energia elettrica mensile per il riscaldamento e raffrescamento.	220
Figura 3.24: Termografia: a),c) vista dell'edificio dal lato di piazza Roma; b) particolare delle finestre lato sud; d) termografia dell'edificio sul lato est.	221
Figura 3.25: Misura in opera con termoflussimetro: a) Posizionamento dei sensori su una parete esposta a nord-est; b) andamento della conduttanza termica misurata.	222
Figura 3.26: Edificio reale (a) e modello di simulazione (b): vista dal lato di Piazza Roma.	223

Figura 3.27: Fabbisogno di energia elettrica: richieste reali e modello di simulazione	226
Figura 3.28: Struttura dell'Istituto Ospedaliero G.Pascale.	229
Figura 3.29: Day-Hospital: a) vista completa dell'edificio; b) pianta del piano tipo.	230
Figura 3.30: Misura con termoflussimetro: a) schema della parete esterna; b) posizionamento sensori lato interno del sottofinestra; c) posizionamento sensori lato esterno parete con rifinitura in mattoni.	232
Figura 3.31: Particolare delle zone termiche del piano terra.	235
Figura 3.32: Particolare delle zone termiche del secondo piano.	235
Figura 3.33: Edificio reale (a) e modello di simulazione (b).	236
Figura 3.34: Leggi di Variazione di temperatura (A) e radiazione solare incidente (B).	246
Figura 3.35: Primo ponte termico analizzato: a) geometria; b) griglia di calcolo.	247
Figura 3.36: Confronto tra il metodo proposto e quello di Seem.	247
Figura 3.37: Posizionamento dell'apparato sperimentale: A) posizione sensori di flusso e termoflussimetro; B) schema della posizione dei nodi.	249
Figura 3.38: Termografia del ponte termico analizzato.	249
Figura 3.39: Confronto tra il metodo CTF e i dati sperimentali quando $d=0.0m$: A) andamento del flusso termico; B) errore percentuale.	251
Figura 3.40: Confronto tra il metodo CTF e i dati sperimentali quando $d=0.15m$: A) andamento del flusso termico; B) errore percentuale.	251
Figura 3.41: Confronto tra il metodo CTF e i dati sperimentali quando $d=0.50m$: A) andamento del flusso termico; B) errore percentuale.	251
Figura 3.42: Tipologia di ponte termico analizzato: pilastro d'angolo.	252
Figura 3.43: Confronto tra il metodo CTF e FVM (Fluent) considerando la temperatura esterna costante: A) andamento del flusso termico; B) errore percentuale.	253
Figura 3.44: Confronto tra il metodo CTF e FVM (Fluent) considerando la temperatura esterna variabile: A) andamento del flusso termico; B) errore percentuale.	253
Figura 3.45: Confronto tra il metodo CTF e FVM (Fluent) considerando la temperatura esterna e la radiazione solare incidente variabili: A) andamento del flusso termico; B) errore percentuale.	254
Figura 3.46: Tipologia di ponte termico analizzato: innesto a T tra una muratura esterna ed una muratura interna di diversa struttura.	255
Figura 3.47: Confronto tra il metodo CTF e FVM (Fluent) considerando la temperatura esterna costante: A) andamento del flusso termico; B) errore percentuale.	256
Figura 3.48: Confronto tra il metodo CTF e FVM (Fluent) considerando la temperatura esterna variabile: A) andamento del flusso termico; B) errore percentuale.	256
Figura 3.52: Confronto tra il metodo CTF e FVM (Fluent) considerando la temperatura esterna e la radiazione solare incidente variabili: A) andamento del flusso termico; B) errore percentuale.	257
CAPITOLO 4: LA PROGETTAZIONE DELLA RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA: ANALISI DELLE PRESTAZIONI DEL SISTEMA EDIFICIO/IMPIANTI	
Figura 4.1: Ciclo di funzionamento (a) ideale e sperimentale (b) di un PCM.	267
Figura 4.2: Funzione temperatura/entalpia per un intonaco con proprietà a cambiamento di fase e temperatura di fusione pari a $26^{\circ}C$.	271
Figura 4.3: Configurazioni di retrofit analizzate: condizioni climatiche, condizioni di simulazione, spessore e temperatura di fusione del materiale a cambiamento di fase.	274
Figura 4.4: Ankara – Effetto di diverse configurazioni di retrofit sul fabbisogno estivo di energia	277

