

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II



SCUOLA POLITECNICA E DELLE SCIENZE DI BASE

Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali e della
Produzione Industriale

**Dottorato di Ricerca in
Tecnologie e Sistemi di Produzione
Indirizzo Gestione del Rischio e della Sicurezza**

**SVILUPPO DI UN MODELLO DI
SIMULAZIONE INTEGRATO E
PARAMETRICO A SUPPORTO DEL
FACILITY MANAGEMENT**

Coordinatore

Ch.mo Prof. Ing. Luigi Carrino

Candidato

Ing. Daniela Miele

Tutor

Ch.mo Prof. Ing. Guido Guizzi

Ch.mo Prof. Ing. Riccardo De Carlini

XXVII ° CICLO DI DOTTORATO

*...”Continua ciò che hai cominciato e
forse arriverai alla cima,
o almeno arriverai in alto ad un punto
che tu solo comprenderai non essere la cima.”*

Seneca

Indice

| | |
|--|----|
| Introduzione..... | 1 |
| Capitolo 1: Aspetti teorici ed organizzativi del FM..... | 8 |
| 1.1. Nascita del Facility Management..... | 8 |
| 1.2. Definizioni FM..... | 12 |
| 1.3. Il contesto normativo europeo per i servizi di FM..... | 18 |
| 1.4. Differenze tra Outsourcing, Facility Management e Global Service..... | 25 |
| 1.5. Classificazione dei servizi di Facility Management..... | 31 |
| 1.6. La struttura organizzativa del FM..... | 35 |
| 1.6.1 Facility Department..... | 35 |
| 1.6.2 Facility Manager..... | 37 |
| 1.7. Modelli organizzativi per la gestione integrata dei servizi no-core..... | 38 |
| 1.7.1 La strategia “in-house management”..... | 41 |
| 1.7.2 La strategia “management by agent”..... | 43 |
| 1.7.3 La strategia “direct outsourcing”..... | 45 |
| 1.7.4 La strategia “management by contractor”..... | 46 |
| 1.7.5 La strategia “(integrated) facility management”..... | 47 |
| 1.8. Il FM in modalità outsourcing..... | 50 |
| 1.8.1 Gli steps del FM nella modalità “outsourcing”..... | 50 |
| 1.8.2 Modelli di gara per avviare l’outsourcing..... | 52 |
| 1.8.3 Il mercato dei fornitori in Italia..... | 57 |
| 1.8.4 Tendenze dell’Outsourcing..... | 62 |
| 1.9. Gli “attori” del Facility Management: un modello di relazione a rete..... | 65 |
| 1.10. Vantaggi e svantaggi dell’outsourcing del Facility Management..... | 69 |
| 1.10.1 Vantaggi nella prospettiva del cliente..... | 69 |
| 1.10.2 Svantaggi nella prospettiva del cliente..... | 73 |
| 1.10.3 Vantaggi e svantaggi nell’ottica del fornitore..... | 76 |
| 1.10.4 Vantaggi e svantaggi percepiti – Studio IFMA..... | 78 |
| 1.11. Dimensioni del mercato di FM europeo ed italiano..... | 82 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| 1.11.1 | Un confronto internazionale su scala europea | 84 |
| 1.11.2 | Il mercato italiano | 87 |
| Capitolo 2: | Programmazione e Controllo Operativo di Produzione e Manutenzione | 92 |
| 2.1 | Introduzione | 92 |
| 2.2 | I Sistemi di Produzione | 93 |
| 2.3 | Programmazione della Produzione | 99 |
| 2.4 | La Schedulazione della Produzione | 104 |
| 2.4.1 | Definizioni ed Elementi Fondamentali in un Problema Di Scheduling | 105 |
| 2.4.2 | Classificazione dei Problemi di Scheduling | 109 |
| 2.4.3 | Metodi di Risoluzione | 111 |
| 2.5 | La Manutenzione | 115 |
| 2.5.1 | Le Politiche Manutentive | 124 |
| 2.5.2 | Stato dell'arte | 130 |
| Capitolo 3: | Sistemi Di Simulazione Integrati | 137 |
| 3.1 | La Simulazione | 137 |
| 3.1.1 | Vantaggi e Svantaggi della Simulazione | 139 |
| 3.1.2 | La Simulazione come Strumento di Supporto alle Decisioni . | 141 |
| 3.2 | I sistemi di simulazione integrati | 144 |
| 3.2.1 | Stato dell'arte | 148 |
| 3.3 | Conclusioni | 167 |
| Capitolo 4: | La System Dynamics | 171 |
| 4.1 | Introduzione | 171 |
| 4.2 | I modelli di simulazione | 174 |
| 4.2.1 | Elementi di un Modello di Simulazione | 175 |
| 4.2.2 | Classificazione dei Modelli | 177 |
| 4.3 | La System Dynamics | 179 |
| 4.3.1 | Elementi Fondamentali in un Modello SD | 181 |
| 4.4 | Powersim | 191 |
| 4.5 | System Dynamics vs Descret Event Simulation | 196 |

| | |
|--|-----|
| Capitolo 5: Il modello di Simulazione..... | 200 |
| 5.1. Introduzione | 200 |
| 5.2. Elementi base del modello | 202 |
| 5.3. La logica della produzione..... | 212 |
| 5.3.1. Ingresso | 214 |
| 5.3.2. Evoluzione..... | 221 |
| 5.3.3. Uscita..... | 234 |
| 5.4. La logica della manutenzione..... | 236 |
| 5.4.1. Usura, guasto e soglie di manutenzione..... | 238 |
| 5.4.2. Monitoraggio | 243 |
| 5.4.3. Raccolta dei dati | 267 |
| 5.5. Validazione del modello | 278 |
| Capitolo 6: Il modello di Ottimizzazione | 280 |
| 6.1. Introduzione | 280 |
| 6.2. Modifiche alle ipotesi ed al modello funzionali al processo di ottimizzazione..... | 284 |
| 6.3. Parametri dell'Ottimizzazione..... | 289 |
| 6.4. Risultati dell'Ottimizzazione | 292 |
| Conclusioni e sviluppi futuri | 300 |
| Modello di Simulazione Parametrico per le Operations negli Impianti Industriali | 303 |
| Bibliografia..... | 304 |
| Ringraziamenti | 314 |

Elenco delle Figure

| | |
|---|----|
| Figura 1: Evoluzione storica dei processi economici | 9 |
| Figura 2: La risposta delle imprese al processo di de-verticalizzazione | 10 |
| Figura 3: Il processo di diffusione del FM in Europa | 12 |
| Figura 4: Il modello di processo del FM delineato dalla norma EN 15221-1 20 | |
| Figura 5 Legame FM/Outsourcing/Global Service | 26 |
| Figura 6: Simboli nelle figure | 42 |
| Figura 7: Modelli organizzativi per la strategia “in-house management” | 42 |
| Figura 8: Modelli organizzativi per la strategia”management by agent” | 44 |
| Figura 9: Modelli organizzativi per la strategia “direct outsourcing” | 45 |
| Figura 10: Modelli organizzativi per la strategia “management by contractor” | 46 |
| Figura 11: Modelli organizzativi per la strategia “integrated facility management” | 48 |
| Figura 12: Modelli organizzativi per la gestione delle attività no-core e variabili decisionali..... | 49 |
| Figura 13: Life cycle of FM outsourcing..... | 52 |
| Figura 14:Il processo di outsourcing nel FM: il modello “a gara” | 53 |
| Figura 15:Il processo di outsourcing nel FM: il modello “a offerta diretta” . | 54 |
| Figura 16:Il processo di outsourcing nel FM: il modello “a convenzione”... | 56 |
| Figura 17: La Piramide del Facility Management..... | 58 |
| Figura 18: Tasso di Outsourcing per paese | 62 |
| Figura 19: Pianificazione di outsourcing futura | 63 |
| Figura 20: Tasso di esternalizzazione per funzione | 63 |
| Figura 21: Tasso futuro di esternalizzazione per funzione | 64 |
| Figura 22: Mappatura del trend di outsourcing..... | 65 |
| Figura 23: Attori del FM..... | 67 |
| Figura 24: Service Supply Network | 69 |
| Figura 25: Percezione quantitativa dei rischi | 79 |
| Figura 26: Percezione quantitativa dei vantaggi | 80 |
| Figura 27:Mercato europeo del FM nel 2008 (mercato potenziale in miliardi di Euro)..... | 87 |
| Figura 28: Mercato potenziale italiano del FM nel 2009 | 87 |
| Figura 29:Il trend del mercato del FM pubblico in Italia nel periodo 2007/2011-bandi di gara pubblicati- importo in milioni di Euro..... | 88 |

| | |
|--|-----|
| Figura 30: Mercato del FM pubblico a confronto con il mercato delle opere pubbliche e della sola esecuzione-bandi di gara pubblicati-importi in milioni di Euro..... | 89 |
| Figura 31: Composizione bandi pubblici 2011 | 90 |
| Figura 32: Committenti bandi pubblici 2011 | 91 |
| Figura 33 Classificazione dei sistemi produttivi secondo i tre assi | 94 |
| Figura 34 "Punti di Input" relativi agli ordini secondo la classificazione di Wortmann..... | 97 |
| Figura 35 Job Shop - Cell Manufacturing - Flow Shop | 99 |
| Figura 36 Le fasi della Pianificazione | 103 |
| Figura 37 Rappresentazione della schedulazione di un'operazione | 108 |
| Figura 38 Possibili obiettivi da minimizzare | 109 |
| Figura 39 $R(t) - F(t) - f(t)$ | 119 |
| Figura 40 $G(t) - g(t)$ | 121 |
| Figura 41 Vita operativa di un componente..... | 121 |
| Figura 42 Vita operativa di diversi componenti..... | 122 |
| Figura 43 Vita utile e politiche di manutenzione | 129 |
| Figura 44 Framework complessivo del modello di simulazione | 132 |
| Figura 45 Processo Decisionale | 142 |
| Figura 46 Fonti di dati rilevanti per la generazione automatica di un modello [82]..... | 148 |
| Figura 47 Framework della metodologia proposta da Wang et al [85]..... | 153 |
| Figura 48 Struttura complessiva del modello [85] | 157 |
| Figura 49 Automatic model generation [96]..... | 158 |
| Figura 50 Framework proposto [81]..... | 160 |
| Figura 51 Flusso logico del modello [81]..... | 162 |
| Figura 52 Logica del modello AutoLogic Assembly [81]..... | 162 |
| Figura 53 Il concetto di Digital Factory..... | 164 |
| Figura 54 Struttura circuiti di retroazione..... | 182 |
| Figura 55 Metafora della vasca da bagno | 183 |
| Figura 56 Reinforcing Loop..... | 186 |
| Figura 57 Possibili andamenti esponenziali..... | 186 |
| Figura 58 Balancing Loop..... | 187 |
| Figura 59 Andamento di Stabilizzazione o Goal Seeking..... | 187 |
| Figura 60 Archetipi..... | 188 |
| Figura 61 Casual Loop Diagram | 189 |
| Figura 62 Stock and Flow Diagram..... | 190 |
| Figura 63 Elementi grafici in Powersim | 192 |
| Figura 64 Flow with Rate..... | 193 |

| | |
|---|-----|
| Figura 65 Altri simboli in Powersim | 193 |
| Figura 66 Casual Loop Diagram del modello dei conigli..... | 194 |
| Figura 67 Diagramma in Powersim del modello dei conigli | 194 |
| Figura 68 Equazioni matematiche [103]..... | 195 |
| Figura 69 Software di simulazione a confronto | 195 |
| Figura 70: costante Schedule_Objects..... | 210 |
| Figura 71 Finestra di dialogo: costante Schedule_Objects..... | 210 |
| Figura 72: Resource Required by route | 210 |
| Figura 73: Source Target Matrix | 211 |
| Figura 74: Object Info Token..... | 211 |
| Figura 75: Critical Resources per Route..... | 211 |
| Figura 76: Costi | 211 |
| Figura 77 Modello: Arrivi..... | 217 |
| Figura 78 Modello: Arrivi e Coda degli arrivi | 218 |
| Figura 79 Route Selection..... | 221 |
| Figura 80 Tokens e Routes utilizzabili | 222 |
| Figura 81 Evoluzione del sistema: State e Route_Matrix | 224 |
| Figura 82 Evoluzione: Clessidra | 225 |
| Figura 83 Costante TIME_TABLE | 225 |
| Figura 84 Finestra di dialogo: Time_Table | 226 |
| Figura 85 Candidate_EvtChg..... | 227 |
| Figura 86 Risorse Richieste da ciascuna Route | 227 |
| Figura 87 Livello Risorse impegnate..... | 229 |
| Figura 88 Copertura delle risorse e cambiamento di stato | 232 |
| Figura 89 Resources_busy | 233 |
| Figura 90 Obj_token | 235 |
| Figura 91: Soglie preventive | 241 |
| Figura 92: Soglie opportune..... | 241 |
| Figura 93: Soglie di guasto | 242 |
| Figura 94: Soglie di allarme..... | 242 |
| Figura 95 Intervallo ispezioni | 243 |
| Figura 96 Azione_Controllo | 244 |
| Figura 97 Inserimento ordini di manutenzione | 245 |
| Figura 98 Token Maintenance..... | 246 |
| Figura 99 Modello di prova: flussi di input in Resource..... | 246 |
| Figura 100 Modello finale: Monitoring Online & By Inspection..... | 247 |
| Figura 101 Finestra di dialogo : Machine to Monitor by Inspection | 249 |
| Figura 102 Finestra di dialogo : Machine to Monitor Online..... | 249 |
| Figura 103 Online Monitoring | 250 |

| | |
|---|-----|
| Figura 104 Monitoring By Inspection | 251 |
| Figura 105 Variabile ausiliaria Check_Preventive_Maintenance..... | 252 |
| Figura 106 Variabile ausiliaria Global_Check_Threshold_Norm | 252 |
| Figura 107 Variabile di Livello: Ordini di manutenzione Preventiva ed Opportuna..... | 253 |
| Figura 108 Schedule_Condition | 255 |
| Figura 109 Decision Maker | 255 |
| Figura 110 Tempo di schedulazione degli ordini di manutenzione | 256 |
| Figura 111 State of wear | 258 |
| Figura 112 Failure_Machine | 259 |
| Figura 113 Failure_Level..... | 260 |
| Figura 114 Inspection_Period ed Inspection_Order..... | 260 |
| Figura 115 Schedule_Inspection_Condition | 261 |
| Figura 116 Modello finale: Flussi di input in Schedule_Obj_ID..... | 263 |
| Figura 117 Modello finale: flussi di input in Resource | 263 |
| Figura 118 Resource_Used_By-Token, Crit_Res_Used & ManitenanceMachineUsedbyToken | 265 |
| Figura 119 Modello: contatori..... | 267 |
| Figura 120 Contatore: numero prodotti finiti..... | 272 |
| Figura 121 Contatore: numero ordini di manutenzione preventiva | 273 |
| Figura 122 Contatore: numero ordini di manutenzione opportuna..... | 274 |
| Figura 123 Contatore: numero di ispezioni | 275 |
| Figura 124 Contatore: numero guasti | 275 |
| Figura 125 Contatore: fermo macchina | 276 |
| Figura 126 Costante dei costi | 277 |
| Figura 127 Contatore: costi della manutenzione..... | 277 |
| Figura 128 Contatore: costo di macchina libera | 278 |
| Figura 129 Tipologie di analisi sul Powersim | 281 |
| Figura 130 Powersim: the Optimize Process | 282 |
| Figura 131 Impostazioni Optimize | 283 |
| Figura 132 Monitoraggio progresso dell'ottimizzazione | 283 |
| Figura 133 Variabili di decisione | 290 |
| Figura 134 Optimize | 291 |
| Figura 135 Andamento dei Costi primo scenario..... | 294 |
| Figura 136 Andamento costo di fermo macchina: primo scenario | 295 |
| Figura 137 Andamento dell'usura nel primo scenario | 295 |
| Figura 138 Andamento dei Costi secondo scenario | 297 |
| Figura 139 Andamento costo di fermo macchina: secondo scenario..... | 297 |
| Figura 140 Andamento dell'usura nel secondo scenario | 298 |

Elenco delle Tabelle

| | |
|---|-----|
| Tabella 1: Sviluppo storico del FM | 11 |
| Tabella 2: Evoluzione della definizione di FM..... | 14 |
| Tabella 3: Norme per il FM | 24 |
| Tabella 4: Sintesi Outsourcing, FM in modalità outsourcing e GS | 27 |
| Tabella 5 : Tabella sinottica articoli | 29 |
| Tabella 6: I servizi del FM secondo la norma UNI 15221-1:2007 | 33 |
| Tabella 7: Principali benefici emergenti dalla letteratura..... | 70 |
| Tabella 8: Principali rischi emergenti dalla letteratura..... | 73 |
| Tabella 9: Sintesi Benefici/Criticità dell'outsourcing del FM nell'ottica cliente | 76 |
| Tabella 10: Sintesi Benefici/Criticità dell'outsourcing del FM nell'ottica fornitore..... | 78 |
| Tabella 11: Indagine AT Kearney | 81 |
| Tabella 12: Stima del mercato europeo del FM nel 2008 (miliardi di Euro) | 86 |
| Tabella 13 Livelli di Pianificazione e Problemi decisionali | 101 |
| Tabella 14 Dati di input ed output per la generazione automatica del modello [85]..... | 156 |
| Tabella 15 Quadro sinottico dei lavori analizzati nell'ambito dei Sistemi di Simulazione Integrati | 165 |
| Tabella 16 Principali vantaggi nell'utilizzo dei Sistemi di Simulazione Integrati | 168 |
| Tabella 17 Confronto SD e DES | 197 |
| Tabella 18 Matrice degli Stati | 203 |
| Tabella 19 Tabella riepilogativa degli elementi base del modello..... | 209 |
| Tabella 20 Ranges del modello | 212 |
| Tabella 21 Cicli di Produzione..... | 213 |
| Tabella 22 Cicli di Manutenzione | 237 |
| Tabella 23 Tabella riepilogativa elementi base modello di simulazione ottimizzato | 285 |
| Tabella 24 Stati Modello Ottimizzazione | 286 |
| Tabella 25 Routes Modello Ottimizzazione..... | 287 |
| Tabella 26 Tempi modello di Ottimizzazione..... | 288 |
| Tabella 27 Voci di costo | 288 |
| Tabella 28 Risultati dell'ottimizzazione: primo scenario | 293 |
| Tabella 29 Totale ordini manutentivi : primo scenario | 294 |
| Tabella 30 Risultati dell'ottimizzazione: secondo scenario | 296 |
| Tabella 31 Totale ordini manutentivi: secondo scenario..... | 296 |

Introduzione

Gli anni novanta sono stati investiti da un processo tecnologico, finalizzato all'innalzamento della qualità dei prodotti-servizi, nonché alla riduzione dei costi di produzione, che ha visto un processo di accelerazione negli anni duemila. Un processo che si potrebbe sintetizzare nella continua ricerca di vantaggi competitivi o di valore aggiunto rispetto ai concorrenti, fondato su un ridisegno dei modelli organizzativi dell'offerta. Difatti nel nuovo millennio si è sviluppata un'arena competitiva caratterizzata da un processo di forte focalizzazione/rifocalizzazione sui core business aziendali di riferimento. Cosicché i leaders di mercato hanno dovuto configurare una catena del valore flessibile per rispondere sempre al meglio alle turbolenze continue che il mercato presenta, tramite la configurazione di network relazionali adattevoli. Lo scenario descritto insieme alla necessità di ottenere costi sempre più bassi ed al contempo mantenere determinati livelli qualitativi hanno creato il terreno fertile per la diffusione e lo sviluppo del Facility Management (FM). Una disciplina descritta egregiamente dal CEN (Comité Européen de Normalisation), come "l'integrazione dei processi interni di un'organizzazione, per mantenere e sviluppare i servizi che supportano e rendono più efficaci le sue attività primarie". Dunque, la percezione dell'efficacia di tale disciplina ha motivato e sostenuto l'intero percorso di dottorato, durante il quale è stata dedicata grande attenzione alla fase di ricerca bibliografica, svoltasi in modo intenso, scrupoloso e dettagliato. Grazie a questa attività, è stato possibile conoscere, approfondire e soprattutto fare chiarezza su una serie di concetti, che aleggiavano attorno al mondo del Facility Management. Ad esempio, "Outsourcing", "Global Service" e "Facility Management" sono utilizzati nel gergo quotidiano come se fossero sinonimi: il Facility Management è una disciplina che considera i servizi di supporto come elementi strategici per la gestione delle attività core; l'outsourcing costituisce una delle possibili leve a disposizione del Facility

Manager, nella realizzazione della gestione ottimale dei servizi ed il Global Service rappresenta una eventuale forma contrattuale, attraverso la quale innescare un rapporto di outsourcing. La parola chiave che governa la disciplina del FM è *l'integrazione*: il fornitore non si deve limitare alla mera erogazione del servizio, ma deve gestirlo, programmarlo e pianificarlo in accordo ed in sinergia con il core business dell'azienda cliente. Tutto ciò, ovviamente, contribuisce al ridisegno del modello organizzativo e comporta il cambiamento del rapporto con il cliente: nasce una vera e propria partnership. Il fornitore diventa una parte complementare dell'azienda, si trasforma, dunque, in uno specializzato partner aziendale, in grado di interpretare le necessità del cliente e di svolgere le proprie mansioni in linea con la missione aziendale. Descritto in questi termini, ovvero in maniera semplicistica, il FM sembra costituire una sfida insormontabile, dato che la sua adozione comporta, il più delle volte, una revisione dell'organizzazione aziendale, difficile da attuare vista la forte resistenza umana al cambiamento, e la creazione di un sinergico rapporto di fiducia tra una schiera di soggetti, che devono essere pronti ad operare nel bene della missione aziendale. La necessità di abbattere le reticenze nei confronti del FM ed il desiderio di rendere giustizia al concetto di integrazione, vera essenza dell'approccio fin'ora descritto, hanno aperto le porte alla realizzazione di uno strumento, in grado di sintetizzare l'integrazione delle attività core e delle attività non core e di mostrare nell'immediatezza i benefici di un simile modus operandi. Se si guarda al FM come alla gestione della manutenzione è facilmente intuibile come tale approccio sia in grado di impattare fortemente sulla realizzazione degli obiettivi aziendali, quali la puntualità delle consegne, la qualità dei prodotti, la riduzione dei lead time e del work-in-process, tutti aspetti fortemente connessi al corretto funzionamento delle risorse di una linea produttiva.

