

# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II



SCUOLA DI DOTTORATO IN INGEGNERIA INDUSTRIALE

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA DEI SISTEMI MECCANICI

XXV CICLO

IL RUOLO DELLE SCHERMATURE SOLARI NEL BILANCIO ENERGETICO DEL  
SISTEMA EDIFICIO-IMPIANTI

TUTOR

CH.MO PROF. FRANCESCO MINICHIELLO

CANDIDATO

DOTT. ING. FRANCESCO DE FALCO

Abstract .....	5
1. Introduzione .....	7
2. La radiazione solare .....	13
2.1. La posizione del Sole .....	13
2.1.1. La sfera celeste .....	13
2.1.2. Altezza solare e angolo azimutale .....	15
2.1.3. Declinazione .....	16
2.1.4. Latitudine .....	17
2.1.5. Angolo orario .....	18
2.1.6. Ora solare .....	18
2.1.7. Equazione del tempo .....	18
2.2. Costante solare e irradianza extratmosferica .....	19
2.3. Componenti della radiazione solare .....	22
2.3.1. Radiazione solare diffusa .....	22
2.3.2. Radiazione solare diretta .....	22
2.3.3. Radiazione solare riflessa .....	22
3. I sistemi di schermatura solare .....	24
3.1. Premessa .....	24
3.2. Il ruolo dei sistemi di ombreggiamento .....	31
3.3. Sistemi di ombreggiamento tradizionali .....	33

3.4.	Schermature solari e fabbisogno energetico.....	36
3.5.	Tipologie di schermature solari .....	39
3.6.	Dispositivi di schermatura solare esterni .....	41
3.7.	Dispositivi di schermatura solare interni .....	43
3.8.	Elementi fissi di schermatura.....	45
3.9.	Dispositivi di schermatura solare regolabili.....	48
3.10.	Progettazione di schermature solari.....	49
3.11.	Diagrammi solari .....	50
3.12.	Heliodon .....	55
4.	Attività di ricerca .....	57
4.1.	Introduzione.....	57
4.2.	Riferimenti alla letteratura scientifica .....	58
4.3.	Software di simulazione energetica per il sistema edificio-impianto .....	61
4.4.	Finalità della ricerca .....	64
4.5.	Caso studio.....	65
4.6.	Risultati della ricerca.....	73
4.6.1.	Profondità degli aggetti orizzontali .....	75
4.6.2.	Condizioni climatiche.....	79
4.6.3.	Altezza dell'edificio .....	81
4.6.4.	Isolamento termico dell'edificio.....	84

4.6.5.	Capacità termica dell'involucro edilizio.....	87
4.6.6.	Rapporto tra involucro opaco ed involucro trasparente .....	89
4.6.7.	Sistema di controllo dell'illuminazione .....	92
4.6.8.	Orientamento dell'edificio .....	96
4.7.	Analisi del ciclo di vita (LCA) .....	98
5.	Conclusioni .....	101
	Bibliografia.....	104

## Abstract

Con riferimento ai sistemi passivi per la riduzione del fabbisogno energetico del sistema edificio-impianto, nel primo capitolo della tesi vengono presentate alcune tre le più rilevanti Direttive del Parlamento europeo e del Consiglio in materia di efficienza energetica in edilizia. Viene quindi presentato un focus sul loro recepimento in ambito nazionale.

Nel secondo capitolo vengono invece presentate alcune nozioni sulla radiazione solare, sulla geometria del sistema Sole-Terra, utili per comprendere appieno le problematiche sottese alla scelta ed alla progettazione dei sistemi di schermatura solare.

Il terzo capitolo è dedicato alla trattazione dei dispositivi di schermatura solare di più comune impiego. I dispositivi vengono presentati criticamente, e classificati secondo i diversi criteri. Vengono poi dati forniti alcuni cenni relativi alla progettazione degli schermi solari.

Nel quarto capitolo vengono invece presentati i principali risultati del lavoro di ricerca svolto durante il ciclo di dottorato. Si è proceduto innanzitutto ad una accurata indagine bibliografica sugli schermi solari, con il fine di acquisire le informazioni di base indispensabili per affrontare il tema e conoscere lo stato dell'arte della ricerca specifica. Successivamente si è individuato un adeguato software di simulazione dinamica che, modellato un sistema edificio-impianto, simula il comportamento delle schermature solari e valuta il loro contributo al bilancio energetico del sistema edificio-impianto, fornendo indicazioni utili all'ottimizzazione delle sue variabili di progetto. La scelta è ricaduta su EnergyPlus, il software per la simulazione energetica degli edifici sviluppato dal Dipartimento dell'Energia statunitense (DOE) che, dalla letteratura tecnico-scientifica consultata, si evince essere diffusamente utilizzato in ambito accademico per la simulazione e la valutazione degli effetti delle schermature solari applicate agli edifici. Dato un edificio e gli impianti di cui è dotato, definite le condizioni al contorno, EnergyPlus consente di calcolare tra le altre cose i carichi termici che è necessario

bilanciare per mantenere le condizioni climatiche di benessere impostate all'interno dell'edificio, sia in regime invernale che estivo, ed ovviamente di valutare gli apporti solari attraverso le superfici trasparenti dell'involucro, con o senza sistemi di schermatura. Definito l'ambiente simulativo, il passo successivo della ricerca è stato quello di modellare un adeguato edificio sul quale condurre le indagini. La scelta è ricaduta su un edificio per uffici a tre piani fuori terra, a pianta rettangolare. Si è scelto di focalizzare l'attenzione su edifici del terziario perché questi presentano condizioni di utilizzo e profili di occupazione che determinano, rispetto alle abitazioni, maggiori fabbisogni energetici per il raffrescamento estivo. Le simulazioni condotte sull'edificio-modello mostrano che i sistemi di schermatura solare, soprattutto in climi mediterranei, riescono ad abbattere in maniera molto significativa i carichi termici estivi. È inoltre emerso che il sistema più efficace per ridurre gli apporti solari consiste nello schermare la superficie vetrata dall'esterno. I sistemi di schermatura orizzontali, quando esposti a sud-est, sud o sud-ovest, sono efficaci prevalentemente nel periodo che va dalla tarda primavera fino all'inizio dell'autunno. A est e ovest, durante tutto l'anno, la ridotta altezza solare richiederebbe schermi orizzontali troppo lunghi, per cui risulta preferibile utilizzare schermi verticali.

L'ultimo capitolo è dedicato alle conclusioni tratte dal lavoro di ricerca svolto, con alcuni cenni ai suoi possibili sviluppi futuri.

# 1.Introduzione

I sistemi passivi rivestono un ruolo sempre più centrale nell'ambito della normativa comunitaria e nazionale in materia di efficienza energetica in edilizia, il cui perseguimento fa parte di una importante serie di iniziative intraprese dall'Unione Europea volte al raggiungimento degli obiettivi climatici ed energetici fissati con la sottoscrizione del protocollo di Kyoto.

Mantenere condizioni di comfort climatico all'interno di un edificio richiede significativi consumi energetici: nei paesi dell'Unione Europea il parco edilizio è responsabile di circa il 40 % del fabbisogno complessivo di energia primaria e delle emissioni di CO<sub>2</sub>. Ciò comporta, ed è facile intuirlo anche considerando che l'Europa è in larga misura energeticamente dipendente dalle importazioni, enormi costi energetici ed ambientali.

Le attività legate all'edilizia rappresentano una parte significativa dell'economia comunitaria, rispettivamente il 9 % circa del PIL dell'UE e il 7-8 % del tasso di occupazione comunitario. Il potenziale rappresentato dal risparmio energetico conseguibile è considerevole, e comporterebbe vantaggi economici, sociali e ambientali significativi. Di conseguenza, il risparmio energetico nel settore edilizio svolge nell'UE un ruolo di primo piano nel raggiungimento degli obiettivi climatici, energetici e di crescita, contribuendo nel contempo a un aumento del livello di comfort e a una riduzione delle fatture energetiche per i cittadini.

La Comunità Europea, attraverso la direttiva 2002/91/CE (anche nota come EPBD, Energy Performance of Building Directive) [1] e la direttiva 2010/31/CE [2], ha indicato ai paesi membri la strada da percorrere in materia di efficienza energetica in edilizia. L'EPBD prevede un approccio globale: le sue disposizioni disciplinano il fabbisogno energetico per il riscaldamento degli ambienti, per quello dell'acqua ad uso sanitario, per la climatizzazione estiva, per la ventilazione e per l'illuminazione. La revisione della direttiva prevede che gli edifici di nuova costruzione pubblici (dal 2018), residenziali e commerciali (dal 2020) siano "carbon neutral". Per raggiungere questa "parità" nel bilancio di CO<sub>2</sub> è necessario agire essenzialmente su due fronti: da un lato soddisfare il fabbisogno di

energia primaria ricorrendo a fonti rinnovabili, da un altro ridurre detto fabbisogno ricorrendo a soluzioni costruttive e impiantistiche altamente efficienti.

Con riferimento allo scenario italiano, secondo i dati pubblicati dal Ministero dello Sviluppo Economico nel bilancio energetico nazionale, nell'anno 2010 il settore civile è stato responsabile del 36% dei consumi finali di energia.

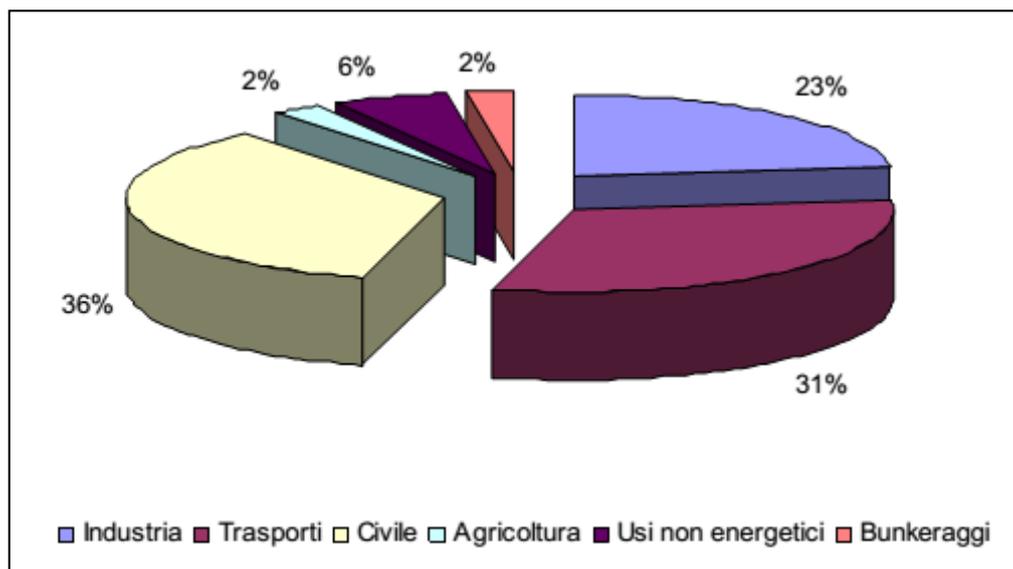


Figura 1 – consumi finali di energia per settore anno 2010 (Bilancio energetico nazionale, Ministero dello Sviluppo Economico)

Analizzando la serie storica dei consumi finali di energia per settore dal 2000 al 2010, si nota che nel periodo il settore civile ha fatto registrare un incremento del 21,5%, in controtendenza con gli altri settori.

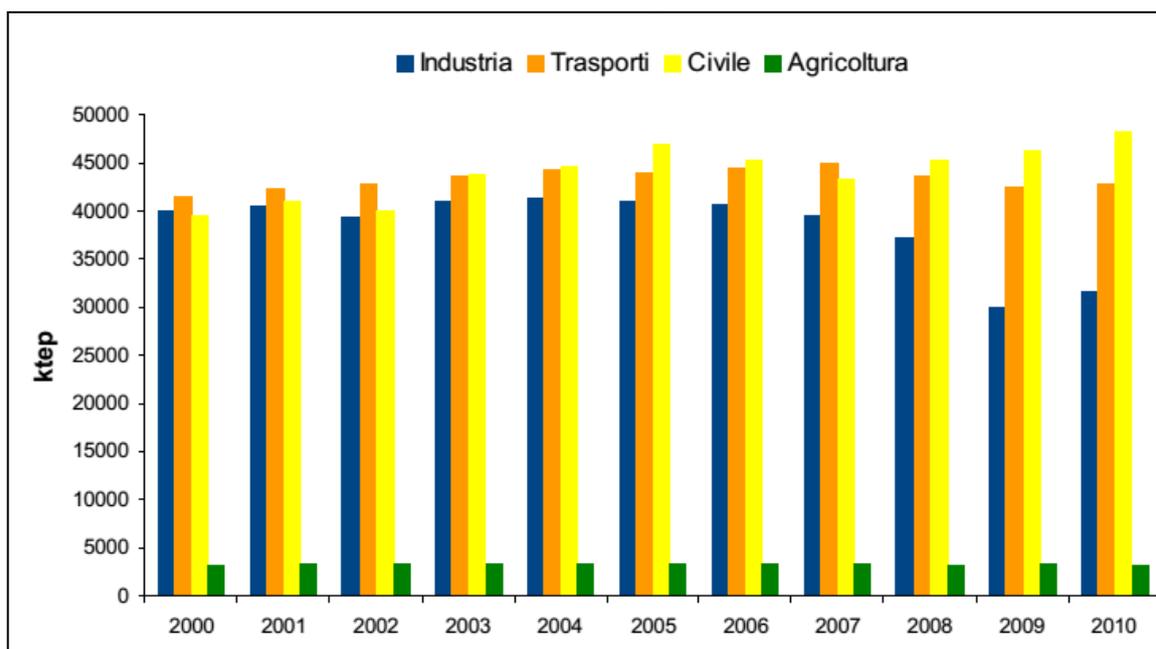


Figura 2 – consumi finali di energia per settore (Bilancio energetico nazionale, Ministero dello Sviluppo Economico)

Al fine di ridurre il fabbisogno energetico di questo settore, sono state proposte diverse strategie relative agli impianti di climatizzazione. D'altro canto, le direttive europee in materia di rendimento energetico in edilizia promuovono l'utilizzo di tecnologie passive per il raffrescamento degli edifici. Al riguardo, la direttiva 2002/91/CE del Parlamento europeo e del Consiglio sul rendimento energetico nell'edilizia recita in premessa:

[omissis]

*“Negli ultimi anni si osserva una crescente proliferazione degli impianti di condizionamento dell'aria nei paesi del sud dell'Europa. Ciò pone gravi problemi di carico massimo, che comportano un aumento del costo dell'energia elettrica e uno squilibrio del bilancio energetico di tali paesi. Dovrebbe essere accordata priorità alle strategie che contribuiscono a migliorare il rendimento termico degli edifici nel periodo estivo. Concretamente, occorrerebbe sviluppare maggiormente le tecniche di raffreddamento passivo, soprattutto quelle che contribuiscono a migliorare le condizioni climatiche interne e il microclima intorno agli edifici”.*

[omissis]

Ancora, la direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio sulla prestazione energetica in edilizia, che ha sostituito la summenzionata direttiva 2002/91/CE, oltre a ribadire la centralità dei sistemi passivi, fa un esplicito richiamo all'ombreggiamento come misura per evitare fenomeni di surriscaldamento degli edifici:

*[omissis]*

*“Dovrebbe essere accordata priorità alle strategie che contribuiscono a migliorare la prestazione termica degli edifici durante il periodo estivo. A tal fine, occorrerebbe concentrarsi sulle misure che evitano il surriscaldamento, come l'ombreggiamento e una sufficiente capacità termica dell'opera edilizia, nonché sull'ulteriore sviluppo e applicazione delle tecniche di rinfrescamento passivo”.*

*[omissis]*

Così come altri provvedimenti legislativi e programmi di incentivazione, l'EPBD promuove l'utilizzo di soluzioni tecniche passive per gli edifici, con l'obiettivo di ottenere, soprattutto in regime estivo, condizioni di comfort termico, riducendo o evitando il ricorso ad impianti di raffrescamento. Questo tipo di approccio appare tanto più urgente in climi mediterranei, come quello italiano, dove il fabbisogno energetico per il raffrescamento estivo degli edifici sopravanza quello per il riscaldamento invernale.

L'Italia ha recepito i contenuti della direttiva EPBD con la pubblicazione del DLgs 192/2005, entrato in vigore l'8 ottobre 2005. Il contenuto di questo decreto è stato poi modificato ed integrato dal DLgs 311/06 “Disposizioni correttive e integrative al decreto legislativo 19/08/05 n.192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia” che entra in vigore il 2 Febbraio 2007. L'attuazione completa del DLgs 192/05 prevede la pubblicazione di ulteriori decreti attuativi.

Una soluzione tecnica passiva per migliorare l'efficienza energetica dell'involucro edilizio è costituita dalle schermature solari, ovvero sistemi che, applicati ad una superficie trasparente, a seconda della tipologia, permettono l'attenuazione, il controllo e la modulazione della radiazione solare, con il fine di migliorare il comfort degli ambienti

confinati e ridurre il fabbisogno energetico necessario al raffrescamento estivo degli edifici.

Il DPR 59/09, pubblicato in G.U. il 10 Giugno 2009, è in ordine temporale il primo dei decreti attuativi previsti dal Dlgs 192/2005. Il decreto introduce un nuovo quadro di disposizioni obbligatorie a partire dal 25 Giugno 2009 in sostituzione alle indicazioni “transitorie” dell’Allegato I del Dlgs192/05. Il DPR 59/09, tra le altre cose, riconosce l’importante ruolo delle schermature solari nel ridurre il fabbisogno energetico per il raffrescamento degli edifici in regime estivo. Di seguito se ne propone un estratto:

[omissis]

*18. Per tutte le categorie di edifici, così come classificati in base alla destinazione d'uso all'articolo 3 del decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412, ad eccezione, esclusivamente per le disposizioni di cui alla lettera b), delle categorie E.5, E.6, E.7 ed E.8, il progettista, al fine di limitare i fabbisogni energetici per la climatizzazione estiva e di contenere la temperatura interna degli ambienti, nel caso di edifici di nuova costruzione e nel caso di ristrutturazioni di edifici esistenti di cui all'articolo 3, comma 2, lettere a), b) e c), numero 1), del decreto legislativo, questo ultimo limitatamente alle ristrutturazioni totali:*

*a) valuta puntualmente e documenta l'efficacia dei sistemi schermanti delle superfici vetrate, esterni o interni, tali da ridurre l'apporto di calore per irraggiamento solare:*

[omissis]

*19. Per tutte le categorie di edifici, così come classificati in base alla destinazione d'uso all'articolo 3 del decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n.412, ad eccezione delle categorie E.6 ed E.8, al fine di limitare i fabbisogni energetici per la climatizzazione estiva e di contenere la temperatura interna degli ambienti, nel caso di edifici di nuova costruzione e nel caso di ristrutturazioni di edifici esistenti di cui all'articolo 3, comma 2, lettere a), b) e c), numero 1), questo ultimo limitatamente alle ristrutturazioni totali, del decreto legislativo, è resa obbligatoria la presenza di sistemi schermanti esterni. Qualora se ne dimostri la non convenienza in termini tecnico-economici, detti sistemi*

*possono essere omessi in presenza di superfici vetrate con fattore solare (UNI EN 410) minore o uguale a 0,5. Tale valutazione deve essere evidenziata nella relazione tecnica di cui al comma 25.*

[omissis]

In buona sostanza il decreto, al fine di limitare i fabbisogni energetici per il raffrescamento estivo e di contenere la temperatura interna degli ambienti, ha introdotto l'obbligo, per gli edifici di nuova costruzione, dell'adozione di sistemi schermanti esterni per le superfici vetrate. Qualora se ne dimostri la non convenienza in termini tecnico e/o economici, detti sistemi possono essere omessi in presenza di superfici vetrate con fattore solare minore o uguale a 0,5. Lo stesso DPR introduce l'obbligo per il progettista di valutare puntualmente e documentare l'efficacia dei sistemi schermanti delle superfici vetrate utilizzati, esterni o interni.

## 2. La radiazione solare

### 2.1. La posizione del Sole

#### 2.1.1. La sfera celeste

La sfera celeste (Figura 3) è una sfera di raggio arbitrario sulla cui superficie sono proiettati, dal centro della sfera, tutti gli astri. Se il centro della sfera coincide con il centro della Terra, fisso, si parla di sfera celeste geocentrica, alla quale si farà sempre riferimento nel seguito. Questo è il sistema di rappresentazione del cielo usato nell'astronomia tolemaica e in tutta l'astrologia classica, che ovviamente non corrisponde alla realtà; tuttavia è sufficiente per spiegare i fenomeni astronomici percepibili dall'occhio umano.

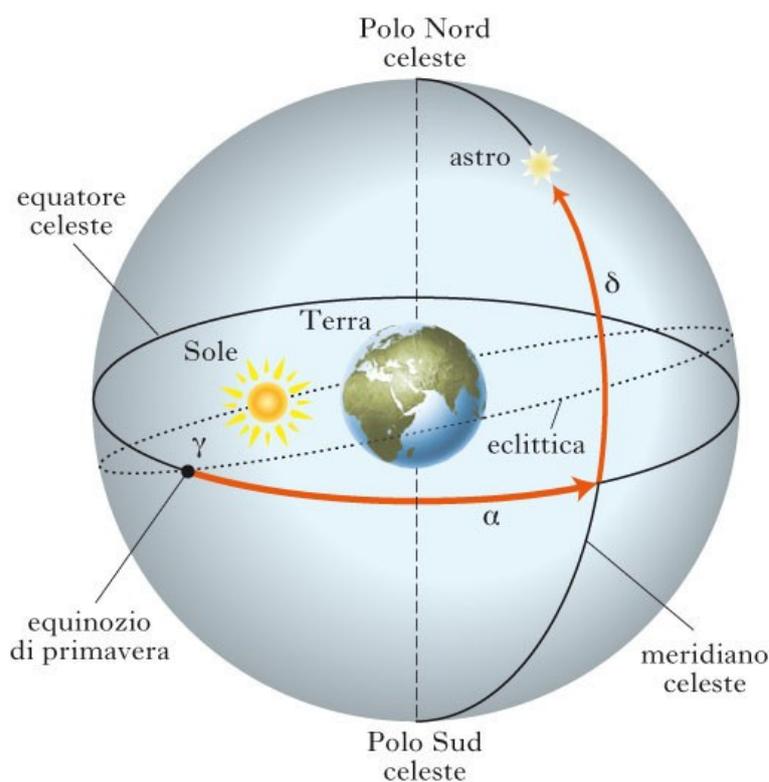


Figura 3 – La sfera celeste

L'asse di rotazione è la retta attorno alla quale ruota la sfera celeste. I punti di intersezione tra la volta celeste e l'asse di rotazione sono detti poli celesti: il polo nord

celeste è la proiezione del polo nord terrestre, mentre il polo sud celeste è la proiezione del polo sud terrestre.

I cerchi della sfera celeste che hanno per centro il centro della sfera sono detti cerchi massimi. L'equatore celeste è il cerchio massimo della sfera che contiene tutti i punti equidistanti dai poli, e corrisponde alla proiezione dell'equatore terrestre sulla sfera celeste. L'equatore celeste divide la sfera celeste in due metà: l'emisfero celeste nord, che contiene il polo nord celeste, l'emisfero celeste sud che contiene il polo Sud celeste.

L'eclittica è il cerchio massimo della sfera celeste, inclinato mediamente di  $23^{\circ}27'$  rispetto all'equatore, che rappresenta la proiezione sulla sfera celeste del piano orbitale della Terra intorno al Sole. Il Sole, ad un osservatore posto sulla Terra, sembra muoversi lungo l'eclittica. Da un punto di vista geocentrico, l'eclittica è costituita dalla proiezione di tutti i punti della congiungente centro della Terra - Sole sulla sfera celeste.

Gli equinozi sono i due punti in cui l'eclittica interseca l'equatore. Quando il Sole passa per questi punti la durata del giorno è uguale a quella della notte. Durante il giorno 20 o 21 del mese di marzo, quando il Sole si trova all'equinozio, ha l'inizio la primavera astronomica. L'equinozio che invece ha luogo il 23 settembre segna l'inizio dell'autunno astronomico.

I solstizi sono i due punti in cui l'eclittica raggiunge la maggiore distanza rispetto all'equatore. Il 21 di giugno il Sole si trova al solstizio d'estate, raggiunge il punto più alto sull'equatore, è nel punto più vicino al polo nord celeste e il giorno ha la sua durata massima rispetto alla notte: è l'inizio dell'estate astronomica; il 21 di dicembre il Sole si trova al solstizio d'inverno, è nel punto più vicino al polo sud celeste e raggiunge il punto più basso rispetto all'equatore e il giorno ha la sua durata minima: è l'inizio dell'inverno astronomico.

### 2.1.2. Altezza solare e angolo azimutale

Nel presente lavoro si farà riferimento alla posizione del Sole mediante un sistema di coordinate celesti riferite ad un punto di osservazione sulla Terra, ovvero l'angolo di l'altezza solare  $\alpha$  e l'angolo azimutale  $\gamma$ .

Per un osservatore che dalla Terra osserva il cielo, il percorso del Sole sulla volta celeste assume la forma di un arco che varia sia durante il corso dell'anno che con la latitudine del luogo di osservazione. Durante il corso dell'anno la durata delle ore di luce ed il percorso del Sole subiscono delle modifiche al variare delle stagioni. La durata di luce è massima al solstizio d'estate, giorno in cui il Sole raggiunge il punto più alto nel cielo nel corso dell'intero anno; il caso opposto si verifica al solstizio d'inverno. Ai due equinozi di primavera e di autunno l'altezza del Sole è intermedia tra la massima e la minima, e le durate del giorno e della notte sono esattamente pari a 12 ore.

La posizione del Sole rispetto ad un punto sulla Terra è determinata dall'angolo di altezza solare  $\alpha$  e dall'angolo azimutale  $\gamma$ .

L'altezza solare è l'angolo formato dalla retta Sole-Terra con il piano dell'orizzonte.

L'azimut solare è l'angolo formato dalla retta Sole-Terra sul piano dell'orizzonte con la direzione sud, e si assume positivo verso est.

Il sistema di coordinate celesti è schematizzato in Figura 4.

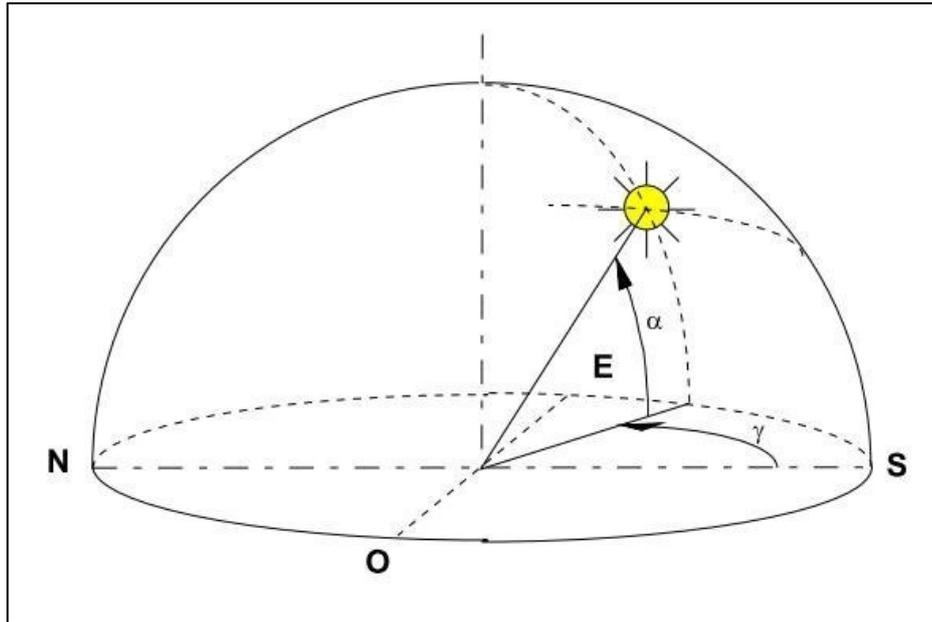


Figura 4 – Altezza solare ( $\alpha$ ) e di azimut solare ( $\gamma$ )

Altezza solare e l'azimut solare dipendono a loro volta dalla declinazione  $\delta$ , dalla latitudine  $\varphi$  e dall'angolo orario  $\omega$ . Essi possono essere calcolati mediante le seguenti relazioni:

$$\alpha = \arcsen(\sen\delta\sen\varphi + \cos\delta\cos\varphi\cos\omega)$$

$$\gamma = \arcsen\left(\frac{\cos\delta \cdot \sen\omega}{\cos\alpha}\right)$$

Conoscendo quindi la latitudine, la declinazione e l'angolo orario, le due relazioni consentono di determinare la posizione del Sole.