primaria.	
Figura 4.5: Marsiglia – Effetto di differenti spessori di intonaco PCM sul fabbisogno estivo di energia primaria.	277
Figura 4.6: "Not overheating time" al variare della temperature di fusione e della località climatica.	281
Figura 4.7: Ankara – Confronto tra i profili di temperatura operativa e temperatura media radiante.	282
Figura 4.8: Atene - Confronto tra i profili di temperatura operativa e temperatura media radiante.	282
Figura 4.9: Marsiglia - Confronto tra i profili di temperatura operativa e temperatura media radiante.	283
Figura 4.10: Napoli - Confronto tra i profili di temperatura operativa e temperatura media radiante.	283
Figura 4.11: Siviglia - Confronto tra i profili di temperatura operativa e temperatura media radiante.	283
Figura 4.12: a), b) Esempi di edifici a destinazione d'uso commercial/residenziale; c) Caso studio.	286
Figura 4.13: Configurazioni simulate per la posizione degli strati PCM.	288
Figura 4.14: Bordeaux (Francia) - Effetto di diverse configurazioni di PCM (T _{22/29}) sulle richieste energetiche annuali.	290
Figura 4.15: Napoli (Italia) - Effetto della temperatura di fusione di PCM _H sul fabbisogno di energia primaria in riscaldamento.	291
Figura 4.16: Napoli (Italia) - Effetto della temperatura di fusione di PCM _C sul fabbisogno di energia primaria in raffrescamento.	291
Figura 4.17: Performance Index of temperature per le migliori soluzioni di retrofit di ogni città.	293
Figura 4.18: Verde pensile estensivo ed intensivo (A), mono- e multi-strato (B), vegetazioni considerate (C).	295
Figura 4.19: Planimetrie e viste tridimensionali dell'edificio simulato.	297
Figura 4.20: Copertura tradizionale (A) e con trattamento riflettente (B).	297
Figura 4.21: Tenerife e Siviglia: energia primaria annuale al variare del tetto.	300
Figura 4.22: Roma e Amsterdam: energia primaria annuale al variare del tetto.	301
Figura 4.23: Londra e Oslo: energia primaria annuale al variare del tetto.	302
Figura 4.24: Roma e Amsterdam: Temperature esterne e superficiali interne per differenti soluzioni di copertura.	303
Figura 4.25: Costo del kWh risparmiato per gli interventi proposti.	311
Figura 4.26: Fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento e risparmio percentuale su base mensile.	311
Figura 4.27: Fabbisogno di energia elettrica e risparmio percentuale su base mensile.	312
Figura 4.28: Flussi di cassa attualizzati (interventi cumulati).	313
Figura 4.29: Costo del kWh risparmiato per ciascun intervento (en. primaria).	318
Figura 4.30: Fabbisogno di energia primaria e risparmio mensile percentuale.	319
Figura 4.31: Flussi di cassa attualizzati per lo scenario di retrofit ipotizzato.	319
Figura 4.32: Andamento della temperatura interna: a) periodo di riscaldamento; b) periodo di raffrescamento.	325
Figura 4.33: Andamento dell'umidità relativa: a) periodo di riscaldamento; b) periodo di raffrescamento.	326

Figura 4.34: Performance index for temperature e for umidity: a) periodo di riscaldamento; b) periodo di raffrescamento.	327
Figura 4.35: Schema delle due soluzioni impiantistiche: a) sistema fan-coil/ventilazione meccanica controllata; b) sistema misto aria/acqua senza recupero termico.	330
Figura 4.36: Schema delle due soluzioni impiantistiche: a) sistema misto aria/acqua; b) sistema misto aria/espansione diretta.	332
Figura 4.37: Confronto tra le condizioni di comfort con impianto misto aria/acqua e misto aria/acqua ad espansione diretta, in riscaldamento (a) e raffrescamento (b).	335
Figura 4.38: Flusso di cassa attualizzato per il sistema misto aria/acqua ad espansione diretta.	335
Figura 4.39: Micro rete a servizio di due sezioni censuarie e dettaglio della destinazione d'uso degli edifici.	340
Figura 4.40: Analisi energetica ed ambientale delle soluzioni proposte.	343