Avere a disposizione un laboratorio virtuale in grado di sintetizzare il sistema azienda dal punto di vista delle due attività, produttiva e manutentiva, consente di apprezzare istantaneamente i vantaggi provenienti dalla loro interazione e di analizzare e vagliare possibili azioni alternative. L'esigenza di garantire uno strumento di ausilio semplice ed immediato ha direzionato il lavoro verso l'ideazione, la creazione e l'implementazione di un modello di simulazione parametrico, attraverso il quale rappresentare ed osservare le funzionalità di un sistema produttivo, il comportamento di un generico impianto rispetto al suo deterioramento nel tempo, l'interazione tra attività di diversa natura e la gestione di una politica di manutenzione su condizione multisoglia. Tutto ciò dal punto di vista dei costi sostenuti e dei benefici ottenibili. Il concetto da cui si è partiti è che l'usura, ovvero l'invecchiamento, delle macchine di una linea produttiva, a cui è riconducibile il fermo degli impianti (per guasto, per sostituzione o per ispezione, a seconda dei casi), è strettamente correlato allo svolgimento del ciclo produttivo: una risorsa si usura "lavorando", in base al tipo di lavorazione ed al tempo di utilizzo. Nello specifico, si è analizzato e modellato un sistema produttivo di tipo Flow Shop, per meglio studiare la relazione tra la logica produttiva e quella manutentiva: è proprio in un sistema in serie che l'interdipendenza delle componenti e del sistema in generale è massima. Osservando e studiando diversi scenari simulativi è possibile risalire alla corretta gestione di due attività di lavoro fondamentali, diverse, ma complementari nel raggiungimento dell'obiettivo finale, rappresentato dal miglioramento continuo delle prestazioni dei processi produttivi. Una corretta politica manutentiva, infatti, permette sicuramente di incrementare le prestazioni dei processi (impianti e/o attrezzature) in relazione a disponibilità, efficienza e qualità ed, inoltre, consente una significativa riduzione del costo totale di manutenzione: inteso come somma del costo delle attività di manutenzione e del costo di mancata produzione.

Il modello è stato realizzato avvalendosi del formalismo della System Dynamics ed ispirandosi a lavori di ricerca precedentemente sviluppati nell'ambito della sezione Impianti, che hanno rappresentato il substrato del modello. Tali lavori sono stati successivamente utilizzati per la validazione del nuovo modello implementato.

Nello specifico, l'implementazione è stata possibile, grazie all'ausilio di un opportuno software di simulazione: Powersim Studio 8, capace di riprodurre, mediante un'interfaccia grafica, il comportamento dei sistemi che evolvono nel continuo. Il software oltre ad essere di semplice utilizzo, permette il trasferimento dei dati da fogli di calcolo come Microsoft Excel o database; consentendo, quindi, la realizzazione di un modello di simulazione parametrico, ovvero di un modello di simulazione innovativo, nel quale si fa ricorso a modelli generati da fonti di dati esterne e definiti sulla base di specifici parametri. Il modello sviluppato, risulta parametrizzato secondo opportune regole. Inoltre tale modello prevede l'integrazione della fase produttiva con quella manutentiva. Pertanto è stato realizzato un modello generico facilmente declinabile in specifici contesti, grazie alla sua natura parametrica e alla sua formulazione per archetipi, ovvero per strutture tipo, rappresentative degli elementi di base di qualsiasi realtà. Difatti, il modello creato è caratterizzato da tre momenti essenziali: l'ingresso di un elemento nel sistema, la sua evoluzione e l'uscita dal sistema stesso. In particolare l'evoluzione rappresenta il viaggio di un oggetto nel sistema attraverso la transizione tra i diversi stati noti a priori. Il percorso di evoluzione è, infatti, deterministicamente assegnato all'oggetto all'ingresso del sistema. All'interno del modello di simulazione, gli stati rappresentano diverse attività (di produzione o manutenzione) alle quali sono associate delle risorse, necessarie affinché l'ordine da eseguire venga realizzato. Con il termine risorse sono state indicate, invece, sia le macchine/attrezzature della linea produttiva, da mantenere, che il personale addetto.

I diversi ordini, che transitano all'interno del sistema per poter essere eseguiti, sono associati a particolari elementi definiti tokens. Questi ultimi, infatti, sono gli oggetti che transitano da uno stato all'altro, secondo un certo ordine di priorità, se e solo se le risorse per effettuare quella particolare transizione sono disponibili. Per poter gestire la natura diversa degli ordini, i token sono stati distinti in token di produzione e di manutenzione e seguiranno specifici percorsi in funzione dell'ordine di lavoro da eseguire. I percorsi di evoluzione sono rappresentati dalle routes nelle quali sono specificati gli stati in cui un determinato oggetto deve seguire. Nella fase di uscita, l'oggetto può essere trasportato in magazzino come prodotto finito se si tratta di un ordine di produzione oppure l'oggetto può tornare ad essere "as good as new" se si tratta di un ordine di manutenzione (preventiva, opportuna o correttiva). Ipotizzando le risorse soggette a manutenzione accessibili e monitorabili, si sono rappresentate due tipologie di monitoraggio/ispezione: continuo, definito Online_Monitoring, in grado di rilevare e di aggiornare automaticamente lo stato di usura delle macchine durante il loro ciclo di lavorazione senza dover ricorrere, ad esempio, alla figura dell'ispettore; e ad intervalli discreti, il cosiddetto Monitoring_by_Inspection. In questo ultimo caso un ispettore ha il compito di ispezionare le macchine ad intervalli programmati (con conseguente fermata della linea) per poter stabilire il loro grado di usura e, quindi, l'azione da intraprendere (avvicinamento prossima data di ispezione o manutenzione preventiva). Grazie all'attività di ispezione è possibile verificare lo stato delle macchine e valutare la vicinanza del livello di usura ai valori di soglia, rispettivamente soglia di guasto, soglia di manutenzione preventiva, soglia di manutenzione opportuna e soglia di allarme. Quest'ultima indica la necessità di avvicinare la data della successiva ispezione onde evitare di intervenire in ritardo. Il guasto è un evento la cui probabilità di accadimento è condizionata dal livello di usura. La probabilità di guasto è stata, infatti, modellata attraverso una distribuzione Weibull, legata non al tempo, come talvolta in letteratura scientifica accade di

trovare, bensì ad un generico valore di usura. La generazione di un ordine di manutenzione preventiva, correttiva e di ispezione è, infatti, legata al superamento o meno delle rispettive soglie che, in genere, vengono stabilite dall'azienda sulla base di considerazioni di tipo economico sulle performance di impianto. Pertanto la performance dell'impianto è collegata al livello di utilizzo dello stesso, alle leggi che governano il fenomeno di usura di ciascun componente ed al dimensionamento delle soglie di manutenzione preventiva, opportuna e di allarme. Dunque, l'obiettivo ultimo è stato quello di individuare tramite un problema di Optimization, la migliore strategia di manutenzione multisoglia (corretto dimensionamento delle soglie) che minimizzi i costi totali della manutenzione. Anche in questa fase, ci si è avvalsi della funzionalità del Powersim Studio, caratterizzato da una apposita sezione dedicata alla ottimizzazione. Le variabili decisionali del problema di ottimizzazione sono state rappresentate, in tal caso, dalla soglia di manutenzione preventiva, dalla soglia di manutenzione opportuna e dalla soglia di allarme. Le soglie di guasto, al contrario, non rientrano nelle variabili di decisione perché costituiscono un'informazione esterna al sistema, ovvero un dato di input non modificabile e, quindi, non controllabile; come anche l'intervallo previsto tra due ispezioni, ipotizzato pari a tre giorni. A tale scopo, sono stati analizzati alcuni scenari al fine di validare il comportamento del modello, mediante un confronto con modelli precedentemente sviluppati nell'ambito della sezione Impianti. In particolare, ci si è soffermati su due scenari maggiormente significativi. Nel primo caso, si è considerato come parametro di riferimento il costo della manutenzione preventiva, è stato impostato un costo di guasto e di fermo impianto elevato, rendendo il guasto un evento molto svantaggioso. Il dimensionamento ottimale, infatti, ha suggerito una gestione manutentiva dell'impianto volta a ridurre la probabilità di guasto: le soglie preventiva ed opportuna hanno presentano valori bassi rispetto alla soglia di guasto.

Per il secondo scenario, invece, sono stati considerati valori di costo più bassi sia per l'intervento correttivo che per il costo di fermo macchina. I risultati hanno evidenziato dei valori delle soglie preventiva ed opportuna più alti e prossimi tra loro e nello specifico la soglia di manutenzione preventiva, è aumentata rispetto al primo scenario avvicinandosi a quella di guasto.

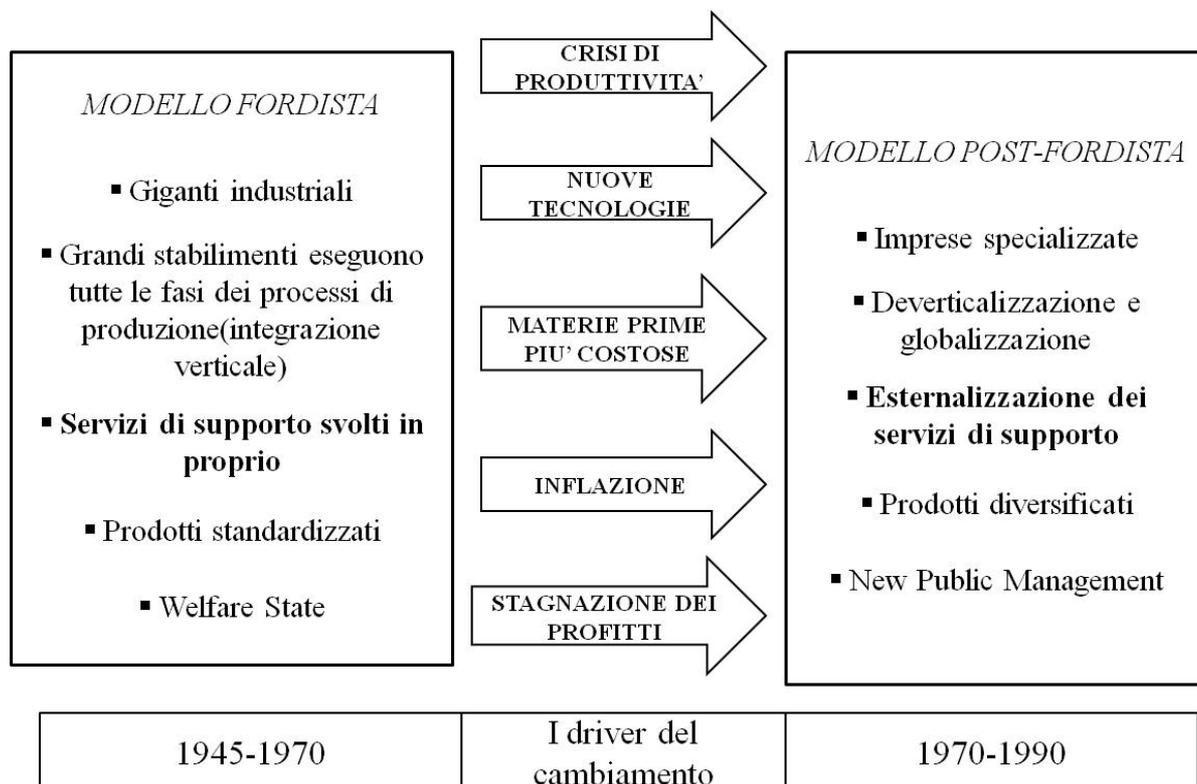
unque, il modello fornisce dei risultati congruenti a quelli attesi, suggerendo un corretto dimensionamento delle soglie in funzione dei costi di manutenzione e del fermo macchina.

Capitolo 1

Aspetti teorici ed organizzativi del FM

1.1. Nascita del Facility Management

A cavallo tra gli anni sessanta e settanta si mise in moto, dapprima negli USA e poi anche negli altri paesi industrializzati, un importante processo di cambiamento nei modi di produzione e nelle strutture d'impresa. Una transizione storica ha portato all'abbandono del paradigma fordista, che basava la crescita dell'economia sulla produzione di massa di beni standardizzati da parte di grandi imprese industriali integrate sia verticalmente (varie fasi del processo produttivo effettuate dalla stessa azienda) sia orizzontalmente (la stessa impresa produce diversi beni e servizi), la cui forza lavoro era concentrata in grandi stabilimenti e sindacalizzata. Il nuovo paradigma, che ha permesso alle economie industrializzate di recuperare i margini di profitto e ricominciare a crescere dopo le crisi stagflative degli anni '70, è invece basato sulla diversificazione dei prodotti, sullo scorporamento e sulla dislocazione delle diverse fasi dei processi produttivi (deverticalizzazione e globalizzazione), sulla specializzazione e sulla valorizzazione dei servizi (terziarizzazione e finanziarizzazione).



FONTE: Tratto da CRESME¹[29]

Figura 1: Evoluzione storica dei processi economici

Riduzione dei costi, specializzazione, innovazione e flessibilità diventano obiettivi imprescindibili. Acquista così grande rilevanza la distinzione tra **attività core** e **attività non-core**. Il core business è l'area d'interesse primario di un'azienda, e comprende le attività tramite le quali l'impresa persegue i propri obiettivi strategici. In altre parole, il core-business è la più importante o la maggiore delle attività economiche di un'azienda. Le attività non-core comprendono invece tutti quei servizi che non rientrano nel core-business dell'impresa, ma che sono tuttavia necessari al suo funzionamento. Nell'economia post-industriale, le imprese hanno bisogno di concentrare le proprie risorse sul core-business, ma allo stesso tempo di rendere più efficienti i servizi di supporto e di abbassarne i costi. La soluzione che

¹ Centro Ricerche Economiche, Socioli e di Mercato per l'Edilizia e il Territorio realizza ricerche e favorisce incontri fra operatori pubblici e privati.

permette di conciliare questi tre obiettivi è l'**esternalizzazione (outsourcing)** di queste attività a delle imprese specializzate, soggetti terzi in grado di fornire i servizi legati alle attività “non-core” con migliore qualità e costi ridotti. Si tratta delle società di **Facility Management**, imprese il cui core-business è la gestione dei servizi non-core.

Un processo di de-verticalizzazione ha così portato tutti gli enti economici, pubblici e privati, a cedere all'esterno alcuni servizi di supporto che prima erano svolti internamente, allo scopo di aumentare la produttività tramite la conversione di costi fissi in costi variabili e l'adozione di standard operativi più agili e flessibili. Nascono così soggetti specializzati nel Facility Management, cioè nell'ottimizzazione dei servizi di supporto, e nascono i concetti di gestione e manutenzione integrata di tali servizi.



FONTE:Elaborazione CRESME su BIFM (British Institute of Facility Management) [29]

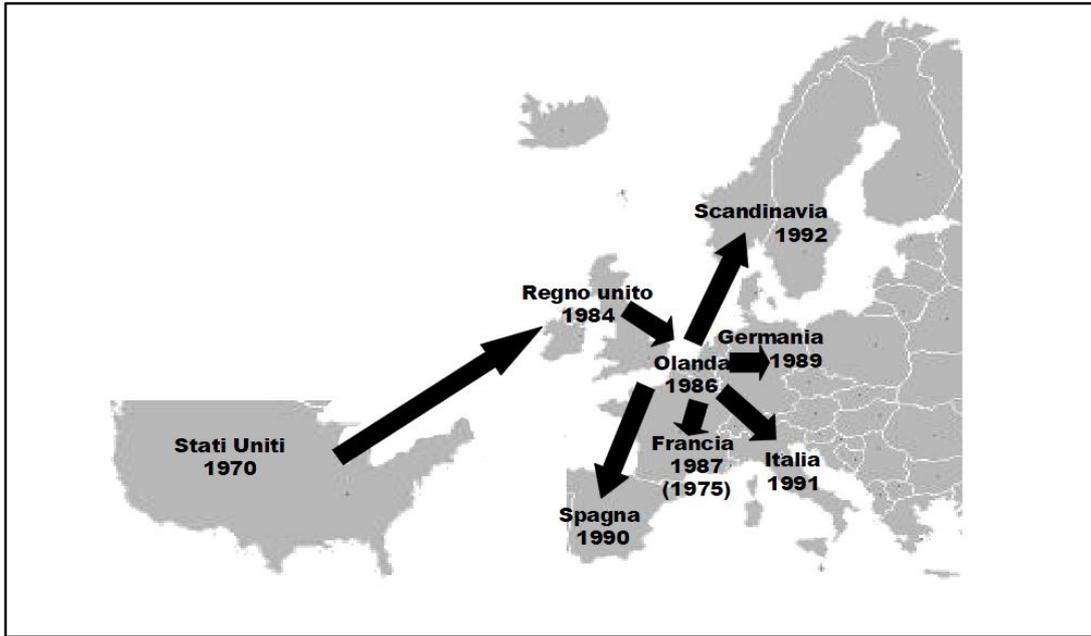
Figura 2: La risposta delle imprese al processo di de-verticalizzazione

La pratica del Facility Management è nata negli Stati Uniti, attraverso il coordinamento dei servizi di gestione degli immobili, e vanta ormai una tradizione pluridecennale. Già negli anni '60-'70 negli USA è stato dato forte impulso a una politica di esternalizzazione dei servizi che ha favorito il consolidarsi di un primo gruppo di società specializzate. Il mercato ha successivamente conosciuto una decisa espansione, soprattutto a partire dagli anni '80. In Europa il mercato del Facility Management si diffonde a partire dal Regno Unito nella prima metà degli anni '80, e poi in Olanda, nella seconda metà degli anni '80. In Francia, a differenza di quanto avvenuto

negli Stati Uniti, dove appare stretto il legame iniziale con la gestione degli immobili (in particolare per le università e gli ospedali), il FM si sviluppa partendo dal tema della gestione dei *Servizi Generali* nelle organizzazioni, tra la fine degli anni '70 e la prima metà degli anni '80, per evolversi poi verso il FM 'immobiliare' negli anni '90. La Germania vede svilupparsi i processi di esternalizzazione a partire dai primi anni '80, trainati dai settori delle pulizie, della sicurezza, del catering e più avanti dai settori dell'Information Technology, mentre è con la fine degli anni '80 che si va affermando un vero e proprio mercato del Facility Management (nel 1989 nasce GEFMA – *German Association for Facility Management*), per poi arrivare negli anni '90 anche nei paesi scandinavi (Tuomela, Putho, 2001). In Italia il mercato del FM comincia i suoi primi passi tra la fine degli anni '80 e la prima metà degli anni '90, per crescere prepotentemente negli ultimi quindici anni.