### 2.1.3. Declinazione

La declinazione (Figura 5) è l'angolo formato dalla direzione del Sole con il piano dell'equatore celeste; essa varia durante l'anno da un valore massimo di  $-23^{\circ}27'$  in inverno ad un valore di  $23^{\circ}27'$  in estate. Essa può essere calcolata mediante la formula di Cooper:

$$\delta = 23.45 \sen\left(360 \frac{284 + g}{365}\right)$$

dove  $g$  rappresenta il numero di giorni dell'anno trascorsi dal 1° gennaio.

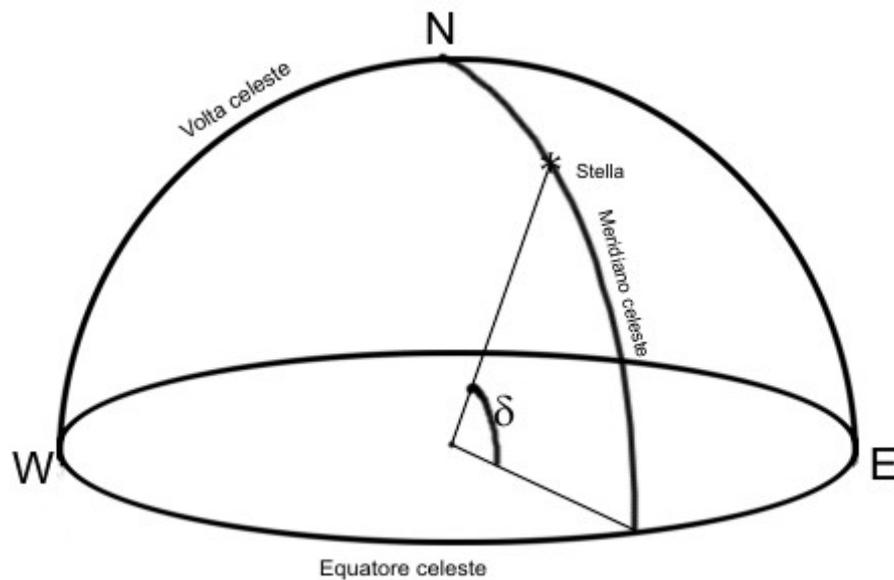


Figura 5 – Declinazione  $\delta$

#### 2.1.4. Latitudine

La latitudine è l'angolo formato dalla congiungente il punto di osservazione con il centro della Terra e il piano dell'equatore. Essa assume valore  $0^\circ$  all'orizzonte a  $90^\circ$  al polo.

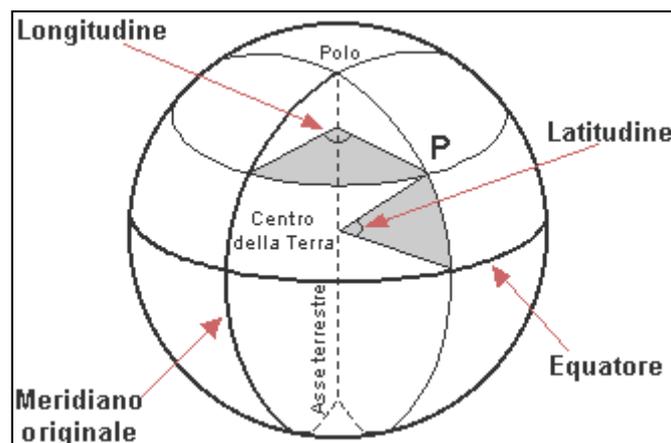


Figura 6 – Coordinate geografiche

### 2.1.5. Angolo orario

L'angolo orario è l'angolo formato dal piano meridiano passante per il Sole con il meridiano di riferimento ed assume valori compresi tra  $-180^\circ$  e  $180^\circ$  variando di  $15^\circ$  ogni ora. Può essere calcolato secondo la relazione:

$$\omega = 15 \cdot h_{sol} - 180^\circ$$

dove  $h_{sol}$  rappresenta l'ora solare.

### 2.1.6. Ora solare

L'ora solare  $h_{sol}$  può essere determinata a partire dall'ora convenzionale segnata dall'orologio e dalla longitudine del punto di osservazione:

$$h_{sol} = h_{conv} + \frac{E - 4(\lambda_{mr} - \lambda_{oss})}{60}$$

Nella precedente equazione  $h_{conv}$  è l'ora data dall'orologio,  $\lambda_{mr}$  è la longitudine del meridiano di riferimento,  $\lambda_{oss}$  è la longitudine del punto di osservazione. E rappresenta l'equazione del tempo.

### 2.1.7. Equazione del tempo

L'equazione del tempo E, o analemma nella sua rappresentazione grafica, rappresenta una correzione, dovuta alla seconda legge di Keplero, per la quale la velocità di rivoluzione della Terra attorno al Sole non è costante durante l'anno. La sua formulazione è la seguente:

$$E = -10.1 \text{sen} \left( 360 \frac{2g + 31}{366} \right) - 6.9 \text{sen} \left( 360 \frac{g}{366} \right)$$

Il valore di E può anche essere determinato utilizzando opportuni grafici o tabelle.

## 2.2. Costante solare e irradianza extratmosferica

L'energia solare si propaga nello spazio sotto forma di radiazioni elettromagnetiche la cui distribuzione, in funzione della lunghezza d'onda, viene detta spettro solare. La radiazione solare si estende su tutto lo spettro elettromagnetico, dai raggi  $\gamma$  ai raggi x, attraverso l'ultravioletto (UV), il visibile e l'infrarosso, fino alle microonde e radioonde. Tuttavia, la parte più significativa dello spettro è compresa tra l'ultravioletto e il vicino infrarosso.

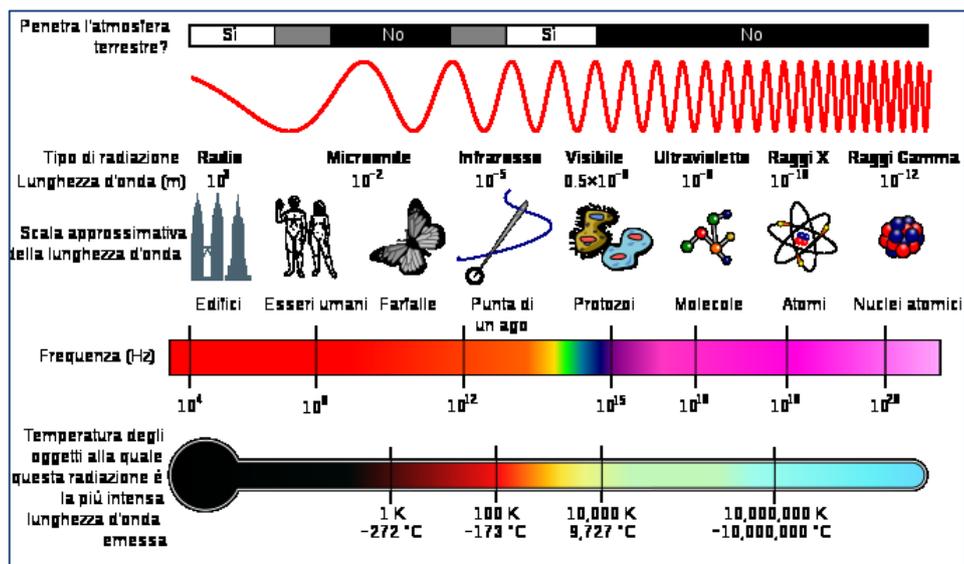


Figura 7 – spettro elettromagnetico

Limitatamente alle bande dell'infrarosso (1 mm - 700 nm) e del visibile (700 nm - 400 nm), lo spettro solare può essere approssimato allo spettro di un corpo nero alla temperatura di 5776 K. Nell'attraversare l'atmosfera, una frazione dei raggi solari viene assorbita o deviata (scattering) a seguito degli urti con le molecole dell'atmosfera stessa (inclusi il vapor acqueo, le nubi e gli aerosol). L'attenuazione interessa tutte le lunghezze d'onda dello spettro, però in maniera differenziata, per cui lo spettro elettromagnetico risultante assume un profilo irregolare, come si nota dalla Figura 8.

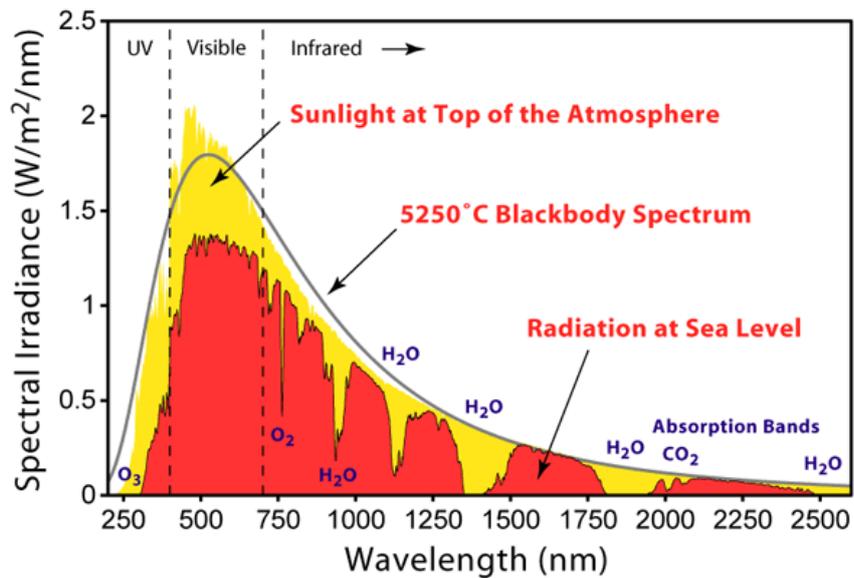


Figura 8 - Spettro dell'irradianza solare in funzione della lunghezza d'onda

La radiazione solare che raggiunge il suolo è distribuita quasi interamente in tre zone dello spettro di lunghezze d'onda:

- 300-370 nm (UV) 2,3%
- 380-780 nm (Visibile) 54%
- 790-2500 nm (IR vicino) 42,4%

La costante solare  $I_{sc}$  è l'irradianza misurata esternamente all'atmosfera terrestre, ad una distanza media Terra-Sole di  $1,495 \cdot 10^{11}$  m, su un piano normale ai raggi solari. Valori affidabili della costante solare possono essere effettuati solo dallo spazio, ed il valore suggerito dal World Meteorological Organization è di  $1367 \text{ W/m}^2$ .

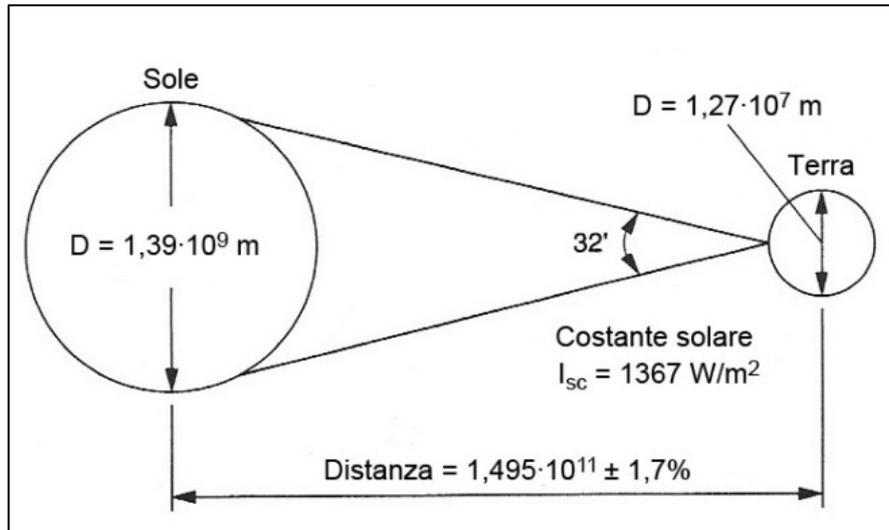


Figura 9 – Geometria Terra-Sole

A causa dell'eccentricità dell'orbita terrestre, la distanza Terra-Sole non è costante durante l'anno, subendo variazioni del  $\pm 1,7\%$  rispetto alla distanza media. Ciò determina una variazione durante l'anno della radiazione extratmosferica del  $\pm 3,3\%$ . La relazione che descrive l'andamento dell'irradianza su base annua è la seguente:

$$I_{on} = I_{sc} \cdot \varepsilon$$

dove:

$I_{on}$  è l'irradianza extraatmosferica misurata su un piano normale alla radiazione,  $[W/m^2]$ ;

$\varepsilon$  è il fattore di correzione della costante solare, adimensionale, [-].

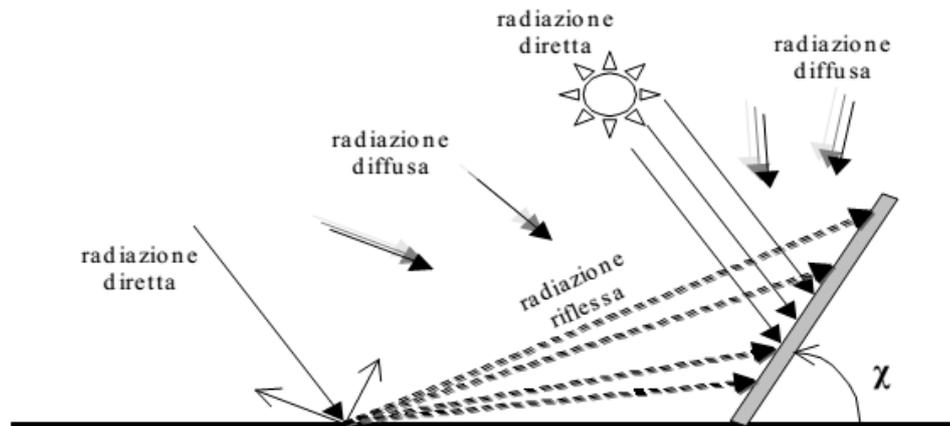
In letteratura esistono diversi metodi per calcolare il fattore di correzione della costante solare, il più semplice dei quali è mediante la seguente relazione:

$$\varepsilon = 1 + 0,033 \cos \frac{2\pi \cdot g}{365}$$

dove  $g$  rappresenta il numero di giorni dell'anno trascorsi dal 1° gennaio.

## 2.3. Componenti della radiazione solare

In un giorno sereno la potenza incidente su una superficie di generici disposizione ed orientamento è pari alla somma della radiazione solare diretta, diffusa e riflessa al suolo.



### 2.3.1. Radiazione solare diffusa

La radiazione solare diffusa rappresenta quella quota di radiazione che ha colpito almeno una particella dei gas atmosferici cambiando angolo di incidenza, e che arriva comunque al suolo.

### 2.3.2. Radiazione solare diretta

La radiazione solare diretta è la componente della radiazione solare che raggiunge direttamente il suolo terrestre. La quantità di radiazione che colpisce una superficie è proporzionale al coseno dell'angolo d'incidenza: è massima quando l'angolo di incidenza è perpendicolare.

### 2.3.3. Radiazione solare riflessa

La radiazione riflessa è quella quota parte della radiazione solare incidente riflessa dalla superficie terrestre per effetto dell'albedo. L'albedo è la frazione di radiazione incidente che viene riflessa in tutte le direzioni, ed indica dunque il potere riflettente di una superficie. L'esatto valore della frazione dipende, per lo stesso materiale, dalla lunghezza

d'onda della radiazione considerata. Se la parola albedo viene usata senza ulteriori specifiche, si intende riguardare la luce visibile. L'albedo ha valori compresi tra 0 e 1, ed il suo valore medio per la superficie terrestre è di circa 0,4.

## 3.I sistemi di schermatura solare

### 3.1. Premessa

La protezione dell'involucro edilizio da apporti energetici indesiderati dovuti alla radiazione solare dovrebbe avere un ruolo centrale nelle strategie di raffrescamento di un edificio. Le schermature solari sono presenti nell'architettura fin dall'antichità. Ci sono esempi di schermature solari sia nell'architettura greca e romana, come i portici e le logge. Nell'architettura dei paesi del Medio Oriente e del Nord-Africa, che tipicamente godono di climi molto caldi ed asciutti, un sistema tradizionale di raffrescamento passivo molto noto è costituito dalla mashrabiya (Figura 10), ovvero una apertura dell'involucro edilizio schermata da una grata di legno dalla trama più o meno fitta. La mashrabiya è progettata per consentire all'aria ed alla luce di filtrare tra gli spazi, ed ha una valenza estetica oltre che funzionale.

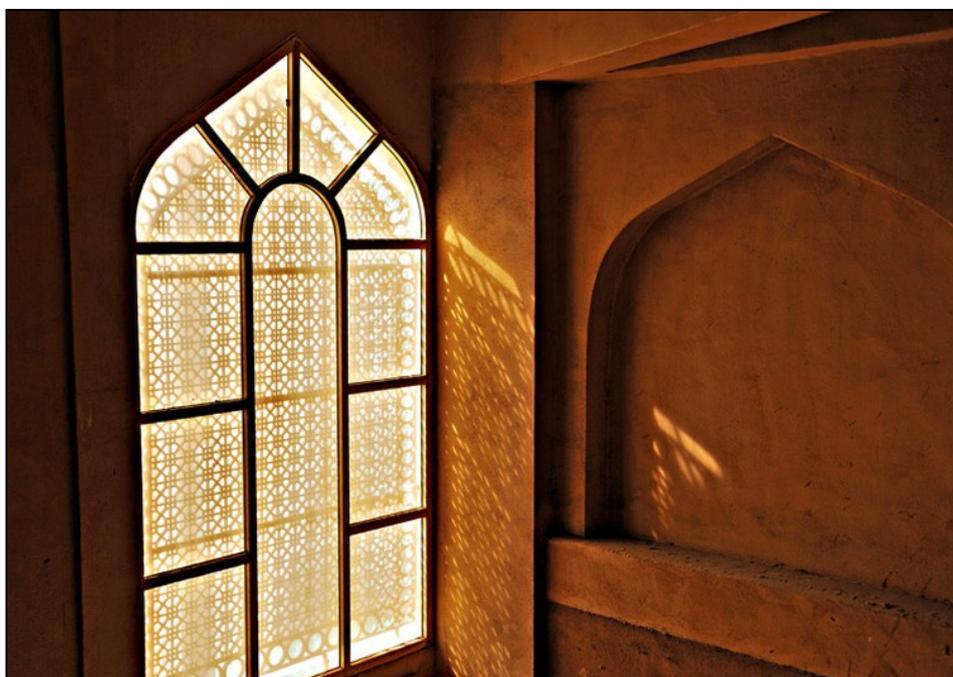


Figura 10 – Mashrabiya

Lo sfruttamento passivo del sole è stato affrontato scientificamente per la prima volta già nel VII secolo a.C. dai Greci nell'ambito della fondazione di nuove città. Quando

fondavano una nuova città, i Greci cercavano di costruirla in modo "perfetto", eliminando cioè tutti i difetti della città madre. Salubrità e sfruttamento dell'energia solare erano due dei principali criteri dell'urbanistica e dell'architettura. Anche nell'architettura dell'antica Roma vi sono esempi di edifici progettati tenendo conto della radiazione solare. I bagni termali, ad esempio, avevano un immenso fabbisogno energetico: bisognava riscaldare l'acqua delle piscine e delle vasche e anche le ampie aule. Per limitare i consumi di legna era necessario sfruttare al massimo gli apporti solari. Le terme di Caracalla a Roma (Figura 11 e Figura 12), ad esempio, furono costruite in modo che le sale con i bagni caldi (calidarium) fossero orientate verso sud, mentre le sale i bagni freddi (frigidarium) fossero collocate in posizione interna.

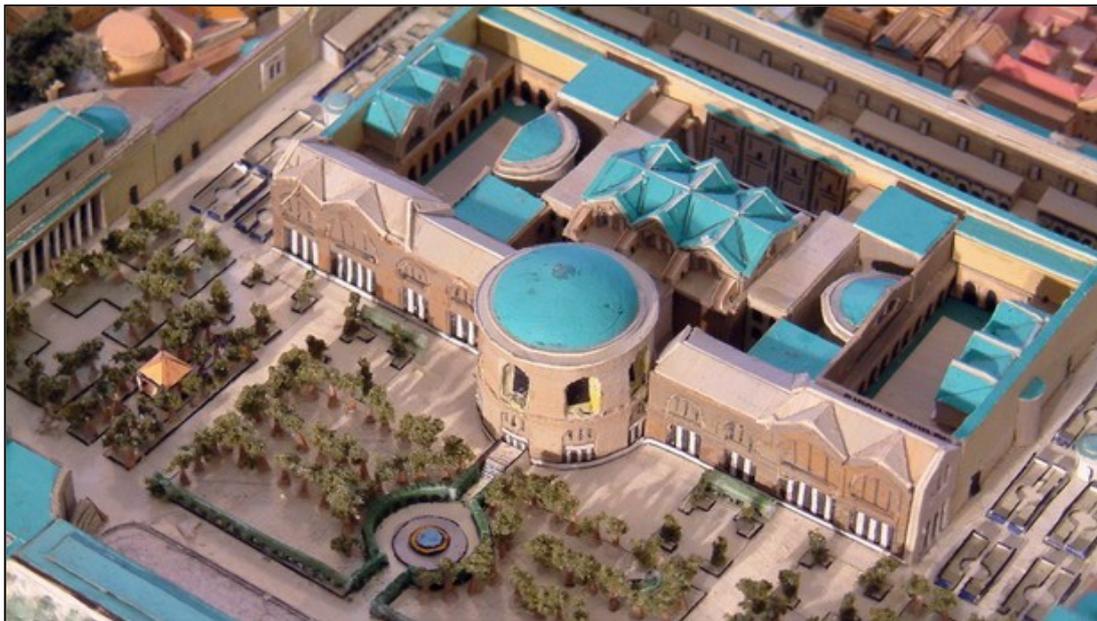


Figura 11 – Ricostruzione delle terme di Caracalla, con il calidarium in posizione centrale

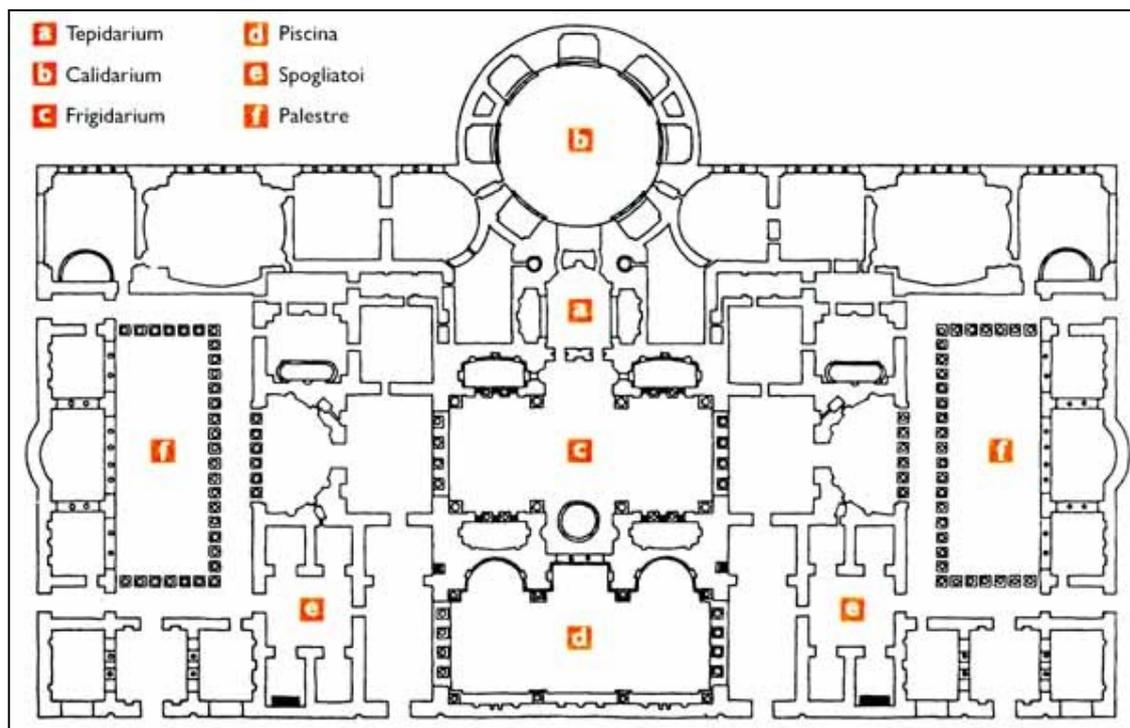


Figura 12 – Pianta delle terme di Caracalla

Davanti ai bagni caldi si estendevano ampi spazi liberi, giardini e campi sportivi, che impedivano l'ombreggiamento da parte di altri edifici, lasciando libero l'accesso alla radiazione solare. Ancora, Vitruvio nel I secolo a.C. scriveva: *“Bisogna fare attenzione che il teatro non sia esposto a mezzogiorno, in quanto i raggi del sole che rimangono rinchiusi nella cinta muraria riscalderebbero l'aria che vi è rimasta rinchiusa e che non può essere rimossa e ciò la renderebbe così ardente e infiammata da bruciare, cuocere ed essiccare internamente gli umori del corpo”*.

La protezione dell'involucro trasparente dell'edificio è il primo e fondamentale aspetto di cui tener conto nella progettazione di sistemi di schermatura, che tuttavia possono essere realizzati anche in modo da ombreggiare le superfici opache dell'involucro.

Nella progettazione di strategie di raffrescamento per gli edifici, il contributo della radiazione solare non dovrebbe mai essere tralasciato. Sistemi di ombreggiatura correttamente progettati possono controllare efficacemente la radiazione solare diretta, e bloccare parzialmente le componenti diffusa e riflessa della radiazione solare.

La componente diretta della radiazione solare getta ombre nette, ed è di gran lunga la componente più significativa che il sistema di ombreggiatura deve fronteggiare. La componente diffusa della radiazione solare proviene dall'intera volta celeste e, quindi, da tutte le possibili direzioni entro gli orizzonti. La radiazione riflessa è costituita dalle radiazioni diretta e diffusa riflesse dal suolo e da altri edifici, ed ha in genere un basso angolo di incidenza. Come già specificato in precedenza, l'intensità della radiazione riflessa è fortemente influenzata dalle proprietà riflettenti della superficie: l'erba, ad esempio riflette circa il 20-30 % della luce solare incidente, mentre la neve oltre il 70 %.