Indice delle Tabelle

CAPITOLO 1: TRE VOLTE 20 PER IL 2020: L'EFFICIENZA ENERGETICA IN EDILIZIA	
Tabella 1.1: Consumo di energia primaria nel mondo, confronto tra il 2001 e il 2012.	23
Tabella 1.2: Riduzioni attese delle emissioni inquinanti con le politiche di efficienza energetica.	25
Tabella 1.3: Consumi finali di energia 2012, distribuzione per fonti.	27
Tabella 1.4: Stock e attività di riqualificazione nelle abitazioni al 2001 e al 2011.	34
Tabella 1.5: Edifici per epoca di costruzione e stato manutentivo.	36
Tabella 1.6 Investimenti in riqualificazione nell'edilizia residenziale.	37
Tabella 1.7: Risorse finanziarie FESR per interventi con impatto sulle emissioni di gas serra.	41
Tabella 1.8: Consumi finali nel 2008 per tipologia di fonte in Campania.	44
Tabella 1.9: Abitazioni in edifici ad uso abitativo, suddivise per epoca di costruzione.	45
Tabella 1.10: Resoconto interventi ammessi alle detrazioni fiscali in Campania nel 2011.	46
Tabella 1.11: Valore atteso di fonti rinnovabili nel bilancio energetico al 2020 per l'Italia.	52
Tabella 1.12: EPI,lim [kWh/m ² anno] dal 1 gennaio 2010.	56
Tabella 1.13: Trasmittanza limite per le strutture opache verticali.	57
Tabella 1.14: Valori limite per EPe,invol.	58
Tabella 1.15: Qualità prestazionale per la climatizzazione estiva rispetto all' EPe,invol.	62
Tabella 1.16: Qualità prestazionale estiva rispetto ad attenuazione e sfasamento.	62
Tabella 1.17: Soggetti ammessi, tipologia e durata degli incentivi.	66
Tabella 1.18: Detrazione massima per tipologia di intervento.	76
Tabella 1.19: Valori di trasmittanza massimi consentiti per l'accesso agli incentivi.	77
Tabella 1.20: Requisiti di soglia minimi consentiti per l'accesso agli incentivi interventi 1C.	78
Tabella 1.21: Riferimenti per il calcolo dell'incentivo interventi sull'involucro edilizio.	79
Tabella 1.22: Coefficienti di calcolo dell'incentivo per tecnologia e valore massimo.	79
CAPITOLO 2: LE METODOLOGIE DI CALCOLO DEGLI INDICI DI PRESTAZIONE ENERGETICA	
Tabella 2.1: Tipi di calcolo per la valutazione energetica.	104
Tabella 2.2: Trasmittanza di energia solare totale per incidenza normale.	129
Tabella 2.3: Condizioni di riferimento per determinare l'indice EER in diverse condizioni di carico parziale delle macchine frigorifere.	139
Tabella 2.4: Priorità dei generatori.	143
Tabella 2.5: Distribuzione percentuale delle destinazioni d'uso e correlati tassi di rinnovo e carico interno.	168
Tabella 2.6: Zona climatica, gradi giorno, ore giornaliere di riscaldamento e periodo di riscaldamento per la città di Benevento.	170
Tabella 2.7: Irradianzione solare globale mensile su superficie verticale per Benevento.	170
Tabella 2.8: Sintesi dei valori utilizzati per i rendimenti dei sottosistemi.	171
Tabella 2.9: Confronto tra l'indice di prestazione calcolato e desunto da bolletta.	172
Tabella 2.10: Confronto tra l'indice di prestazione calcolato e quello determinato attraverso la simulazione dinamica.	172