Tabella 1: Sviluppo storico del FM

| Anni | Paese | Stadio FM |
|--------------|--------------------|--|
| 60-70 | USA | Coordinamento dei servizi di gestione immobiliare |
| 70-80 | Francia | Servizi generali |
| 80 | Regno Unito | |
| | Germania | Servizi di pulizia, catering, sicurezza, IT |
| | Olanda | |
| 90 | Italia | |
| | Scandinavia | |
| | Spagna | |
| | Francia | Servizi immobiliari |



FONTI: CRESME [29]

Figura 3: Il processo di diffusione del FM in Europa

1.2. Definizioni FM

Il CEN² (Comité Européen de Normalisation), dopo un lungo processo di elaborazione e mediazione tra istanze provenienti da diverse regioni, è pervenuto alla seguente definizione di Facility Management:

“FM is the integration of processes within an organization to maintain and develop the agreed services which support and improve the effectiveness of its primary activities”[1]

“Il FM è l’integrazione dei processi interni di un’organizzazione, per mantenere e sviluppare i servizi che supportano e rendono più efficaci le sue attività primarie”

Possiamo considerare queste definizioni come il punto di arrivo (non necessariamente definitivo) di un percorso, durante il quale la definizione di

²Il CEN, Comitato Europeo di Standardizzazione, è l’ente europeo che ha come obiettivo la standardizzazione delle definizioni a livello comunitari

FM si è andata modificando progressivamente, per adattarsi ad un mercato nuovo, in continua evoluzione ed espansione.

Alla fine degli anni '80, la prima definizione condivisa dai professionisti del settore che introduceva i concetti fondamentali del Facility Management in Europa, fu proposta da **Regterschot e Becker** (1988) [2], che definirono il FM come *“la pianificazione, realizzazione e gestione integrale di edifici ed alloggi, offrendo servizi e risorse che contribuiscono al raggiungimento di obiettivi organizzativi in un ambiente mutevole in maniera efficace, efficiente e flessibile”*. In questa prima definizione fu però messo in evidenza solo il comparto “hardware” del Facility Management, e cioè la parte responsabile di progettare, pianificare e monitorare tutte le attività riguardanti gli edifici in modo da supportare il cliente. Una definizione più completa arrivò quattro anni dopo, proposta da **Cotts e Lee**, in cui si definiva il Facility Management *“la pratica di coordinare la postazione di lavoro fisica con le persone e l'attività dell'organizzazione; tramite l'applicazione del Facility Management si integrano i principi dell'amministrazione del business, dell'architettura e delle scienze comportamentali”*[3]. In questa definizione si introducono per la prima volta i concetti fondamentali di integrazione e coordinamento di più attività, e quindi la necessità di avere diverse competenze e contenuti tecnologici eterogenei, che riescano ad adattarsi al modello organizzativo del cliente connettendo, in maniera orizzontale, le diverse attività. Di “approccio integrato” parla anche **Barrett** (1996) [4], che definisce il Facility Management come un *“approccio integrato per installare, mantenere, migliorare ed adattare gli edifici e l'infrastruttura di un'organizzazione in modo da creare un ambiente che supporta in maniera esaustiva gli obiettivi primari di quell'organizzazione”*. Nello stesso anno il professor **Keith Alexander**[5] enfatizza la relazione tra il Facility Management e le attività strategiche d'impresa, introducendo nella definizione anche la parte “software” del FM, che riguarda la gente, i processi, l'ambiente e la salute. All'inizio del ventunesimo secolo, **Then** [6] e

lo stesso **Barrett**, riconobbero che “*il ruolo del Facility Management è ottimizzare l'utilizzo di tecnologia, persone e strutture fisiche raggiungendo il totale equilibrio nel loro utilizzo*”. **Varcoe** intuisce che “*le organizzazioni ed i consorzi cercheranno di avere un'infrastruttura completa per il business allargando i componenti dell'ambiente di lavoro inserendo la struttura dell'Information Technology, finanza e risorse umane*” [7]. **Curcio** [8] enfatizza il concetto di integrazione, definendo il Facility Management come “*la gestione integrata di tutti i servizi non-core (in riferimento ad edifici, spazi e persone) connessi alla gestione immobiliare*”. Questa definizione introduce inoltre un aspetto peculiare del Facility Management: l'enfasi sui servizi non-core. La distinzione tra i servizi core e non-core è stata introdotta da Chase ed altri [9] che definirono come servizi no-core tutte le attività complementari ai processi distintivi dell'organizzazione e come servizi core tutti quelli richiesti dal cliente e di cui l'organizzazione offre un valore aggiunto [10]. Le attività core permettono di ottimizzare i tipici parametri di performance come qualità, flessibilità, reattività e costi, mentre le attività non core sono identificate come i processi dell'organizzazione che contribuiscono solo in maniera marginale a realizzare gli obiettivi dell'organizzazione, ma che sono necessari per il funzionamento dell'organizzazione stessa.

Tabella 2: Evoluzione della definizione di FM

| Autore | Definizione FM |
|-----------------------------------|--|
| Regterschot e Becker(1988) | Pianificazione, realizzazione e gestione integrale di edifici ed alloggi, offrendo servizi e risorse che contribuiscono al raggiungimento di obiettivi organizzativi in un ambiente mutevole in maniera efficace, efficiente e flessibile |
| Cotts e Lee (1992) | La pratica di coordinare la postazione di lavoro fisica con le persone e l'attività dell'organizzazione; tramite l'applicazione del Facility Management si integrano i principi dell'amministrazione del business, |

| | |
|-----------------------|--|
| | dell'architettura e delle scienze comportamentali |
| Barrett (1996) | Approccio integrato per installare, mantenere, migliorare ed adattare gli edifici e l'infrastruttura di un organizzazione in modo da creare un ambiente che supporta in maniera esaustiva gli obiettivi primari di quell'organizzazione”. |
| Then (1999) | Il ruolo del Facility Management è ottimizzare l'utilizzo di tecnologia, persone e strutture fisiche raggiungendo il totale equilibrio nel loro utilizzo |
| Varcoe (2000) | un focus sulla attuazione e la gestione delle scelte del business riguardo beni immobili o edifici, utilizzando asset di costruzione come strutture” |
| Curcio (2003) | Gestione integrata di tutti i servizi non-core (in riferimento ad edifici, spazi e persone) connessi alla gestione immobiliare |
| IFMA (2003) | La pratica di coordinare la postazione di lavoro fisica con le persone e l'attività dell'organizzazione; tramite l'applicazione del FM si integrano i principi dell'amministrazione del business, dell'architettura e delle scienze comportamentali. |
| CEN(2007) | L'integrazione dei processi interni di un'organizzazione, per mantenere e sviluppare i servizi che supportano e rendono più efficaci le sue attività primarie” |

Le definizioni iniziali di FM rispecchiavano un mercato legato quasi unicamente alla gestione e manutenzione degli immobili e degli impianti a essi connessi. Il FM era quindi visto come la manutenzione, pulizia e riparazione degli immobili e degli impianti di un'organizzazione produttiva per arrivare alla definizione odierna che comprende tutte le attività non-core

che supportano il core-business di un'organizzazione. Si è quindi verificato un processo di ampliamento progressivo della definizione, fino a farla diventare "olistica", forse più generica e sfuggente ma anche in grado di descrivere meglio un mercato che oggi comprende gestione immobiliare, progettazione, gestione finanziaria e assicurativa, gestione dei cambiamenti, gestione delle risorse umane, gestione della sicurezza, gestione delle infrastrutture, gestione della sicurezza e della salute. Il Facility Management è quindi la pratica aziendale che permette a un'organizzazione di ottenere dalle proprie infrastrutture (fisiche ma anche immateriali) i servizi di cui ha bisogno per perseguire i propri indirizzi strategici.

L'analisi delle definizioni di Facility Management porta quindi a constatare come l'ambito di azione del FM comprenda oramai tutte le attività non-core di un'organizzazione. Si tratta di un ambito molto difficile da delimitare a priori, sia perché definito per esclusione (tutto ciò che non è core-business), sia perché il confine tra attività core e non-core non è semplice da tracciare, varia in ogni organizzazione e nel tempo, e contiene elementi di soggettività. Stabilire quali attività classificare (e trattare) come strategiche e quali no è una decisione non banale, che può essere compiuta in modo diverso da diversi soggetti.

Ciò che contraddistingue le operazioni di FM non è quindi l'oggetto della gestione (quali servizi vengono svolti), ma piuttosto la modalità di svolgimento (in che modo vengono svolti). **FM significa gestione integrata e coordinata, pianificazione degli interventi e utilizzo di sistemi informativi avanzati.**

Ciò che caratterizza la gestione in FM è dunque l'integrazione delle attività: il fornitore non si limita alla mera erogazione del servizio, ma lo gestisce, programma e pianifica con il supporto di piattaforme informative avanzate, eseguendo un continuo monitoraggio.

Il ridisegno del modello organizzativo ha comportato anche il cambiamento del rapporto con il cliente che, ben diverso da quello che si instaura nei tradizionali contratti di fornitura di singoli servizi, si è trasformato in una vera e propria partnership. Negli anni, quindi, il rapporto con il fornitore è cambiato: la diffusione del FM ha richiesto la specializzazione del fornitore che da semplice erogatore di servizi è diventato un partner aziendale, ovvero parte complementare all'azienda, capace di interpretarne le necessità.

Il cambiamento oltre ad essere indotto da una crescente competitività tra gli attori dell'offerta in un mercato sempre più attrattivo, è legato all'evoluzione della preparazione degli attori della domanda nel definire le richieste di servizio e valutazione dei risultati sulla base di una attenta analisi delle necessità aziendali. In realtà gli attori coinvolti in un progetto di outsourcing non sono riconducibili esclusivamente al cliente e all'outsourcer ma coinvolgono gli utenti interni ed esterni, i sub-fornitori, i consulenti e gli altri possibili stakeholder, sono strettamente interrelati e si influenzano reciprocamente. Per la riuscita del progetto occorre, dunque, inquadrare il rapporto fra i due protagonisti principali in una trama più ampia di relazioni con un approccio che sappia favorire le sinergie fra le informazioni e le competenze di tutti gli attori in gioco. La finalità è la sperimentazione di processi metodologici e l'elaborazione di strategie condivise finalizzate alla costruzione di rapporti di partnership tra cliente e azienda. Questo approccio non sempre ha trovato terreno fertile in quanto per attuarlo è necessario che il cliente, pubblico o privato, abbia chiaro quali sono le necessità in termini di servizi, la consistenza del patrimonio da gestire e una conoscenza approfondita del panorama dell'offerta al fine di selezionare il fornitore partner più vicino alle proprie necessità. È altrettanto importante che il fornitore sappia individuare le caratteristiche e le problematiche del cliente per poter offrire la soluzione più adeguata.

1.3. Il contesto normativo europeo per i servizi di FM

Il quadro normativo volontario europeo sul FM, dopo la diffusione da parte del CEN delle prime linee guida a carattere raccomandativo, si arricchisce di nuovi significativi progetti normativi, offrendo numerosi elementi di riflessione sia sul piano tecnico-processuale che su quello organizzativo-gestionale.

L'iniziale intuizione della necessità di avviare un processo di normazione all'interno del mercato del FM è stata del NEN, l'ente di formazione olandese, a cui si deve la formulazione nel 2002 della prima norma settoriale di un paese europeo (NEN 2748 "Termini e definizioni del FM").

Nel 2003, in risposta alla proposta olandese di estendere tale processo a livello europeo, viene costituita la Commissione europea CEN/TC348 "FM".

Da quel momento il lavoro svolto con il contributo attivo di tutti i paesi europei coinvolti, tra cui l'Italia attraverso l'UNI, ha portato nel 2007 alla pubblicazione ufficiale delle due norme EN 15221-1 "Terminologia e definizioni del FM" e EN 15221-2 "Linee guida per la predisposizione di un contratto di FM" e all'attivazione di altri nuovi progetti normativi (EN 15221-3 "Linee guida per la qualità nel FM", EN 15221-4 "Tassonomia del FM", EN 15221-5 "Processi del FM", EN 15221-6 "Misurazione degli spazi per il FM" e EN 15221-7 "Benchmarking per la valutazione delle prestazioni").

In realtà, l'iniziativa olandese è nata nel medesimo contesto politico, economico, sociale e normativo europeo in cui la domanda sempre crescente di strumenti di supporto allo sviluppo del mercato dei servizi di FM individuava proprio nell'unificazione normativa una soluzione efficace al superamento delle numerose barriere che si andavano creando tra gli operatori del settore, al fine di migliorare la trasparenza negli approvvigionamenti, le procedure di certificazione ed i mezzi di comunicazione tra gli stakeholders, e di fornire regole nella contrattazione e

supportare i committenti nella definizione delle proprie esigenze. Oltre a ciò, a causa delle evidenti differenze che si manifestavano tra i paesi europei est-ovest e nord-sud, si riconosceva – nell’ambito dello stesso processo normativo avviato – un’opportunità di notevole interesse proprio a vantaggio dei mercati del sud e dell’est Europa, nella prospettiva di un innalzamento dei livelli di competitività.

I gruppi di lavoro WG1 e WG2, a cui la Commissione CEN/TC 348, il Comitato Tecnico che all’interno del CEN si occupa di Facility Management, a partire dal 2003, aveva affidato l’obiettivo di disegnare un modello del FM, definendone la terminologia e le definizioni ad esso connesse e, parallelamente, le procedure contrattuali, hanno scontato un’iniziale difficoltà di approcciare alle suddette complesse differenze del mercato, particolarmente accentuate anche dalle diverse lingue, culture, visioni e pratiche presenti nei diversi paesi.

Pur in presenza di questa oggettiva difficoltà iniziale di approccio, lo sviluppo di tale processo è proceduto fondandosi sulla co-partecipazione attiva e costruttiva dei diversi enti normatori dei paesi europei, giungendo all’approvazione delle due prime norme nel luglio del 2006.

- **La norma EN 15221-1**

EN 15221-1: Facility Management – Part 1: Terms and Definitions (2006)

La norma EN 15221-1 si pone l’obiettivo prioritario di superare le divergenze negli approcci e nei linguaggi tra i vari paesi europei, attraverso la definizione di un modello comune di FM, la descrizione delle relative funzioni, la precisazione del campo di applicazione e la specificazione della terminologia di settore. Costituisce, pertanto, la base per tutte le norme successive, ponendosi come documento di indirizzo essenziale.

I termini e le definizioni proposte e finalizzate alla lettura univoca del modello di FM illustrato nella norma, ne descrivono attori, relazioni, funzioni, parametri e output principali con riferimento al processo integrato che in esso è descritto.

La definizione di FM rimanda ad una logica di “integrazione di processi nell’ambito di una organizzazione per mantenere e sviluppare i servizi concordati che supportano e migliorano l’efficacia delle attività primarie”.

Il modello di FM proposto dalla norma è costruito intorno a una specifica “organizzazione”, ai suoi “processi primari” e alle interrelazioni gestite a livello “strategico”, “tattico” e “operativo” tra domanda e offerta di servizi integrati.

Scopo prioritario del FM è, quindi, il bilanciamento tra le richieste in termini di servizi integrati da parte della domanda e la risposta in termini di fornitura degli stessi da parte dell’offerta, in un corretto rapporto tra “requisiti” e “prestazioni” e tra “qualità” e “costi”.

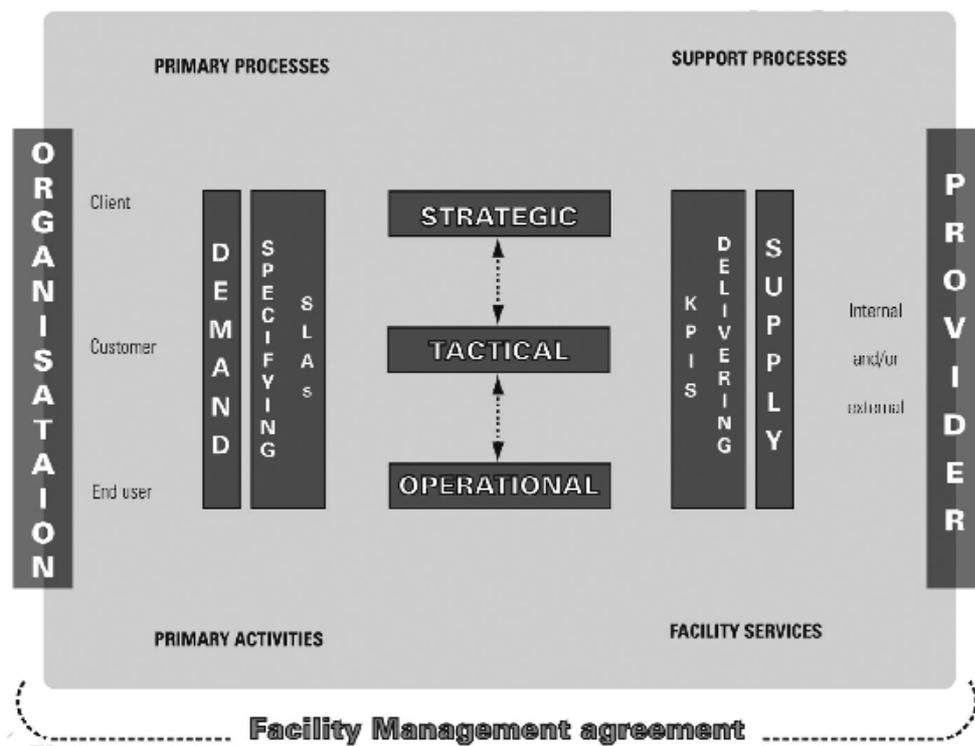


Figura 4: Il modello di processo del FM delineato dalla norma EN 15221-1

- **La norma EN 15221-2**

EN 15221-2: Facility Management – Part 2: Agreements –Guidance on how to prepare Facility Management agreements (2006)

La norma EN 15221-2 offre i criteri base per regolamentare i rapporti tra il committente e il fornitore dei servizi di FM.

Lo scopo della norma mira, in particolare, a promuovere e migliorare le relazioni transfrontaliere tra committenti e fornitori di servizi di FM, anche al fine di minimizzare dispute e contestazioni e favorire una maggior standardizzazione delle reciproche basi di accordo contrattuale.

Con questo obiettivo vengono identificati i “tipi di accordi” di FM e le relative “caratteristiche” e forniti suggerimenti e indicazioni in merito alla stesura dei contratti (struttura, fasi di preparazione, clausole da prevedere in caso di disputa, attribuzione di diritti e doveri tra le parti, ecc.).

Il campo di applicazione della norma abbraccia una gamma assai articolata di servizi, in ambito pubblico e privato e per tutti i tipi di ambiente lavorativo (industriale, commerciale, amministrativo, sanitario, ecc.).

La procedura di predisposizione di un contratto di FM viene descritta attraverso tutte le sue fasi consequenziali di sviluppo operativo e vengono indicati tre principali metodi di determinazione dei prezzi (somma forfettaria, tariffa unitaria, “costo plus”) e di pagamento, con particolare riferimento al riconoscimento degli incentivi e delle “opportunità di risparmio” favoriti da parte del fornitore.

Il progetto normativo avviato dalla Commissione CEN TC 348 si è poi concentrato su altre norme messe in cantiere e sviluppate sulla base delle due norme quadro già approvate.

Queste norme rappresentano un significativo ed ulteriore lavoro di approfondimento ed ampliamento del modello di FM già assunto, con l'obiettivo, in particolare, di descriverne nel dettaglio processi e procedure inerenti in particolare agli aspetti centrali della qualità, del benchmarking e della misurazione delle prestazioni.

- **La norma EN 15221-3**

EN 15221-3: Facility Management – Part 3: Guidance on quality in Facility Management (2011)

La norma EN 15221-3 evidenzia il difficile quanto arduo tentativo di trasferire i dettami della norma ISO 9001 al mercato del FM, allo scopo di ottenere, migliorare e misurare la qualità nel campo specifico di applicazione dei servizi integrati di FM.

Il percorso obbligato che conduce alla massimizzazione della congruenza e della conformità tra le esigenze e le aspettative di qualità poste alla base della soddisfazione del cliente, parte dalla traduzione delle “esigenze” esplicite ed implicite in “requisiti” oggettivi.

In questa direzione, nel processo di costruzione del sistema “esigenze-requisiti”, assume fondamentale importanza la corretta definizione dei “Key Performance Indicator – KPI” e dei “Service Level Agreement – SLA”, elementi questi determinanti per una puntuale realizzazione di capitolati di appalto su base prestazionale.