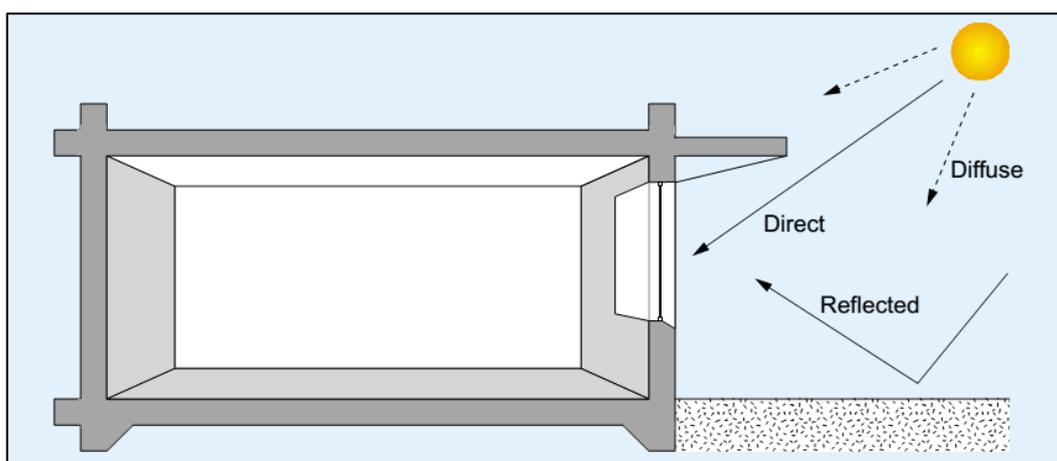


Figura 13 – Componenti della radiazione solare ed edificio

Il controllo della radiazione solare, o comunque la sua attenuazione, può essere ottenuto in diversi modi, come ad esempio:

- Mediante l'impiego di sistemi di schermatura solare;
- Effettuando un adeguato studio preliminare dell'orientamento e della geometria degli elementi dell'involucro edilizio da costruire;
- Controllando le proprietà superficiali degli elementi trasparenti ed opachi dell'involucro edilizio;
- Sfruttando l'ombreggiamento derivante dalla presenza di altri edifici vicini, o di vegetazione.

Tra quelli elencati, i sistemi di schermatura costituiscono il metodo di raffrescamento passivo più facilmente applicabile e flessibile, e possono essere utilizzati in tutti i tipi di clima in cui l'influenza del Sole è significativa, indipendentemente dalla latitudine.

Molto spesso, la chiave per una conseguire condizioni di benessere termo-igrometrico ed una buona illuminazione naturale all'interno di un edificio risiede in una adeguata progettazione dell'involucro edilizio prima ancora che degli impianti.

I sistemi di schermatura, adeguatamente progettati, possono costituire una parte integrante dell'involucro edilizio, e quindi influenzare in maniera determinante le prestazioni termiche e l'illuminazione naturale.



Figura 14 – Schermature esterne in materiale ceramico (sede del New York Times)

Possono essere installati sia internamente che esternamente agli elementi dell'involucro, così come all'interno di sistemi doppi e tripli vetri. In ogni caso, questi sistemi impediscono alla radiazione solare di avere accesso all'edificio, in tutto o in parte.



Figura 15 – Schermature esterne in materiale ceramico dettaglio (sede del New York Times)

Come è facile intuire, intercettando la radiazione solare prima ancora che essa abbia accesso allo spazio confinato interno delimitato dall'involucro edilizio, i dispositivi di schermatura solare esterni sono i più efficaci. Infatti i sistemi di schermatura solare interni, per quanto efficaci, trasmettono all'interno dell'edificio una aliquota della radiazione solare incidente, in genere per convezione.

I sistemi di ombreggiamento devono fornire una buona protezione solare durante il periodo di raffrescamento, ma non dovrebbero ostacolare gli apporti solari nella stagione di riscaldamento, ridurre l'illuminazione naturale, né impedire una corretta ventilazione naturale. Se correttamente progettati secondo la tipologia di edificio, latitudine e clima, i sistemi di schermatura possono rispondere a tutti questi requisiti, offrendo anche molte possibilità di espressione architettonica.

Le potenzialità di un adeguato ombreggiamento nella riduzione dei carichi termici estivi vengono spesso sottostimate, in particolar modo quando non vengono considerate nelle fasi preliminari della progettazione. Ampie superfici vetrate degli edifici, sempre più

diffuse, possono essere oggetto di intensa radiazione solare, con conseguente surriscaldamento interno e fenomeni di abbagliamento per gli occupanti: ex post, questo inconveniente può essere efficacemente contrastato solo a fronte di spese considerevoli. Tuttavia , se le esigenze di ombreggiatura sono adeguatamente affrontate nelle fasi iniziali della progettazione , semplici dispositivi di ombreggiatura montati internamente ed esternamente possono efficacemente ombreggiare anche ampie vetrate e sono in grado di migliorare il comfort visivo interno.

### 3.2. Il ruolo dei sistemi di ombreggiamento

Il ruolo delle schermature solari è quello di migliorare il comfort termico e visivo evitando il surriscaldamento e l'abbagliamento. Durante il secolo scorso, la massiccia diffusione di sistemi di climatizzazione ha relegato i sistemi di schermatura solare in un ruolo di secondo piano nell'ambito della progettazione degli edifici, tanto è che il loro impiego è stato del tutto marginale per lunghi periodi. Tuttavia, a partire dagli anni '70, anche grazie alla crisi energetica, l'utilizzo di sistemi di schermatura solare ha nuovamente riscosso interesse dei progettisti, ma è solo negli anni '90 che l'argomento è tornato di grande attualità, soprattutto per gli edifici commerciali.

La progettazione dei sistemi di schermatura è finalizzata a limitare principalmente gli effetti della radiazione solare diretta sull'involucro opaco e, soprattutto, trasparente degli edifici. Le schermature possono inoltre limitare anche le componenti riflessa e diffusa della radiazione solare.

La radiazione solare incidente su una superficie può derivare da tre fonti: radiazione diretta dal Sole (radiazione ad onde corte), la radiazione diffusa dalla volta celeste e la radiazione riflessa dal suolo. Le schermature solari esterne possono bloccare la componente diretta (normalmente la più significativa) della radiazione solare, e ridurre gli effetti delle componenti diffusa e riflessa, ma possono anche influenzare il comfort visivo e la ventilazione. Le condizioni climatiche, la tipologia di edificio e la sua destinazione d'uso determinano l'importanza relativa di questi fattori.

La progettazione di sistemi di schermatura dovrebbe tenere conto contemporaneamente del controllo solare, dell'illuminazione naturale e delle esigenze di ventilazione. Idealmente, i livelli naturali di illuminamento e ventilazione non dovrebbero essere compromessi al punto da dovere ricorrere ad illuminazione e ventilazione artificiali.

In sintesi, gli obiettivi di un sistema di schermature solari adeguatamente progettato possono essere riassunti in:

- limitare gli effetti della radiazione solare diretta, intercettandola in tutto o in parte, in determinate periodi dell'anno;

- controllare la radiazione diffusa e riflessa;
- evitare fenomeni di abbagliamento.

### 3.3. Sistemi di ombreggiamento tradizionali

La vegetazione è stata tradizionalmente utilizzata per scopi di ombreggiatura. Il principale effetto della vegetazione urbana è la capacità di schermare la radiazione solare diretta e di avere una temperatura della superficie fogliare prossima a quella dell'aria, che spesso risulta essere molto inferiore rispetto alla temperatura superficiale di molti materiali comunemente impiegati in edilizia. Pertanto, la temperatura radiante rilevata in una zona ombreggiata da vegetazione risulta decisamente inferiore alla stessa zona valutata in condizioni di pieno Sole.

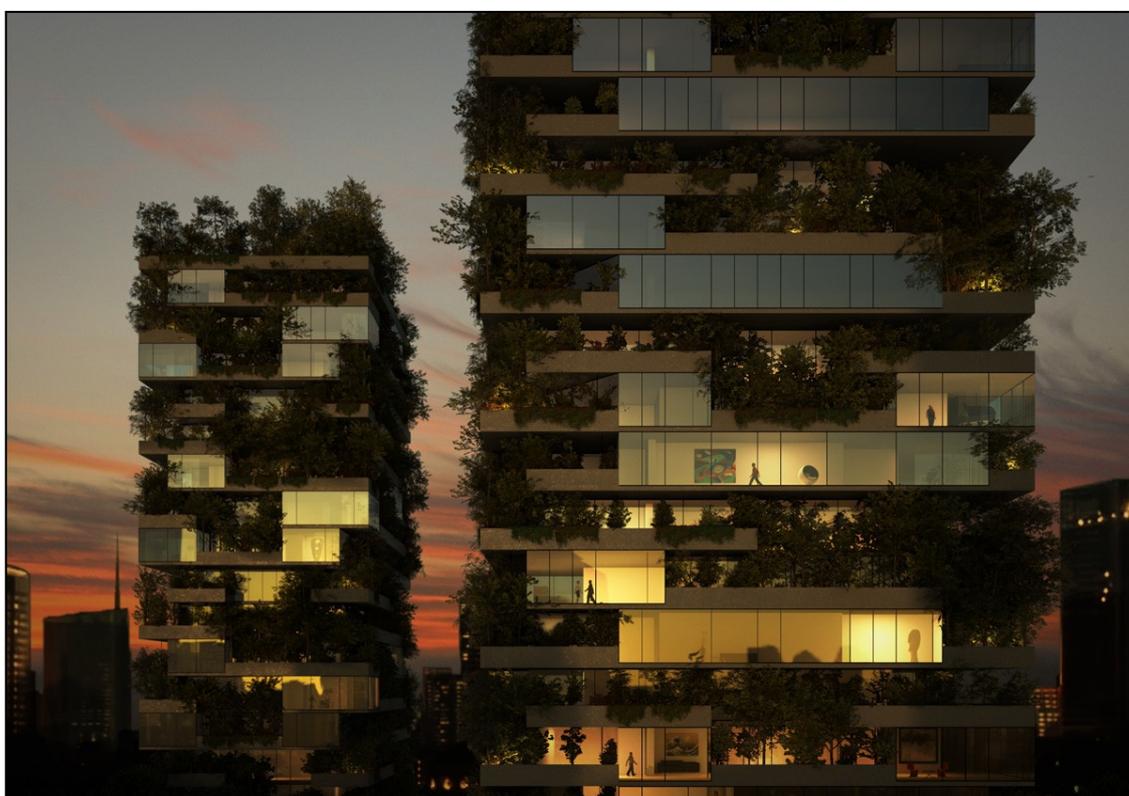


Figura 16 – Studio di ombreggiamento mediante vegetazione

La persiana è un particolare tipo d'infisso che viene installato a protezione degli elementi trasparenti dell'involucro edilizio. È costituita da lamelle che vengono inclinate in modo da consentire il passaggio della luce, bloccando pioggia e vento. Il termine è stato mutuato dal francese *persienne* utilizzato per definire appunto un tipo di imposta caratteristico dei paesi orientali atta a proteggere dalla luce e dal calore senza impedire la circolazione dell'aria. Le persiane sono disponibili sul mercato in diversi tipi di materiali,

come legno, alluminio, PVC e acciaio, e presentano differenti caratteristiche di resistenza agli agenti atmosferici e di isolamento termo acustico.



Figura 17 - persiana

Per secoli, le persiane hanno costituito nei paesi dell'area mediterranea un diffuso sistema di schermatura solare esterno, particolarmente efficace. Le lamelle orizzontali della persiana riducono i guadagni termici solari, consentendo comunque in una certa misura l'illuminazione e la ventilazione dell'ambiente interno. Le componenti diretta e diffusa della radiazione solare risultano in gran parte bloccate dalle lamelle della persiana, mentre la componente riflessa viene indirizzata verso il soffitto che solitamente è costituito da una superficie di colore bianco opaco. Il risultato è una uniforme distribuzione della luce nello spazio, un adeguato migliorato comfort visivo e guadagni energetici ridotti.

La pergola, tipica dei paesi dell'area mediterranea, è un elemento strutturale e decorativo degli edifici, costituito da una impalcatura di sostegno per piante rampicanti e viti, con intelaiatura di legno o di ferro a forma di volta o tettoia. La vegetazione ha in genere uno

sviluppo tale da permettere la copertura della struttura stessa, ombreggiando le superfici sottostanti. Essa è quindi parte integrante del sistema, e senza di essa la pergola non eseguirà la sua funzione di ombreggiatura.



Figura 18 – Esempio di pergola

Se la pergola è edificata a ridosso dell'edificio, nei mesi caldi essa può riparare efficacemente gli elementi dell'involucro edilizio dalla radiazione solare e quindi prevenire fenomeni di surriscaldamento, con conseguente contenimento dell'energia impiegata per il raffrescamento. Durante l'inverno la stessa pergola, priva di vegetazione, non costituisce un'ostruzione per la radiazione solare che può raggiungere l'involucro edilizio e quindi fornire apporti di calore gratuiti. In estate, la radiazione solare è bloccata dalle foglie. Viceversa in inverno, in assenza di foglie, non vi sono ostruzioni a bloccare la radiazione solare, per cui il bilancio energetico dell'edificio potrà beneficiare di apporti energetici solari.

### 3.4. Schermature solari e fabbisogno energetico

La funzione principale delle schermature solari è la protezione dell'involucro edilizio dalla radiazione solare diretta, al fine di mitigare l'accumulo di calore indesiderato all'interno dell'edificio. Naturalmente, i massimi benefici di un sistema di schermature si ottengono quando esso è installato a protezione di elementi trasparenti dell'involucro edilizio. Tuttavia, ombreggiare elementi opachi dell'involucro, come ad esempio le coperture piane, può anche ridurre in maniera significativa fenomeni di surriscaldamento estivo, soprattutto quando detti elementi non sono adeguatamente isolati. In ogni caso, l'ombreggiatura dell'involucro edilizio riduce il fabbisogno energetico per il raffrescamento dell'edificio, e la sua potenzialità non dovrebbe essere sottostimata in fase di progettazione. Gli apporti solari rappresentano un importante contributo al bilancio energetico complessivo del sistema edificio-impianto, soprattutto in presenza di estese superfici vetrate, tipiche di edifici del terziario, dove si sommano agli apporti energetici dovuti agli occupanti e alle attrezzature da ufficio presenti all'interno.

La componente solare diretta ha effetti più significativi sul bilancio energetico dell'edificio rispetto a quella diffusa, e incide in maniera istantanea sul carico di raffrescamento appena ha accesso, attraverso le superfici trasparenti dell'involucro, allo spazio confinato dell'edificio.

La componente diretta della radiazione solare, la cui direzione è prevedibile, può essere intercettata efficacemente da sistema di schermature esterne. Invece, le componenti diffusa e riflessa della radiazione solare presentano ampie escursioni dell'angolo di incidenza sull'involucro edilizio, e sono meno controllabili mediante dispositivi di schermatura esterni; in tal caso si può ricorrere a dispositivi di schermatura interni, la cui efficacia in termini energetici è comunque limitata.

Il flusso di calore di natura conduttiva che attraversa l'involucro di un edificio esposto alla radiazione solare dipende da numerosi fattori, per esempio dalle temperature delle superfici interne ed esterne dell'involucro, oltre che dalle sue proprietà intrinseche (capacità termica, trasmittanza termica). Per un edificio schermato, ma comunque esposto alla radiazione riflessa e diffusa, il carico termico di raffrescamento complessivo

risulterà comunque ridotto, non concorrendo al bilancio energetico la componente diretta della radiazione solare.

Tuttavia, un aspetto di cui è necessario tenere conto all'adozione di schermature solari, è che mentre il carico termico di raffrescamento sarà ridotto, la riduzione della disponibilità di luce naturale potrebbe aumentare il fabbisogno di energia per l'illuminazione. Ciò potrebbe parzialmente vanificare i benefici energetici derivanti dall'adozione delle schermature.

Il fastidioso fenomeno dell'abbagliamento, che si verifica quando le differenze di luminanza all'interno del campo visivo diventano eccessive, può essere opportunamente contrastato con le schermature solari, anche nella zona più prossima agli elementi finestrati, aumentando l'illuminamento nelle zone più interne dell'ambiente. Gli apporti solari dovrebbero essere controllati senza impedire l'accesso alla luce solare e compromettere la ventilazione naturale. Una tipologia di sistemi schermanti che può convenientemente soddisfare tutti questi requisiti è il light shelf esterno con superficie superiore riflettente (Figura 19). Questa tipologia di schermi consente l'accesso alla radiazione solare diretta quando questa incide con basso angolo di altezza solare (mesi invernali); viceversa, blocca la radiazione solare diretta quando questa incide con elevato angolo di altezza solare (mesi estivi), e la riflette sul soffitto, che funge da diffusore luminoso, prevenendo fenomeni di abbagliamento. Un adeguato livello medio di illuminamento dell'ambiente, da solo, non è sufficiente a determinare condizioni di comfort visivo; sono anche necessari, tra gli altri fattori, l'uniformità di illuminamento, una buona distribuzione delle luminanze, assenza di abbagliamento, ed una corretta direzionalità della luce.

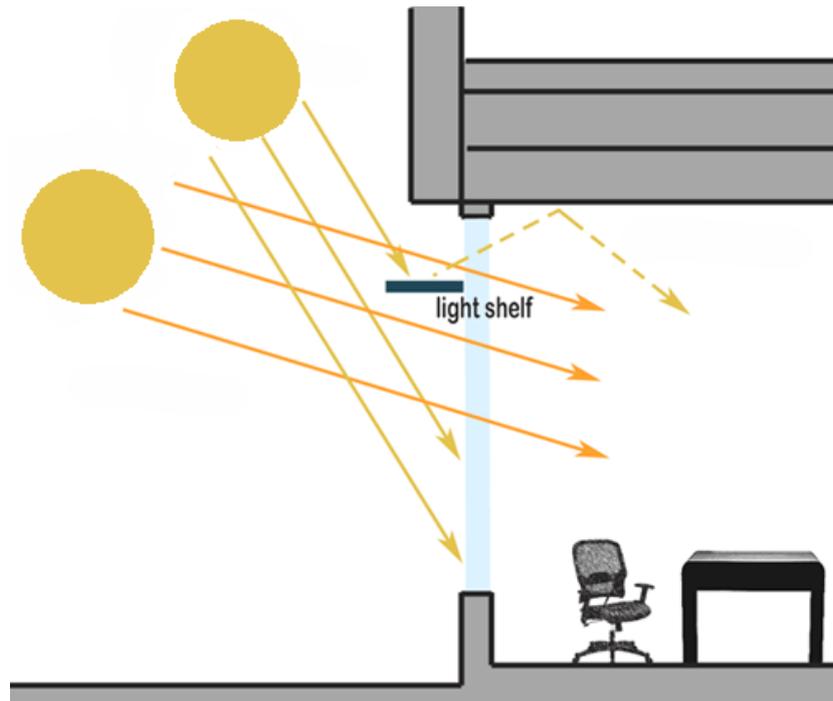


Figura 19 – dispositivo di schermatura di tipo light shelf

Esistono in letteratura diversi modelli matematici per la progettazione di sistemi fissi di schermatura esterni, grazie ai quali è possibile ridurre il carico di raffrescamento senza incidere in maniera significativa sul carico energetico necessario per l'illuminazione, mantenendo il comfort visivo entro livelli accettabili [4].

Quindi, i dispositivi di schermatura solare che svolgono la duplice funzione di protezione contro le radiazioni solari e la redistribuzione di luce naturale concorrono alla riduzione del fabbisogno energetico su due fronti: da un lato riducendo i carichi di raffrescamento attraverso la loro azione ombreggiante (in particolar modo se sono esterni), dall'altro riducendo il ricorso all'illuminazione artificiale.

### 3.5. Tipologie di schermature solari

Le schermature solari possono essere classificate secondo vari criteri; generalmente vengono suddivise in esterne e interne allo spazio climatizzato, ad installazione fissa, ovvero gli elementi costituiscono parte integrante dell'involucro edilizio, o mobile. Le schermature fisse sono quasi sempre esterne, mentre le schermature mobili possono essere sia esterne che interne.

Alcuni dispositivi possono svolgere una duplice funzione. Alcune schermature interne, quando chiuse, possono concorrere in maniera significativa all'isolamento termico complessivo garantito dagli infissi.

La scelta della strategia di schermatura ottimale per un edificio deve essere determinata considerando diversi fattori, come la sua l'architettura, destinazione d'uso, il sito, l'orientamento.

Le strategie di raffrescamento, di riscaldamento e di illuminazione adottate in fase di progettazione influenzano anche la scelta del sistema di ombreggiatura.

La quantità di radiazione solare che ha accesso all'edificio, e quindi l'efficacia di un sistema schermante, è connessa anche alle caratteristiche del materiale costituente la schermatura, ovvero alle sue proprietà di riflessione ed assorbimento della radiazione solare.

Le schermature fisse sono di solito preferite alle schermature mobili grazie alla loro semplicità costruttiva e robustezza, affidabilità e costi generalmente più bassi. Correttamente progettate, le schermature solari fisse svolgono adeguatamente la loro funzione in periodi di forte insolazione ma, soprattutto in caso di condizioni di cielo coperto, possono compromettere significativamente i livelli di illuminamento naturale.

Le schermature esterne mobili sono più flessibili e si adeguano meglio ai movimenti del Sole lungo l'eclittica, permettendo un controllo migliore della radiazione diffusa e dei fenomeni di abbagliamento. Il maggiore vantaggio di questi sistemi sta nel fatto che essi

possono essere completamente rimossi quando non necessari, non compromettendo l'accesso di luce naturale all'interno dell'edificio.

### 3.6. Dispositivi di schermatura solare esterni

Dei vari tipi di schermature, quelli esterni sono i più efficaci nel ridurre gli apporti solari perché intercettano la radiazione solare incidente prima che essa raggiunga lo spazio interno dell'edificio, dissipandola in ambiente. Il controllo solare mediante sistemi di schermatura esterni può avvenire impiegando elementi orizzontali a sbalzo (mensole o aggetti), setti verticali, o ancora elementi dell'involucro edilizio la cui forma e materiale contribuiscono alla definizione dell'architettura dell'edificio.

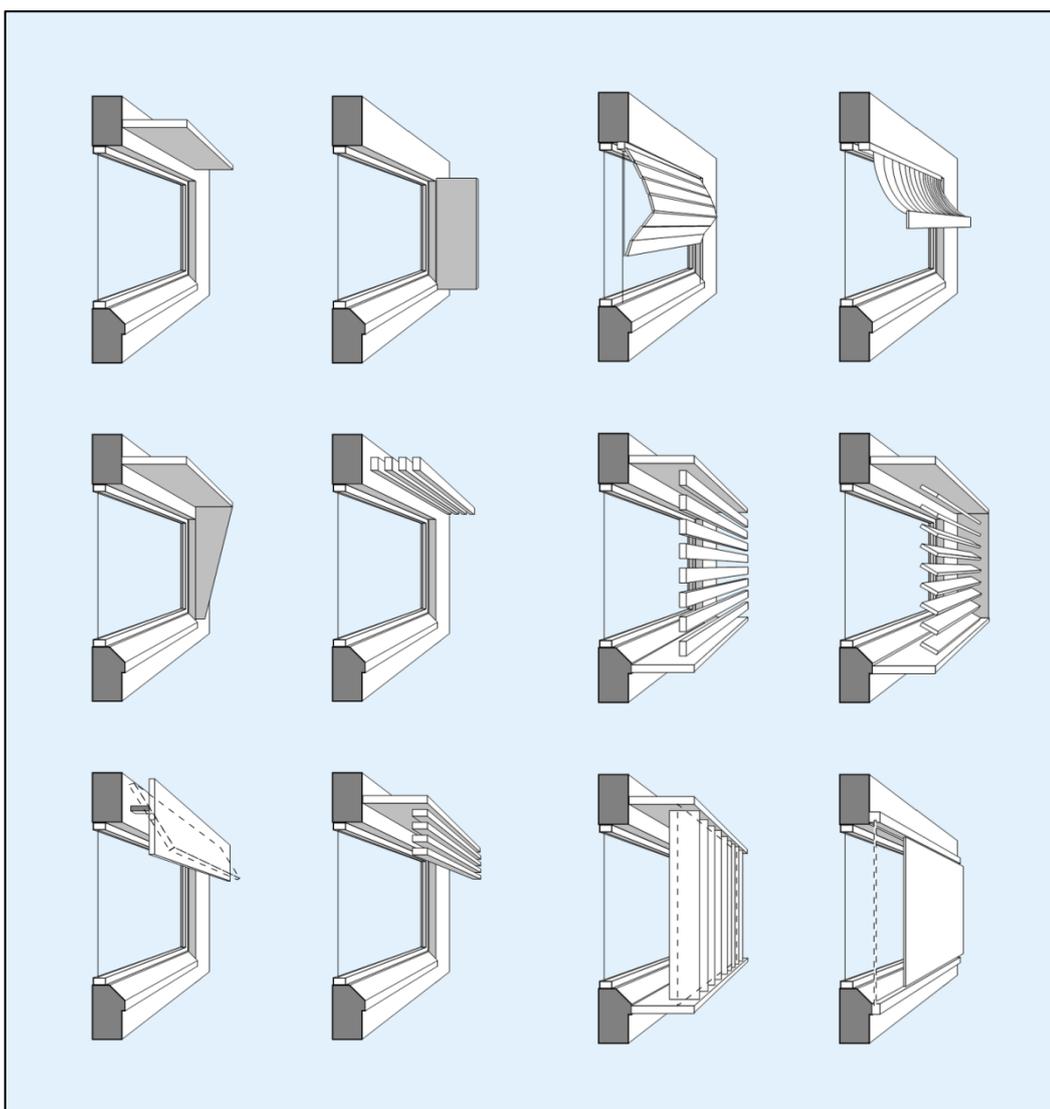


Figura 20 – esempi di dispositivi di schermatura solare esterni

Una volta che la radiazione solare diretta è entrata all'interno dello spazio confinato dall'involucro edilizio, l'unico modo in cui può fuoriuscire nuovamente all'esterno è

attraverso fenomeni di riflessione (limitatamente alle lunghezze d'onda del visibile e del vicino infrarosso) o indirettamente mediante convezione e irraggiamento. Il controllo solare dovrebbe essere progettato per intercettare la radiazione solare diretta durante i periodi dell'anno in cui si desidera abbattere il carico termico di raffrescamento. I sistemi di ombreggiatura esterni che coprono l'intera superficie della finestra dovrebbero essere posizionati ad una distanza adeguata dalla superficie vetrata per permettere la libera circolazione del flusso d'aria.