Tabella 2.11: Differenza di temperatura equivalente per pareti verticali opache e solaio di copertura.	174
Tabella 2.12: Irradianza solare massima estiva incidente su superfici verticali.	175
Tabella 2.13: Temperatura sole aria e irradianza per Benevento.	176
Tabella 2.14: Effetto dell'ombreggiamento: riduzione del carico di raffreddamento.	178
Tabella 2.15: Confronto tra l'indice di prestazione calcolato e desunto da bolletta.	179
Tabella 2.16: Confronto tra il fabbisogno per la climatizzazione estiva calcolato e quello determinato attraverso la simulazione dinamica.	179
CAPITOLO 3: DEFINIZIONE DI UN MODELLO DI DIAGNOSI ENERGETICA PER GLI EDIFICI DEL TERZIARIO	
Tabella 3.1: Scheda per la ricognizione dei dati generali sul sito.	188
Tabella 3.2: Principali caratteristiche della località in cui è collocato l'edificio - Benevento.	202
Tabella 3.3: Stratigrafia parete del piano terra.	203
Tabella 3.4: Specifiche tecniche della termocamera utilizzata.	204
Tabella 3.5: Specifiche tecniche del termoflussimetro wireless.	105
Tabella 3.6: Valori calcolati per la conducibilità termica equivalente.	210
Tabella 3.7: Composizione dell'involucro: rapporto superfici opache e trasparenti.	219
Tabella 3.8: Principali dati relative alle zone termiche ricostruite per la simulazione.	224
Tabella 3.9: Condizioni di progetto per alcune funzioni interne all'edilizia ospedaliera.	228
Tabella 3.10: Dati climatici della città in cui è situato l'edificio – Napoli.	230
Tabella 3.11: Incidenza di ciascuna sottostruttura alla composizione della parete esterna.	232
Tabella 3.12: Carico sensibile in riscaldamento e raffrescamento dell'edificio Day-Hospital.	236
Tabella 3.13: Caratteristiche termofisiche dei materiali considerati.	252
Tabella 3.14: Tempo computazionale richiesto in funzione della geometria.	255
Tabella 3.15: Tempo computazionale richiesto in funzione della geometria.	258
CAPITOLO 4: LA PROGETTAZIONE DELLA RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA: ANALISI DELLE PRESTAZIONI DEL SISTEMA EDIFICIO/IMPIANTI	
Tabella 4.1: Vita utile attesa per i principali interventi di retrofit.	256
Tabella 4.2: Principali dati climatici estivi per le località climatiche considerate.	272
Tabella 4.3: Principali dati relativi alle zone termiche dell'edificio.	273
Tabella 4.4: Stratigrafia della parete esterna al variare dello spessore di intonaco PCM.	275
Tabella 4.5: Effetto di differenti configurazioni di retrofit sul risparmio di energia primaria in valore assoluto e percentuale per diverse località climatiche.	275
Tabella 4.6: Effetto di differenti spessori di intonaco PCM sul risparmio di energia primaria in valore assoluto e percentuale per diverse località climatiche.	275
Tabella 4.7: Ankara, effetto del valore della temperatura di fusione sul fabbisogno di energia primaria.	278
Tabella 4.8: Atene, effetto del valore della temperatura di fusione sul fabbisogno di energia primaria.	278
Tabella 4.9: Marsiglia, effetto del valore della temperatura di fusione sul fabbisogno di energia primaria.	279
Tabella 4.10: Napoli, effetto del valore della temperatura di fusione sul fabbisogno di energia primaria.	279
Tabella 4.11: Siviglia, effetto del valore della temperatura di fusione sul fabbisogno di energia	279