- **La norma EN 15221-4**

EN 15221-4: Facility Management – Part 4: Taxonomy of facility management (2011)

La norma EN 15221-4 si pone lo scopo di realizzare un sistema di classificazione dei servizi di FM prioritariamente finalizzato a costruire una

struttura per inquadrare le analisi di benchmarking in ambito europeo, definendo le interrelazioni tra gli elementi e la struttura gerarchica che caratterizzano i servizi stessi, i termini ad essi associati e i principi per la definizione dei costi. La struttura di classificazione si fonda sui concetti di base già introdotti dalla norma 15221-1, che vedono il campo di applicazione del FM suddiviso in due macro-gruppi: spazio-infrastrutture, persone-organizzazione.

- **La norma EN 15221-5**

EN 15221-5: Facility Management – Part 5: Guidance on the development and improvement of processes (2011).

La norma fornisce una guida alle organizzazioni di Facility Management (FM) sullo sviluppo e il miglioramento dei loro processi per supportare i processi primari. Stabilisce, inoltre, i principi di base, descrive i processi generici di alto livello di FM, liste strategiche, processi tattici e operativi, e fornisce esempi di flussi di lavoro di processi..

- **La norma EN 15221-6**

EN 15221-6: Facility Management – Part 6: Area and space measurement in Facility Management (2011)

La norma EN 15221-6 “Misurazione degli spazi per il FM” nasce allo scopo di uniformare a livello europeo i criteri e metodi per il calcolo delle superfici degli edifici, al fine di stabilire una base comune di riferimento per la pianificazione, la progettazione, la gestione delle aree e degli spazi in funzione in particolare degli aspetti di costo e benchmarking.

- **La norma EN 15221-7**

EN 15221-7: Facility Management – Part 7:Guide to Benchmark for Facility Management (2012)

La norma fornisce linee guida per il benchmarking delle prestazioni e contiene precisi termini e definizioni, po' metodi per confrontare prodotti e servizi di Facility Management, così come le operazioni e le organizzazioni di Facility Management. La norma stabilisce una base comune per confrontare i costi di Facility Management, le superfici e gli impatti ambientali, po' la qualità, il gradimento e la produttività del servizio. Essa si applica al Facility Management come definito nella UNI EN 15221-1 e dettagliato nella UNI EN 15221-4. Il recepimento di tali normative a livello nazionale è avvenuto con le normative UNI presenti in tabella

Tabella 3: Norme per il FM

| Norme per il FM | Contenuto | Recepimento nazionale |
|--------------------------|--|------------------------------|
| EN 15221-1 (2006) | Termini e definizioni del FM | UNI EN 15221/1 |
| EN 15221-2 (2006) | Linee guida per preparare accordi di FM | UNI EN 15221/2 |
| EN 15221-3 (2011) | Guida sulla qualità nel FM | UNI EN 15221/3 |
| EN 15221-4 (2011) | Tassonomia, classificazione e strutture nel FM | UNI EN 15221/4 |
| EN 15221-5 (2011) | Guida ai processi nel FM | UNI EN 15221/5 |
| EN 15221-6 (2011) | Misurazione dell'area e degli spazi nel FM | UNI EN 15221/6 |
| EN 15221-7 (2012) | Benchmarking per la valutazione delle prestazioni | UNI EN 15221/7 |

1.4. Differenze tra Outsourcing, Facility Management e Global Service

Molto spesso viene ravvisata una confusione e una presunta sovrapposizione di definizioni e contenuti tra i concetti di “outsourcing”, “Facility Management” e “Global Service”. In realtà i vari termini non sono affatto sinonimi. Per capire le loro differenze è necessario passare in rassegna quali sono le loro definizioni secondo le normative e quindi:

- **Outsourcing:**

Accordo di medio-lungo periodo con il quale un'organizzazione stabilmente affida a fornitori esterni la gestione operativa di attività o processi svolti in precedenza all'interno (UNI 11336:2010).

- **Facility Management:**

Integrazione dei processi interni ad un'organizzazione al fine di sostenere e sviluppare i servizi che ne supportano e migliorano l'efficienza delle attività primarie (UNI EN 15221-1:2007).

- **Global Service:**

Modalità contrattuale basata sulla piena responsabilità dei risultati da parte dell'assuntore.(UNI 10685:2007).

Quindi, esternalizzare significa affidare a un ente esterno un'attività che in precedenza era svolta all'interno ovvero non necessariamente l'esternalizzazione si traduce in Facility Management: si può anche esternalizzare un servizio verso un ente esterno che lo gestisce in modo non integrato. Non è neanche vero che il Facility Management debba necessariamente passare per un'esternalizzazione (anche se ciò accade nella maggior parte dei casi): un'azienda può anche gestire un servizio (o un insieme di servizi) in FM tramite una propria branca (FM *in house*), senza quindi ricorrere all'utilizzo di fornitori esterni.

Il Facility Management è, quindi, una disciplina che guarda ai servizi di supporto come **elementi strategici per la gestione delle attività core** invece

l'outsourcing è semplicemente **una delle possibili leve** a disposizione del Facility Manager impegnato nel realizzare la gestione ottimale dei servizi.

Una delle formule contrattuali da adottare per esternalizzare servizi di Facility Management è quella del Global Service.

Con il contratto di Global Service si cerca di ottimizzare la gestione di una serie di servizi tra loro connessi, attraverso l'affidamento degli stessi ad un unico interlocutore che ha il compito di gestirli in modo coerente e coordinato seguendo i principi di economicità ed efficienza. Lo stesso interlocutore attraverso meccanismi di tipo economico, che prevedono formule di pagamento legate ai risultati conseguiti (in termini qualitativi e quantitativi), è direttamente coinvolto nella gestione dei servizi stessi (UNI 10685).

Quindi, i tre concetti sopra esposti non coincidono ma sono legati tra di loro nel modo seguente:

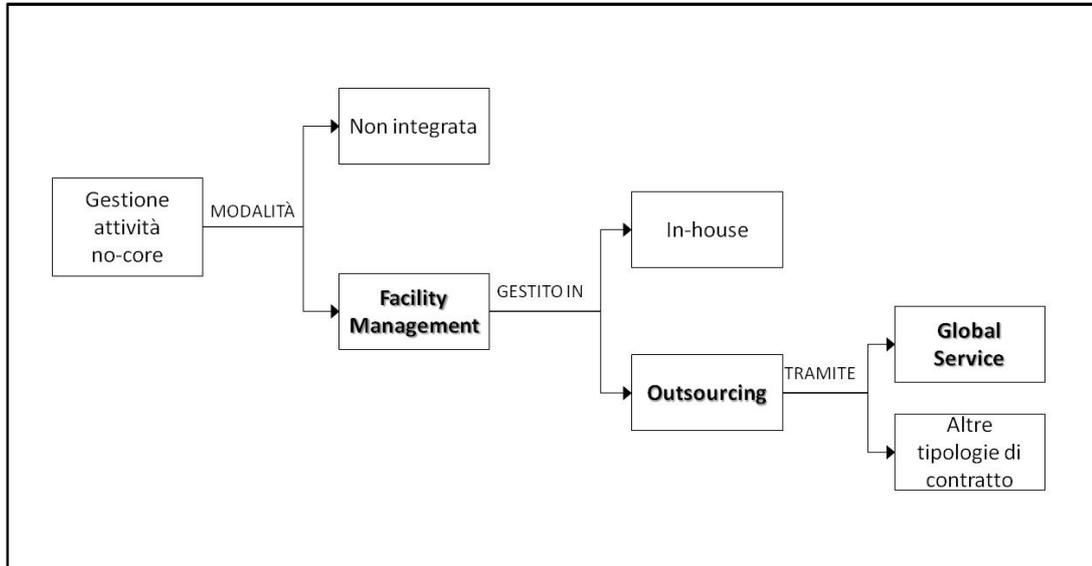


Figura 5 *Legame FM/Outsourcing/Global Service*

Infine, viene riportata una tabella con le principali differenze tra i tre termini fino ad ora analizzati.

Tabella 4: Sintesi Outsourcing, FM in modalità outsourcing e GS

| | OUTSOURCING | FACILITY MANAGEMENT IN MODALITA' OUTSOURCING | GLOBAL SERVICE |
|--|---|--|--|
| <i>RAPPORTO CLIENTE-FORNITORE</i> | Di tipo tradizionale | Partnership | |
| <i>GESTIONE DELLE FACILITIES</i> | Non integrata | Integrata | |
| <i>CAPACITA' DEL PROVIDER</i> | Mera esecuzione | Gestionali | Gestionali ed operative |
| <i>PROGETTAZIONE SERVIZIO</i> | FACILITY MANAGER: definizione degli obiettivi, progetto esecutivo e piani di intervento. | FACILITY MANAGER: definizione obiettivi e livelli di servizio. | |
| | FORNITORE DI SERVIZI: esecuzione di quanto stabilito dal facility manager | FORNITORE DI SERVIZI: Programmazione ed esecuzione degli interventi con possibilità di subappalto | FORNITORE DI SERVIZI: Programmazione ed esecuzione degli interventi |
| <i>COMPENSO</i> | A misura | Variabile in funzione del contratto stipulato | Basato sui risultati raggiunti. |
| <i>CONTROLLO</i> | Il facility manager verifica lo svolgimento delle attività' | Il facility manager verifica il raggiungimento dei livelli di qualità' del servizio. | |

Per la realizzazione di tale sezione sono stati analizzati articoli della letteratura scientifica pubblicati sulle maggiori riviste del settore. Le principali caratteristiche di tali fonti bibliografiche sono state poi schematizzate in Tabella 5. In questa tabella, sulle righe sono stati riportati gli articoli più significativi ritrovati mentre sulle colonne sono stati riportati i giudizi inerenti le caratteristiche di ciascun lavoro. Nello specifico, sono state riportate le seguenti caratteristiche:

- Numero di bibliografia;
- Anno di pubblicazione;
- Aspetto teorico del FM (Normativa e Literature review);
- Aspetto pratico del FM (Case study e Risultati);
- Aspetto teorico Outsourcing (Literature Review);
- Differenza tra FM, GS e outsourcing

Per la legenda dei simboli associati alle caratteristiche dei lavori si rimanda alla legenda presente alla fine della Tabella 5

Tabella 5 : Tabella sinottica articoli

| Titolo articolo | N° bibliografia | Anno | Aspetto teorico FM | | Aspetto pratico FM | | Aspetto teorico outsourcing | Differenza tra FM, GS, Outsourcing |
|---|-----------------|------|--------------------|-------------------|--------------------|---|-----------------------------|------------------------------------|
| | | | Normativa | Literature review | Case study | Risultati | Literature review | |
| • Facilities management: a ``Jack of all trades''? | [22] | 2011 | x | Xxx | | | | |
| • Step-by-step process analysis for hospital facility management | [28] | 2005 | | X | xx | Miglioramento dell'efficienza attraverso l'utilizzo del FM | | |
| • Managerial perception of service innovation in facility management organizations | [11] | 2012 | | Xx | | | | |
| • Outsource or in-house facilities management: The pros and cons | [21] | 2003 | | X | | | x | xx |
| • Facilities management: lost, or regained? | [23] | 2012 | | Xxx | | | | xx |
| • Management speak in Facilities Management | [20] | 2002 | | X | | | | xx |
| • Linking FM practice and research | [13] | 2006 | | Xxx | | | | |
| • Managing effectiveness and efficiency through FM blueprinting | [16] | 2011 | xxx | X | | | | |
| • The principles and practice of facilities maintenance in Botswana | [14] | 2011 | | X | xx | Creazione di linee guida per migliorare la pratica del FM | | xx |
| • A study of facility management strategy: the case of commercial banks in Thailand | [12] | 2011 | | Xxx | xx | Definizione di strategie di FM | | xx |
| • A review and classification of academic research in facilities management | [24] | 2007 | | Xxx | | | | |
| • A road-map for outsourcing facilities-related services in SMEs | [17] | 2011 | | X | xxx | Realizzazione di una tabella di marcia per superare le barriere dell'outsourcing del FM | xx | xx |
| • Organizational Models for Non-Core Processes Management: A Classification framework | [15] | 2012 | | X | | | | xxx |
| • Facility management e global service integrato | [25] | 2005 | | Xx | | | xx | xxx |

| | | | | | | | | |
|---|------|------|---|-----|-----|---|-----|----|
| • Outsourcing in Facilities Management- A Literature Review. | [26] | 2011 | | Xxx | | | xxx | xx |
| • Impact Analysis of Facilities Management Outsourcing –through a Case Study of Cisco HQ Building | [18] | 2010 | | X | xxx | Realizzazione di alcuni indicatori di performance | xx | xx |
| • Outsourcing Engineering and Facilities Management | [19] | 2005 | x | Xx | | | | |
| • Outsourcing in Health Care Sector – A State of the art review | [27] | 2010 | | X | | | xx | x |
| • Knowledge based facilities management | [55] | 2009 | | Xxx | | | | x |
| • Quality management standards for facility services in the Italian health care sector | [60] | 2006 | | X | | | | xx |
| • The benefits and obstacles of mobile technology in FM service procurement | [57] | 2009 | | X | | | | |
| • Collaborative relationships in facility services | [53] | 2006 | | Xx | | | | |
| • Establishment of KPIs for facility performance measurement: review of literature | [58] | 2010 | | Xx | | | | |
| • Business critical FM | [52] | 2004 | | X | | | | |
| • Standardizing FM knowledge acquisition when information is inadequate | [56] | 2009 | | X | | | | |
| • Key performance indicators for maintenance of health-care facilities | [59] | 2003 | | X | | | | |
| • Positioning and repositioning FM | [54] | 2008 | | Xx | | | | |

| Legenda | |
|---------|-------------|
| Simbolo | Valutazione |
| XXX | Ottimo |
| XX | Buono |
| X | Discreto |

1.5. Classificazione dei servizi di Facility Management

L'obiettivo del Facility Management applicato all'impresa è la gestione dei servizi che non fanno parte del business aziendale. Non è richiesto al fornitore di essere uno specialista di un servizio a lui affidato, ma di essere in grado di coordinare diversi sub-appaltatori in modo efficace, occupandosi di formulare i contratti e di gestire la commessa da titolare.

La gamma dei servizi offerti alle grandi aziende è vasta e si articola tra manutenzioni, trasporti, ambiente, infrastrutture e supporti vari; di norma viene classificata (Bella, Marchetti, 2003; Sciarelli, 2005; De Toni, 2007; Ciaramella, Tronconi, 2006; IFMA) in:

- **servizi all'edificio**, Building services, questa macroarea racchiude tutte le attività volte al mantenimento dell'immobile e di tutti i suoi impianti e strutture. L'obiettivo finale di questi servizi è garantire la continuità di funzionamento dell'edificio inteso come "scatola" all'interno della quale l'azienda svolge la propria attività
- **servizi alle persone** che frequentano l'edificio, People services, come l'intero comparto delle pulizie ed igiene ambientale, smaltimento rifiuti, gestione spazi a verde, reception, sicurezza e vigilanza, gestione centri stampa; si tratta in pratica di un insieme di attività che mirano ad incrementare la produttività, il benessere e la fidelizzazione di chi lavora per l'azienda.
- **servizi allo spazio**, Space planning management, come la gestione programmata degli spazi di lavoro, ivi compresi gli arredi, o anche il software per la gestione degli spazi. L'obiettivo in questo caso è fare in modo che lo spazio di lavoro sia un supporto utile per l'azienda, facilitando i processi di creazione del valore, di comunicazione, di socializzazione e di creazione e circolazione della conoscenza.

I servizi all'edificio comprendono:

1) i servizi tecnico-manutentivi, richiedono competenze tecniche e specialistiche per il loro espletamento. La manutenzione è definita dalle norme UNI come la “combinazione di tutte le azioni tecniche ed amministrative, incluse le azioni di supervisione, volte a mantenere o a riportare un’entità in uno stato in cui possa eseguire una funzione richiesta” (Norma UNI 9910;). Secondo le tipologie e modalità di intervento, si distinguono:

– manutenzione correttiva, volta a ripristinare la funzionalità di un’entità avariata;

– manutenzione preventiva, eseguita ad intervalli predeterminati al fine di ridurre la probabilità di guasto o la degradazione del funzionamento di un’entità;

2) il servizio energia, o servizio calore, riguarda la conduzione e manutenzione ordinaria e straordinaria degli impianti termici, entrambe finalizzate al contenimento dei consumi energetici ed alla salvaguardia ambientale.

I servizi alle persone comprendono:

1) i servizi di pulizia ed igiene ambientale, consistono nella pulizia dei locali e arredi, disinfestazione e derattizzazione, raccolta e smaltimento di rifiuti ordinari e speciali, fornitura di materiale igienico di consumo, servizi di pulizia straordinari o interventi straordinari di smaltimento rifiuti. Si tratta di attività programmate sulla base di frequenze e livelli di servizi prestabiliti, solitamente compensate a canone, o a richiesta, con corrispettivo a misura. La loro gestione è volta ad assicurare gli standard di comfort igienico-sanitario degli ambienti di lavoro, limitando nel contempo il progressivo deterioramento delle strutture;

2) i servizi di vigilanza e guardiania (Security), comprese le attività di reception e manutenzione dei sistemi di sicurezza, il cui obiettivo è garantire

a tutto il personale, interno ed esterno, ed ai beni esistenti nell'edificio, gli standard di sicurezza adeguati;

3) il fleet management, il servizio consiste nella gestione delle flotte auto, ed eventualmente della "forza lavoro autisti", con l'obiettivo di mantenere in perfetta efficienza e disponibilità il parco auto, attraverso la gestione della manutenzione, delle polizze assicurative, del rifornimento;

4) la gestione documentale, concerne l'efficiente gestione delle attività di riproduzione, distribuzione ed archiviazione dei documenti, tramite centri stampa, attrezzature e risorse umane dedicate, nonché la determinazione di giusti prezzi dei servizi.

I servizi allo spazio rispondono all'esigenza di fornire un'assistenza nell'organizzazione degli spazi aziendali ai fini del miglioramento delle condizioni e della produttività del lavoro. Comprendono:

1) la progettazione degli spazi e delle postazioni di lavoro, si estrinseca nella gestione ottimale di spazi e lay-out delle attrezzature delle postazioni di lavoro, nel pieno rispetto della normativa in tema di sicurezza, al fine di migliorare soddisfazione e produttività del lavoro;

2) i servizi di lavoro e facchinaggio, gestiscono con adeguate risorse tecnico-umane la movimentazione di beni in senso lato all'interno della realtà aziendale, con l'intento di contenere tempi, disagi ed interruzioni di lavoro.

Questa appena presentata risulta essere la classificazione maggiormente utilizzata in letteratura. In linea con tale classificazione, pur con qualche estensione, si presenta anche quella contenuta nell'appendice UNI 15221-1:2007 che distingue tra:

Tabella 6: I servizi del FM secondo la norma UNI 15221-1:2007

| | | |
|----------|-----------------------------|---|
| 1 | Servizi all'edificio | - Manutenzione ordinaria e straordinaria edile |
|----------|-----------------------------|---|

| | | |
|---|--|---|
| | - infrastruttura | <p>- Manutenzione ordinaria e straordinaria impianti</p> <p>- Conduzione e manutenzione Servizio energia (gestione calore e impianti di riscaldamento e raffrescamento)</p> <p>-Progettazione e costruzione Interventi di riqualificazione</p> |
| 2 | Servizi allo spazio e all'ambiente di lavoro | <p>-Posto di lavoro(arredi, macchinari, apparecchiature, segnaletica, decorazioni, ecc)</p> <p>-Pulizia e igiene ambientale(servizi igienici, pulizia interna,pulizia e manutenzione aree verdi e grigie, raccolta rifiuti ordinari e smaltimento rifiuti speciali, derattizzazione e disinfestazione, ecc.)</p> |
| 3 | Servizi alle persone | <p>-Salute e sicurezza (salute professionale, controllo accessi, reception o portierato fiduciario, vigilanza e sicurezza, protezione antincendio, ecc.)</p> <p>-Ospitalità (reception, ristorazione/mense aziendali, asilo aziendale, ecc.)</p> |
| 4 | Servizi all'organizzazione | <p>-Tecnologia dell'informazione e comunicazione (gestione rete dati e telefonica, server, personal computer, telefonia fissa e mobile, ecc.)</p> <p>-Logistica (gestione spazi, posta interna, gestione e archiviazione documenti, copiatura e stampa, trasporti, parcheggi, gestione auto, ecc.)</p> <p>-Altri servizi di supporto (contabilità, gestione risorse umane,gestione qualità, ecc.)</p> |
| 5 | Servizi di governo (cd. <i>Gestione Tecnica</i> <i>Consulenza Gestionale</i>) | <p>Servizi, coordinati ed integrati, che esulano dall'esecuzione in senso stretto degli interventi</p> <p>-Creazione e Gestione Anagrafica tecnica-patrimoniale (Gestione Documentale, attività tecniche relative a licenze, autorizzazioni, permessi, rapporti con Enti, messa a norma)</p> |

| | | |
|--|--|--|
| | | <p>-Rilievo e censimento (monitoraggio degli immobili)</p> <p>-Gestione Sistema informativo – informatico</p> <p>-Gestione richieste (“call center” o “Centrale operativa”) (ricezione richieste e coordinamento interventi manutentivi)</p> <p>-Gestione processo manutentivo(preventivazione e progettazione, e programmazione degli interventi manutentivi)</p> |
|--|--|--|

1.6. La struttura organizzativa del FM

Il Facility Management presuppone l’integrazione di una serie di attività e una struttura di gestione che, oltre a competenze economico-finanziarie, deve possedere cognizioni specifiche di tipo ingegneristico, architettonico, organizzativo e relazionale. Tale struttura di gestione è chiamata **Facility Department** con a capo il **Facility Manager**.