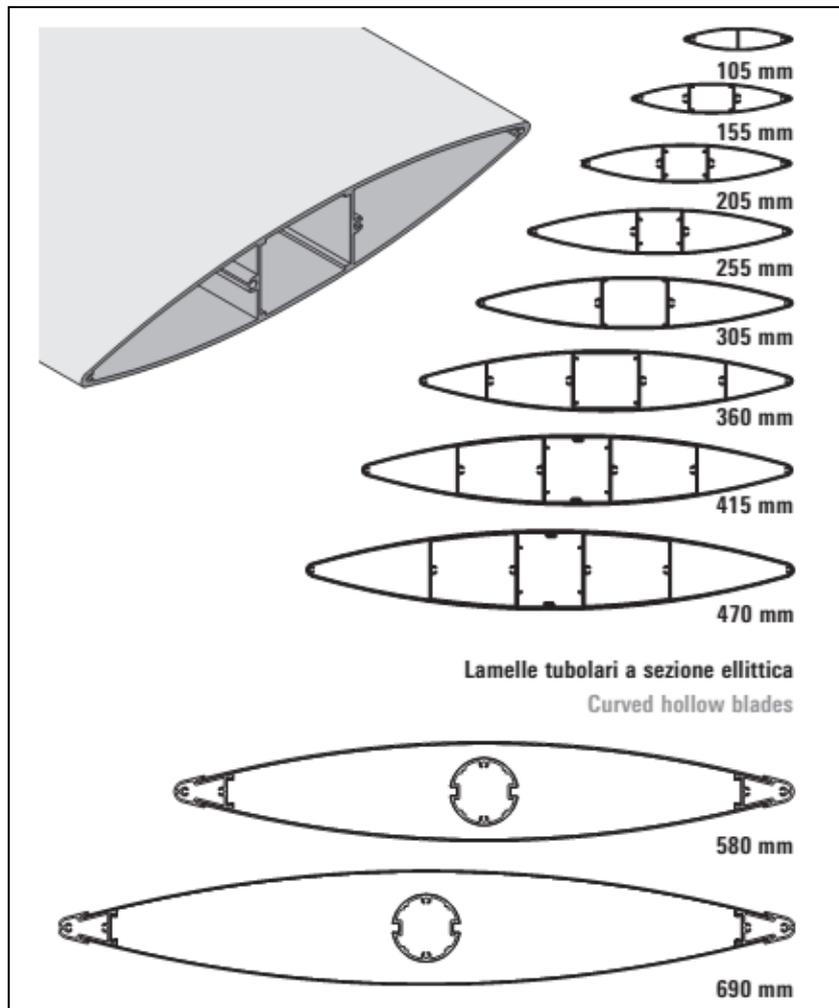


Figura 21 – esempio di lamelle in alluminio utilizzate per la realizzazione di dispositivi di schermatura esterni

### 3.7. Dispositivi di schermatura solare interni

I dispositivi di schermatura solare interni sono in genere regolabili o retraibili, e manovrati autonomamente dagli occupanti dell'edificio. Tipici esempi sono le tende verticali in tessuto, le tende a rullo, e le tende alla veneziana. Sono in linea di massima più economici rispetto ai dispositivi di schermatura esterni, e risultano particolarmente efficaci nel controllare le componenti diffusa e riflessa della radiazione solare, principale causa di abbagliamento.

I dispositivi di schermatura solare interni intercettano la radiazione solare diretta solo quando essa ha già avuto accesso allo spazio confinato dell'edificio, e la cedono quindi all'ambiente interno mediante flussi energetici convettivi e radiativi. Pertanto, la loro capacità di ridurre il carico termico di raffrescamento è del tutto marginale, e non dovrebbero essere presi in considerazione a tal fine.



Figura 22 – esempi di schermatura solare interna (tende alla veneziana e a rullo)

Piuttosto, vista la capacità di controllare la radiazione solare diffusa e riflessa, i sistemi di schermatura solare interni devono essere considerati correttamente più come dispositivi funzionali al comfort visivo, ovvero per il controllo dell'accesso della luce naturale e per contrastare i fenomeni di abbagliamento. Un tipico esempio in tal senso è costituito dalle

tende alla veneziana che, correttamente regolate, possono intercettare la radiazione solare diretta e rifletterla verso il soffitto, ricreando condizioni di luce naturale diffusa.

### 3.8. Elementi fissi di schermatura

Gli elementi fissi di schermatura solare sono generalmente posti all'esterno dell'involucro edilizio, e ne costituiscono parte integrante. Di solito, non sono dispositivi applicabili dopo la realizzazione del manufatto edilizio. Tipicamente, costituiscono elementi fissi di schermatura gli aggetti orizzontali, come ad esempio le mensole dei balconi, oppure i setti verticali o ancora la combinazione dei due.

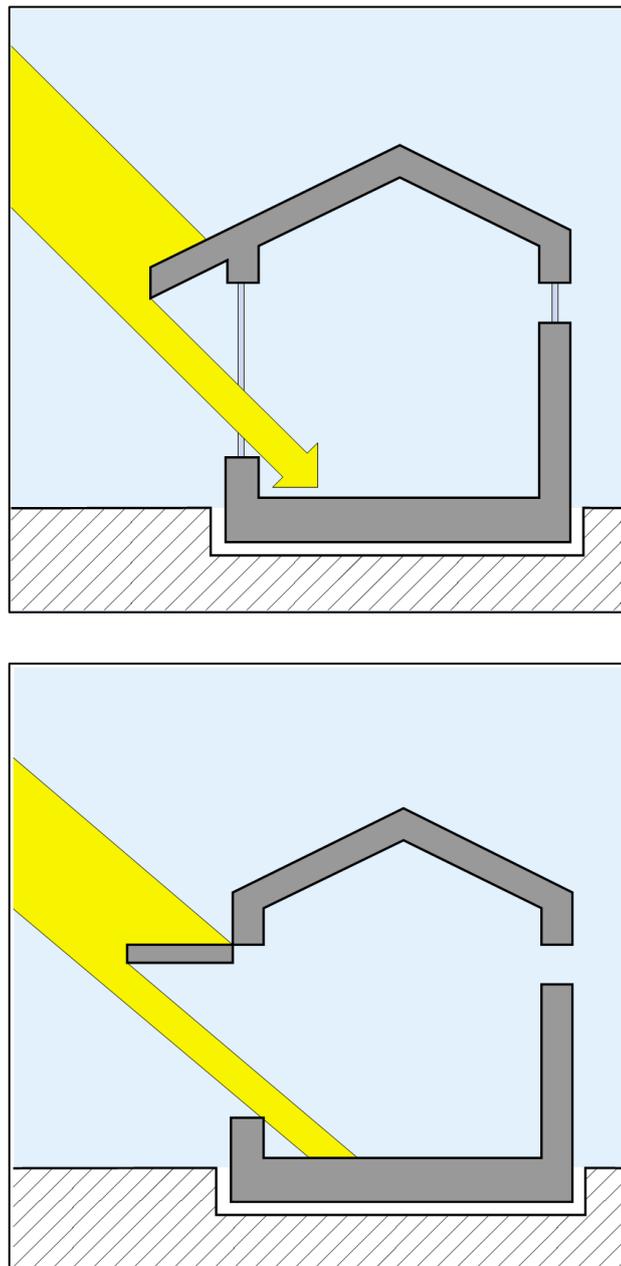


Figura 23 – elementi fissi di schermatura

Gli elementi fissi di schermatura, se adeguatamente progettati, costituiscono una soluzione estremamente efficace per la schermatura dell'involucro dalla radiazione solare diretta. Non hanno la medesima efficacia nello schermare la radiazione solare riflessa e diffusa. La realizzazione di questi manufatti è in genere economica, in special modo quanto vengono gettati in opera, e spesso non necessitano di manutenzione diversa da quella necessaria agli altri elementi costitutivi dell'involucro.



Figura 24 – combinazione di aggetto orizzontale e setto verticale

L'aggetto orizzontale è, senza dubbio, il più diffuso e semplice elemento fisso di schermatura solare, adeguato per intercettare la radiazione solare con elevati angoli di incidenza. Nell'emisfero boreale viene utilizzato prevalentemente per proteggere la superfici vetrate esposte a sud, per le quali rappresenta una ottima soluzione. Può essere convenientemente usato anche per superfici esposte a sud-est ed a sud-ovest. Correttamente dimensionato, un aggetto orizzontale posto su una superficie esposta a sud può schermare la radiazione solare diretta durante il periodo di raffrescamento, e consentirne invece il passaggio durante la stagione di riscaldamento.

Per controllare al meglio la radiazione solare diretta con bassi angoli di azimut, che ha luogo di primo mattino e nel tardo pomeriggio, l'aggetto può estendersi nella sua larghezza oltre i limiti della superficie trasparente da schermare.

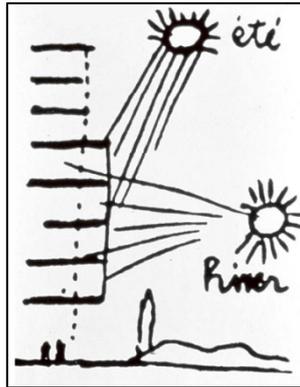


Figura 25 – disegno di Le Corbusier sulla differente direzione della radiazione solare in estate ed inverno

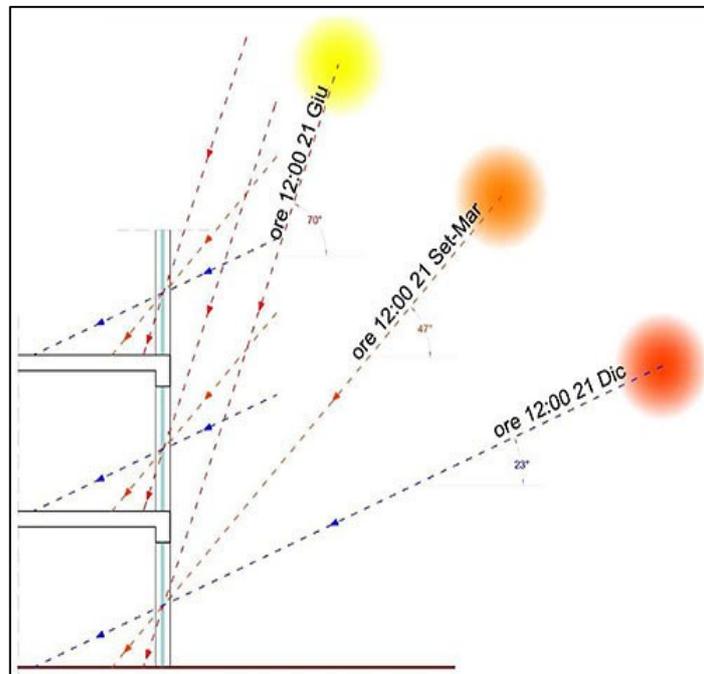


Figura 26 – direzione della radiazione solare diretta in diversi periodi dell'anno

In termini generali, la profondità dell'aggetto si determina in funzione dell'altezza dell'elemento vetrato, della latitudine, e della distanza tra il margine superiore della finestra e l'aggetto; la larghezza dell'aggetto viene determinata in funzione della larghezza della finestra e della latitudine.

Per facciate esposte ad est e ad ovest, gli aggetti orizzontali non costituiscono una soluzione di schermatura efficace; in tal caso, risulta più indicato l'utilizzo di setti verticali.

### 3.9. Dispositivi di schermatura solare regolabili

I dispositivi di schermatura solare regolabili possono essere installati internamente, esternamente, o nell'intercapedine di finestre doppie o triple. Tuttavia, nel caso più diffuso, i sistemi regolabili sono installati all'interno, dove possono essere facilmente manovrabili dagli occupanti dell'edificio. Esistono comunque dispositivi esterni manovrabili dall'interno per mezzo di meccanismi più o meno complessi. I dispositivi di schermatura regolabili, installati all'esterno, possono intercettare in maniera efficace la componente diretta della radiazione solare, prevenendo fenomeni di surriscaldamento, regolare l'accesso di luce naturale secondo le esigenze degli occupanti, e sono particolarmente efficaci per operare in condizioni di radiazione solare proveniente da direzioni con bassi angoli rispetto all'orizzonte.

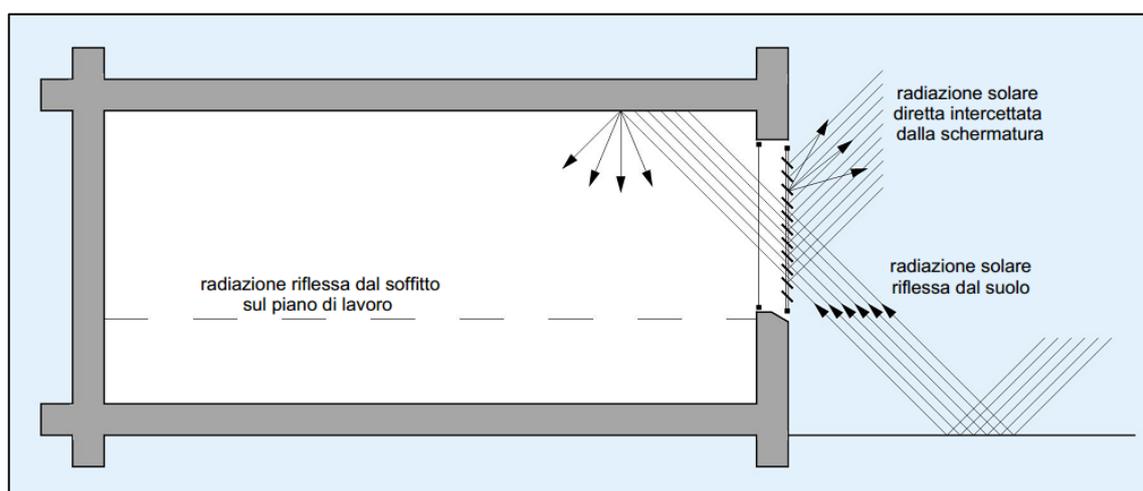


Figura 27 – dispositivo esterno di schermatura solare regolabile

A differenza dei dispositivi e degli elementi di schermatura solare fissi, i dispositivi di schermatura solare regolabili possono essere utilizzati in modo da non compromettere l'illuminazione naturale interna. La loro regolazione può essere anche automatizzata, creando sistemi che, se da un lato sono più efficienti, dall'altro sono più costosi e meno affidabili rispetto ai sistemi fissi.

### 3.10. Progettazione di schermature solari

In letteratura è possibile reperire numerosi e differenti approcci alla progettazione di schermature solari. Ci si può avvalere di modelli reali in scala, di strumenti di modellazione e simulazione software, maschere di ombreggiamento, o ancora metodi grafici. Szokolay [6] ha identificato tre fasi fondamentali, comuni alle diverse metodologie di progettazione:

- identificazione del periodo dell'anno per il quale si richiede la schermatura dell'edificio dalla radiazione solare;
- determinazione delle prestazioni degli elementi schermanti (in quale periodo dell'anno devono risultare efficaci);
- progettazione delle caratteristiche geometriche dell'elemento schermante

Stabilite le prestazioni desiderate dell'elemento schermante, è possibile pervenire agli stessi risultati mediante l'impiego di diverse tipologie di schermature.

### 3.11. Diagrammi solari

Nel secondo capito sono state illustrate le modalità di calcolo analitiche degli angoli di altezza solare e di azimut solare. Tuttavia, la determinazione della posizione del Sole può essere anche effettuata avvalendosi dei diagrammi solari.

Fissata una località, il diagramma solare è una modalità di rappresentazione bidimensionale del percorso del Sole durante l'anno. Il diagramma si ottiene proiettando la volta celeste e la posizione del Sole su di una superficie. A seconda delle modalità secondo cui si opera detta proiezione, si ottengono diverse tipologie di diagrammi solari, che tuttavia contengono informazioni equivalenti.

Nel diagramma solare polare sono presenti una serie di linee curve, dette linee della data (Figura 28), ciascuna delle quali descrive la traiettoria del sole in uno specifico giorno dell'anno. Le linee che ricordano la forma di un 8 sono dette linee dell'ora (Figura 29), e sono formate dall'insieme di punti che, nel diagramma solare, sono rappresentativi delle posizioni assunte dal sole durante l'anno ad una data ora prefissata. Le circonferenze concentriche rappresentano i gli angoli di altezza solare (Figura 30), variabili tra  $0^\circ$  e  $90^\circ$ . Infine, sulla circonferenza del diagramma più esterna, graduata, sono rappresentati gli angoli di azimut solare (Figura 31).

Per utilizzare la carta, ovvero per determinare angoli di altezza e azimut solari ad una data ora, è sufficiente individuare il punto di intersezione tra la linee della data e dell'ora prescelte, e tracciare il raggio della circonferenza più esterna passante per detto punto. Dalla linea di altezza solare più prossima al punto di intersezione si può subito determinare l'angolo di altezza solare, mentre per conoscere l'azimut basta leggere il valore sulla circonferenza esterna individuato dal raggio tracciato (Figura 32).

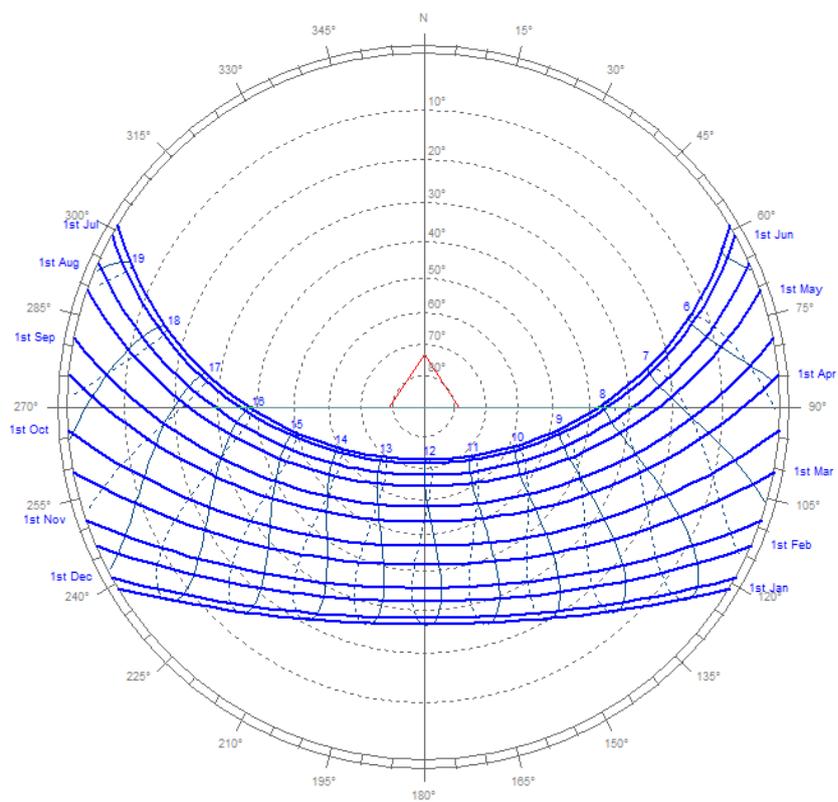


Figura 28 – Diagramma solare polare. In blu le linee della data

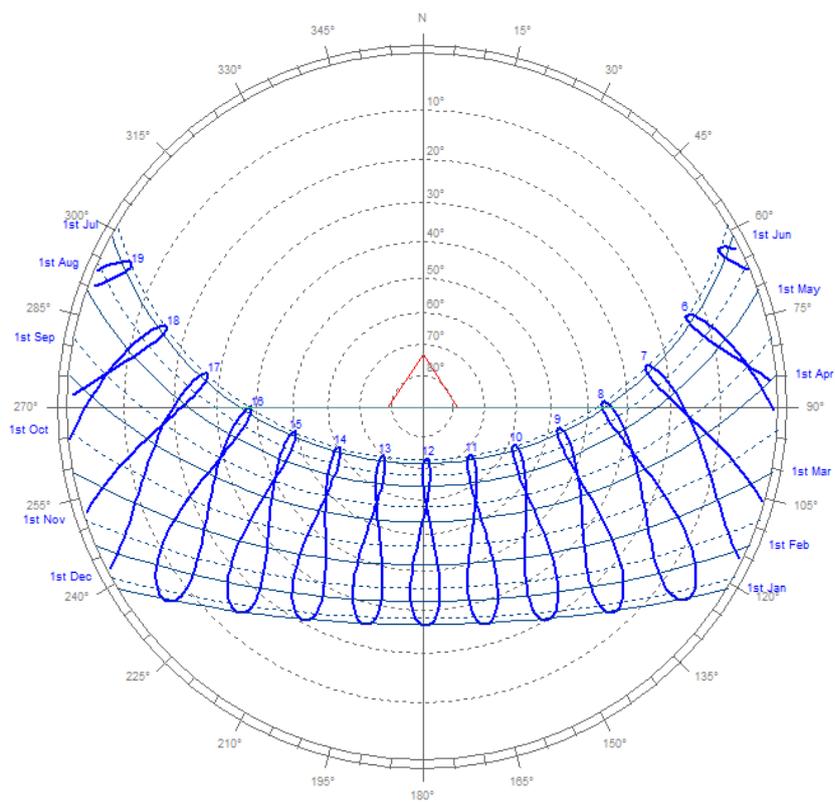


Figura 29 – Diagramma solare polare, in blu le linee dell'ora

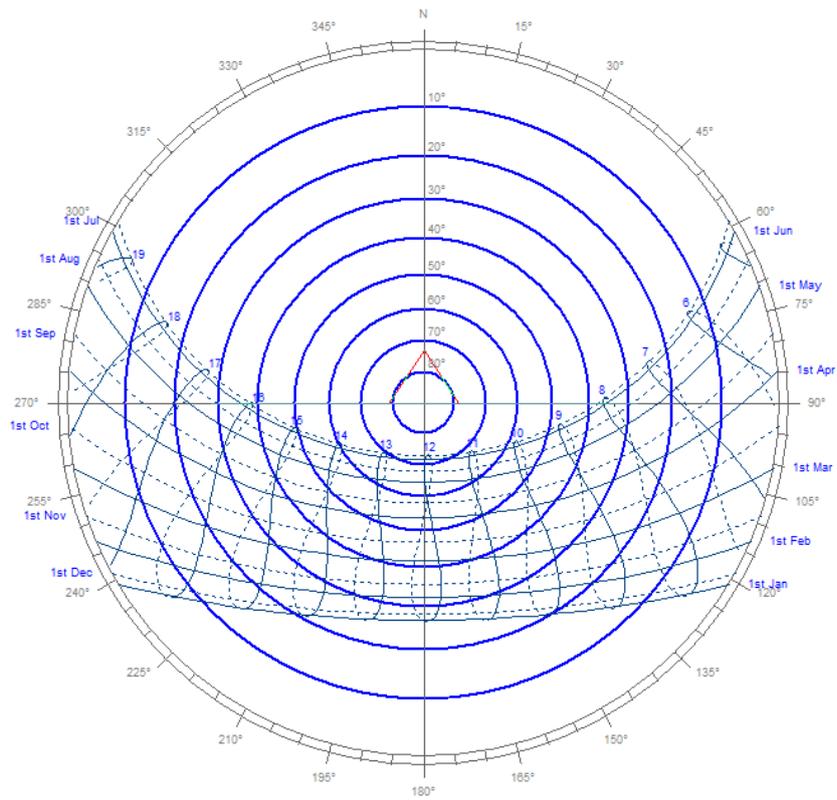


Figura 30 – Diagramma solare polare, in blu le linee di altezza solare

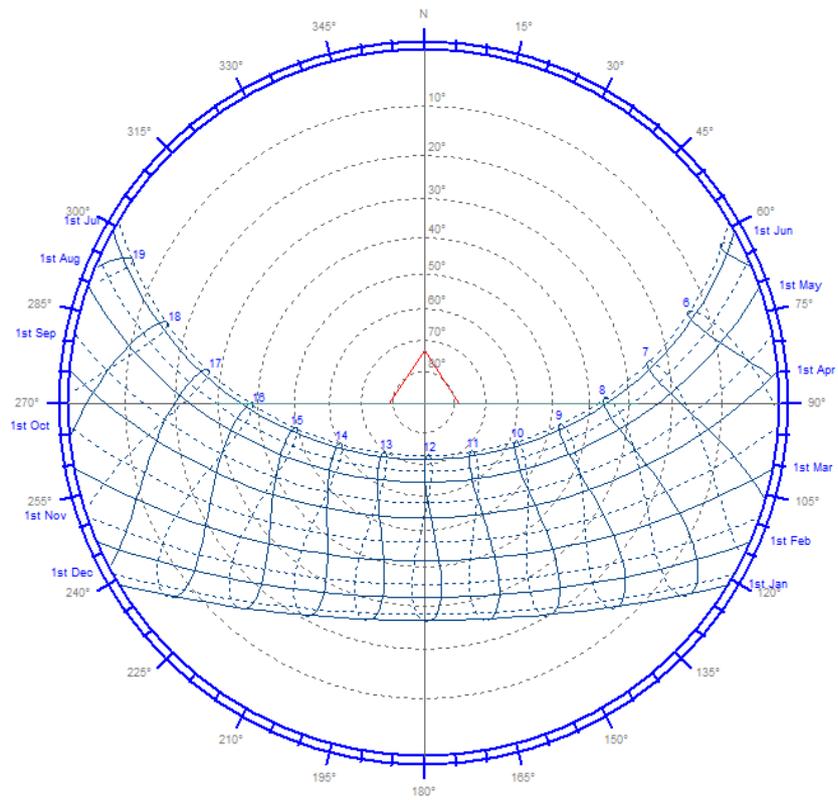


Figura 31 – Diagramma solare polare, in blu la circonferenza graduata con i valori di azimut solare

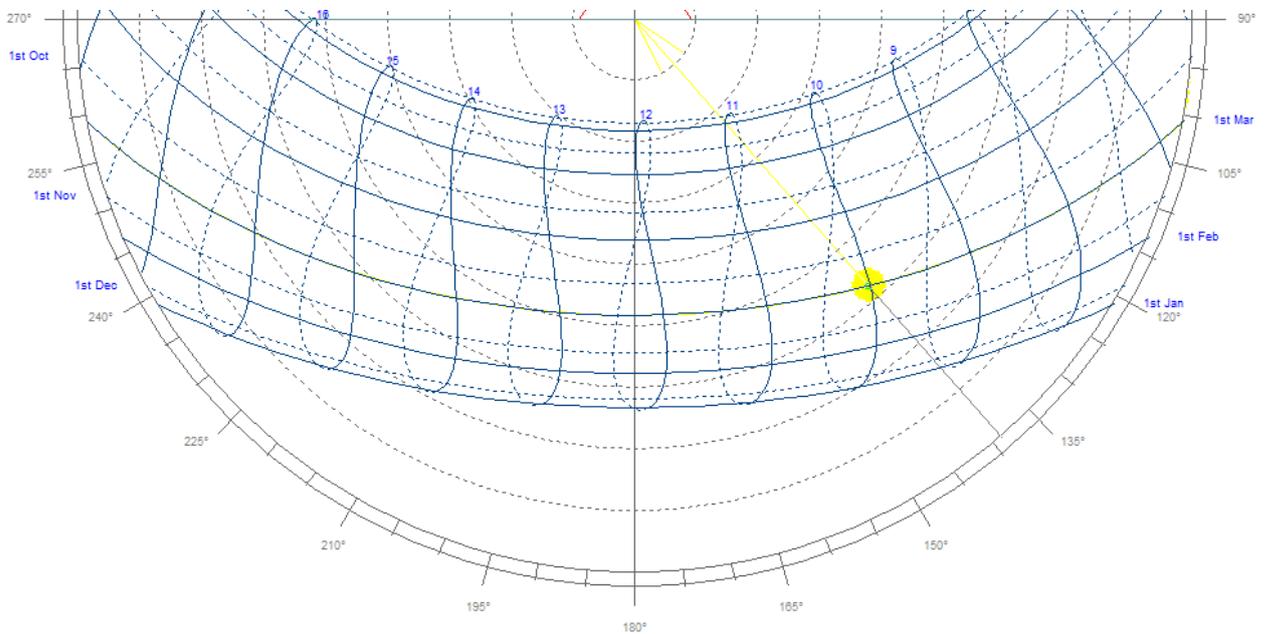


Figura 32 – Diagramma solare polare, determinazione di altezza e azimut solari

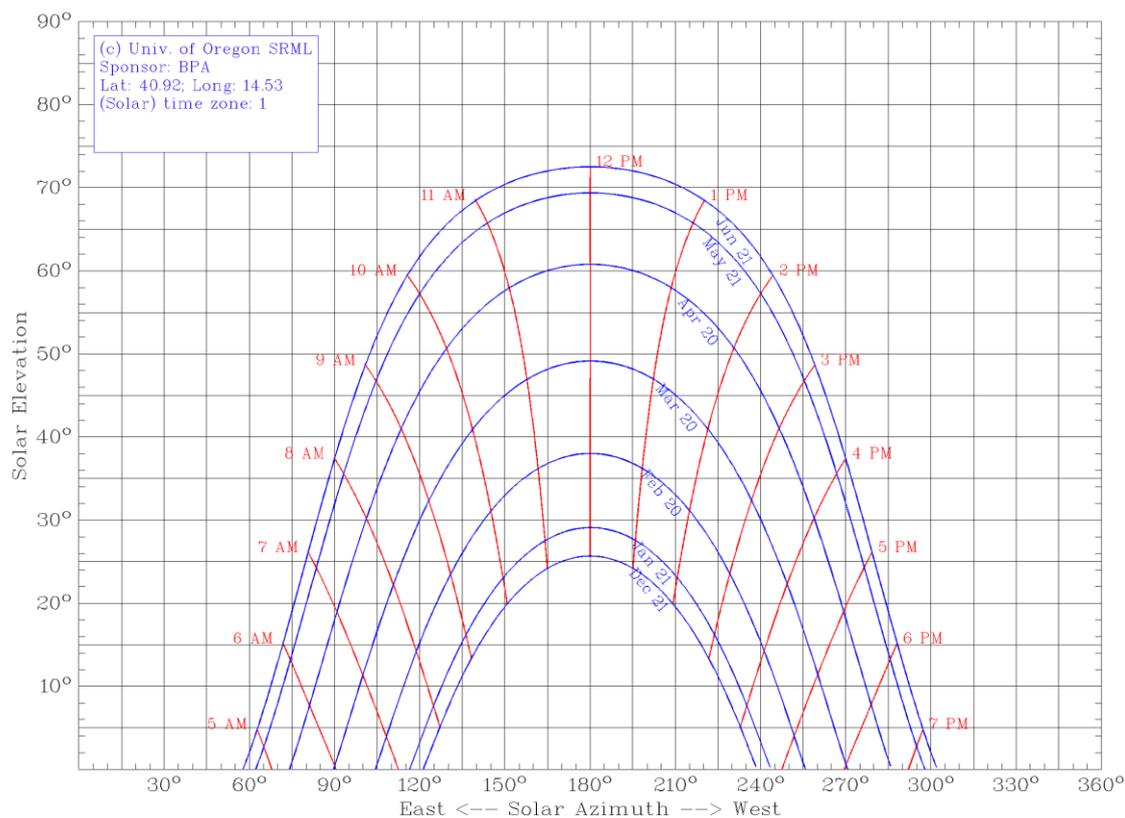


Figura 33 – Diagramma solare cartesiano

### 3.12. Heliodon

L'heliodon è uno strumento per l'analisi della radiazione solare e della sua interazione con l'ambiente costruito, utilizzato in passato soprattutto a fini didattici. Mediante il suo utilizzo si possono riprodurre, sui modelli tridimensionali in scala dell'edificio o del contesto da studiare, le effettive condizioni di insolazione in funzione della latitudine, del periodo dell'anno e dell'ora del giorno. Esistono diverse tipologie di heliodon; in quelli a sorgente luminosa fissa, per ottenere una ricostruzione precisa degli effetti del Sole sull'edificio ed in particolar modo delle ombre, il modello deve essere ruotato su tre assi corrispondenti a latitudine, giorno dell'anno e ora del giorno per i quali si vuole effettuare la simulazione.