primaria.	
Tabella 4.12: Proprietà termofisiche degli intonaci PCM considerati.	285
Tabella 4.13: Descrizione geometrica dell'involucro edilizio.	285
Tabella 4.14: Dati relativi alle zone termiche.	287
Tabella 4.15: Trasmittanza termica dei componenti d'involucro opachi per le diverse località climatiche.	287
Tabella 4.16: LCA Emission factor per l'energia elettrica.	289
Tabella 4.17: Francoforte (Germania): Riduzione annuale e stagionale di energia primaria per diverse soluzioni di retrofit.	290
Tabella 4.18: Analisi energetica e ambientale per le migliori configurazioni di riqualificazione energetica ipotizzate.	292
Tabella 4.19: Caratteristiche dell'edificio e degli impianti di riscaldamento/raffrescamento installati.	297
Tabella 4.20: Caratteristiche delle coperture a verde modellate in EnergyPlus 5.0.0.	298
Tabella 4.21: Contesti climatici considerati: precipitazioni di acqua piovana .	299
Tabella 4.22: Efficienza parchi termo-elettrici nazionali e costo dei prodotti energetici nei vari paesi.	300
Tabella 4.23: a),b) energia primaria richiesta per il riscaldamento ed il raffrescamento, per diverse coperture e climi.	304
Tabella 4.24: Graminacea alta a Siviglia: calcolo pioggia assorbita, dell'evapo-traspirazione e dell'irrigazione necessaria.	304
Tabella 4.25: Costi di esercizio dell'edificio per il controllo microclimatico (energia e acqua di irrigazione).	305
Tabella 4.26: Costi di esercizio dell'edificio per il controllo microclimatico (dati aggregati).	305
Tabella 4.27: Extracosti per installazione delle soluzioni analizzate rispetto alla copertura tradizionale base.	306
Tabella 4.28: Risparmi economici rispetto alla soluzione di riferimento e tempo di rientro degli investimenti.	306
Tabella 4.29: Risultati dell'analisi energetica, (interventi cumulati).	312
Tabella 4.30: Scenari di attualizzazione per l'analisi economica.	315
Tabella 4.31: Caratteristiche tecniche e costi di investimento per la sostituzione dei component finestrati.	316
Tabella 4.32: Sintesi dell'analisi energetica, economica e di impatto ambientale per le azioni di retrofit.	318
Tabella 4.33: Carico sensibile di riscaldamento per l'edificio attuale e quello riqualificato .	323
Tabella 4.34: Carico sensibile di raffrescamento per l'edificio attuale e quello riqualificato.	323
Tabella 4.35: Fabbisogno d energia primaria annuale per le tre configurazioni impiantistiche.	325
Tabella 4.36: Fabbisogno di energi primaria per le due tipologie impiantistiche.	331
Tabella 4.37: Controllo microclimatico ottimizzato: Set-Point e Range di comfort.	333
Tabella 4.38: Confronto in termini di energia primaria tra impainto misto aria/acqua con recupero termico ed impianto aria/espansione diretta.	334
Tabella 4.39: Diametro e lunghezza dei tratti di rete.	340
Tabella 4.40: Risultati della simulazione.	342

**PRESTAZIONI ENERGETICHE DEGLI EDIFICI: METODOLOGIE, COMPONENTI E
TECNOLOGIE PER LA RIDUZIONE DELLA DOMANDA DI ENERGIA PRIMARIA
DEL SISTEMA EDIFICIO/IMPIANTI**

INTRODUZIONE : STRUTTURA, METODOLOGIA E FINALITÀ DELLA RICERCA	3
ABSTRACT: STRUCTURE, METHODOLOGY AND PURPOSES OF THE RESEARCH	11
CAPITOLO 1: TRE VOLTE 20 PER IL 2020: L'EFFICIENZA ENERGETICA IN EDILIZIA	18
1.1 Strategia energetica nazionale: un'energia più competitiva e sostenibile	22
1.1.1 Il contesto energetico internazionale	22
1.1.2 Le strategie europee per la de-carbonizzazione e lo sviluppo sostenibile	24
1.1.3 Energia e ambiente in Italia: i dati, la sfida e le opportunità	26
1.1.4 Una priorità per lo sviluppo sostenibile: l'efficienza energetica in edilizia	31
1.1.5 La riqualificazione energetica degli edifici: risultati e potenzialità	34
1.1.6 I fondi strutturali per l'efficienza energetica	40
1.1.7 Impatto regionale delle misure nazionali di risparmio energetico: la regione Campania	44
1.2 Efficienza energetica negli edifici: quadro normativo	47
1.2.1 Gli orientamenti internazionali	48
1.2.2 Il ruolo dell'Unione Europea nelle politiche ambientali mondiali	51
1.2.3 La prestazione energetica in edilizia in Italia fino al D.P.R 59/2009 e al D.M. del 26 Giugno 2009	54
1.2.4 Obiettivi e traiettorie per le energie rinnovabili	63
1.2.5 Il recepimento italiano della Direttiva 2010/31/UE	70
1.2.6 Gli strumenti di supporto finanziario	75
1.3 L'evoluzione delle politiche di efficienza energetica: dal limite prescrittivo al Reference Building	80
1.3.1 Il Reference Building	80
1.3.2 Definizione delle misure di efficienza energetica	87
1.3.3 Calcolo del fabbisogno di energia primaria	88
1.3.4 Calcolo del costo globale in termini di valore attuale netto	88
1.3.5 Analisi di sensibilità per i dati di costo	92
1.3.6 Derivazione di un livello ottimale di prestazione in funzione dei costi	92
1.3.7 Sintesi dell'applicazione della metodologia del "Cost Optimal"	95
CAPITOLO 2: LE METODOLOGIE DI CALCOLO DEGLI INDICI DI PRESTAZIONE ENERGETICA	97
2.1 Gli standard tecnici europei successivi alla EPBD	101
2.1.1 La direttiva sull'efficienza energetica (EPBD) e il ruolo del mandato M/343	101
2.1.2 Norme tecniche di riferimento: quadro di sintesi	106
2.1.3 Il recasting della EPBD e il ruolo del mandato M/480	119
2.2 Le procedure di calcolo europee ed italiane	121
2.2.1 Norma UNI/TS 11300: Parte I	123