1.6.1 Facility Department

Per poter gestire in modo integrato servizi così eterogenei, combinando efficienza ed efficacia, cioè riduzione dei costi e qualità delle prestazioni, è necessario disporre di una centrale di governo del sistema di gestione integrato, a cui fan capo funzioni di monitoraggio e pianificazione, procedure operative, di reporting e meccanismi di controllo, oltre ad attività ricognitive specifiche. I servizi di governo riguardano, tra le altre, le seguenti prestazioni essenziali:

- progettazione e gestione della Centrale Operativa (Call Center) per la gestione delle richieste di intervento;
- progettazione e gestione del sistema informativo (CAFM: Computer Aided Facility Management);
- formazione e aggiornamento dell’anagrafe di ciò che bisogna gestire;
- monitoraggio, verifica ed analisi tecnica dello stato manutentivo;

- monitoraggio, verifica del soddisfacimento dei requisiti normativi di legge;
- supporto logistico, tecnico-amministrativo ed informatico per lo svolgimento dei singoli servizi;
- gestione dei contratti in corso

Le società che offrono servizi di Facility Management sono prevalentemente organizzazioni di grandi dimensioni, dotate di elevata competenza e professionalità, capacità di coordinamento organizzativo, forte orientamento all'innovazione tecnologica ed alla multidisciplinarietà, idoneità a garantire prestazioni integrate, affidabilità finanziaria e contrattuale.

L'offerta integrale prevede quattro aree di sviluppo dei servizi, gestite congiuntamente dal grande operatore:

- l'erogazione di consulenza organizzativa sull'utilizzazione delle risorse economiche e umane necessarie alla gestione degli immobili e dei servizi ad essi asserviti;
- la messa a disposizione degli strumenti necessari a gestire e controllare le attività affidate in outsourcing, quali verifiche in itinere e rendicontazioni;
- il coordinamento delle attività svolte dai diversi fornitori professionali e/o operativi;
- la fornitura di singoli servizi operativi, dalla manutenzione al catering, ecc..

Ai grandi operatori si affiancano, a completamento della piramide degli offerenti il Facility management, gli operatori settoriali, che dispongono di competenze organizzative e conoscenze specialistiche su alcuni servizi in particolare, gestibili in modo integrato; e gli operatori parziali, fornitori specializzati in determinati servizi, che non dispongono delle competenze di

gestione integrata, né di dimensioni e mezzi per svilupparle. Diversamente da chi eroga Total Facility Management, gli operatori settoriali e parziali di Facility management gestiscono solo alcune delle aree sovresposte, non tutte.

1.6.2 Facility Manager

La **responsabilità** del Facility Manager è assai ampia e comprende **l'area strategica, di analisi e controllo e gestionale-operativa** relativamente al patrimonio immobiliare strumentale, ai servizi tecnici, accessori, generali, ecc. Le prime due aree sono da considerarsi strategiche per l'azienda e costituiscono l'attività predominante del Facility Manager, alle quali dedica, o dovrebbe dedicare, la maggior parte del proprio tempo e delle proprie energie.

Questa figura professionale si caratterizza per un **elevato livello di managerialità**; il Facility Manager ha infatti necessità di conoscere a fondo le **strategie aziendali** per poter progettare servizi e spazi di lavoro utili ad agevolare il cambiamento e contribuire al raggiungimento degli obiettivi aziendali.

Entrando più nel dettaglio il Facility Manager durante la propria giornata lavorativa svolge compiti diversi ma al tempo stesso integrati tra loro:

- **Attività relazionale e decisionale**, che concretamente si realizza mediante riunioni con il Top Management e/o con i Manager delle diverse Business Unit, con l'obiettivo di definire le strategie e le politiche di gestione delle facility e di individuare le necessità di servizio;
- **Gestione economico finanziaria** ovvero previsioni di spesa, stesura budget, benchmarking, analisi degli scostamenti budget-consuntivo, definizione modalità di ripartizione costi, ecc.

- **Controllo** ovvero analisi dei risultati della gestione (attraverso la reportistica fornita dai fornitori di servizio), visite ispettive allo scopo di monitorare la qualità dei servizi, riunioni con i fornitori, ecc.

È inoltre responsabile della **progettazione dei servizi** (stesura procedure operative, definizione strategie e piani di manutenzione, ecc) e della **gestione operativa** (ricezione richieste dal Cliente Interno, contatto con i fornitori, ecc.). Queste attività sono **svolte direttamente dalla struttura del Facility Department** (che può essere interna, esterna o mista come vedremo nelle sezioni successive). Il Facility Manager deve inoltre avere le competenze di un **Project Manager** dato che riveste questo ruolo quando sono in atto progetti di cambiamento organizzativo che comportano la realizzazione di nuovi spazi di lavoro, il trasferimento della sede aziendale, nuove costruzioni e/o ristrutturazioni, progettazione e design di interni, ecc. In definitiva, il Facility Manager deve non solo saper maneggiare numeri e bilanci, e gestire risorse, ma anche essere in grado di **interpretare le strategie dell'azienda**, coglierne le esigenze presenti e future e utilizzare i migliori strumenti e la metodologia più adatta di controllo. Deve inoltre saper **utilizzare gli strumenti più idonei a influenzare le scelte** dell'azienda e a veicolare il cambiamento; deve quindi riuscire ad intervenire nel contesto dello sviluppo del business con una notevole capacità di coinvolgimento e integrazione di persone, risorse e strutture

1.7. Modelli organizzativi per la gestione integrata dei servizi no-core

Nell'ambito dei servizi no-core, la definizione del modello organizzativo da adottare per l'impresa cliente, può essere molto differente a seconda della complessità di esecuzione dei servizi e della volontà da parte dell'impresa stessa di gestirli con proprie risorse.

Come già detto prima, in passato generalmente, le organizzazioni svolgevano con risorse interne i servizi no-core; nell'ultimo decennio invece, è emersa la tendenza ad esternalizzarli con l'obiettivo di focalizzarsi sui processi a maggior valore aggiunto.

Allo scopo di valutare le caratteristiche, le opportunità e i limiti delle differenti configurazioni, risulta utile sintetizzare i modelli organizzativi attraverso una classificazione [15], alla base della quale, vi sono due macro-variabili fondamentali:

- il *soggetto erogatore del servizio*; le facilities aziendali possono essere gestite dalle seguenti tipologie di soggetti:
 - *operatori della singola business unit*: per esempio quando gli operai di un reparto dedicano parte del proprio turno di lavoro alla pulizia o alla manutenzione delle macchine;
 - *business unit dedicata all'interno dell'azienda*: unità dedicata all'erogazione di uno o più servizi no-core, quali per esempio, la pulizia, la manutenzione edile, degli impianti ecc.;
 - *impresa di servizi no-core parziali in outsourcing integrato*: società specializzate nell'erogazione dei servizi no-core; in questo caso si è in presenza di fornitori diversificati ed operatori parziali e di settore. Questo soggetto può assumere forme diverse: impresa, consorzio di cooperative, associazione temporanea d'impresa ecc.
 - *impresa di servizi no-core totali in outsourcing integrato*: in questo caso, il fornitore di servizi si assume la responsabilità di erogazione di tutte le prestazioni richieste.

- il *ruolo organizzativo del facility manager* (risorsa che si occupa del coordinamento, integrazione e gestione dei servizi no-core di un'organizzazione, esso può essere in carico all'organizzazione cliente, advisor di una società di consulenza o dipendente del fornitore di servizi no-core).

- *assente*: non esiste alcun soggetto che ha la responsabilità di coordinare l'erogazione dei servizi no-core;
- *manager in organico all'organizzazione del cliente*: il facility manager è un dipendente del cliente;
- *consulente per l'organizzazione cliente*: il facility manager è un individuo autonomo rispetto al cliente, legato da un contratto di carattere temporaneo allo scopo di organizzare di coordinare l'erogazione dei servizi no-core.
- *manager in organico all'organizzazione dell'assuntore*: il facility manager è sostanzialmente un soggetto alle dipendenze dell'azienda di facility management ed è quindi completamente autonomo rispetto al cliente.

Le due variabili permettono la costruzione di una struttura di classificazione nella quale sono presenti 16 differenti modelli organizzativi dei quali, però, solo 11 sono attualmente implementati nella gestione delle attività no-core.

Ritornando alla descrizione dei modelli, l'erogatore dei servizi, quindi, può essere interno o esterno all'impresa.

Nel primo caso, sono impiegate risorse dell'azienda, in particolare nelle grandi organizzazioni, è possibile identificare un'intera funzione aziendale di Facility Management.

Questa funzione è generalmente amministrata dal facility manager che ha il compito di amministrare e coordinare l'esecuzione dei lavori.

Per questo tipo di soluzione è possibile individuare due strategie che potranno essere attuate con diversi modelli che analizzeremo in seguito. Le strategie ed i rispettivi modelli risultano essere:

- **Strategia in-house management:**
 - Modello I;
 - Modello II;
 - Modello III;
- **Strategia management by agent.**

- Modello IV.

Nel secondo caso invece, l'azienda cliente si rivolge a fornitori in grado di svolgere in modo efficiente i servizi no-core. Tali organizzazioni passano quindi, da una scelta di integrazione verticale ad una caratterizzata dall'approvvigionamento da fonti esterne (outsourcing) di servizi no-core.

L'outsourcing può riguardare alcuni o tutti i servizi no-core e può coinvolgere uno o più fornitori. In tal caso, è possibile individuare tre strategie in cui è possibile instaurare tutte le tipologie di relazione tra cliente e fornitore:

- **Strategiadirect outsourcing:**
 - Modello V;
 - Modello VI
- **Strategiamanagement by contractor:**
 - Modello VII;
 - Modello VIII.
- **Strategia(integrated) facility management:**
 - Modello IX;
 - Modello X;
 - Modello XI.

1.7.1 La strategia "in-house management"

La strategia in questione, si verifica quando le business unit provvedono a soddisfare al proprio interno i servizi no-core e non è previsto alcun facility manager oppure quest'ultimo risulta essere un dipendente dell'organizzazione.

Si possono individuare tre diversi modelli come rappresentato in Figura 7.

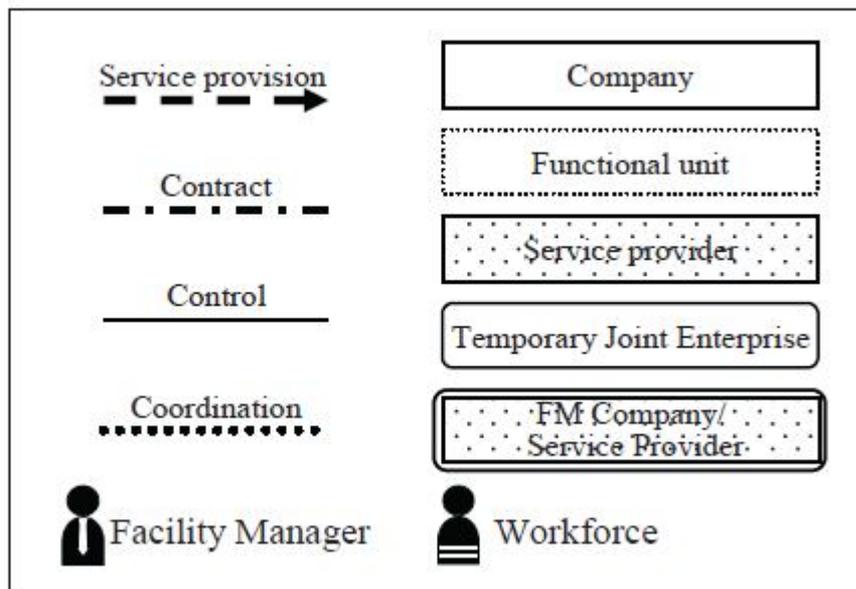


Figura 6: Simboli nelle figure

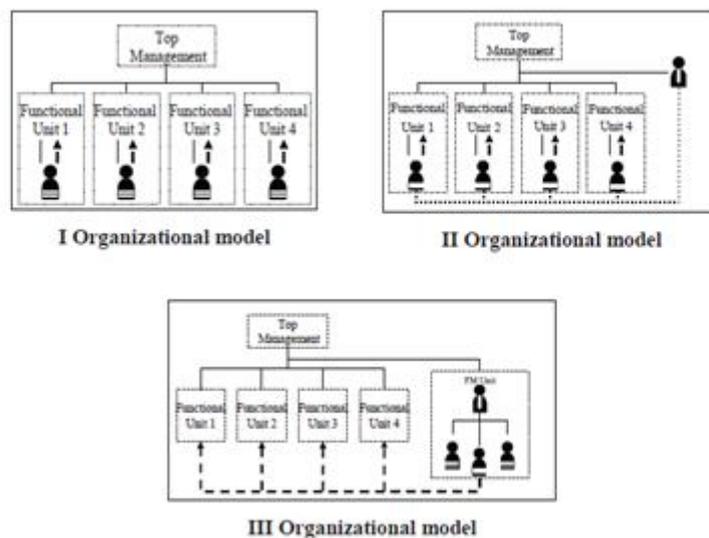


Figura 7: Modelli organizzativi per la strategia “in-house management”

Modello 1. Il primo modello, viene impiegato nel caso in cui la natura dei servizi no-core è scarsamente specializzata e la frequenza di intervento è bassa. Al crescere della frequenza, della complessità, della specializzazione delle attività o della necessità di impiegare particolari strumentazioni, questo modello organizzativo presenta alcuni limiti derivanti dall’assenza di coordinamento dei servizi.

Modello 2. Il secondo modello è impiegato nel caso in cui, il cliente è dotato di personale proprio per l'erogazione dei servizi no-core; per questo motivo risulta opportuno introdurre una figura di coordinamento (facility manager) interna all'organizzazione, per esempio un dirigente o un quadro.

Modello 3. Il terzo modello è applicato nel caso in cui cresce l'importanza dei servizi no-core per il cliente, può risultare quindi opportuno costituire una business unit interna all'azienda, dedicata all'erogazione di tali attività.

Nella pratica, tale business unit è diretta dal facility manager che come per il secondo modello organizzativo sopra descritto, gode dell'autorità di gestire e coordinare tale unità.

Anche in questo caso, con riferimento alla struttura organizzativa, è opportuno prevedere che il facility manager risponda direttamente al top management così da poter esercitare una certa autorità nei confronti delle singole business unit.

Quindi, il modello II e III mira ad organizzare e migliorare il coordinamento delle risorse aumentando l'efficacia e l'efficienza delle attività di facility; infatti l'autorità sulle business unit, derivante dalla natura gerarchica della struttura organizzativa, fornisce al facility manager la possibilità di risolvere potenziali controversie tra le stesse.

1.7.2 La strategia “management by agent”

La seconda strategia, viene introdotta nel caso in cui l'organizzazione non possieda le capacità e le competenze per gestire e coordinare in modo autonomo, efficace ed efficiente i servizi no-core. Per questo, a volte, è necessario incaricare un consulente esterno che svolga le attività di facility manager.

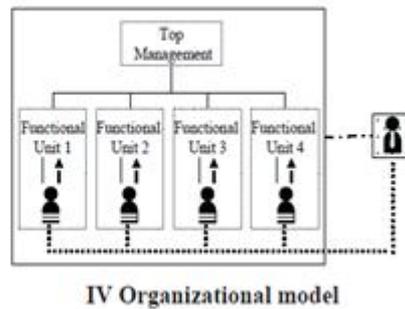


Figura 8: Modelli organizzativi per la strategia "management by agent"

Modello 4. Nel quarto modello organizzativo, associato appunto alla strategia in questione, l'organizzazione affida ad un consulente esterno, attraverso un contratto di medio o lungo periodo, l'incarico di coordinare l'erogazione dei servizi no-core all'interno delle singole business unit. Tale strategia (e modello associato) è caratterizzata dalla presenza di una figura, denominata "**managing agent**", che funge da consulente per il cliente, supportandolo nel gestire e nel monitorare le unità di erogazione dei servizi di proprietà del cliente stesso.

Anche questo approccio è caratterizzato dallo svolgimento dei servizi no-core da parte di personale interno all'azienda. Rispetto al secondo modello, presenta il vantaggio di potenziare la qualità dei servizi, ma comporta maggiori costi dovuti alla presenza di un consulente esterno.

Pertanto, la differenza sostanziale tra il secondo ed il quarto modello, consiste nella natura della relazione tra l'organizzazione e il facility manager.

Il management by agent fornisce quindi un giudizio neutrale e competente sull'operato delle unità interne, valutando anche l'eventuale vantaggio nell'esternalizzare alcune attività.

Di conseguenza, l'organizzazione cliente ha la flessibilità di scegliere se incaricare le proprie unità interne o acquistare dall'esterno servizi occorrenti.

Il successo di questa soluzione dipende dalle competenze e dall'autorevolezza del consulente esterno. Il rischio per il cliente che utilizza questa strategia, deriva dalla potenziale perdita delle competenze organizzative in materia di gestione dei servizi no-core, pur conservando le risorse in termini operativi all'interno delle singole business unit.

1.7.3 La strategia “direct outsourcing”

Al crescere della specializzazione e della complessità dei servizi no-core, il cliente può decidere di rivolgersi a fornitori in *outsourcing non integrato* definiti operatori parziali il cui contributo è solamente operativo.

L'outsourcing dei servizi no-core consente, da un lato, la riduzione delle risorse interne all'azienda e un aumento della flessibilità organizzativa interna e dall'altro, un controllo maggiore sui costi di ogni singolo servizio.

A seguire, vengono richiamati i due modelli subordinati a tale strategia.

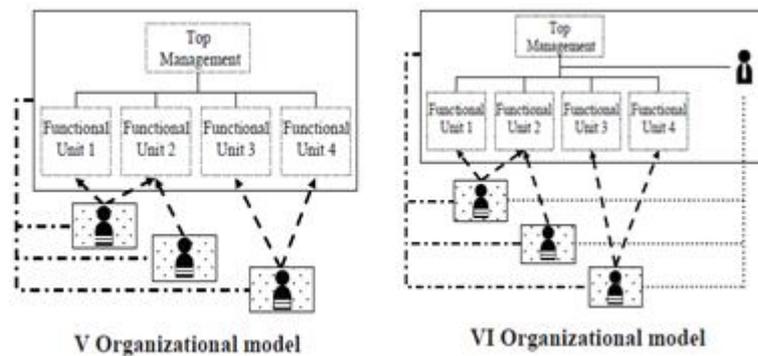


Figura 9: Modelli organizzativi per la strategia “direct outsourcing”

Modello 5. In questo quinto modello, caratterizzato dall'assenza di un facility manager, l'azienda fa ricorso a diversi fornitori specifici per ogni singolo servizio o famiglie di servizi no-core. Tali fornitori altamente diversificati offrono quindi solamente una tipologia di servizi ad una o più business unit del cliente.

Lo svantaggio di questo modello deriva dall'elevato numero di fornitori che sfocia nella necessità di un loro coordinamento.

Modello 6. In questo modello, in analogia con la strategia in-house management, il cliente può dotarsi di un facility manager interno con il compito di guidare il processo di coordinamento dei fornitori esterni e di ottimizzazione della gestione.

La presenza del facility manager agevola la comunicazione con gli erogatori dei servizi dal momento che questi interagiscono con un interfaccia unica.

1.7.4 La strategia “management by contractor”

In tal caso, l'azienda fa ricorso a fornitori integrati, nella maggior parte dei casi operatori di settore che hanno una profonda conoscenza del business aziendale e un gran numero di risorse. Tali fornitori possono essere imprese, consorzi di società o Associazioni Temporanee d'Impresa.