Figura 34 – heliodon a piano fisso

Per essere realistica, questa modalità di simulazione richiede dall'osservatore l'assunzione di una giusta prospettiva, il che può rivelarsi scomodo. Pertanto, alcuni heliodon consentono lo spostamento della sorgente luminosa, simulando il cammino apparente del Sole lungo l'eclittica, in modo da evitare movimenti del piano di lavoro.

## 4. Attività di ricerca

### 4.1. Introduzione

L'attività di ricerca svolta durante nell'ambito del dottorato è stata finalizzata alla valutazione degli effetti dei dispositivi di schermatura solare sul fabbisogno energetico del sistema edificio-impianto. In particolare, l'attenzione è stata focalizzata su edifici con destinazione d'uso ufficio.

Il risparmio energetico conseguito grazie all'adozione di un sistema di schermature è stato valutato su base annua, in particolar modo con riferimento all'abbattimento dei carichi di raffrescamento. Le valutazioni sono state effettuate mediante l'utilizzo di un software di simulazione energetica degli edifici. I fabbisogni energetici dei principali impianti asserviti all'edificio, ovvero riscaldamento, raffrescamento ed illuminazione, sono stati valutati in funzione di numerosi parametri significativi, quali ad esempio le condizioni climatiche, le caratteristiche geometriche delle schermature, della trasmittanza e della capacità termiche del involucro edilizio, e dell'orientamento dell'edificio.

Le schermature solari hanno mostrato la più alta efficienza energetica per i climi caldi estivi: per esempio, la risparmio energetico su base annua connesso con l'utilizzo di dispositivi di adeguati dispositivi di schermatura è stato valutato tra l'8% nel caso di Milano, la località dalle condizioni climatiche invernali più rigide tra quelle esaminate, ed il 20 % nel caso di Palermo, località che al contrario presenta le condizioni climatiche invernali più miti tra quelle esaminate.

Nel seguito del capitolo verranno illustrati i principali risultati dell'attività conseguiti, in particolare quelli pubblicati nell'articolo *"Effects of solar shading devices on energy requirements of standalone office buildings for Italian climates"* [38], a cura di Bellia, De Falco e Minichiello.

## 4.2. Riferimenti alla letteratura scientifica

È ampiamente documentato in letteratura che adeguate strategie energetiche passive per gli edifici migliorano le condizioni di benessere termo-igrometrico, soprattutto in regime di raffrescamento, e quindi consentono una riduzione della taglia e dei fabbisogni energetici degli impianti attivi di climatizzazione [11, 12]. Ciò consente anche una riduzione dei picchi del fabbisogno energetico elettrico durante il periodo estivo [13].

Tra le strategie passive proposte per l'involucro edilizio opaco [13, 14] e trasparente [15, 16], l'utilizzo di adeguati sistemi di schermatura solare per componenti vetrati dell'involucro ha un ruolo preminente. Questa strategia ancora più attuale se si tiene conto che il mercato delle costruzioni propone sistemi per l'involucro sempre maggiormente isolati dal punto di vista termico, con una elevata tenuta alle infiltrazioni d'aria dall'esterno: ciò determina che le condizioni di benessere all'interno dell'ambiente confinato sono sempre più sensibili ai guadagni solari [17].

La funzione principale di un sistema di schermatura è la protezione dell'involucro edilizio trasparente dalla radiazione solare durante il periodo di raffrescamento, prevenendo il surriscaldamento dello spazio interno bloccando l'accesso di flussi energetici non desiderati. Infatti, sebbene siano numerosi i fattori che possono concorrere al verificarsi di condizioni di surriscaldamento durante il periodo estivo, nei climi caldi un fattore determinante è costituito dagli apporti solari che hanno accesso all'edificio attraverso l'involucro trasparente.

Tra le possibili strategie di ombreggiamento per limitare i carichi termici di raffrescamento, quella di intercettare la radiazione solare prima che essa incida sulla superficie vetrata risulta essere la più efficace [18, 19].

In alcuni casi, l'utilizzo di adeguati sistemi schermanti esterni può ridurre gli apporti solari anche in misura dell'80% [20].

Da una analisi della letteratura scientifica, sono emersi alcuni aspetti che si è ritenuto meritevoli di ulteriore approfondimento. Di seguito vengono riepilogati alcuni dei più significativi lavori consultati.

Palmero-Marrero e Oliveira [21] hanno studiato gli effetti di frangisole esterni applicati ad un edificio in diverse condizioni climatiche (Città del Messico, il Cairo, Lisbona, Madrid, Londra). Nello studio vengono comparati, in presenza ed in assenza di dispositivi schermanti, le condizioni termo-igrometriche interne e il fabbisogno energetico dell'edificio.

Tzempelikos e Athienitis [22] hanno invece studiato gli effetti dei sistemi di schermatura esterni sul fabbisogno energetico per il raffrescamento e per l'illuminazione interna di un edificio ubicato a Montreal.

Con riferimento a climi italiani, Datta [23] ha analizzato gli effetti di un dispositivo di ombreggiamento esterno sulle prestazioni energetiche di un semplice edificio a due zone termiche. Lo schermo, esterno ed orizzontale, è stato considerato per una finestra esposta a sud. Il valore di trasmittanza termica dell'involucro opaco dell'edificio simulato è di 1,691 W/m<sup>2</sup>K.

Lee e Tavit [24] hanno invece valutato il risparmio energetico ottenibile in un edificio di tipo commerciale mediante l'applicazione di sistemi di schermatura solare esterni a finestre con vetro elettrocromico. Gli autori hanno inoltre valutato l'impiego di vetri termo tropici, dotato di controllo attivo dimmerabil, come sistemi di schermatura [25].

Uno studio sulla riduzione dei carichi di raffrescamento dovuta a sistemi di schermatura solare, con riferimento a moderne abitazioni di Cipro, è stato condotto da Florides et al. [26]. Gli autori hanno valutato detta riduzione nella misura dell'8-9%.

David et al. [27] hanno analizzato effetti energetici e relativi al comfort visivo dei dispositivi di schermatura.

Nell'articolo "Comparative advantage of an exterior shading device in thermal performance for residential buildings" [19] vengono valutati gli effetti di una configurazione sperimentale di sistemi di schermatura solare esterni per un edificio residenziale in Corea del Sud. In questo caso, anche mediante l'uso di un software di simulazione energetica, oltre all'impatto energetico del sistema di schermatura sui carichi

di riscaldamento e raffrescamento è stato preso in considerazione il suo impatto sull'illuminazione naturale degli ambienti.

Abu-Zour et al. [28] hanno invece proposto una nuova tipologia di collettore solare termico integrato in un dispositivo di schermatura.

Da uno studio della letteratura disponibile si nota che, con riferimento a località climatiche italiane, esistono pochi studi che documentano gli effetti energetici dei sistemi di schermatura solare applicati agli edifici [23].

Dall'indagine si evince inoltre che raramente la ricerca si è focalizzata sugli effetti dei sistemi di schermatura solare anche con riferimento al fabbisogno energetico per l'illuminazione [22], che pure può rappresentare un elemento rilevante nel bilancio energetico complessivo di un sistema edificio-impianti.

Pertanto si è deciso di focalizzare l'attività di ricerca sugli effetti energetici di dispositivi esterni di schermatura solare, con riferimento a condizioni climatiche di città italiane.

Per lo studio si è scelto di utilizzare EnergyPlus, un accurato software di simulazione energetica per il sistema edificio-impianto ampiamente utilizzato ai fini di ricerca [25]. EnergyPlus, come verrà illustrato più avanti nel testo, è soggetto ad un intenso processo di validazione mediante diverse metodologie. In particolare, i modelli di ombreggiamento utilizzati dal software sono stati validati attraverso indagini sperimentali [17, 30].

### 4.3. Software di simulazione energetica per il sistema edificio-impianto

I programmi di simulazione energetica per il sistema edificio-impianto vengono largamente utilizzati sia dal mondo accademico, a scopi di ricerca, che professionale. La loro validazione è una componente importante dello sviluppo e perfezionamento dei modelli e degli algoritmi implementati nel software.

Judkoff [5] individua tre diversi approcci utilizzati nella validazione costruzione di software di simulazione energetica

- Validazione analitica, ottenuta dal confronto tra i risultati del software di simulazione e la soluzione analitica;
- Validazione comparativa, ottenuta confrontando tra loro i risultati di diversi software di simulazione;
- Validazione sperimentale, ottenuta confrontando i risultati del software di simulazione energetica con i risultati di un esperimento reale.

Ognuno di questi metodi di validazione include una serie di vantaggi e svantaggi, che vengono riassunti nella Tabella 1.

Validazione	Vantaggi	Svantaggi
<b>Analitica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Risultato esatto come riferimento</li> <li>- Nessuna incertezza legata ai dati di input</li> <li>- Non dispendiosa in termini di tempo</li> <li>- Non dispendiosa in termini economici</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Limitato numero di casi per i quali si possono ottenere soluzioni analitiche</li> </ul>
<b>Comparativa</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nessuna incertezza legata ai dati di input</li> <li>- Qualsiasi livello di complessità è ammissibile</li> <li>- Non dispendiosa in termini di</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Non c'è un risultato esatto come riferimento</li> </ul>

	tempo -Non dispendiosa in termini economici	
<b>Sperimentale</b>	-Qualsiasi livello di complessità è ammissibile -Risultato esatto approssimato nei limiti della affidabilità delle misurazioni effettuate	-Margine di incertezza -Dispendiosa in termini di tempo -Dispendiosa in termini economici -Limitato numero di casi trattabili

Tabella 1 – Comparazione tra diversi metodi di validazione del software di simulazione energetica degli edifici

EnergyPlus è tra i più noti programmi di simulazione energetica in regime dinamico del sistema edificio-impianto. Basato sui programmi BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) e DOE-2, sviluppati negli Anni 80 per poter eseguire stime e simulazioni sui carichi energetici degli edifici, EnergyPlus è sviluppato a cura del Dipartimento dell’Energia degli Stati Uniti d’America (DoE) e rilasciato sotto licenza open source.

Il lungo percorso di sviluppo ed i continui aggiornamenti hanno reso EnergyPlus uno dei più affidabili strumenti di simulazione presenti nel settore. Tutte le versioni di EnergyPlus vengono accuratamente testate prima del rilascio. La validazione di EnergyPlus prosegue parallelamente al suo sviluppo e si basa, tra l’altro, sui seguenti test analitici e comparativi:

- **TEST ANALITICI**

- Test basati sul progetto di ricerca ASHRAE 865, “Development Of Accuracy Tests For Mechanical System Simulations”;
- Test basati sul progetto di ricerca ASHRAE 1052, “Development of an Analytical Verification Test Suite for Whole Building Energy Simulation Programs – Building Fabric”;

- **TEST COMPARATIVI**

- ANSI/ASHRAE Standard 140-2011, “Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs”;
- Metodi previsti dall’International Energy Agency Solar Heating and Cooling Programme (IEA SHC) BESTest (Building Energy Simulation Test), non ancora ricompresi nell’ANSI/ASHRAE Standard 140-2011;
- Test EnergyPlus HVAC Component;
- Test EnergyPlus Global Heat Balance.

Sul sito di EnergyPlus è disponibile ampia documentazione dei test di validazione del software secondo le metodologie summenzionate, ed in particolare i seguenti report:

- ANSI/ASHRAE Standard 140-2011;
- Envelope;
- HVAC CE100-200;
- HVAC CE300-545;
- HVAC HE100-230;
- HERS (Section 7);
- ASHRAE Research Project 1052;
- EnergyPlus HVAC Component Comparative Tests;
- EnergyPlus Global Energy Balance Tests;
- IEA BESTEST In-Depth Ground Coupled Heat Transfer Tests;
- IEA BESTEST Multi-Zone Non-Airflow In-Depth Tests;
- IEA BESTEST Mechanical Equipment & Control Strategies for a Chilled Water and a Hot Water System.

Maggiori informazioni sulla validazione di EnergyPlus sono disponibili al sito [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus\\_testing.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_testing.cfm).

#### **4.4. Finalità della ricerca**

Lo scopo dell'attività di ricerca è stato innanzitutto quello di fornire dei criteri semplificati ai progettisti, come ad esempio ingegneri ed architetti, per valutare la convenienza in termini energetici di un sistema di schermature solari esterne applicato all'involucro di un edificio per uffici isolato, con riferimento a climi di alcune località italiane, ovvero Milano, Roma e Palermo. Ovviamente i risultati sono estendibili a località con condizioni climatiche simili.

Inoltre, nel caso in cui venga valutata la convenienza delle schermature solari in termini di riduzione del fabbisogno energetico complessivo del sistema edificio-impianto, lo studio consente di quantificare i benefici energetici conseguibili e di ottimizzare le caratteristiche geometriche ed il posizionamento degli schermi in funzione di numerosi parametri caratteristici del sistema edificio-impianto, come ad esempio il grado di isolamento termico dell'involucro edilizio o la sua inerzia termica. L'analisi effettuata è focalizzata in modo particolare sul fabbisogno complessivo di energia elettrica dell'edificio.

#### 4.5. Caso studio

Il modello di edificio oggetto di simulazione è mostrato nelle Figura 35 e nella Figura 36, mentre le principali caratteristiche del sistema edificio impianto e le condizioni al contorno della simulazione sono contenute nella Tabella 2.

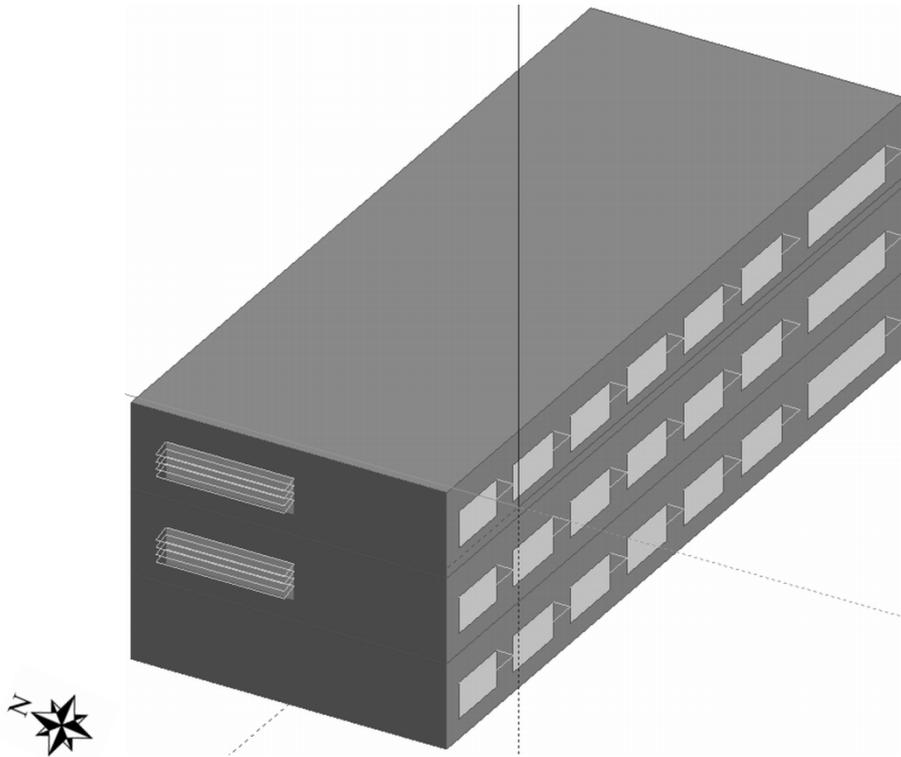


Figura 35 – modello tridimensionale dell'edificio simulato

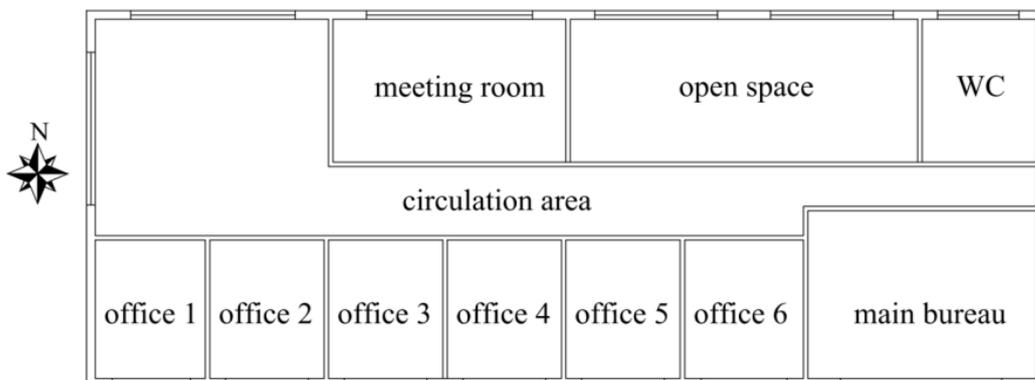


Figura 36 – pianta del piano tipo dell'edificio simulato

Ciascun piano tipo dell'edificio è dotato di sei uffici di uguali dimensioni, una sala riunioni, un ufficio direzionale, un open space, servizi e superfici connettive. Ogni ambiente ha almeno un affaccio verso l'esterno. Il sistema di climatizzazione asservito all'edificio è costituito da fan-coil e pompa di calore/chiller elettrici, i cui COP e EEER stagionali, variabili in funzione della località climatica, sono contenuti in Tabella 2.

**EDIFICIO PER UFFICI DI RIFERIMENTO – DIMENSIONI E PRINCIPALI CONDIZIONI AL CONTORNO**

<b>Profondità (direz. N-S)</b>	12.8 m	<b>Lunghezza</b>	32.3 m
<b>Altezza</b>	10.5 m	<b>Area</b>	413.4 m <sup>2</sup>
<b>S/V</b>	0.28 m <sup>-1</sup>	<b>Volume</b>	4341.1 m <sup>3</sup>
<b>Window to wall ratio (WWR)</b>	30%	<b>Infiltrazioni d'aria</b>	0.5 vol h <sup>-1</sup>
<b>Superficie delle finestre</b>			
<b>Nord</b>	<b>Sud</b>	<b>Est</b>	<b>Ovest</b>
100 m <sup>2</sup>	100 m <sup>2</sup>	23 m <sup>2</sup>	16 m <sup>2</sup>
<b>Altezza delle finestre</b>		1.5 m	
<b>T<sub>set-point-estivo</sub></b>	26 °C	<b>Fattore solare del vetro</b>	0.7
<b>U<sub>vetratura</sub></b>	2.7 W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	<b>T<sub>set-point-invernale</sub></b>	20 °C
<b>U<sub>telaio</sub></b>	3.6 W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	<b>U<sub>pareti-esterne</sub></b>	0.58 W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
<b>U<sub>copertura</sub></b>	1.0 W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	<b>U<sub>pavimento-piano-terra</sub></b>	0.90 W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
<b>Fattore di occupazione</b>	0.111 persone/m <sup>2</sup>	<b>Periodo di occupazione dell'edificio</b>	Dalle 09:00 alle 18:00 dal lunedì al venerdì
<b>Illuminamento sul piano di lavoro</b>	Uffici: 400 lx	<b>Tasso metabolico degli occupanti</b>	0.9 met/persona
	Atrio: 100 lx	<b>Apporti termici dovuti alle attrezzature da ufficio elettriche</b>	20 W/m <sup>2</sup>
	Corridoi: 100 lx		
	Servizi: 200 lx	<b>Resistenza termica dell'abbigliamento</b>	1 clo per l'inverno 0.5 clo per l'estate
<b>SEER<sub>raff</sub> (fan coils + chiller)</b>	2.8 (Milano)	<b>SCOP<sub>risc</sub> (fan coils + pompa di calore)</b>	2.8 (Milano)
	2.7 (Roma)		3.0 (Roma)
	2.6 (Palermo)		3.2 (Palermo)
<b>Nota:</b> gli impianti di climatizzazione vengono azionati solo durante il periodo di occupazione dell'edificio da parte degli utenti			

<b>Dati climatici: collezione "Gianni De Giorgio" [33]</b>			
<b>Località</b>	Milano (Linate)	Roma (Fiumicino)	Palermo (Punta Raisi)
<b>Latitudine</b>	45.43°	41.80°	38.18°
<b>Longitudine</b>	9.28°	12.23°	13.10°
<b>Gradi giorno di riscaldamento (base 10 °C)</b>	1771	2174	3082
<b>Gradi giorno di raffrescamento (base 18 °C)</b>	2454	1514	744
<b>Massima irradiazione solare giornaliera media mensile diretta su piano orizzontale</b>	5539 Wh m <sup>-2</sup> (luglio)	6121 Wh m <sup>-2</sup> (luglio)	6714 Wh m <sup>-2</sup> (luglio)

Tabella 2 – Edificio per uffici di riferimento, dimensioni e principali condizioni al contorno

La scelta del dispositivo di schermatura solare ottimale per una data finestra è stato condotto innanzitutto con riferimento al suo orientamento. Dall'osservazione della Figura 4 Figura 35 si evince che per gli elementi trasparenti dell'involucro orientati a sud si è optato per dispositivi di schermatura solare orizzontali (overhang), mentre per quelli orientati verso est ed ovest si è optato per dispositivi di schermatura solare verticali (louver). Le scelte sono state fatte coerentemente con le buone pratiche di progettazione e con la letteratura disponibile [20, 34]. Le principali caratteristiche dei dispositivi di schermatura adottati sono schematizzati in Tabella 3.

<b>Schermo orizzontale (overhang)</b>		<b>Schermo verticale (louver)</b>	
<b>Orientamento Sud</b>		<b>Orientamento Est, Ovest</b>	
<b>Proiezione</b> <i>(projection)</i>	1.0 m (se non diversamente specificato)	<b>Numero lamelle</b> <i>(louver blades #)</i>	4 (se non diversamente specificato)
<b>Distanza verticale dal filo superiore della finestra</b> <i>(vertical offset from top of window)</i>	0.0 m	<b>Distanza verticale dal filo superiore della finestra</b> <i>(vertical offset from top of window)</i>	0.0 m
<b>Sovrapposizione orizzontale oltre la finestra</b> <i>(horizontal window overlap)</i>	0.0 m	<b>Sovrapposizione orizzontale oltre la finestra</b> <i>(horizontal window overlap)</i>	0.0 m
<b>Materiale impiegato per la costruzione delle schermature:</b> alluminio.  <b>Conduttività termica:</b> 221.0 W/m K <b>Calore specifico:</b> 896 J/kg K <b>Densità:</b> 2740 kg/m <sup>3</sup> <b>Riflettanza solare:</b> 0.61 <b>Emissività nell'infrarosso:</b> 0.25		<b>Profondità delle lamelle</b> <i>(blade depth)</i>	0.7 m
		<b>Angolo di inclinazione</b> <i>(angle)</i>	25°
		<b>Spaziatura verticale</b> <i>(vertical spacing)</i>	0.3 m
		<b>Distanza dalla finestra</b> <i>(distance from window)</i>	0.3 m

Tabella 3 – caratterizzazione dei dispositivi di ombreggiamento

I parametri geometrici del dispositivo di ombreggiamento verticale, applicato alle finestre esposte ad est e ad ovest, sono illustrati graficamente nella Figura 37, mentre nella figura 24 si può vedere un esempio di installazione reale.