2.2.2	Norma UNI/TS 11300: Parte II	130
2.2.3	Norma UNI/TS 11300: Parte III	135
2.2.4	Norma UNI/TS 11300: Parte IV	139
2.2.5	L'aggiornamento delle normative nel biennio 2013-2014	143
2.3	Strumenti e metodi per la simulazione energetica degli edifici	146
2.3.1	BEPS: Building Energy Performance Simulation	149
2.3.2	Introduzione alla simulazione dinamica con il software EnergyPlus	151
2.3.3	Struttura del software EnergyPlus e procedura di simulazione	152
2.3.4	Evoluzione e limiti del software EnergyPlus	160
2.3.5	Confronto tra modelli dinamici e stazionari	161
2.4	Dallo studio degli edifici a quello di quartieri e città: Mappe Energetiche Urbane	161
2.4.1	Il GIS come strumento di visualizzazione e supporto alla determinazione delle prestazioni energetiche degli edifici	163
2.4.2	Valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici alla scala urbana: metodologia e applicazione al centro storico di Benevento	166
2.4.3	Le Mappe Energetiche Urbane: elementi innovativi di gestione del patrimonio edilizio	180
CAPITOLO 3: DEFINIZIONE DI UN MODELLO DI DIAGNOSI ENERGETICA PER GLI EDIFICI DEL TERZIARIO		183
3.1	Una metodologia per l'analisi delle prestazioni attuali degli edifici esistenti	185
3.1.1	La caratterizzazione energetica (audit)	188
3.1.2	Il modello di simulazione energetica dell'edificio	196
3.2	Stato di fatto e analisi delle prestazioni attuali per alcuni casi studio	198
3.2.1	La diagnosi energetica di un edificio storico	199
3.2.2	La diagnosi energetica di un edificio del '900	217
3.2.3	La diagnosi energetica di un edificio ospedaliero	227
3.3	Ponti termici: verifica di un metodo di risoluzione numerica, per l'integrazione in codici dinamici di simulazione	237
3.3.1	Il problema dell'analisi dei ponti termici	237
3.3.2	Modellare il flusso bi-tridimensionale all'interno dei software di simulazione energetica degli edifici	240
3.3.3	Configurazioni analizzate e discussione	245
CAPITOLO 4: LA PROGETTAZIONE DELLA RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA: ANALISI DELLE PRESTAZIONI DEL SISTEMA EDIFICIO/IMPIANTI		259
4.1	Metodologia d'analisi: indici energetici, economici e di impatto ambientale	261
4.1.1	Indici per l'analisi energetica	262
4.1.2	Indici per l'analisi dell'impatto ambientale	262
4.1.3	Indici per l'analisi del comfort indoor	263
4.1.4	Indici per l'analisi economica	264
4.2	Analisi di interventi per l'incremento dell'efficienza energetica	265
4.2.1	Applicazione dei materiali a cambiamento di fase in interventi di retrofit energetico non invasivo	266
4.2.1.1	Retrofit energetico di un edificio del terziario adibito ad uffici	272
4.2.1.2	Retrofit di un edificio adibito ad attività commerciale e residenziale	284
4.2.2	Sostenibilità energetica mediante coperture a verde	294