Comune a questi modelli è la stipula di contratti tra il cliente e il facility manager scelto per la gestione e il coordinamento dei servizi. A sua volta, il facility manager, stipula diversi contratti con differenti sub-contraenti.

Questi ultimi non necessitano di un contratto diretto con il cliente che, viceversa, si interfaccia con un unico interlocutore: il facility manager.

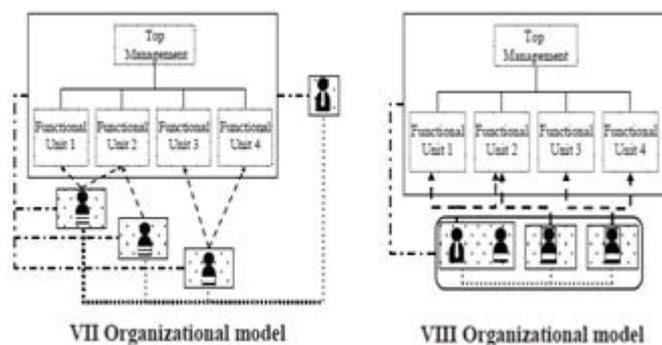


Figura 10: Modelli organizzativi per la strategia “management by contractor”

Modello 7. In analogia a quanto descritto con il terzo modello, il coordinamento degli erogatori dei servizi, nel modello in analisi, può essere invece affidato ad un consulente esterno.

Modello 8. Nel caso in cui si verifica altresì, che il facility manager è in organico all'organizzazione dell'assuntore, si parla di un altro tipo di modello ancora, l'ottavo di questa successione.

Proprio quest'ultimo modello organizzativo è spesso utilizzato da aziende fornitrici di servizi di Facility Management come per esempio in Italia, il Consorzio Nazionale dei Servizi (CNS).

Si conclude la trattazione relativa ai modelli organizzativi per la strategia "management by contractor", dicendo che, i modelli 7 e 8, sono accomunati dal fatto che il cliente, ha la facoltà di scegliere se ricorrere a fornitori di servizi no-core o a un facility manager proveniente dall'esterno. Generalmente comunque, per questa strategia, il facility manager ha autonomia nel selezionare e gestire i fornitori dei singoli servizi no-core, ovvero i sub-contraenti a cui ricorrere, sollevando da questo onere il cliente che può così concentrare le risorse sul proprio core business

1.7.5 La strategia "(integrated) facility management"

In questo caso, l'azienda, fa ricorso a fornitori integrati quali grandi operatori di Facility Management che forniscono al cliente una gamma estremamente ampia di servizi coordinati e integrati.

In questo caso si possono individuare tre modelli.

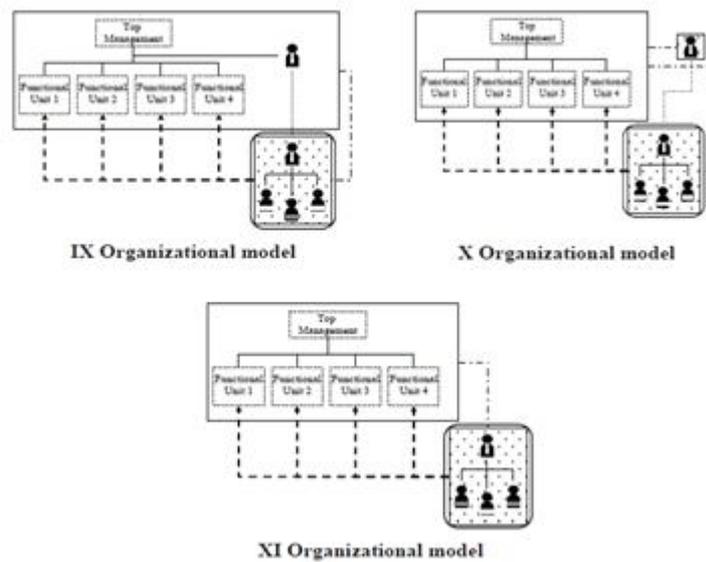


Figura 11: Modelli organizzativi per la strategia “integrated facility management”

Modello 9. Il nono modello prevede un facility manager interno al cliente che costituisce l’interfaccia con il facility manager dell’azienda fornitrice. Questa duplicazione di ruoli di facility manager, se da un lato genera maggiori costi, dall’altro consente al cliente di mantenere parte delle competenze e delle conoscenze sui servizi no-core esternalizzati. Questo aspetto diventa particolarmente interessante per il cliente nel momento in cui si trova nella necessità di rinegoziare i contratti di fornitura dei servizi a intervalli regolari. Infatti, nell’ipotesi che il cliente si rivolga esclusivamente a fornitori esterni di servizi no-core, sia per gli aspetti operativi che per quelli di definizione, coordinamento e gestione degli stessi, si genera un problema particolarmente critico (nel medio-lungo periodo), in cui il cliente, rischia di perdere la capacità di stimare i costi effettivi, i tempi di intervento e gli standard qualitativi dei servizi di Facility Management.

Modello 10. Questo modello prevede un facility manager esterno, autonomo rispetto al cliente e all’azienda fornitrice dei servizi no-core.

Modello 11. Quest’ultimo modello delega completamente la gestione e il coordinamento dei servizi no-core dell’azienda fornitrice e presenta costi di

transazione inferiori rispetto agli altri modelli presentati. Infatti, l'assenza di sub-contrattenti riduce il numero di livelli e il network dell'impresa di facility management, con conseguente snellimento gestionale.

Tuttavia si sottolinea, come l'assenza di figure professionali per la gestione dei servizi no-core controllate dal cliente, espongono il cliente a rischi illustrati precedentemente per le strategie di management by contractor.

Dopo aver passato in rassegna i modelli organizzativi per la gestione delle attività no-core concludiamo la trattazione con l'individuazione delle variabili che dovrebbero indirizzare le aziende nella scelta di un modello piuttosto che di un altro. Come si nota in figura, le variabili da prendere in considerazione sono:

- Focalizzazione sui processi core;
- Complessità dei servizi no-core;
- Know-how aziendale dei processi no-core;
- Autonomia dell'azienda nella gestione dei processi no core;

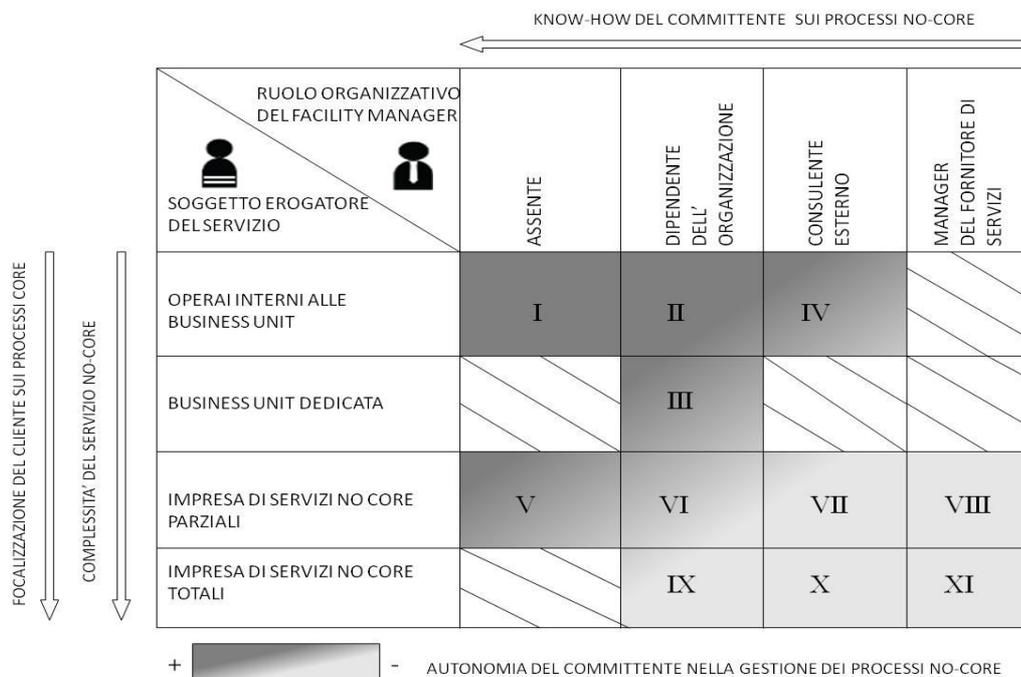


Figura 12: Modelli organizzativi per la gestione delle attività no-core e variabili decisionali

1.8. Il FM in modalità outsourcing

1.8.1 Gli steps del FM nella modalità “outsourcing”

Il processo di outsourcing integrata delle attività no-core può essere suddiviso in tre grandi macrofasi :

- I. Macrofase pre-gara;
- II. Macrofase di gara;
- III. Macrofase post-gara;

La **prima macrofase** ha inizio quando, da parte di un'azienda (committente), nasce l'esigenza di esternalizzare in maniera integrata la gestione di parte o tutte le attività no-core a cui fa seguito uno studio di fattibilità per valutare se tale decisione sia la migliore sia in termini economici che prestazionali- la classica scelta del “*make or buy*”[47]. Verificata la convenienza di tale scelta si giunge alla **seconda macrofase** durante la quale il committente procede con la redazione della richiesta di offerta comprendente: stesura del capitolato tecnico e d'oneri, stesura del bando di gara.

Nel Capitolato d'oneri vi sono informazioni circa: l'oggetto dell'appalto, standard di servizio richiesti, modalità di esecuzione, struttura organizzativa, penali, garanzie, cauzioni e assicurazioni, tutela della sicurezza, rapporti tra assuntore e committente, corrispettivi e pagamenti, chiusura del contratto e controversie.

Il Capitolato tecnico è il documento che stabilisce i requisiti minimi, i vincoli e le specifiche della fornitura e ne descrive le modalità di realizzazione. Infine attraverso la stesura del bando di gara il committente comunica la sua decisione di reperire contraenti cui affidare servizi, lavori o forniture.

A seguito della pubblicazione del bando di gara le imprese interessate (Fornitori) compileranno:

- un'offerta tecnica, con la quale spiegheranno come intenderanno eseguire il lavoro per l'azienda che richiede la prestazione ovvero il piano di lavoro, le fasi, le risorse impiegate nel progetto
- un'offerta economica nella quale definiranno i costi per l'erogazione del servizio.

Infine il committente passerà in esame tutte le proposte pervenute e valuterà la più conveniente sulla base di elementi definiti in fase di richiesta di offerta. Individuata l'impresa vincitrice (che viene denominata assuntore) si passa alla **terza ed ultima fase** che prevede la firma del contratto da parte del committente e dell'assuntore e l'erogazione del servizio per il tempo pattuito. Alla chiusura del contratto il committente potrà decidere se:

- Rinnovare il contratto;
- Avviare la ricerca per un nuovo contratto;
- Gestire in-house le attività che prima erano esternalizzate.

Quanto appena descritto è schematizzabile attraverso quello che possiamo definire ciclo di vita dell'outsourcing del Facility Management. All' interno del ciclo vita per ciascuna delle attività presenti nelle macrofasi è stato indicato il soggetto esecutore. Con la lettera [C] si indica il committente che ha richiesto il servizio invece con la lettera [F] il fornitore erogatore del servizio.

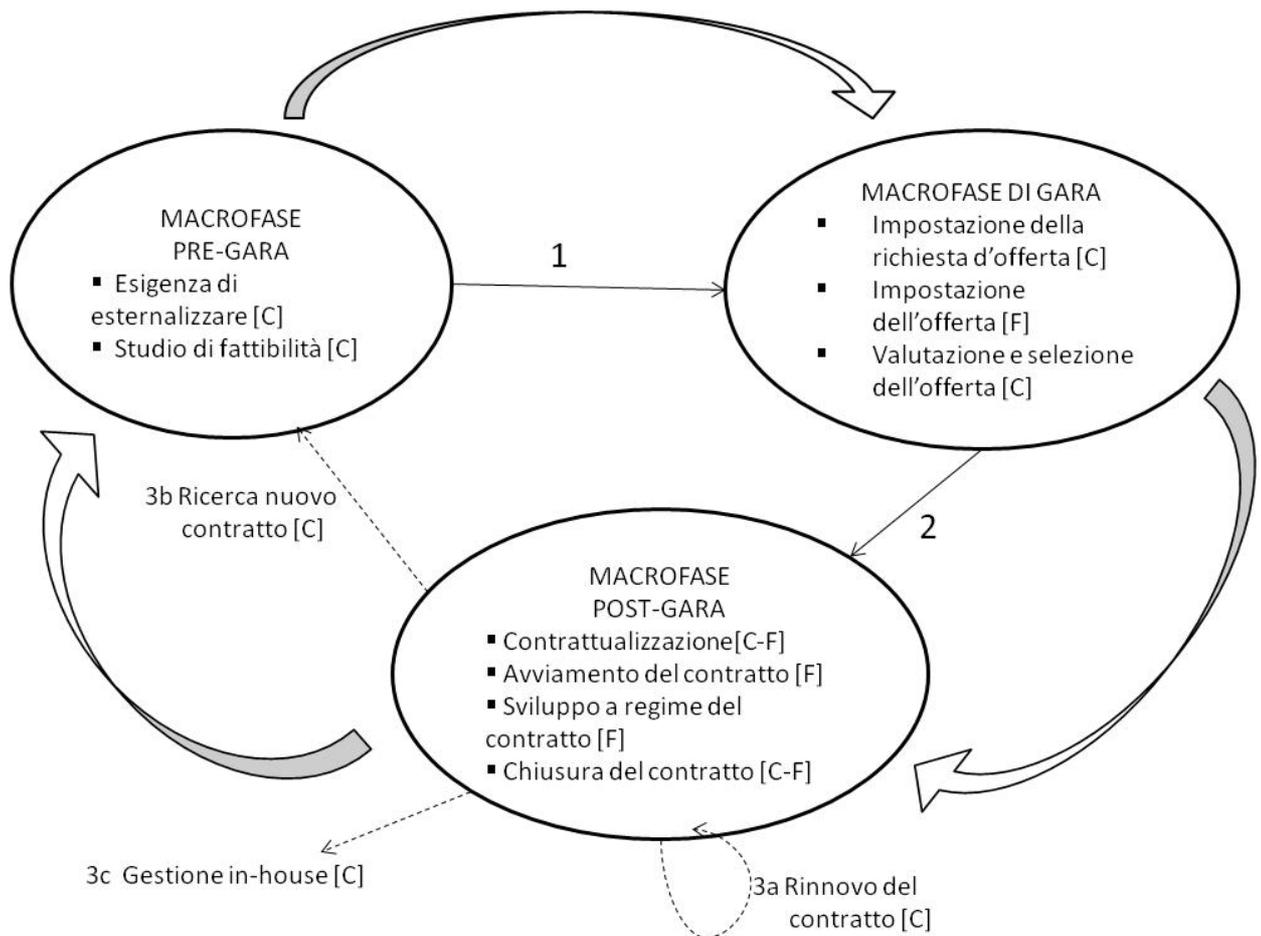


Figura 13: Life cycle of FM outsourcing

1.8.2 Modelli di gara per avviare l'outsourcing

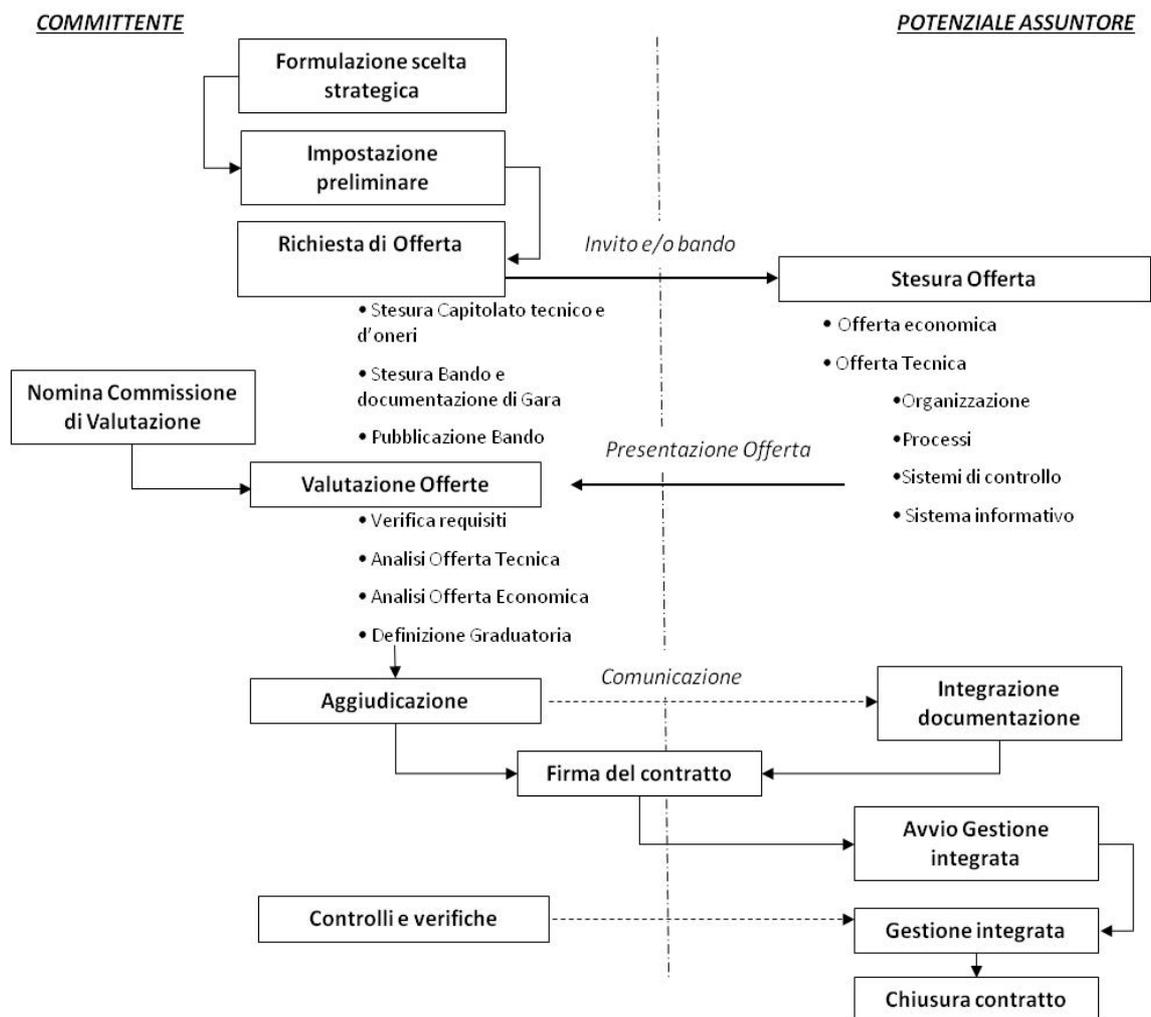
Il processo di esternalizzazione sopra descritto può essere implementato attraverso tre diversi modelli :

- Modello 'a gara';
- Modello 'a offerta diretta';
- Modello 'a convenzione'.