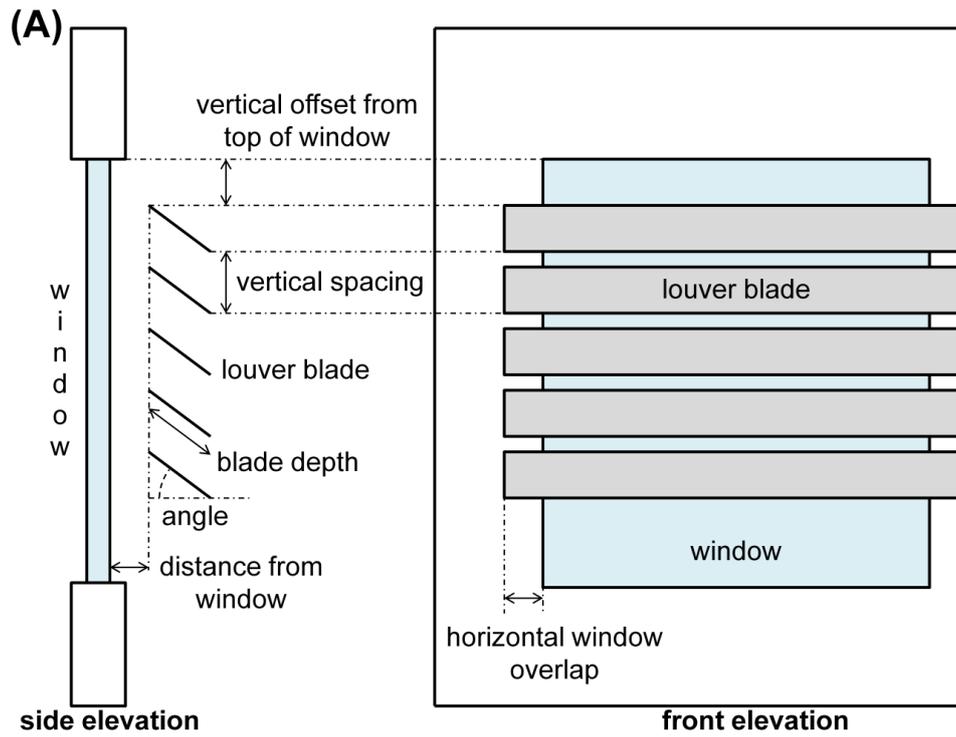


Figura 37 – dispositivo schermante verticale (louver)



Figura 38 – Esempio di installazione di louver esterni

Nella Figura 39 sono invece mostrati i parametri geometrici del dispositivo di ombreggiamento orizzontale, applicato alle finestre esposte a sud, mentre nella figura 25 si può vedere un esempio di installazione reale.

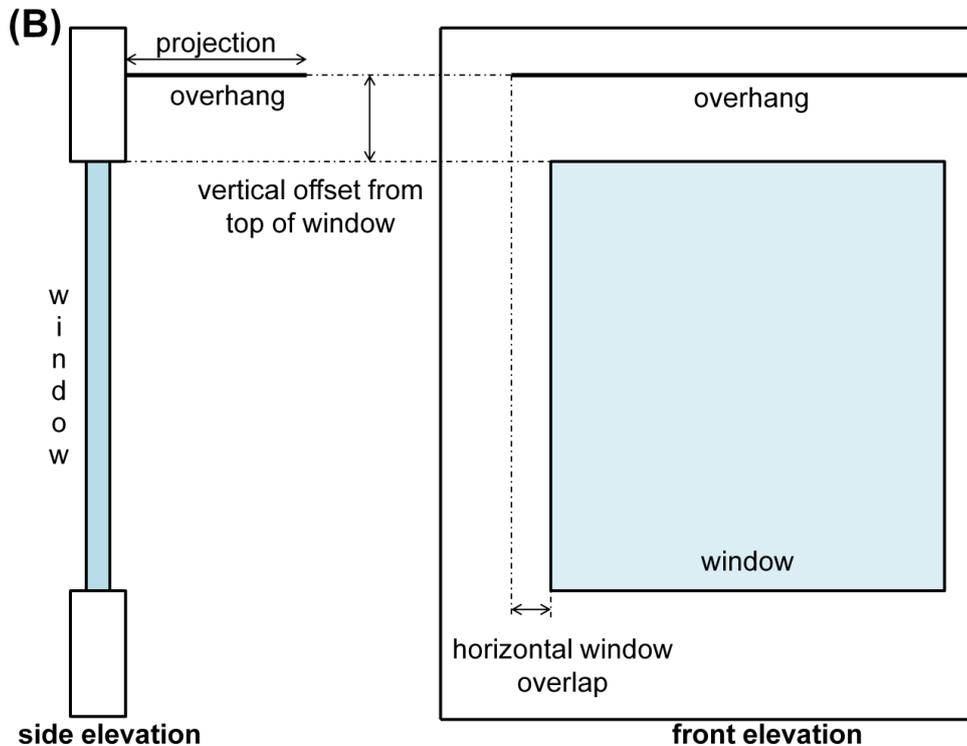


Figura 39 – dispositivo schermante orizzontale (overhang)

La configurazione dei dispositivi di ombreggiamento è stata ottimizzata al fine di minimizzare il fabbisogno energetico del sistema edificio-impianti, effettuando numerose simulazioni energetiche al variare dei parametri geometrici e costruttivi più significativi come, a titolo di esempio, il numero di lamelle e la loro inclinazione (louver), o la profondità dell'oggetto (overhang).



Figura 40 – esempio di installazione di overhang per involucro vetrato orientato a sud

#### 4.6. Risultati della ricerca

Al fine di analizzare gli effetti dei dispositivi di schermatura solare esterni sul bilancio energetico dell'edificio oggetto di indagine, con riferimento ai fabbisogni di energia per il riscaldamento, raffrescamento ed illuminazione, sono stati presi in esame diversi parametri del modello.

Quando non diversamente specificato, i valori dei parametri più significativi sono riportati in Tabella 2 e Tabella 3.

L'edificio modellato oggetto di simulazione presenta una pianta rettangolare, ed è disposto per il lato maggiore lungo la direttrice est-ovest (Figura 35 e Figura 36). Pertanto, l'edificio ha i lati corti esposti ad est ed ovest, mentre quelli lunghi sono esposti a nord e sud. Ciò comporta che la superficie vetrata esposta ad est ed ovest, che è opportuno proteggere dalla radiazione solare con dispositivi di schermatura verticali (louver), è minore di quella esposta verso nord e verso sud, che viene invece schermata con dispositivi orizzontali (overhang). Tanto premesso, è lecito supporre che l'impatto di questi ultimi sul bilancio energetico complessivo dell'edificio sarà preponderante rispetto a quello dei louver.

L'utilizzo di un sistema di schermature esterno di tipo fisso comporta la riduzione del fabbisogno energetico per il raffrescamento durante il periodo estivo, mentre può determinare un aumento del fabbisogno energetico per il riscaldamento e per l'illuminazione. Infatti, la riduzione degli apporti solari dovuta alla presenza dei sistemi di schermatura si traduce in un maggior fabbisogno di energia per il riscaldamento dell'edificio durante il periodo invernale, ed in un maggior fabbisogno di energia per l'illuminazione durante tutto l'anno.

Appare quindi chiaro che la migliore soluzione schermante possibile non è quella che minimizza il solo fabbisogno energetico per il raffrescamento, ma quella che, su base annua, determina il minor fabbisogno energetico complessivo per raffrescamento, riscaldamento ed illuminazione.

Preliminarmente alla ricerca, si è proceduto ad effettuare alcune verifiche preliminari sul modello realizzato, in particolare sulla adeguatezza dei fabbisogni energetici ottenuti in output dal codice di calcolo. Ad esempio, con riferimento alla località con il clima più caldo tra quelle prese in esame, Palermo, si è visto che nel periodo dal 1 dicembre al 31 marzo, ovvero nel periodo di riscaldamento stabilito dal DPR n. 412/93 per la zona climatica B, il raffrescamento dell'edificio è risultato necessario solo in 117 h, che rappresentano il 4% delle ore totali (2904 h).

Allo scopo di valutare gli effetti energetici derivanti dall'adozione di un sistema di schermatura per l'edificio modello, sono stati presi in esame diversi parametri, in particolare:

- Profondità degli aggetti orizzontali;
- Condizioni climatiche;
- Altezza dell'edificio;
- Isolamento termico dell'edificio;
- Capacità termica dell'involucro edilizio;
- Rapporto tra involucro opaco ed involucro trasparente;
- Sistema di controllo dell'illuminazione;
- Orientamento dell'edificio.

#### 4.6.1. Profondità degli aggetti orizzontali

Il fabbisogno energetico dell'edificio oggetto di indagine è stato calcolato con riferimento all'adozione di sistemi schermanti esterni orizzontali (overhang) riportati in Tabella 3, per diverse profondità dell'aggetto orizzontale (0,5 m – 1,0 m – 1,5 m), in un intervallo di valori simile a quello considerato in altre pubblicazioni scientifiche sul tema [34]. Sono state considerate le condizioni climatiche di tre città dell'Italia settentrionale, centrale e meridionale, ovvero Milano, Roma e Palermo. Il fabbisogno energetico ottenuto per ciascuna delle condizioni di test, ottenute al variare della località climatica e dalla profondità dell'aggetto, è stato poi confrontato con il fabbisogno energetico dell'edificio considerato privo di sistemi di schermatura, per le medesime condizioni climatiche (nel seguito identificato come "caso base").

Per le condizioni climatiche di Palermo, il migliore risultato, ovvero la maggiore riduzione del fabbisogno complessivo di energia elettrica per i sistemi di riscaldamento, raffrescamento ed illuminazione, è stato ottenuto con aggetti orizzontali di profondità 1.0 m. In questo caso, l'adozione del sistema schermante ha determinato un decremento del fabbisogno energetico di circa il 20% rispetto al caso base. La riduzione del fabbisogno è stata invece di circa il 16% rispetto al caso base quando la profondità dei dispositivi di schermatura orizzontale considerati è stata fissata a 0,5 m oppure 1,5 m (Figura 41).

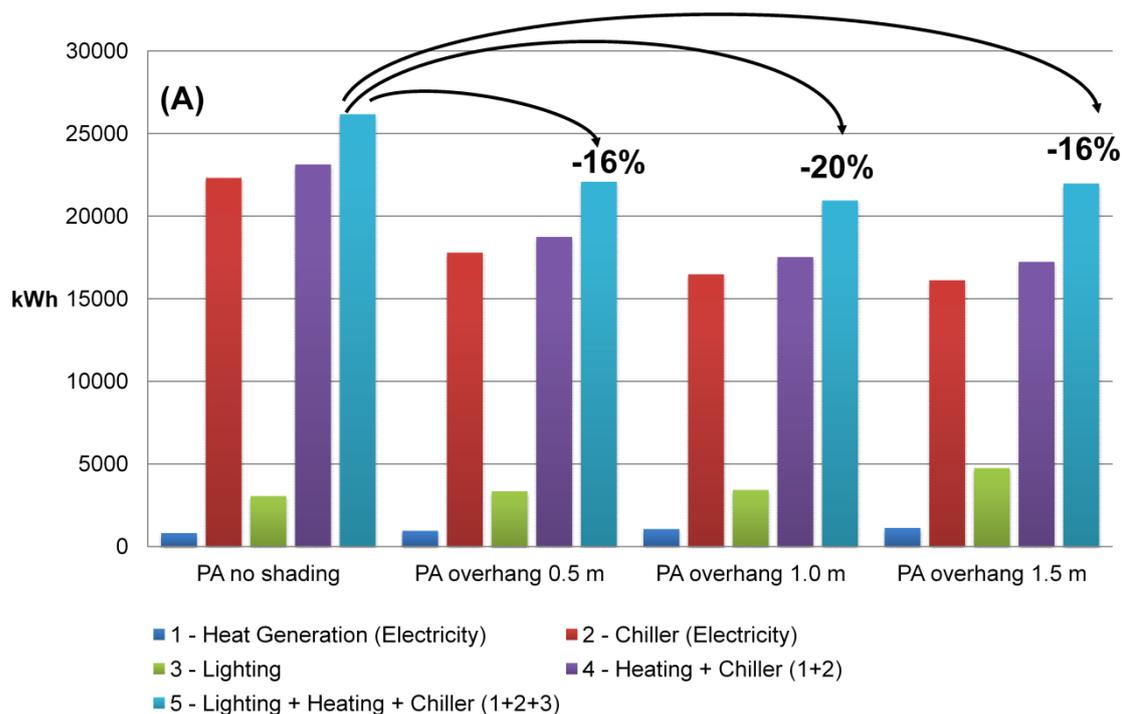


Figura 41 – Variazioni del fabbisogno energetico al variare della profondità dell’aggetto orizzontale, Palermo

I risultati ottenuti per le altre località climatiche in esame, Roma e Milano, hanno mostrato lo stesso andamento. Prendendo in esame le condizioni climatiche della città di Roma, la riduzione del fabbisogno complessivo di energia elettrica per i sistemi di riscaldamento, raffrescamento ed illuminazione, dovuta all’adozione di aggetti schermanti orizzontali di profondità 1,0 m, è stata circa il 15% rispetto al caso base (Figura 42). La riduzione del fabbisogno è stata invece di circa il 12% e 9% rispetto al caso base quando la profondità dei dispositivi di schermatura orizzontale è stata fissata rispettivamente a 0,5 m e 1,5 m.

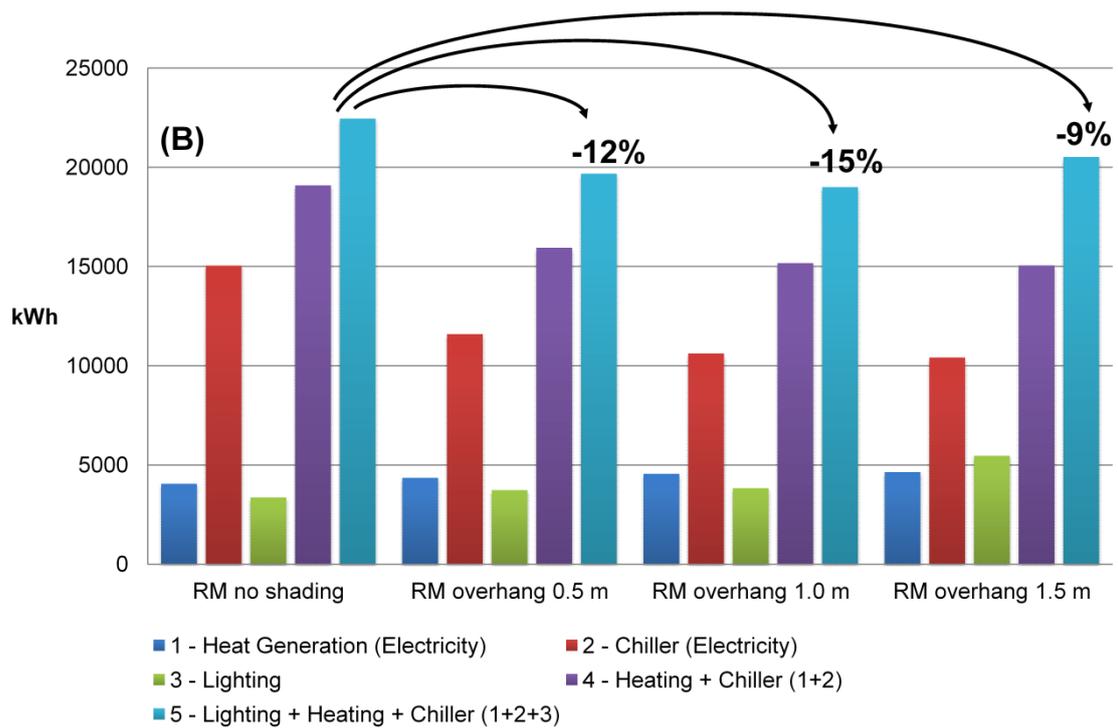


Figura 42 – Variazioni del fabbisogno energetico al variare della profondità dell’aggetto orizzontale, Roma

Infine, nel caso di Milano (Figura 43), la riduzione del fabbisogno complessivo di energia elettrica per i sistemi di riscaldamento, raffrescamento ed illuminazione, dovuta all’adozione del sistema schermante, è stata di circa l’8%, 6% e 1% quando la profondità dei dispositivi di schermatura orizzontale considerati è stata fissata rispettivamente a 1,0 m, 0,5 m e 1,5 m.

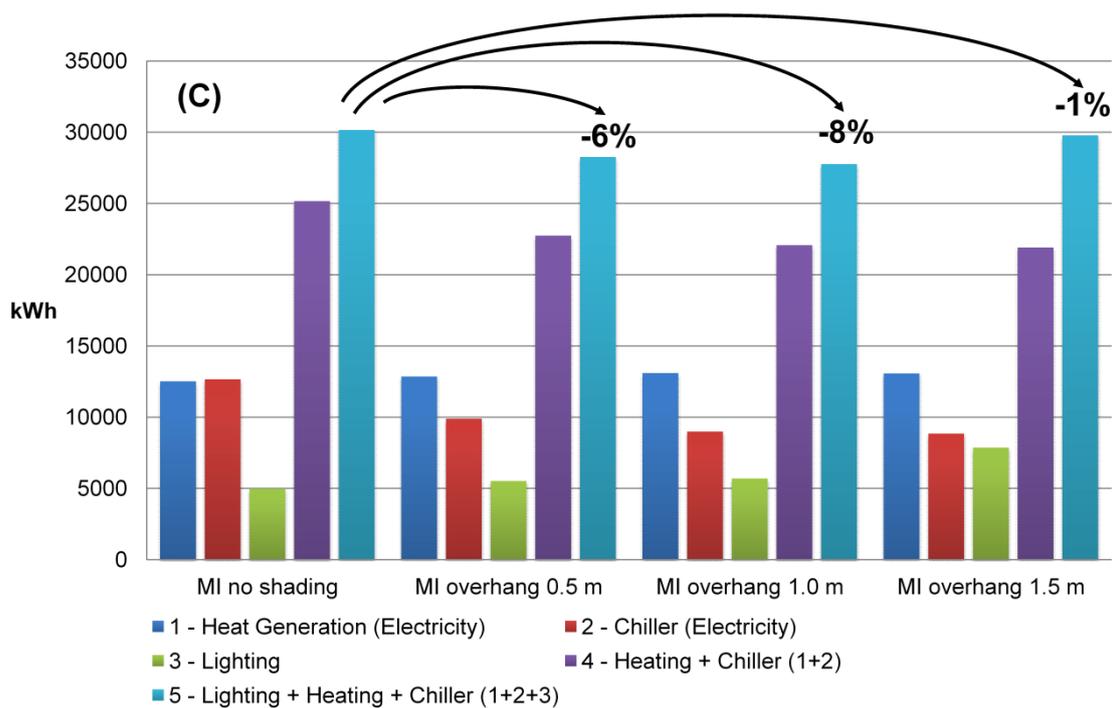


Figura 43 – Variazioni del fabbisogno energetico al variare della profondità dell’aggetto orizzontale, Milano

Per tutte le località prese in esame, l’adozione di schermature orizzontali esterne di profondità 1,0 m rappresenta la soluzione migliore in termini di riduzione del fabbisogno complessivo di energia elettrica. Tuttavia, appare opportuno rilevare, che questo risultato è direttamente correlato anche alle dimensioni delle finestre dell’edificio considerato.

#### 4.6.2. Condizioni climatiche

Come anticipato, al fine di valutare l'influenza delle condizioni climatiche, le simulazioni energetiche sono state condotte con riferimento a tre località dell'Italia settentrionale, centrale e meridionale, ovvero Milano, Roma e Palermo.

Coerentemente con quanto era lecito aspettarsi, la capacità dei dispositivi di schermatura di ridurre il fabbisogno complessivo di energia elettrica (riscaldamento, raffrescamento, illuminazione) si è dimostrata più marcata in climi caratterizzati da estati molto calde, dove il fabbisogno energetico per il raffrescamento risulta particolarmente elevato.

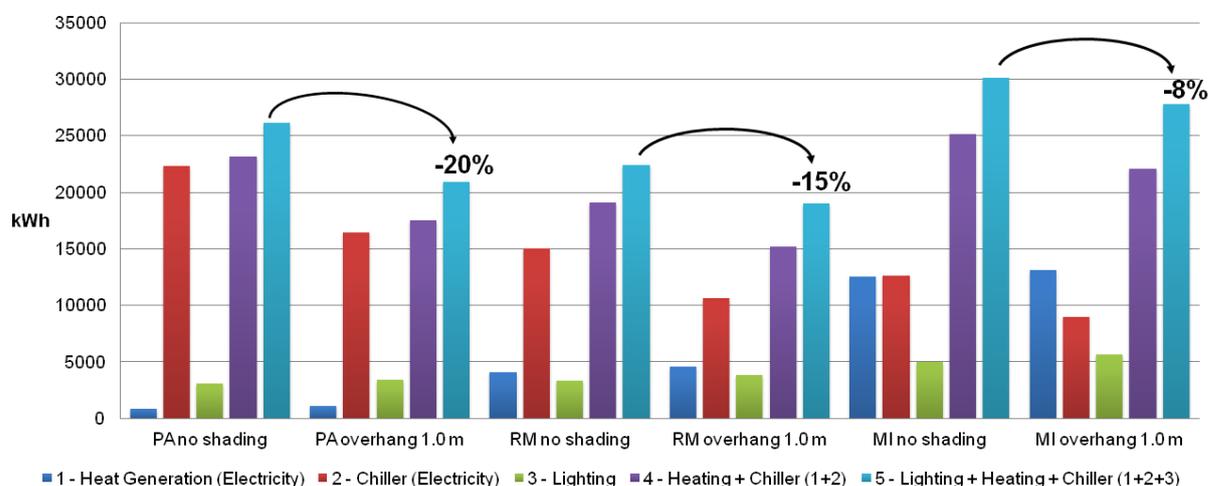


Figura 44 – Variazioni del fabbisogno energetico al variare delle condizioni climatiche in presenza ed in assenza di dispositivi schermanti (caso migliore)

Nel caso di Palermo, la città con il clima più mite tra quelle prese in esame, l'adozione di un sistema di louver e di overhang ha consentito, nel caso più favorevole (adozione di louver e overhang 1,0 m), una riduzione complessiva del fabbisogno energetico elettrico, calcolato rispetto all'edificio privo di sistemi di schermatura, del 20% (Figura 31).

Nel caso di Roma (clima intermedio) e Milano (clima più rigido), la riduzione del fabbisogno energetico, riferito sempre al caso più favorevole, si attesta al 15% ed all'8% rispettivamente (Figura 31).

Dalla Figura 31 si nota anche che, tra i climi presi in esame, solo quello di Milano determina un fabbisogno di energia elettrica per il riscaldamento superiore a quello per il raffrescamento.

Appare infine significativo osservare che, riferendosi al consumo di energia elettrica per il solo raffrescamento, le riduzioni conseguibili mediante l'adozione del sistema di schermature si attestano tra il 26% (Milano) ed il 29% (Palermo).

### 4.6.3. Altezza dell'edificio

Un ulteriore aspetto indagato nell'ambito della ricerca svolta è l'eventuale correlazione tra il numero di piani dell'edificio ed il risparmio energetico conseguibile grazie all'adozione di un sistema di schermature solari, valutato in termini di riduzione del fabbisogno di energia elettrica per il riscaldamento, il raffrescamento e l'illuminazione dell'edificio. Si è pertanto proceduto a modellare un edificio 11 piani, che presenta il medesimo piano tipo dell'edificio a 3 piani altrimenti utilizzato, così come le medesime caratteristiche costruttive ed impiantistiche.

Nel caso di Palermo, per l'edificio di 11 piani, la riduzione del fabbisogno energetico è stata del 17%, 22% e 17% nel caso di adozione di schermature orizzontali di profondità 0,5 m, 1,0 m e 1,5 m rispettivamente, fermo restando l'utilizzo di schermi esterni verticali per le superfici vetrate orientate verso est e verso ovest (Figura 31). La riduzione è sempre valutata rispetto all'edificio considerato privo di sistemi di schermatura. Il dato appare molto simile a quello ottenuto per l'edificio a 3 piani, dove la riduzione del fabbisogno energetico è stata del 16%, 20% e 16% nel caso di adozione di schermature orizzontali di profondità 0,5 m, 1,0 m e 1,5 m rispettivamente (Figura 41).

Nel caso di Milano, per l'edificio di 11 piani, la riduzione del fabbisogno energetico è stata del 7%, 8% e 1% nel caso di adozione di schermature orizzontali di profondità 0,5 m, 1,0 m e 1,5 m rispettivamente (Figura 46); anche stavolta, il dato appare del tutto sovrapponibile al dato ottenuto per l'edificio a 3 piani valutato nella medesime condizioni climatiche (6%, 8% e 1%, Figura 43).

Si può concludere che la dipendenza tra il numero di piani dell'edificio, ovvero la sua altezza, e il risparmio energetico conseguibile con il sistema di schermatura solare è marginale.

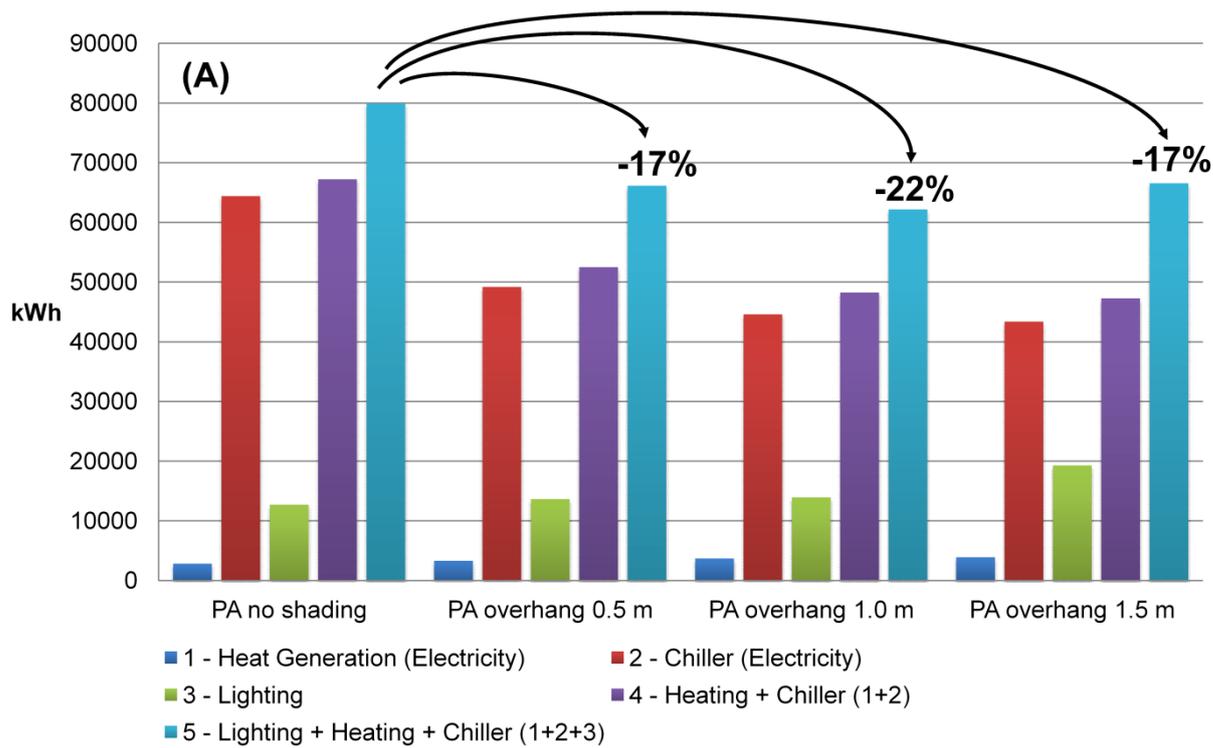


Figura 45 – Variazioni del fabbisogno energetico al variare della profondità dell’aggetto orizzontale, edif. di 11 piani, Palermo

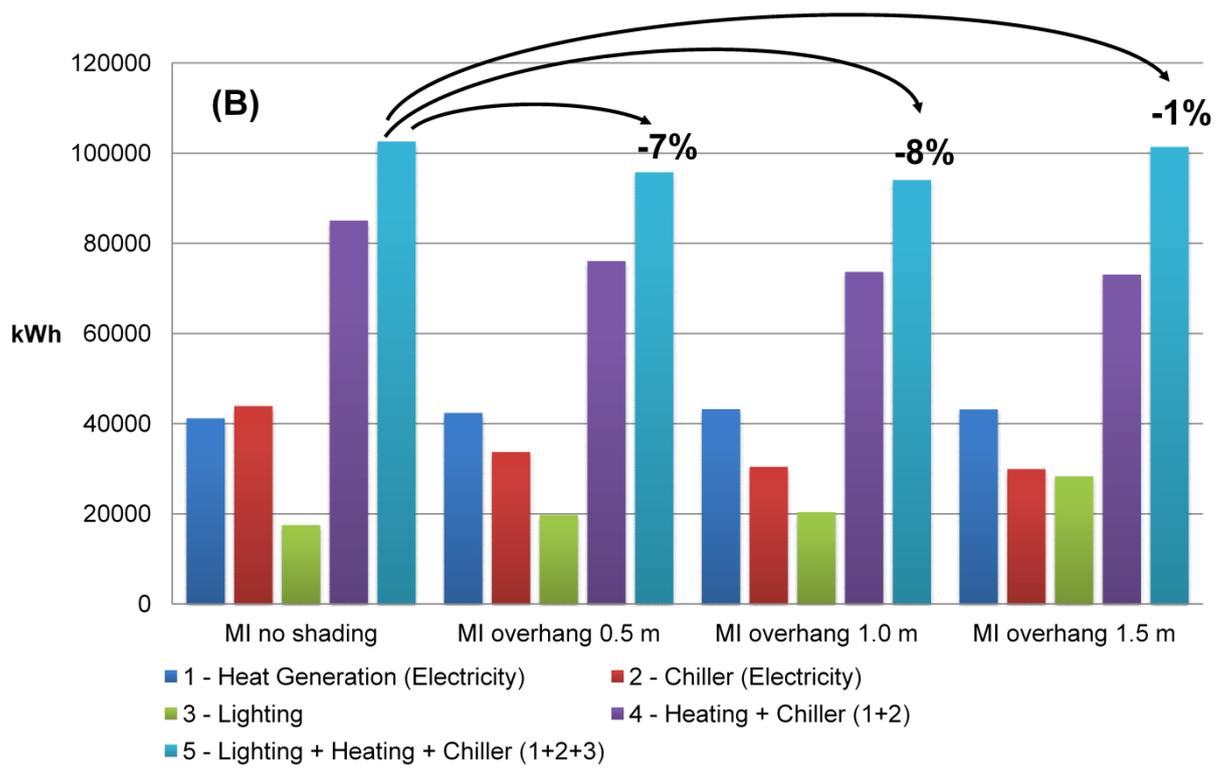


Figura 46 – Variazioni del fabbisogno energetico al variare della profondità dell’aggetto orizzontale, edif. di 11 piani, Milano

#### 4.6.4. Isolamento termico dell'edificio

L'edificio oggetto di indagine, nella sua configurazione tipo, è stato considerato in due diverse condizioni di isolamento termico, ovvero scarso ed elevato isolamento termico. I valori di trasmittanza termica dei principali componenti dell'involucro opaco utilizzati sono riassunti in Tabella 4.