4.3	La riqualificazione energetica: implementazione di casi studio e analisi degli interventi	306
4.3.1	Retrofit energetico di Palazzo Dell'Aquila Bosco Lucarelli	307
4.3.1.1	Descrizione degli interventi e dei risultati delle analisi effettuate	308
4.3.1.2	Analisi in condizioni standard ed etichetta energetica	313
4.3.2	Retrofit energetico di Palazzo EX-INPS	314
4.3.2.1	Analisi delle soluzioni di retrofit ipotizzate	315
4.3.2.2	La classe di prestazione energetica dell'edificio	320
4.3.3	Retrofit energetico del Day-Hospital dell'Istituto G. Pascale	320
4.3.3.1	Efficacia di interventi di retrofit sull'involucro edilizio	321
4.3.3.2	Analisi di interventi sull'impianto e strategie di controllo microclimatico	328
4.4	Sistema di Trigenerazione per una rete urbana di teleriscaldamento/ teleraffrescamento	337
	CONCLUIONI	346
	LISTA DELLE PUBBLICAZIONI	357
	BIBLIOGRAFIA	360
	INDICE DELLE FIGURE	378
	INDICE DELLE TABELLE	383
	INDICE GENERALE	386

Ringraziamenti

È prassi consolidata concludere con il rito dei ringraziamenti. A questo rito non posso sottrarmi avendo potuto contare su apporti e contributi straordinari.

Per questo, giunta al termine di questo lavoro, desidero esprimere la mia riconoscenza nei confronti di tutte quelle persone che, in modi diversi, mi sono state vicine e hanno permesso e incoraggiato i miei studi nel Triennio di Dottorato.

Mi sia consentito, quindi, esprimere i miei sentimenti migliori per i miei due relatori, affinché essi ricevano i sensi della mia profonda stima per i proficui insegnamenti riservatimi, trasmettendomi la loro esperienza professionale ed umana.

Ringrazio la prof. Rita Maria Antonia Mastrullo, per la fiducia dimostratami nell'aver accettato questo argomento di tesi, per essersi sempre dimostrata disponibile a offrirmi il suo preziosissimo contributo durante tutte le fasi del mio lavoro di ricerca e per essersi sempre prodigata a far sì che potessi fare esperienze costruttive e utili alla mia crescita come dottore di ricerca.

Un ringraziamento speciale al prof. Giuseppe Peter Vanoli non solo per l'immenso contributo teorico e metodologico offertomi e la sua dedizione nel seguirmi costantemente nella mio percorso di ricerca, ma anche per l'esempio che è stato per me di passione, intuito, correttezza, amore per la ricerca e professionalità; tutto quello che ho avuto modo di apprendere professionalmente e umanamente costituirà sempre per me un modello da perseguire nella vita e nel lavoro.

Li ringrazio inoltre per avermi affiancata all' arch. Fabrizio Ascione che rappresenta livelli elevatissimi di professionalità e preparazione, ed impersona uno squisito esempio di qualità umane.

Ringrazio il prof. Filippo de' Rossi per avermi accolto con calore nel dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi del Sannio e per avermi offerto la possibilità di esperienze professionali e umane eccezionali. Mi sia, perciò, consentito ringraziare per l'instancabile sostegno morale e per l'aiuto professionale offertomi sempre con spontaneità: Teresa, Carlo, Giovanni, Francesco, Michele, Elisa, persone con cui ho condiviso la quotidianità del mio lavoro, lezioni, impegni e preoccupazioni.

Ringrazio il prof. Nicola Bianco per la stima dimostratami e per essere riuscito a rendere ricco di stimoli per la mia preparazione il tempo e l'impegno dedicatomi in ogni incontro di ricerca.

E' difficile in poche righe ricordare tutte le persone che hanno contribuito a rendere proficui questi anni. Ringrazio dunque tutti i docenti, ricercatori e funzionari amministrativi del DII, Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Napoli Federico II e del DING, Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi del Sannio di Benevento, con cui mi sono interfacciata durante questo percorso.

Grazie, infine, a chi con il silenzio e la comprensione, con un consiglio o un abbraccio ha infuso in me sicurezza e ottimismo, aiutandomi a credere in me stessa sempre: la mia famiglia, Vincenzo, le mie più care amiche.

ὁ πολύτροπος ἀνὴρ..

In conclusione del percorso di dottorato, ho dunque la certezza di aver vissuto un entusiasmante e "multiforme" percorso universitario, ricco nella formazione e nella crescita umana.