I primi due modelli vengono utilizzati principalmente da aziende operanti nel settore privato. Entrambi seguono la struttura generale di Figura 13 ed entrambi sono gestiti da due attori: il committente e l'assuntore/gestore. La differenza tra i modelli risiede nel fatto che mentre nel modello 'a gara' qualsiasi impresa può presentare l'offerta tecnica ed economica, nel modello

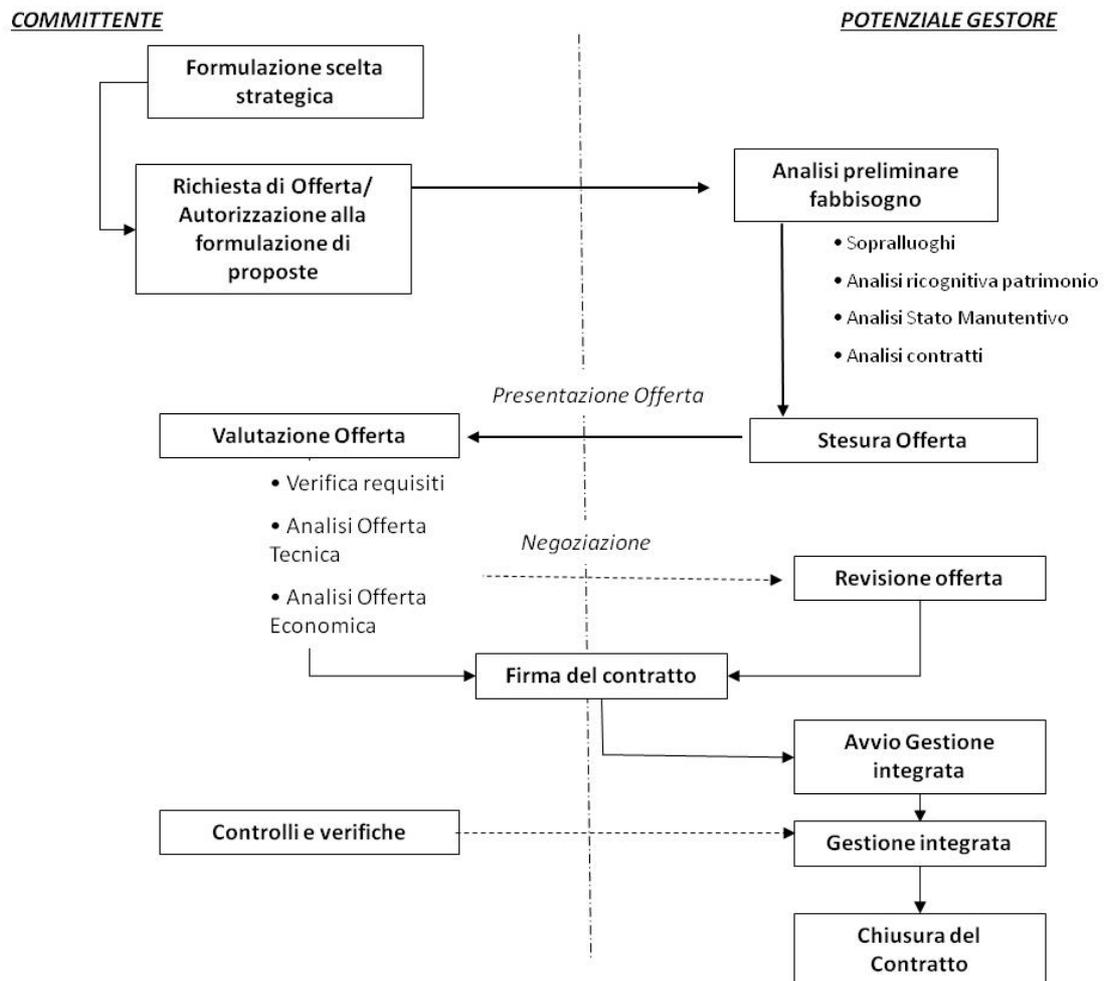
‘a offerta diretta’ tale presentazione può essere effettuata solamente da impresa che hanno avuto l’autorizzazione da parte dell’azienda.

Viene di seguito riportata una schematizzazione dei due modelli analizzati attraverso l’ausilio del diagramma di flusso.



FONTE:[42]

Figura 14:Il processo di outsourcing nel FM: il modello “a gara”



FONTE:[42]

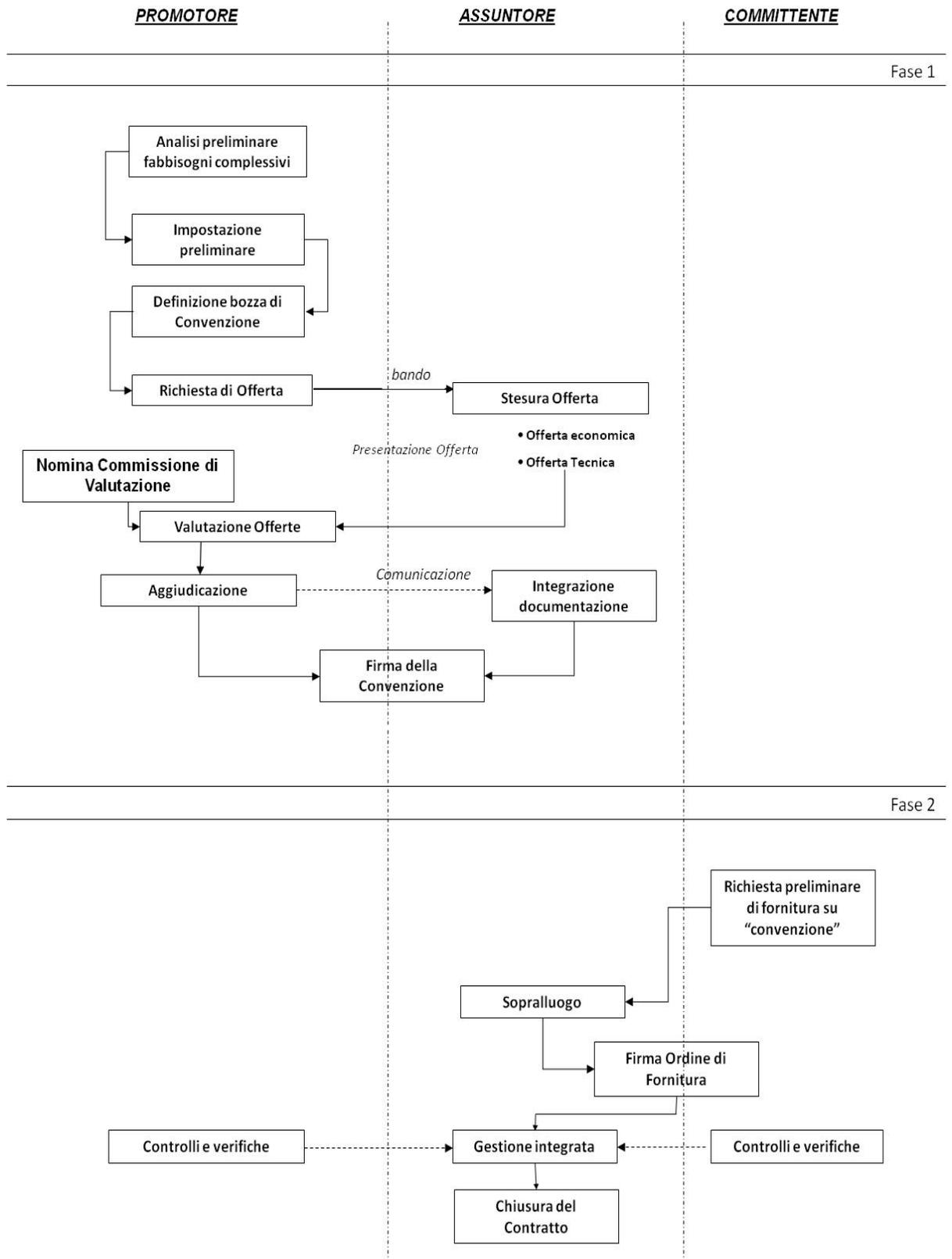
Figura 15: Il processo di outsourcing nel FM: il modello “a offerta diretta”

Relativamente al terzo modello, quello ‘a convenzione’, esso viene utilizzato principalmente nelle aziende operanti nel settore pubblico. Segue anch’esso la struttura generale di Figura 13 ma scomposta in due fasi e con la presenza di un terzo interlocutore che non è apparso nei primi due modelli e cioè quello del Promotore.

Nella prima fase il Promotore redige la richiesta di offerta, valuta le offerte tecniche ed economiche ed infine segnala il vincitore (Assuntore). Il Promotore stipula quindi una *convenzione* con l’Assuntore. Nella seconda fase, invece, il Committente richiede la fornitura del servizio all’Assuntore individuato dal Promotore, quindi si attiva la convenzione e ha inizio l’erogazione del servizio. Ad esempio, nel caso in cui Pubbliche

Amministrazioni (PA) necessitano di alcuni servizi, attivano delle convenzioni stipulate dalla Consip, una società per azioni del Ministero dell' Economia e delle Finanze (unico azionista) che lavora al servizio esclusivo delle PA. Le convenzioni sono accordi-quadro, sulla base dei quali le imprese fornitrici – aggiudicatrici di gare indette da Consip su singole categorie merceologiche – s'impegnano ad accettare (alle condizioni e ai prezzi stabiliti in gara e in base agli standard di qualità previsti nei capitolati) ordinativi di fornitura da parte delle Pubbliche Amministrazioni, fino al limite massimo previsto (il cosiddetto massimale). Le convenzioni attivate da Consip riguardano una spesa standard, cioè l'acquisto di quei beni e servizi che vengono largamente utilizzati da tutte le amministrazioni (computer, stampanti, gasolio per il riscaldamento degli edifici, buoni pasto, telefonia mobile e fissa ecc.). Il vantaggio di tale modello è che acquistando attraverso la convenzione Consip, tutte le amministrazioni possono evitare di sostenere i costi di una gara d'appalto e possono ottenere notevoli risparmi di processo oltre che sul prezzo dei beni. Infatti, aggregando la domanda delle amministrazioni, Consip riesce ad abbattere i costi unitari d'acquisto (in media il 15-20% in meno, secondo rilevazioni dell'Istat), mantenendo al contempo standard qualitativi elevati nelle forniture.

Viene di seguito riportata una schematizzazione del modello 'a convenzione' attraverso l'ausilio del diagramma di flusso.



FONTE:[42]

Figura 16:Il processo di outsourcing nel FM: il modello "a convenzione"

1.8.3 Il mercato dei fornitori in Italia

Dopo aver messo in luce le possibili strategie da mettere in atto per la gestione delle attività no-core è opportuno completare il quadro con uno sguardo alla composizione del mercato del Facility Management nel nostro Paese nell'ottica di gestione in outsourcing.

A questo proposito, è utile adottare la classificazione operata dall' IFMA (International Facility Management Association) Italia³[46], che divide gli operatori presenti sul mercato in tre macro-categorie:

- Fornitori mono e multi servizio;
- Gestori di servizi specifici;
- Società di Facility Management;

che portano alla nascita di quella che è nota essere la “Piramide del Facility Management”

³L' IFMA Italia è il capitolo italiano dell'International Facility Management Association, associazione no-profit fondata nel 1980 negli Stati Uniti allo scopo di promuovere e sviluppare il Facility Management

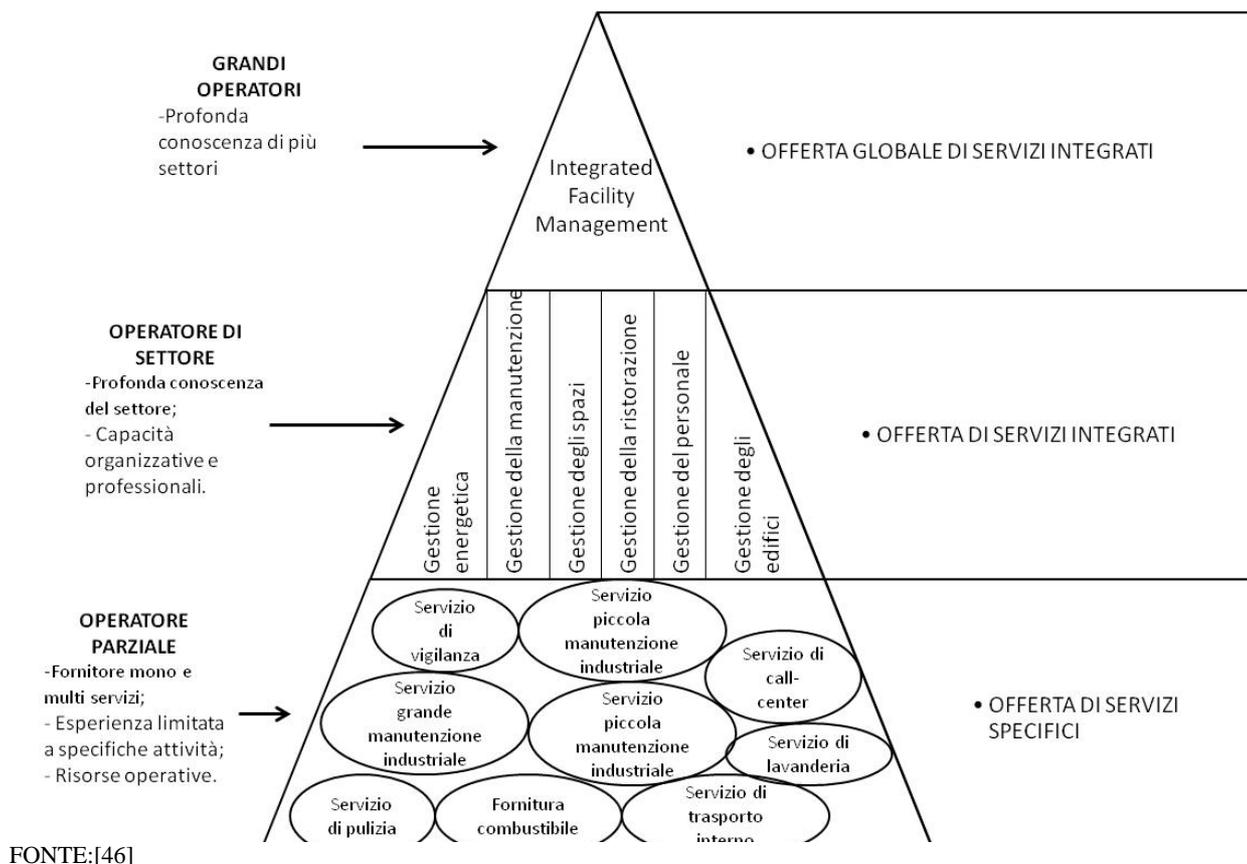


Figura 17: La Piramide del Facility Management

- Fornitori mono e multi servizio (Operatori Parziali)

I fornitori mono e multi servizio sono certamente la categoria più diffusa nel nostro panorama economico: hanno maturato nel tempo una competenza nell'erogazione del servizio, del quale forniscono esclusivamente la parte operativa, sviluppando con il cliente un rapporto basato sulla singola prestazione. Queste realtà hanno la loro specificità sia nell'erogazione di servizi ad alto contenuto di manodopera (ad esempio le pulizie) sia in quelli legati ad un elevato contenuto tecnologico (ad esempio le manutenzioni degli impianti tecnologici). La maggior parte di questo genere di fornitori operano a livello locale per aziende di piccole dimensioni, mentre altri sono diventati interlocutori privilegiati di operatori più grandi, ritagliandosi così il ruolo di sub-fornitori in una filiera più articolata e complessa. Molti fornitori mono servizio, negli anni, hanno subito o promosso processi di fusione e

acquisizione, allo scopo di aumentare le dimensioni e il peso economico della propria organizzazione, così da competere sul mercato con i maggiori player presenti.

- **Gestori di servizi specifici (Operatori di settore)**

I gestori di servizi specifici possono essere definiti come specialisti nella gestione di un determinato servizio. La loro offerta è caratterizzata da una forte integrazione verticale: essi sono in grado di rispondere globalmente alle esigenze del cliente dallo sviluppo del servizio, passando per l'erogazione, fino alla fase di controllo. Si caratterizzano per essere aziende fortemente competitive in una determinata attività, per la quale hanno maturato solide abilità gestionali, tecnologiche e operative, e sono in grado di garantire al cliente un servizio completo. Queste aziende hanno il loro punto di forza nella capacità non solo di erogare il servizio, ma di gestirlo in toto, sfruttando sinergie interne e risorse qualificate. Questa categoria di fornitori può essere identificata direttamente dagli specifici servizi erogati: progettazione e gestione della manutenzione, gestione documentale, gestione flotte auto, gestione viaggi aziendali ecc.

- **Società di facility management (Grandi Operatori)**

Le società di facility management sono soggetti economici in grado di porsi sul mercato come gestori di più servizi e di instaurare con il cliente una vera e propria partnership, orientata alla garanzia sul risultato e alla piena condivisione degli obiettivi. La loro nota caratteristica è quella di saper rispondere efficacemente alle esigenze del cliente. Sono aziende snelle e dinamiche che, attraverso la competenza e la professionalità delle proprie risorse, offrono al cliente managerialità, occupandosi in prima persona dell'acquisto, dell'erogazione e del controllo del servizio. Questi soggetti hanno come interlocutori d'elezione le aziende di medie e grandi dimensioni, possiedono un'elevata capacità di spesa e sono dotate delle più evolute tecnologie per la gestione delle informazioni. Quest'ultima caratteristica, in

particolare, è utile per fornire al facility manager dell'azienda cliente le necessarie garanzie di trasparenza, soprattutto per quanto concerne gli eventuali contratti di sub-fornitura. Il fornitore è perciò in grado di effettuare la contabilità di tutte le attività e degli interventi, fornire un sistema automatizzato di raccolta delle informazioni e dotarsi, ove richiesto, anche di un call center che funzioni da interfaccia tra utente finale e fornitore, così da fornire una prima risposta per i problemi che insorgono quotidianamente e rilevare puntualmente la soddisfazione del cliente (customer satisfaction). Le principali società di facility management che operano in Italia hanno provenienze diverse, ovvero:

- Imprese che, sfruttando la loro posizione e competenza tecnica, hanno ampliato la gamma di servizi offerti e acquisito managerialità;
- Imprese che nascono come spin-off di grandi gruppi industriali e fanno della gestione integrata dei servizi il loro business principale dopo aver operato un passaggio dal mercato captive a quello libero;
- Filiali di multinazionali estere che, sfruttando il know-how acquisito colgono, anche attraverso acquisizioni, le possibilità offerte dal mercato italiano.

Affinché un operatore possa essere qualificato come società di facility management deve possedere le seguenti caratteristiche:

- Capacità di management, ovvero l'operatore deve possedere abilità manageriale comprovata dalla composizione del personale dipendente (dirigenti, tecnici e impiegati) e dalla presenza di personale di gestione presso i propri clienti (site manager, building coordinator, responsabile workplace ecc.).
- Offerta di servizi, ovvero non tanto la capacità di erogare il servizio con personale proprio, quanto il possesso del know-how necessario per la

progettazione, la gestione e il controllo di tutti i servizi appartenenti alle tre macroaree di applicazione della disciplina.

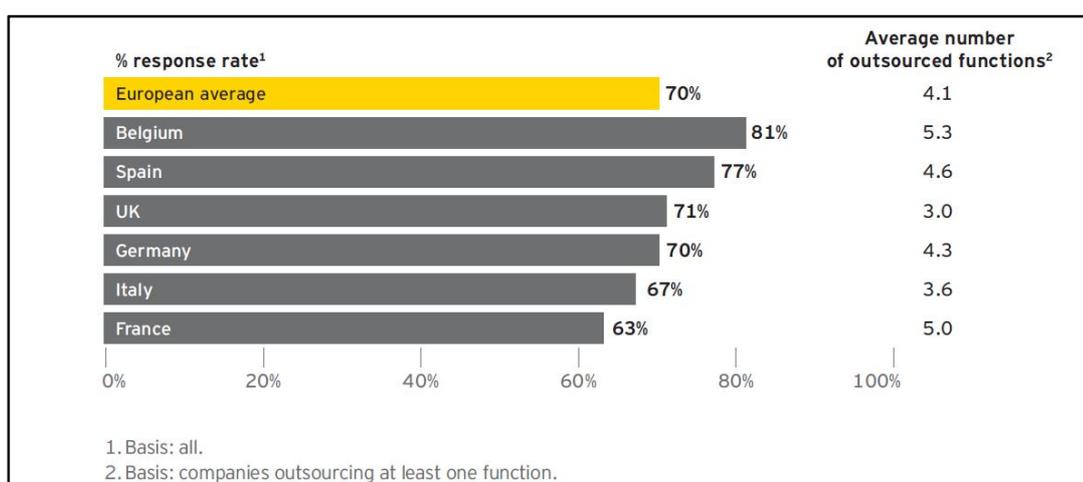
- Presidio contrattuale, ovvero l'operatore deve essere in grado di onorare contratti che contemplino lo stabilirsi di un rapporto di partnership e con i quali si impegna a raggiungere i risultati concordati. Il contratto deve includere e specificare:
 - livelli di qualità del servizio (service level agreement – SLA);
 - indicatori di performance (key performance indicator – KPI);
 - bonus e/o penali in funzione dei risultati raggiunti;m
 - trasparenza nella gestione (open book approach);
 - clausola di partnership.
- Gestione delle informazioni, ovvero l'operatore deve saper gestire le informazioni e integrarle con quelle a disposizione del cliente: un flusso costante di informazioni è un requisito fondamentale per la corretta esecuzione dei servizi; è importante fornire ai clienti interni il più rapido e ampio accesso ai dati relativi ai servizi, in modo che possano valutarne i livelli quantitativi e qualitativi: queste valutazioni saranno poi la base per definire, assieme al cliente, le politiche e le strategie di gestione.
- Monitoraggio e controllo, ovvero la società deve aver sviluppato (e utilizzare) un sistema di prequalifica dei fornitori e possedere un sistema di analisi dei risultati; deve inoltre aver studiato un modello di rilevazione della customer satisfaction da sottoporre ai clienti interni, cioè i diretti utilizzatori dei servizi.