	Scarso isolamento termico	Elevato isolamento termico
<b>Pareti esterne</b>	2,1 W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	0,25 W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
<b>Copertura piana</b>	1,5 W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	0,15 W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
<b>Pavimento piano terra</b>	1,5 W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	0,15 W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>

Tabella 4 – Valori di trasmittanza termica per scarso ed elevato isolamento termico dell'edificio

Sono quindi stati analizzati, per ciascuno dei due livelli di isolamento termico presi in esame, gli effetti del sistema di schermature solari sul bilancio energetico dell'edificio, con riferimento ai climi di Palermo e Milano.

Per quanto riguarda il clima di Palermo (Figura 47A), nel caso di edificio scarsamente isolato il sistema di schermature adoperato consente una riduzione del fabbisogno energetico del 14% rispetto all'edificio privo di schermature. La riduzione si attesta invece al 24% nel caso di edificio con elevato isolamento termico.

È da rilevare che l'elevato isolamento termico dell'edificio determina un notevole aumento dell'energia necessaria al raffrescamento: rispetto all'edificio scarsamente isolato, il fabbisogno energetico dell'edificio fortemente isolato aumenta del 59% in caso di adozione di schermature solari e del 69% nel caso in cui l'edificio ne sia privo.

Invece, con riferimento al clima di Milano (Figura 47B), nel caso di edificio scarsamente isolato il sistema di schermature adoperato consente una riduzione del fabbisogno energetico del 3% rispetto all'edificio privo di schermature. La riduzione si attesta invece al 16% nel caso di edificio con elevato isolamento termico.

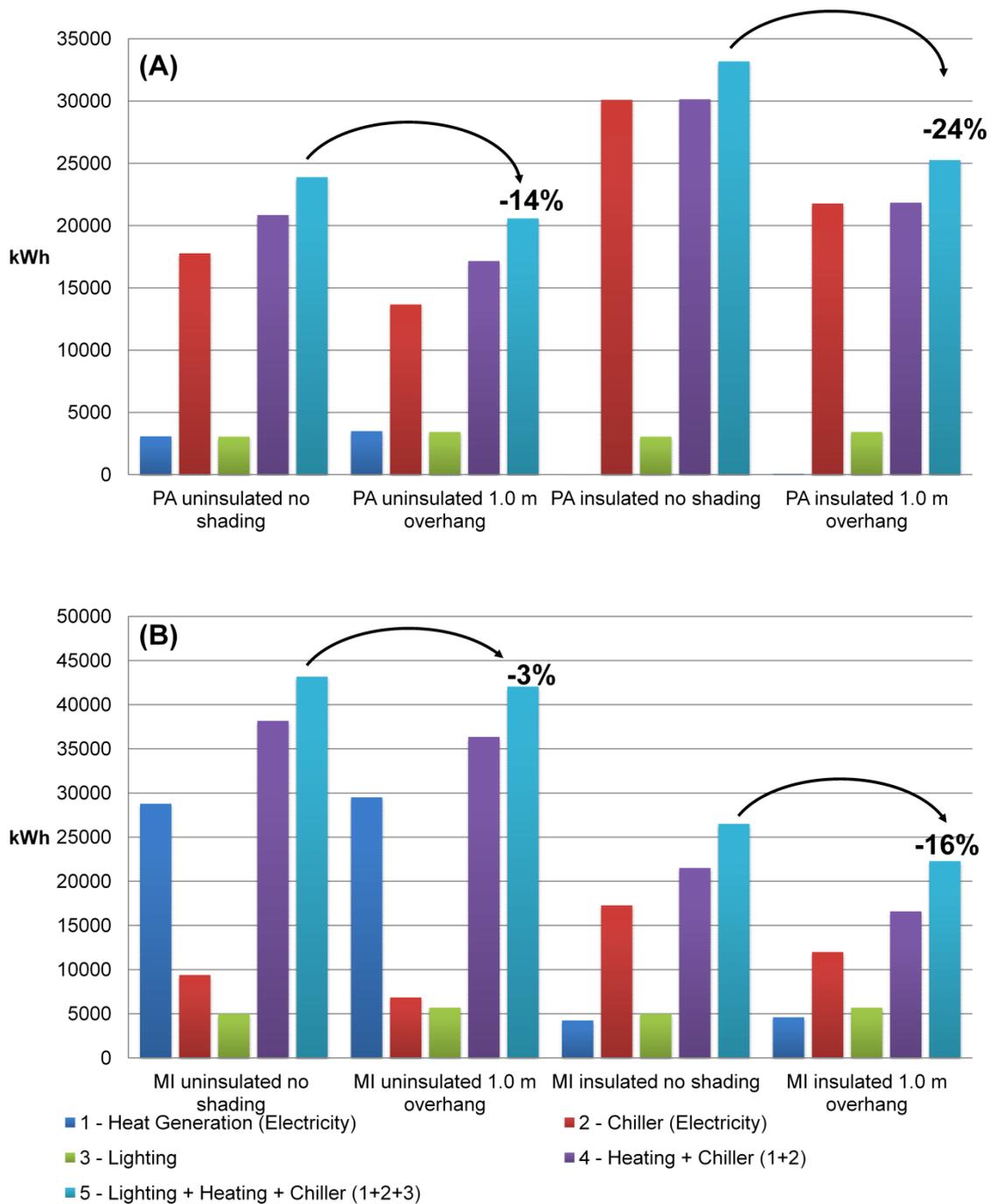


Figura 47 – fabbisogno energetico ed isolamento dell’involucro edilizio

Si può rilevare che nel caso di edificio scarsamente isolato, in una località caratterizzata da inverni rigidi come Milano la riduzione del fabbisogno energetico ottenibile grazie all’impiego di schermi è del tutto trascurabile. Infatti, in dette condizioni, il fabbisogno energetico per il riscaldamento invernale è di gran lunga superiore al fabbisogno

energetico per il raffrescamento durante il periodo estivo. Questo risultato appare coerente con i risultati di altre pubblicazioni consultate [23].

Si può quindi concludere che, per climi caratterizzati da inverni rigidi, l'impiego di schermature solari per edifici scarsamente isolati deve essere valutato con attenzione, perché può incidere in maniera del tutto trascurabile sul bilancio energetico complessivo del sistema edificio-impianto.

#### 4.6.5. Capacità termica dell'involucro edilizio

Allo scopo di valutare gli effetti energetici del sistema di schermatura in relazione alla capacità termica dell'involucro edilizio, l'edificio modello è stato considerato in due diverse configurazioni, identiche tranne che per la capacità termica delle pareti esterne (Tabella 5). Sono quindi state condotte simulazioni per le condizioni climatiche di Palermo e Milano.

	Bassa capacità termica	Elevata capacità termica
<b>Pareti esterne</b>	12,8 kJ m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	134,8 kJ m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>

Tabella 5 – Capacità termica delle pareti esterne dell'involucro edilizio

Per Palermo, l'adozione di un sistema di schermature solari si traduce in una riduzione del fabbisogno di energia elettrica per il riscaldamento, raffrescamento ed illuminazione di circa il 20%, indipendentemente dalla capacità termica dell'involucro (Figura 48A).

Analogamente, anche per Milano la riduzione del fabbisogno energetico complessivo dovuto all'impiego di schermi è sostanzialmente invariabile rispetto alla capacità termica dell'involucro edilizio, attestandosi all'8% in ambedue i casi esaminati (Figura 48B).

Dall'analisi dei risultati numerici si evince che la capacità termica dell'involucro edilizio non ha influenzato in maniera significativa le prestazioni energetiche del sistema di schermatura considerato.

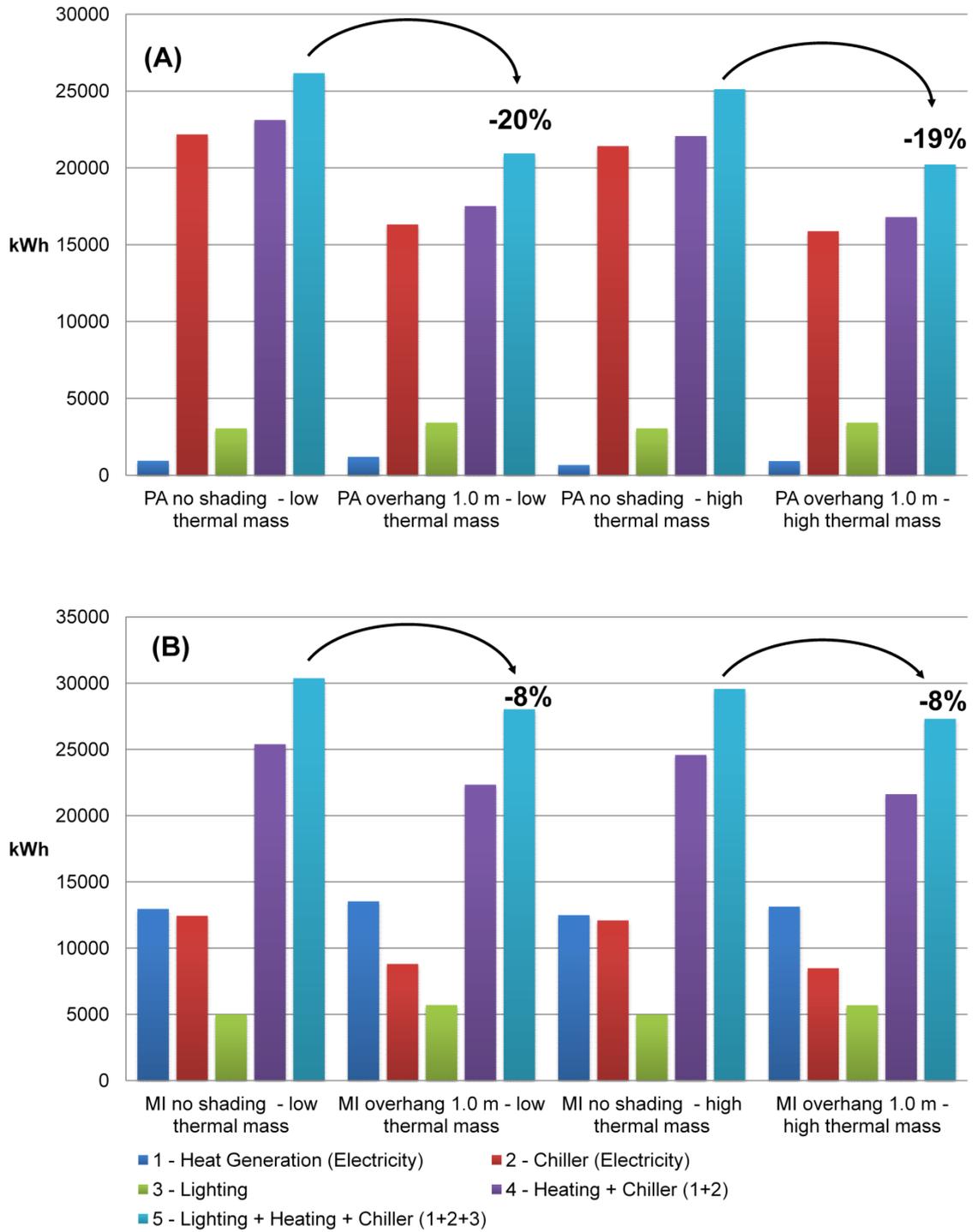


Figura 48 – Influenza della capacità termica

#### 4.6.6. Rapporto tra involucro opaco ed involucro trasparente

Il window to wall ratio (WWR) è il rapporto tra la superficie complessiva di una parete esterna e la sua finestratura. È ovviamente una grandezza che influenza in maniera determinante l'accesso della radiazione solare all'interno di un edificio.

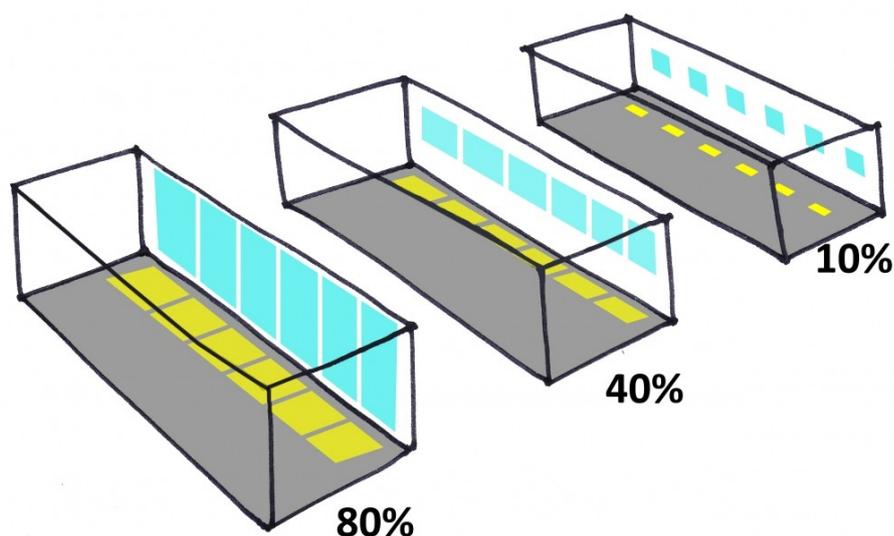


Figura 49 – Schematizzazione di pareti con diversi valori di WWR

Nell'edificio di riferimento, il WWR per tutte le pareti esterne dell'involucro è stato fissato al 30% [22, 36]. In questo paragrafo viene indagata l'influenza che diversi valori di WWR esercitano sulla performance energetica dei dispositivi di schermatura, con riferimento al fabbisogno complessivo di energia elettrica dell'edificio. L'analisi viene proposta per due località, Palermo e Milano.

L'edificio è stato considerato in due diverse configurazioni, caratterizzate da due diversi valori di WWR per le pareti esterne, 30% e 60%.

Nel caso di WWR = 60%, l'utilizzo di sistemi di schermatura solare comporta una riduzione del fabbisogno energetico dell'edificio maggiore di quella che si verifica per un edificio con WWR del 30%. All'aumentare del WWR, per Palermo (Figura 50A) la riduzione del fabbisogno energetico passa dal 20% (WWR = 30%) al 28% (WWR = 60%); per Milano (Figura 50B) passa dall'8% (WWR = 30%) al 15% (WWR = 60%).

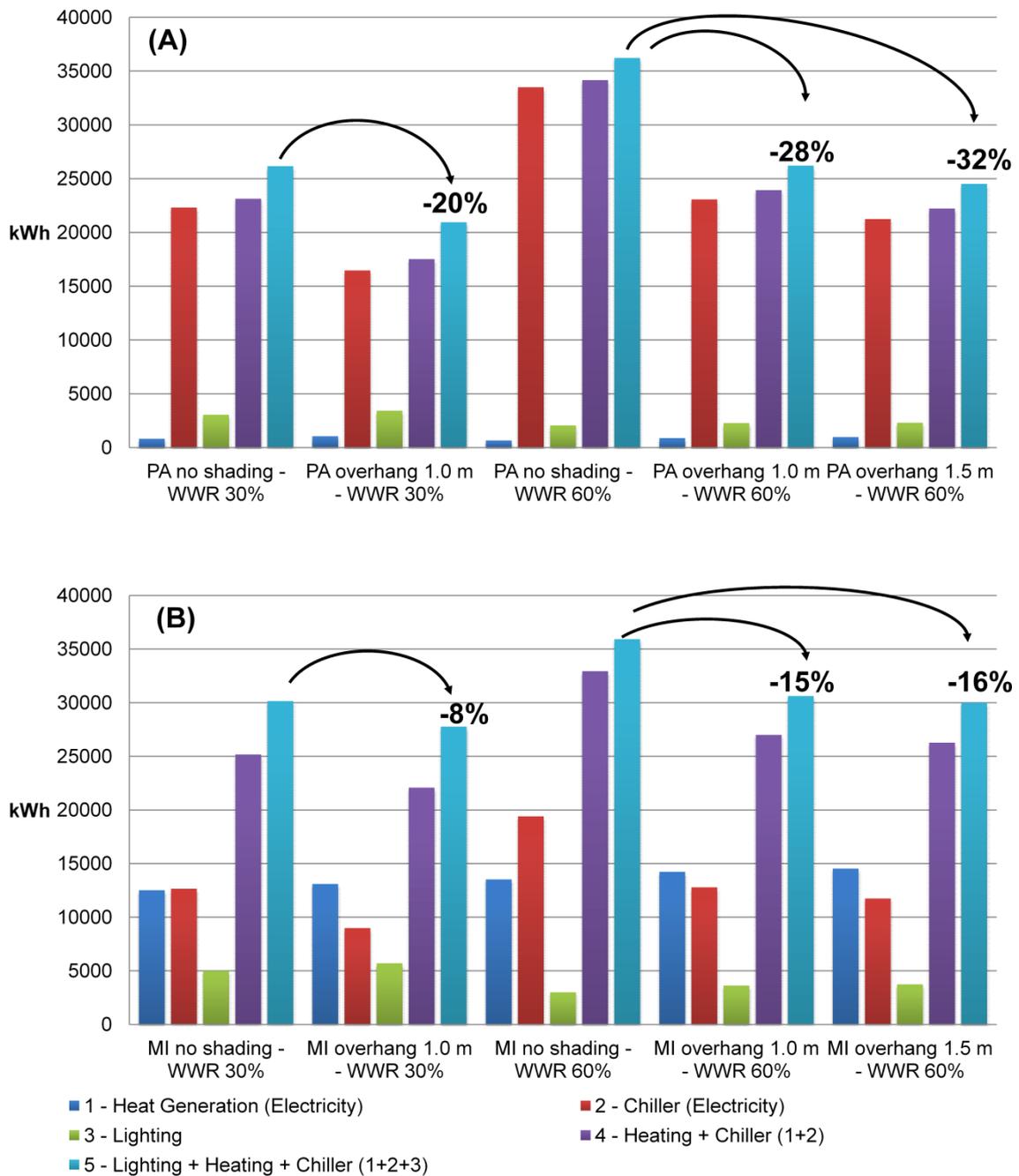


Figura 50 – Influenza del WWR sul fabbisogno energetico in caso di edificio con e senza schermi per Palermo (A) e Milano (B)

Con WWR = 60%, nel caso di Palermo (Figura 50A) la riduzione del fabbisogno energetico incrementa leggermente aumentando da 1,0 m a 1,5 m la profondità dei dispositivi di schermatura orizzontali. Ciò è coerente con il fatto che le finestre dell'edificio con WWR =

60% sono più alte di quelle dell'edificio con WWR = 30%; pertanto, aumenta la proiezione ottimale dell'aggetto orizzontale schermante.

Come prevedibile, il passaggio da un WWR del 30% ad un WWR del 60% determina un considerevole aumento del fabbisogno energetico dell'edificio. Nella fattispecie, nel caso di Palermo il fabbisogno aumenta del 25% per l'edificio schermato e del 38% per l'edificio considerato privo di schermature.

Sia per Palermo che per Milano, il fabbisogno energetico dell'edificio con WWR = 30%, privo di schermature, è molto simile al fabbisogno del medesimo edificio nella configurazione con WWR = 60%, adeguatamente schermato. Se da un lato conferma che edifici che presentano WWR elevati sono più energivori, il risultato conferma che il corretto utilizzo dei dispositivi di schermatura solare può contrastare efficacemente il fabbisogno energetico di detti edifici, coerentemente con i risultati proposti da altri studi [36].

#### 4.6.7. Sistema di controllo dell'illuminazione

Un ulteriore aspetto che è stato indagato durante le attività di ricerca è l'influenza del sistema di controllo dell'illuminazione per l'edificio modello sul contributo energetico ottenibile con l'utilizzo degli schermi, valutato con riferimento al fabbisogno energetico dell'edificio.

I livelli di illuminamento sul piano di lavoro fissati all'interno del modello sono variabili per ogni ambiente dell'edificio, a seconda della specifica destinazione d'uso (Figura 36):

- Uffici: 400 lx
- Atrio e corridoi: 100 lx
- Servizi: 200 lx

Sono stati presi in esame tre diversi sistemi di controllo del sistema di illuminazione:

- Controllo ad 1 step (luci completamente spente o completamente accese)
- Controllo a 2 step (Figura 51A), luci completamente spente, accese per la metà, accese completamente)
- Controllo lineare con spegnimento (Figura 51B)

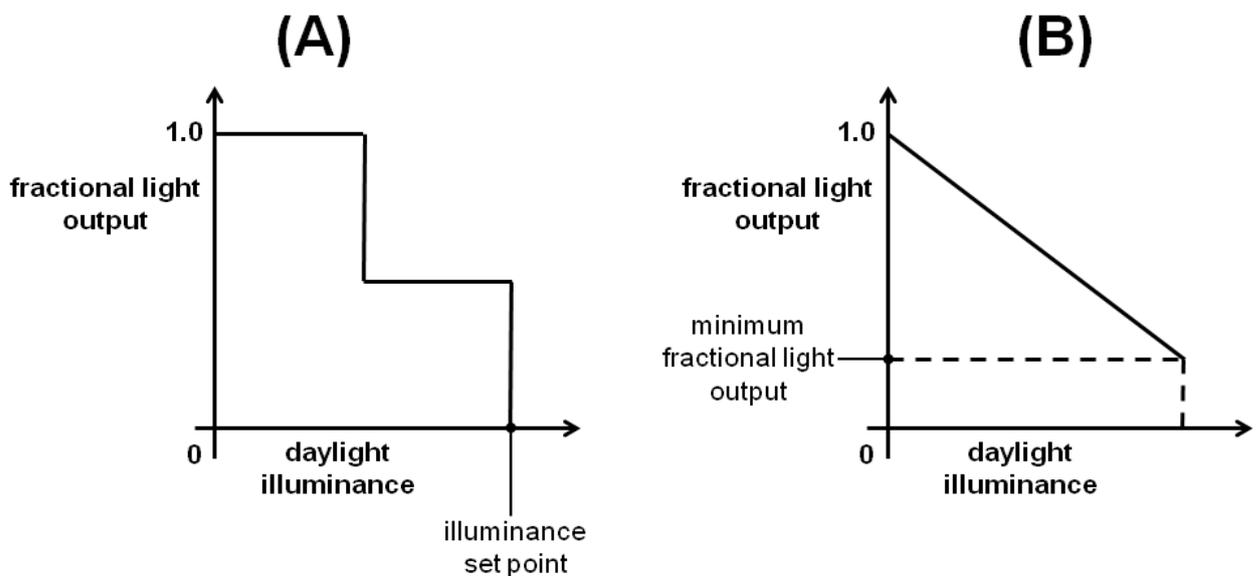


Figura 51 – Controllo del sistema di illuminazione

I risultati ottenuti dimostrano che, per l'edificio in esame, il contributo energetico dovuto agli schermi non risente in maniera significativa della logica di controllo del sistema di illuminazione. Si può notare che, per Palermo (Figura 52A) come per Milano (Figura 52B), la riduzione del fabbisogno energetico conseguita mediante gli schermi è pressoché indipendente dalla tipologia di controllo del sistema di illuminazione. Per Palermo, la riduzione del fabbisogno energetico dovuta agli schermi si attesta intorno al 20% per il controllo ad 1 step, a 2 step e continuo con spegnimento. Anche per Milano la riduzione del fabbisogno si mantiene costante (circa 8%).

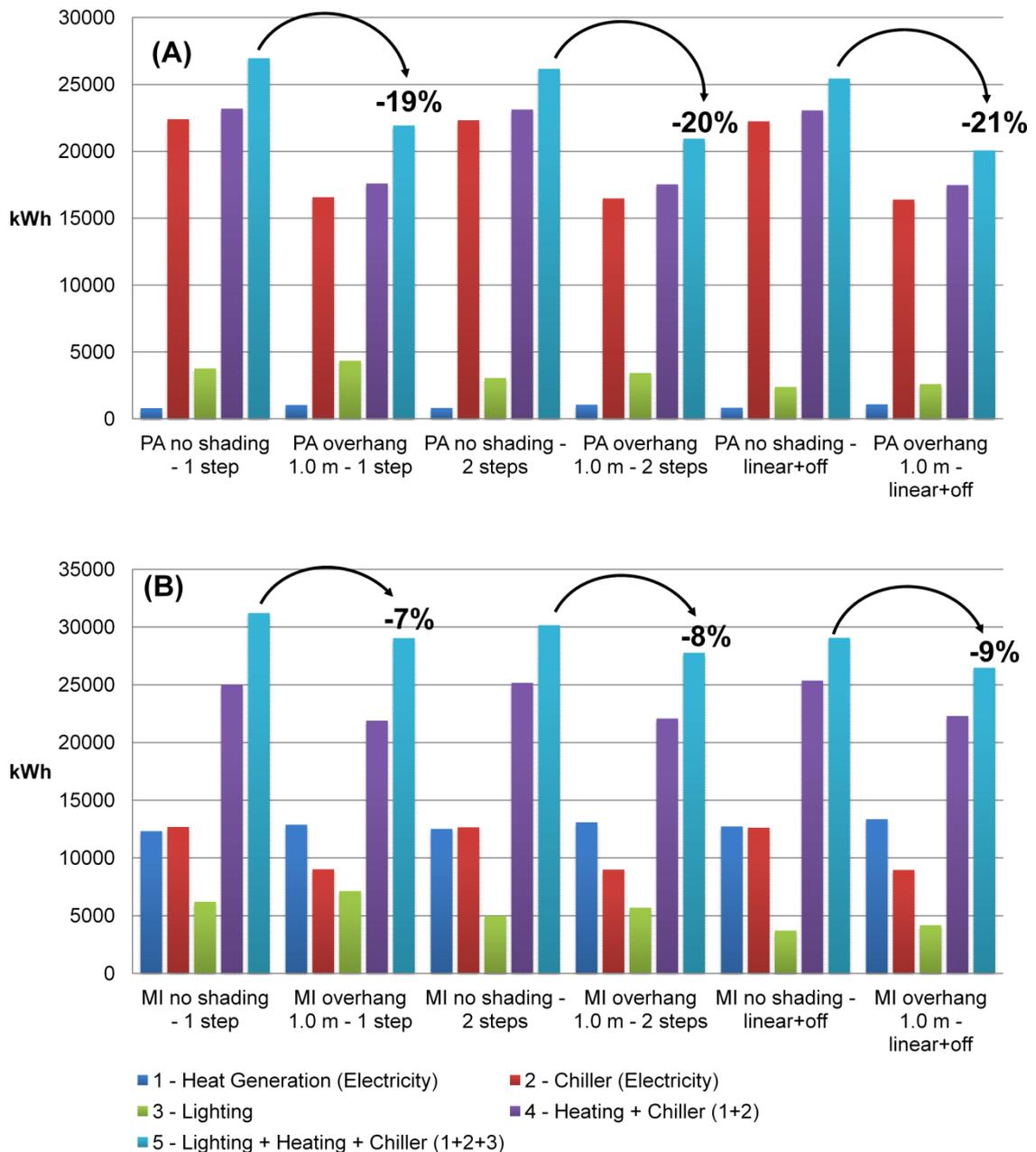


Figura 52 – fabbisogno energetico e sistema di controllo dell’impianto di illuminazione

Tuttavia è molto interessante notare come, se si considera la sola energia elettrica necessaria per il sistema di illuminazione, con il passaggio dal controllo ad uno step a quello lineare con spegnimento si ottiene una riduzione del fabbisogno molto significativa (37% - 42%). Tuttavia, l’effetto positivo risulta notevolmente diluito quando lo si valuta con riferimento al fabbisogno energetico complessivo dell’edificio.

Come ulteriore spunto di riflessione, si può osservare che passando da un edificio privo di sistemi di schermatura e dotato di una logica a controllo del sistema di illuminazione ad uno step (caso peggiore), allo stesso edificio con adeguati sistemi di schermatura e controllo del sistema di illuminazione (caso migliore), si ottiene una riduzione del fabbisogno energetico del 26% per Palermo e del 15% per Milano.

#### 4.6.8. Orientamento dell'edificio

Nel caso base utilizzato ai fini della conduzione della ricerca, l'edificio modello è orientato con i lati lunghi orientati verso nord e verso sud. Per indagare l'influenza dell'orientamento sulla prestazione energetica degli schermi si è scelto di ruotare il modello di 90° (Figura 53), in modo che i suoi lati lunghi siano esposti verso est e verso ovest.

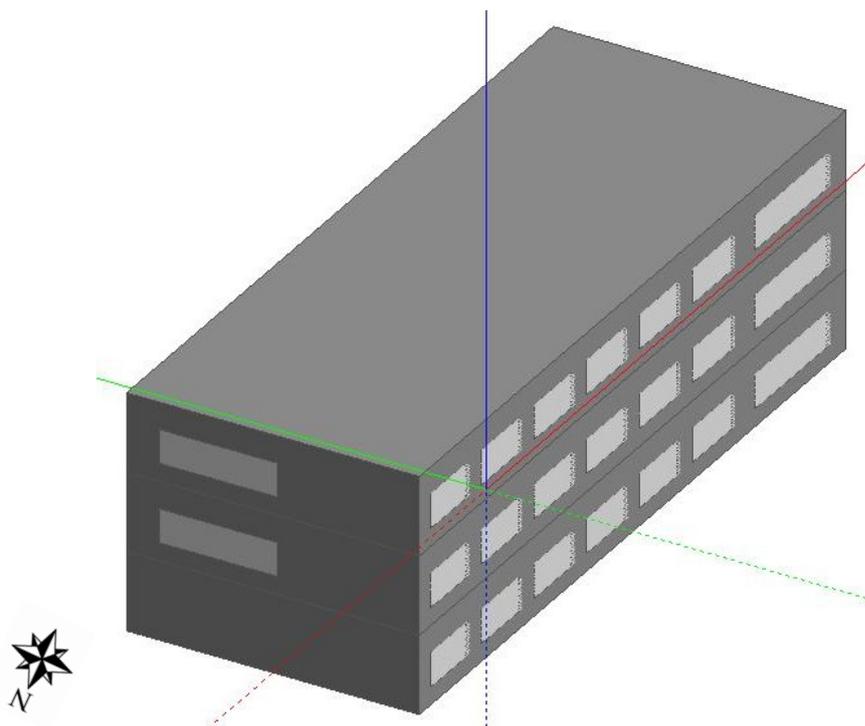


Figura 53 – Edificio con lati lunghi orientati verso est-ovest. Schermi verticali su pareti est-ovest, orizzontali su parete sud

Ruotando l'edificio, secondo quanto previsto dalle buone pratiche di progettazione, sono stati applicati dei louver esterni per le superfici vetrate esposte ad est ed ovest, schermi orizzontali per le finestre esposte a sud (overhang 1.0 m) e nessuna schermatura per quelle esposte a nord. In merito ai louver, sono state effettuate numerose simulazioni volte a determinare la configurazione più vantaggiosa dal punto di vista della performance energetica, che è risultata essere la seguente: ogni louver è composto da 10 lamelle di profondità di 0,15 m, con inclinazione di 25°.

Nella Figura 54 sono riportati i risultati delle simulazioni energetiche per l'edificio ruotato rispetto al caso base, con riferimento alle condizioni climatiche di Palermo e di Milano.

Si può notare che, nel caso di Milano, l'utilizzo di sistemi schermanti determina un aumento del fabbisogno energetico complessivo dell'edificio (9%), dovuto soprattutto ad un aumento molto significativo del fabbisogno di energia elettrica necessaria per il sistema di illuminazione (+133%).

Invece, nel caso di Palermo, la riduzione del fabbisogno energetico dell'edificio dovuta all'adozione di schermi è di circa il 5%. Come nel caso precedente, in questa configurazione il fabbisogno di energia elettrica necessaria per il sistema di illuminazione aumenta considerevolmente (+189%), vanificando quasi completamente la riduzione di fabbisogno energetico per il raffrescamento (31%). Si può concludere quindi che la performance energetica dell'edificio orientato con lati lunghi esposti verso est e verso ovest, è peggiore rispetto a quella riscontrabile nell'edificio di riferimento. Ciò appare evidente anche considerando l'edificio privo di sistemi di schermatura: confrontando l'edificio base con lo stesso edificio diversamente orientato, si ottiene un aumento del fabbisogno energetico del 10% per Palermo e del 6% per Milano.

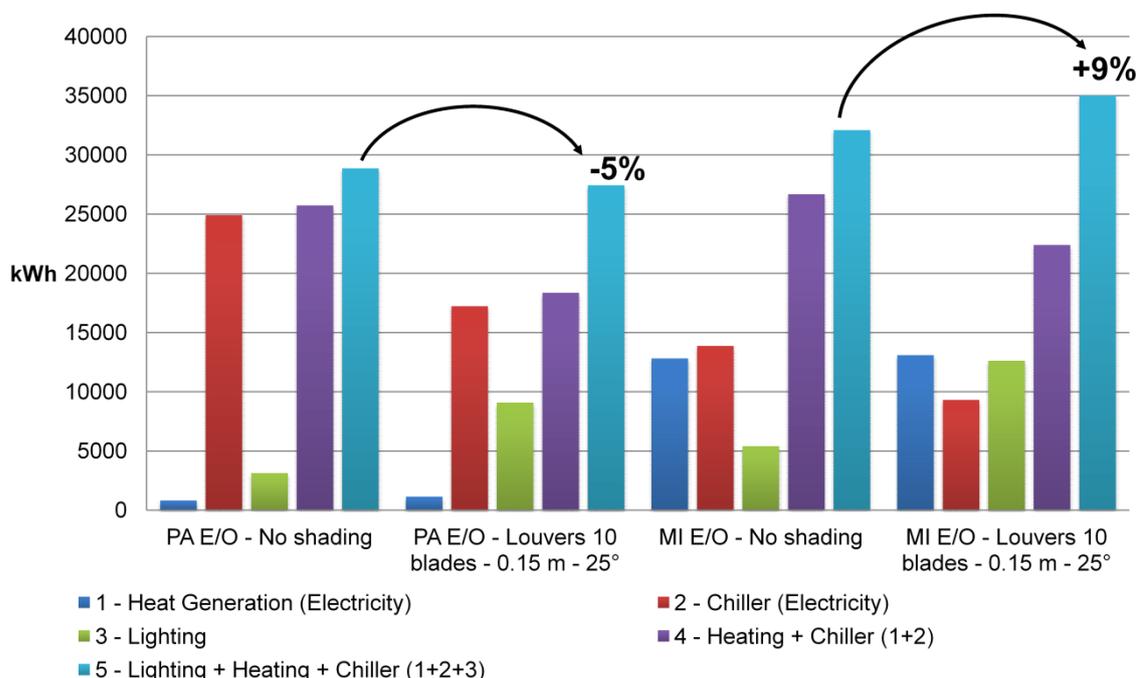


Figura 54 – fabbisogno energetico ed orientamento dell'edificio rispetto ai punti cardinali

#### 4.7. Analisi del ciclo di vita (LCA)

Durante le attività di ricerca è apparso opportuno anche effettuare una analisi semplificata del ciclo di vita (LCA) dei dispositivi di schermatura. In termini generali, l'LCA è un processo che permette di valutare gli impatti ambientali associati ad un prodotto, processo o attività, attraverso l'identificazione e la quantificazione dei consumi di materia ed energia e delle emissioni nell'ambiente e l'identificazione e la valutazione delle opportunità per diminuire questi impatti. L'analisi può riguardare l'intero ciclo di vita del prodotto ("dalla culla alla tomba"): dall'estrazione e lavorazione delle materie prime, alla produzione trasporto e distribuzione del prodotto, al suo uso, riuso e manutenzione, fino al riciclo e alla collocazione finale del prodotto dopo l'uso.

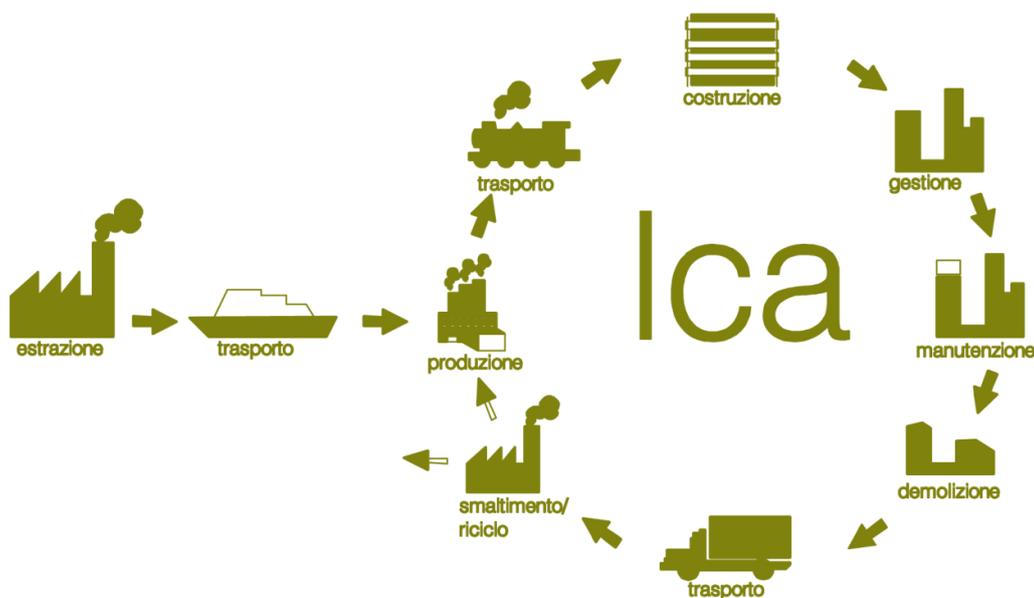


Figura 55 – schema generale dell'analisi del ciclo di vita (LCA)

Ai fini della ricerca è stata effettuata un'analisi semplificata del ciclo di vita del prodotto, utilizzando l'approccio "dalla culla al cancello", che comprende le fasi che partono con l'estrazione delle materie prime fino all'uscita dallo stabilimento del prodotto. Con riferimento agli overhang di profondità 1,0 m, la massa complessiva dei dispositivi di schermatura orizzontali e verticali, supposti fabbricati in alluminio estruso, è stata stimata

in circa 470 kg. Per la produzione dell'alluminio è stato considerato un valore di energia inglobata di 200 MJ/kg.

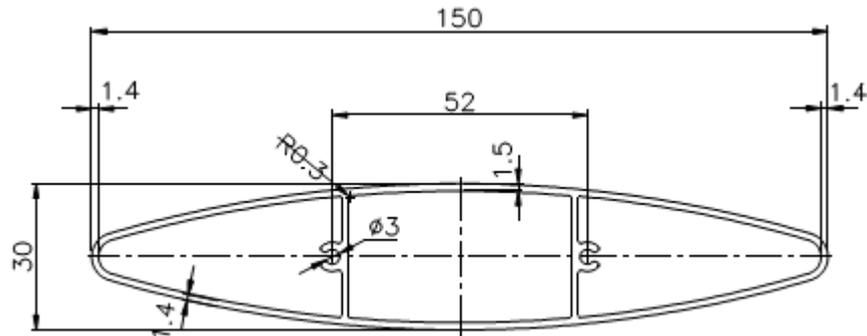


Figura 56 – Vista in sezione di una lamella di un louver



Figura 57 – Lamelle in alluminio estruso di un louver

I risultati dell'analisi mostrano che l'energia primaria risparmiata grazie all'adozione dei dispositivi di schermatura prima specificati, ha un periodo di pareggio dell'energia inglobata di circa 3 anni nel caso della località che gode della maggiore insolazione su base annua tra quelle prese in esame, Palermo. Il periodo di pareggio si allunga fino a circa 5 anni, nel caso di Milano, località che gode di minore insolazione. La conversione dell'energia primaria in energia elettrica è stata calcolata fissando a 0,46 il rendimento del

sistema del sistema nazionale di produzione e distribuzione dell'energia, come stabilito dall'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas (AEEG) nella delibera EEN 3/08. Ovviamente, se per la fabbricazione dei dispositivi di schermatura si considera l'impiego di alluminio riciclato, la cui energia inglobata è significativamente minore, i periodi di pareggio sono suscettibili di riduzione.

## 5. Conclusioni

L'attività di ricerca svolta è stata focalizzata sugli effetti energetici derivanti dall'impiego di un sistema di schermature solari esterne sul fabbisogno energetico di un tipico edificio adibito ad uffici, con riferimento a tre località climatiche italiane. Le valutazioni sono state effettuate mediante un opportuno software di simulazione energetica degli edifici in regime dinamico, EnergyPlus.

I fabbisogni energetici di riscaldamento, raffrescamento ed illuminazione dell'edificio sono stati analizzati al variare delle principali condizioni al contorno.

Di seguito vengono riassunte le più salienti conclusioni che è possibile trarre dall'attività di ricerca svolta.

I risultati migliori in termine di riduzione del fabbisogno energetico dell'edificio sono stati ottenuti utilizzando, per le superfici vetrate esposte a sud, dispositivi di schermatura orizzontali esterni di profondità 1,0 m. Detto valore ottimale è tuttavia strettamente correlato all'altezza delle superfici trasparenti da schermare.

Nel caso più favorevole, l'utilizzo dei sistemi di schermatura ha consentito una riduzione del fabbisogno energetico del sistema edificio-impianti del 20%, ottenuto nel caso di clima più caldo (Palermo) tra quelli presi in considerazione. La riduzione si attesta al 15% per le condizioni climatiche di Roma ed all'8% per le condizioni climatiche di Milano. Questo conferma che l'installazione di dispositivi esterni di schermatura di tipo fisso è più vantaggiosa in termini energetici laddove le condizioni climatiche sono contraddistinte da estati molto calde.

Per Palermo, il sistema di schermatura considerato consente una riduzione del fabbisogno energetico del 14% per un edificio scarsamente isolato, e del 24% per un edificio fortemente isolato. Per condizioni climatiche più rigide i vantaggi tendono a diminuire, e nel caso di Milano le riduzioni del fabbisogno energetico si attestano al 3% (scarso isolamento termico) ed al 16% (forte isolamento termico). Questo mostra che per climi caratterizzati da inverni rigidi, nel caso di edifici scarsamente isolati, i benefici energetici

derivabili dall'utilizzo di un sistema di schermature solari come quello proposto sono trascurabili; ciò è dovuto al fatto che, in dette condizioni di scarso isolamento termico, il fabbisogno energetico per il riscaldamento dell'edificio è sensibilmente più elevato del fabbisogno per il raffrescamento che, tra le componenti del bilancio energetico, è quella a trarre maggiori benefici dall'adozione di schermature solari.

Il rapporto tra la superficie trasparente e la superficie opaca dell'involucro edilizio (WWR) influenza in maniera molto significativa la performance energetica dei sistemi di schermatura, che va sempre rapportata al fabbisogno energetico complessivo dell'edificio. Per un edificio con WWR = 60% il fabbisogno energetico è notevolmente più elevato rispetto a quello di un edificio con WWR = 30%; ciò è riscontrabile in particolar modo per le condizioni climatiche contraddistinte da estati molto calde (Palermo). Tuttavia, all'aumentare del WWR diventa più consistente anche la riduzione del fabbisogno energetico dovuta agli schermi, che nel caso di Palermo, ad esempio, passa dal 20% (WWR = 30%) al 28% (WWR = 60%); nel caso di Milano si ottiene invece una riduzione del fabbisogno dell'8% e del 15% per WWR del 30% e del 60% rispettivamente. Inoltre, il fabbisogno energetico dell'edificio con WWR del 30%, considerato privo di sistemi di schermatura, è grossomodo uguale al fabbisogno dell'edificio con WWR del 60%, stavolta dotato di adeguate schermature. Questo risultato, coerentemente con quanto ottenuto da altri studi [36], mostra che l'utilizzo di opportuni dispositivi di ombreggiamento può contrastare in maniera efficace l'incremento del fabbisogno energetico degli edifici che prevedono ampie superfici vetrate d'involucro.

Il risparmio energetico connesso con l'utilizzo di sistemi di schermatura è grossomodo indipendente dai sistemi esaminati in questo studio per il controllo dell'illuminazione.

L'altezza dell'edificio considerato, così come la capacità termica dell'involucro opaco, incidono in maniera del tutto marginale sul risparmio energetico connesso con l'utilizzo di sistemi di schermatura.

Quando i lati lunghi dell'edificio sono orientati verso est ed ovest, anziché verso nord e sud, la performance energetica dell'edificio peggiora. Per esempio, nel caso di edificio considerato privo di schermi, il fabbisogno energetico complessivo aumenta del 10% nel

caso di Palermo e del 6% per Milano; nel caso di edificio dotato di schermi, il fabbisogno energetico complessivo addirittura aumenta nel caso di Milano (9%), mentre nel caso di Palermo la riduzione è molto contenuta (5%).

Gli spunti per il proseguimento dell'attività di ricerca sono molteplici. Innanzitutto, si potrebbero estendere i risultati e valutare gli effetti energetici degli schermi anche con riferimento a città europee, con condizioni climatiche evidentemente differenti rispetto a quelle delle tre città italiane già considerate.

Sarebbe poi interessante condurre un'analisi di tipo tecnico-economico dei sistemi di schermatura presi in esame, in modo da valutarne la convenienza non solo in termini energetici ma anche economica; ciò può essere fatto, una volta noto l'impatto energetico degli schermi, anche conoscendo il loro costo ed quello dell'energia.

Infine, si rileva che l'edificio oggetto di studio è un fabbricato isolato, che non ha alcuna interazione energetica con altri edifici circostanti. Sarebbe interessante studiare gli effetti energetici degli schermi anche con riferimento ad un edificio collocato all'interno di un'area urbanizzata, dove notoriamente si può determinare un microclima più caldo rispetto a quello delle zone periferiche e rurali.

## Bibliografia

- [1] Direttiva 2002/91/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 16 Dicembre 2002 sul rendimento energetico nell'edilizia.
- [2] Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del consiglio del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica nell'edilizia (rifusione).
- [3] Decreto del Presidente della Repubblica 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.
- [4] Yener, AK: A method of obtaining visual comfort using fixed shading devices in rooms. *Building and Environment* volume 34, no. 3, (1999) 285-291.
- [5] Judkoff RD. Validation of Building Energy Analysis Simulation Programs at the Solar Energy Research Institute, *Energy and Buildings*, 10 (1998) 221-239
- [6] Szokolay, SV: PLEA Notes: Solar Geometry. PLEA (Passive and Low Energy Architecture) and University of Queensland, (1996) 17.
- [7] International Energy Agency, *Worldwide Trends in Energy Use and Efficiency*, Authoring Institution: International Energy Agency (IEA), Head of Communication and Information Office, Paris, France, 2008 (ultimo accesso: 12/2012), [http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Indicators\\_2008-1.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Indicators_2008-1.pdf).
- [8] M.J. Suarez, C. Sanjuan, A.J. Gutierrez, J. Pistono, E. Blanco, Energy evaluation of an horizontal open joint ventilated facade, *Appl. Therm. Eng.* 37 (2012) 302-313.
- [9] A. Capozzoli, P. Mazzei, F. Minichiello, D. Palma, Hybrid HVAC systems with chemical dehumidification for supermarket applications, *Appl. Therm. Eng.* 26 (2006) 795-805.
- [10] F. Ascione, L. Bellia, A. Capozzoli, F. Minichiello, Energy saving strategies in air conditioning for museums, *Appl. Therm. Eng.* 29 (2009) 676-686.
- [11] G.H. dos Santos, N. Mendes, Numerical analysis of passive cooling using a porous sandy roof, *Appl. Therm. Eng.* 51 (2013) 25-31.

- [12] M. Kayfeci, A. Kecebas, E. Gedik, Determination of optimum insulation thickness of external walls with two different methods in cooling applications, *Appl. Therm. Eng.* 50 (2013) 217-224.
- [13] A. Synnefa, M. Santamouris, I. Livada, A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment, *Sol. Energy* 80 (2006) 968-981.
- [14] F. Ascione, L. Bellia, P. Mazzei, F. Minichiello, Solar gain and building envelope: the surface factor, *Build. Res. Inform.* 38 (2) (2010) 187-205.
- [15] T. Inoue, Solar shading and daylighting by means of autonomous responsive dimming glass: practical application, *Energy Build.* 35 (2003) 463-471.
- [16] P.A.B. James, A.S. Bahaj, Smart glazing solutions to glare and solar gain: a "sick building" case study, *Energy Build.* 37 (2005) 1058-1067.
- [17] B.A. Lomanowski, J.L. Wright, Modeling fenestration with shading devices in building energy simulation: a practical approach, in: *Proceedings of Building Simulation 2009*, Glasgow, Scotland, July 27-30, (2009) 976-983.
- [18] E. Gratia, A. De Herde, The most efficient position of shading devices in a double-skin façade, *Energy Build.* 39 (2007) 364-373.
- [19] G. Kim, H.S. Lima, T.S. Limb, L. Schaeferc, J.T. Kim, Comparative advantage of an exterior shading device in thermal performance for residential buildings, *Energy Build.* 46 (2012) 105-111.
- [20] ASHRAE, 2009 ASHRAE Handbook: Fundamentals, Chapter 15 (Fenestration), ASHRAE (American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers), Atlanta, 2009.
- [21] A.I. Palmero-Marrero, A.C. Oliveira, Effect of louver shading devices on building energy requirements, *Appl. Energy* 87 (2010) 2040-2049.
- [22] A. Tzempelikos, A.K. Athienitis, The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand, *Sol. Energy* 81 (2007) 369-382.
- [23] G. Datta, Effect of fixed horizontal louver shading devices on thermal performance of building by TRNSYS simulation, *Renew. Energy* 23 (2001) 497-507.
- [24] E.S. Lee, A. Tavit, Energy and visual comfort performance of electrochromic windows with overhang, *Build. Environ.* 42 (2007) 2439-2449.

- [25] T. Inoue, M. Ichinose, N. Ichikawa, Thermotropic glass with active dimming control for solar shading and daylighting, *Energy Build.* 40 (2008) 385-393.
- [26] G.A. Florides, S.A. Kalogirou, S.A. Tassau, L.C. Wrobel, Modeling of the modern houses of Cyprus and energy consumption analysis, *Energy* 25 (2000) 915-937.
- [27] M. David, M. Donn, F. Garde, A. Lenoir, Assessment of the thermal and visual efficiency of solar shades, *Build. Environ.* 46 (2011) 1489-1496.
- [28] A.M. Abu-Zour, S.B. Riffat, M. Gillott, New design of solar collector integrated into solar louvres for efficient heat transfer, *Appl. Therm. Eng.* 26 (2006) 1876-1882.
- [29] D.B. Crawley, L.K. Lawrie, C.O. Pedersen, R.J. Liesen, D.E. Fisher, R.K. Strand, R.D. Taylor, R.C. Winkelmann, W.F. Buhl, Y.J. Huang, A.E. Erdem, ENERGYPLUS, a new-generation building energy simulation program, in: *Proceedings of Building Simulation '99*, vol. 1, 1999, pp. 81-88.
- [30] P.G. Loutzenhiser, H. Manz, S. Carl, H. Simmler, G.M. Maxwell, Empirical validation of solar gain models for a glazing unit with exterior and interior blind assemblies, *Energy Build.* 40 (2008) 330-340.
- [31] F.R. Mazarrón, J. Cid-Falceto, I. Cañas, An assessment of using ground thermal inertia as passive thermal technique in the wine industry around the world, *Appl. Therm. Eng.* 33-34 (2012) 54-61.
- [32] M.R. Hall, K.B. Najim, C.J. Hopfe, Transient thermal behaviour of crumb rubber-modified concrete and implications for thermal response and energy efficiency in buildings, *Appl. Therm. Eng.* 33e34 (2012) 77-85.
- [33] Ultimo accesso: 12/2012. USA Department of energy (DOE), [apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata\\_sources.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_sources.cfm).
- [34] A.I. Palmero-Marrero, A.C. Oliveira, Evaluation of a solar thermal system using building louvre shading devices, *Sol. Energy* 80 (5) (2006) 545-554.
- [35] G.P. Hammon, C.I. Jones, Embodied energy and carbon in construction materials, *Proc. Inst. Civ. Eng. Energy* 161 (2) (2008) 87-98.

- [36] H. Poirazis, A. Blomsterberg, M. Wall, Energy simulation for glazed office buildings in Sweden, *Energy Build.* 40 (2008) 1161-1170.
- [37] A. Stack, J. Goulding, J. Owen Lewis, Solar shading for the European climates, *ENERGIE*.
- [38] L. Bellia, F. De Falco, F. Minichiello, Effects of solar shading devices on energy requirements of standalone office buildings for Italian climates, *Appl. Therm. Eng.* 54 (2013) 190-201.