1.8.4 Tendenze dell'Outsourcing

L'outsourcing si conferma strumento di business largamente adottato dalle imprese europee, come emerge dalle interviste a 600 senior executive di aziende situate in Francia, Regno Unito, Germania, Italia, Spagna e Belgio. Lo studio ha infatti messo in evidenza come il 70% degli intervistati abbia già assegnato in outsourcing almeno una funzione della propria azienda e il 22% - percentuale che si eleva al 24% per l'Italia – preveda di incrementarne ulteriormente i volumi nell'arco dei prossimi due anni, considerando quindi sempre più l'outsourcing come mezzo utile al raggiungimento di un concreto vantaggio competitivo.

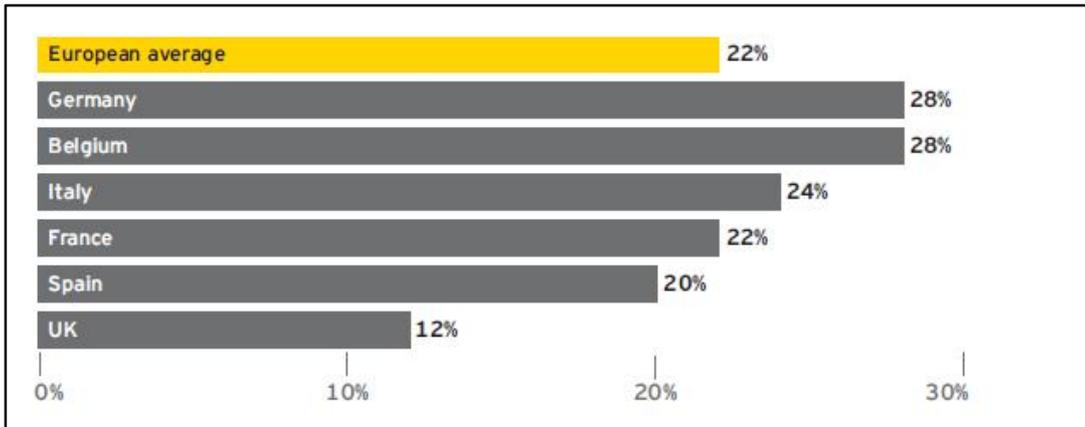
Fra i Paesi partecipanti al sondaggio, il Belgio ha registrato il più elevato tasso di outsourcing con l'81% delle aziende che lo utilizzano, mentre il dato più basso è quello della Francia con il 63%. Nel mezzo si situano Spagna (77%), Regno Unito (71%), Germania (70%) e Italia (67%).

Per quanto riguarda le attività aziendali esternalizzate, la Francia e il Belgio mostrano uno dei ventagli più ampi, con cinque tipologie, al contrario del Regno Unito, fermo a tre. L'Italia è più vicina a questo secondo dato, registrando una media di 3,6 attività affidate a soggetti esterni.



FONTE:[41]

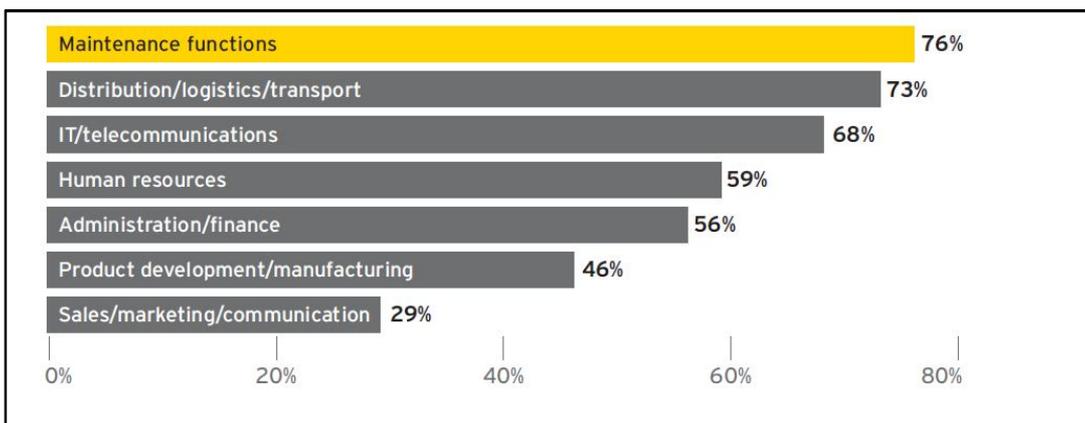
Figura 18: Tasso di Outsourcing per paese



FONTE:[41]

Figura 19: Pianificazione di outsourcing futura

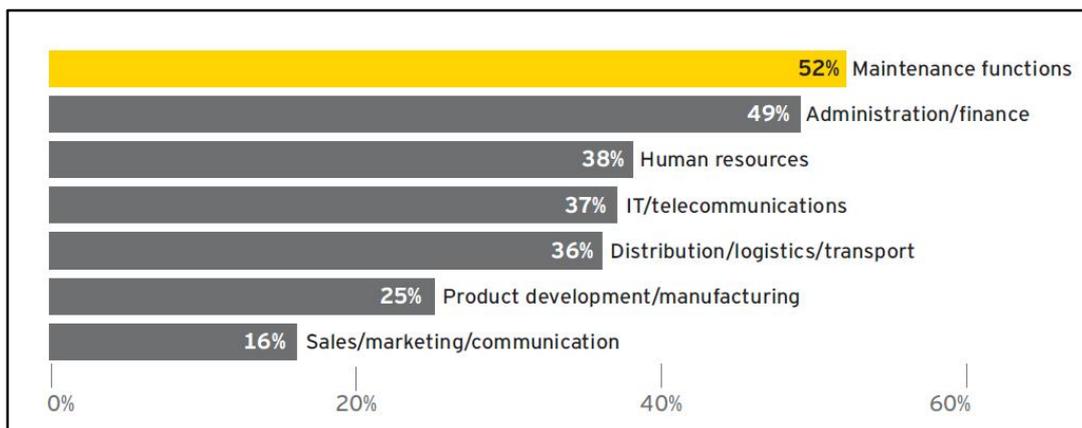
Le funzioni più di frequente interessate tra i Paesi oggetto della ricerca sono risultate essere la manutenzione (76%), la logistica(73%) e il settore dell'informatica e delle telecomunicazioni (68%).



FONTE:[41]

Figura 20: Tasso di esternalizzazione per funzione

All'interno del sondaggio è stata effettuata anche una domanda per valutare le tendenze di esternalizzazione per gli anni a seguire e le risposte sono state le seguenti.



FONTE:[41]

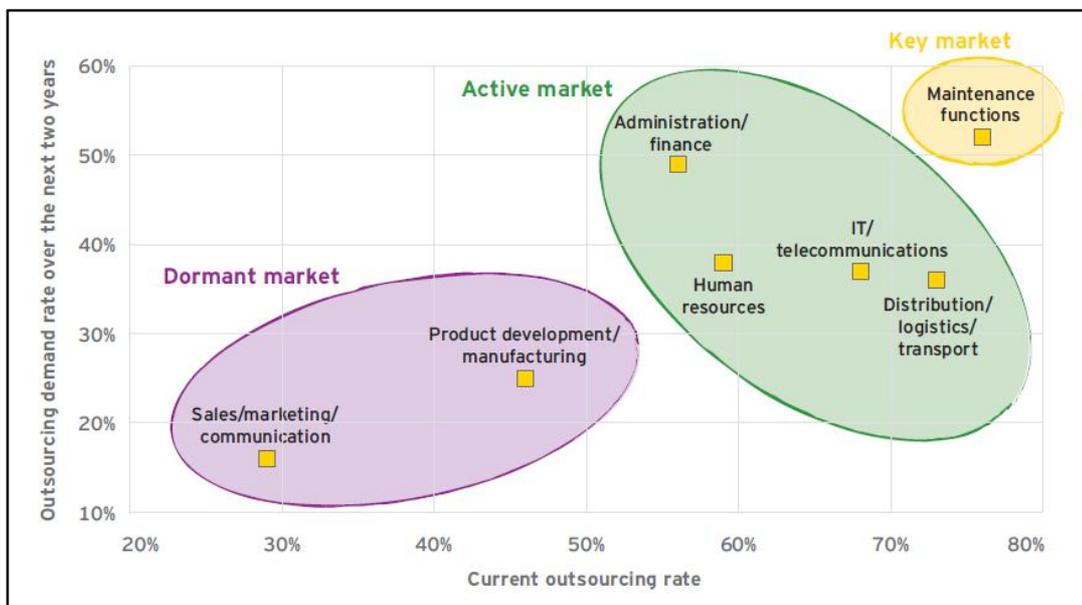
Figura 21: Tasso futuro di esternalizzazione per funzione

Si noti come al primo posto risulta esserci ancora la funzione manutenzione.

Infine, attraverso il raffronto tra il tasso di esternalizzazione (per funzione) presente e futuro è stato possibile raggruppare le funzioni in modo da identificare quelle che possono garantire una maggiore probabilità di profitto nell'ottica del fornitore di servizi.

Dal raggruppamento sono emerse tre classi:

- Dormant market: appartengono a questa classe quelle funzioni che hanno un tasso di esternalizzazione presente e futuro basso e che quindi non interessano ai fornitori di servizi;
- Active market: appartengono a questa classe quelle funzioni che hanno un tasso di esternalizzazione presente e futuro medio/alto e che quindi possono interessare ai fornitori di servizi
- Key market: appartengono a questa classe quelle funzioni che hanno un tasso di esternalizzazione presente e futuro alto. Ricade in questa classe solo la funzione manutenzione che rappresenta per il fornitore il mercato con la più alta probabilità di profitto.



FONTE:[41]

Figura 22: Mappatura del trend di outsourcing

1.9 Gli “attori” del Facility Management: un modello di relazione a rete

Se si analizza la situazione con attenzione, non esistono solo il Fornitore di Servizi e l’Azienda committente ma, come si vede nella Figura 23, nel caso più complesso, si possono distinguere almeno i seguenti quattro “attori” interessati o direttamente coinvolti nel processo di gestione delle facilities.

Distinguiamo quindi [44]:

1. Il Proprietario del Bene (Edificio o Impianto)

Il quale è ovviamente interessato al fatto che la sua “proprietà” sia gestita al meglio nel tempo, mantenendola in un adeguato (e stabile) stato di conservazione. Non vuole che il suo patrimonio si degradi e non vuole problemi sulla sicurezza. Vuole che tutto sia sotto controllo.

2. L’Azienda Gestore del Business

È l’entità che usa le Facilities e di relativi servizi ed ha l’esigenza di ottimizzarne la disponibilità garantendo la qualità necessaria allo

svolgimento della sua attività, ovvero è il Cliente Finale che decide di cedere in outsourcing l'attività di Facility Management ad un operatore di servizi di facilities.

L'Azienda, ad esempio, ha necessità di misurare se le performance concordate con il Contractor/Fornitore nello SLA (Service Level Agreement) vengono effettivamente raggiunte. Ha bisogno di verificare sinteticamente se il "Piano Manutentivo" previsto viene effettivamente attuato. Ha bisogno di essere messa tempestivamente al corrente sull'andamento complessivo dei costi e della qualità. Vuole partecipare in alcune decisioni che hanno risvolti economici di rilievo.

3. Il Service Provider

E' l'entità che si assume l'incarico di "gestire" le facilities in nome e per conto dell'Azienda in modo da garantire certi standard di qualità e di servizio.

Il Service Provider dovendo gestire molti servizi (o tutti), ha la necessità di un buon supporto operativo ma ha anche l'esigenza di raccogliere dati in modo strutturato per fare valutazioni migliorative sul proprio servizio e poter identificare e proporre al proprio Cliente delle iniziative di ottimizzazione.

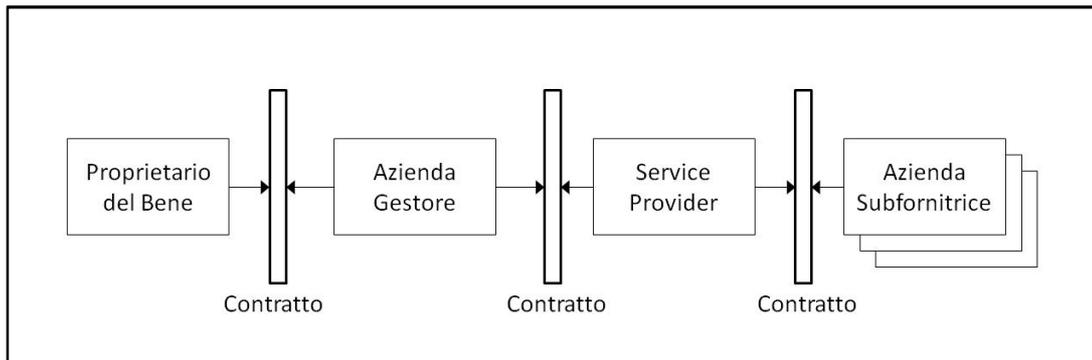
Deve disporre di un reporting adeguato per controllare il suo Contratto e verificare costantemente di essere "inattivo".

4. L'Azienda Terza – Subfornitore Specializzato

E' infine l'entità, magari di piccole o medie dimensioni, che spesso opera per conto del Service Provider svolgendo, sotto la supervisione, una attività operativa quale la Manutenzione, il Facchinaggio, le Pulizie eccetera.

E' tipicamente un operatore specializzato (es. Impianti Frigoriferi) legato probabilmente ad un territorio limitato nel quale opera.

Quindi, come si vede in Figura 23 le entità coinvolte sono diverse



FONTE: Tratto da Sandro Turci, "Il sistema informativo di manutenzione nel Facility Management"

Figura 23: Attori del FM

In generale, le relazioni tra cliente e fornitore di un servizio si possono distinguere in tre diverse categorie.

1. **Relazione Normale:** la relazione normale si caratterizza di una bassa intensità comunicativa. I servizi erogati non si differenziano in modo significativo ed il driver adottato per la selezione dei fornitori è solamente il minor prezzo. Questa relazione, garantisce un livello di servizio minimo e non distingue significativamente i diversi fornitori. La durata della relazione è normalmente predeterminata e al termine della stessa non vi è nessuna garanzia di rinnovo della fornitura.
2. **Relazione Preferenziale:** Il crescente numero di fornitori di servizi, ha determinato lo sviluppo di nuovi servizi e il miglioramento delle condizioni di fornitura. Alcuni fornitori pro-attivi sono stati capaci di proporre soluzioni adeguate alle mutevoli esigenze dei clienti. I clienti possono dunque stabilire relazioni preferenziali con questa categoria di fornitori attraverso contratti di lungo termine. Il fattore essenziale in questa tipologia di relazione, è il clima di fiducia tra le parti coinvolte. L'aspetto centrale di questo rapporto di fiducia riguarda la garanzia degli standard qualitativi dei servizi, riducendo al contempo l'influenza del costo del servizio.
3. **Relazione Alleanza – Partnership:** La crescita nel livello di fiducia tra fornitore e cliente, si può esplicitare nella condivisione dei margini

di profitto tra i soggetti coinvolti in sede di negoziazione dei contratti. Questa pratica intende motivare i fornitori a erogare servizi a maggior valore aggiunto.

In particolare nel caso del Facility Management tutti gli operatori, nonostante le differenze nella struttura organizzativa e nelle modalità di gestione operativa delle attività, sono concordi nel definire la relazione col cliente come una *partnership* che si deve fondare sulla reciproca trasparenza fin dalle prime fasi di impostazione del rapporto. Anche in questo caso, si stabilisce un discrimine importante tra chi fornisce semplicemente il servizio che gli viene richiesto dal cliente secondo modalità e prezzi convenuti e chi è in grado di calarsi nell'organizzazione del cliente, proporre soluzioni adeguate alle singole situazioni e funzionali al raggiungimento degli obiettivi del cliente, diventandone partner strategico.

Ciò significa che ogni attore non lavora come un'entità autonoma, ma al contrario si inserisce in una rete di relazioni, denominata *Supply Network*. Il termine "Supply Network", viene, facilmente, abbinato alla gestione di flussi di prodotti fisici e delle relative informazioni, mentre la rete, che si genera in questo contesto, consente un'evoluzione del concetto, coinvolgendo prodotti intangibili, ovvero i servizi. Si parla, dunque, di **Service Supply Network**[45].

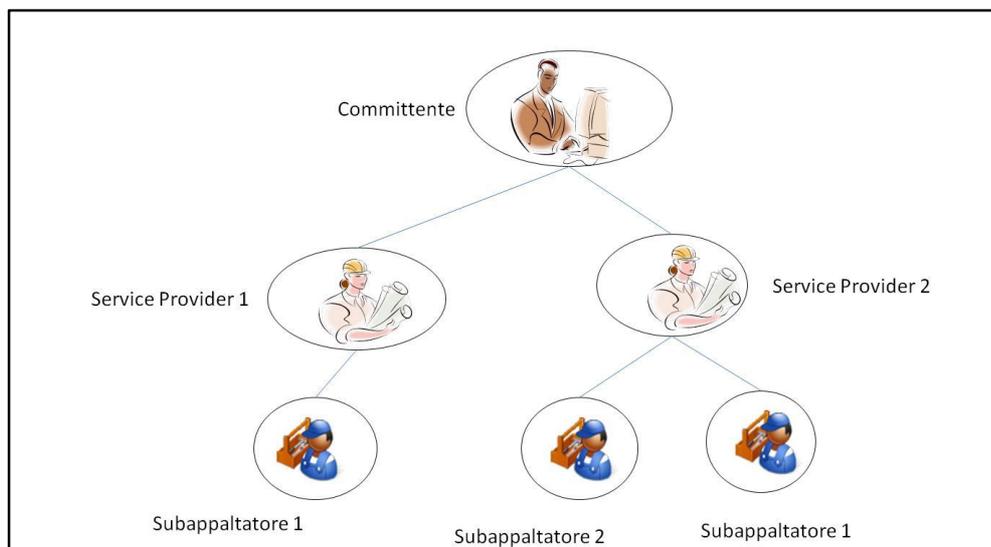


Figura 24: Service Supply Network

La rete innescata dal FM e coinvolgente attori diversi ben si sposa, quindi, con il concetto di *impresa virtuale*, da intendere come un insieme di unità operative che agiscono in modo integrato ed organico, nell'ambito di un sistema a rete di tipo olonico, per configurarsi come una catena del valore, adatta a cogliere le opportunità che il mercato presenta.

1.10 Vantaggi e svantaggi dell'outsourcing del Facility Management

L'esternalizzazione dei servizi di supporto non è priva di criticità e rischi. Attraverso un'analisi della letteratura, si è cercato di mettere in evidenza quelli che sono i rischi e le opportunità percepite sia nell'ottica del cliente che del fornitore

1.10.1 Vantaggi nella prospettiva del cliente

I benefici conseguibili nell'ottica del cliente, la cui sintesi è riportata nella Tabella 7, possono riguardare tre dimensioni principali della gestione d'impresa:

- quella strategico – organizzativa;
- quella operativa;

- quella economico – finanziaria

Tabella 7: Principali benefici emergenti dalla letteratura

| <i>Principali benefici individuati</i> | <i>Referenze principali</i> |
|--|--|
| Riduzione dei costi. | Lacity and Hirschheim [30]; McFarlan and Nolan [31]; Barthe´lemy and Geyer[32] ; Kakabadse and Kakabadse[33] |
| Focus sulle attività core. | Quinn and Hilmer[34] ; Saunders <i>et al.</i> [35] ; Alexanderand Young[36] ; Kakabadse and Kakabadse [33]; McFarlan and Nolan[31] ; |
| Guadagnare l'accesso a competenze esterne e migliorare la qualità. | Quinn and Hilmer[34] ; McFarlan and Nolan[31] ;Kakabadse and Kakabadse[33] |
| Trasformare costi fissi in variabili. | Alexander and Young [36];Lacity and Hirschheim[30];Quinn and Hilmer[34] |

Resta inteso che nella prospettiva del cliente approdare al Facility Management significa richiedere di più ad un costo minore ed eliminazione dei rischi attraverso il trasferimento al Provider [21].

- **Le opportunità strategico – organizzative**

Esternalizzare dei servizi, in primo luogo, consente all'impresa di liberare risorse e concentrarle sul proprio core business. Ricorrere all'outsourcing, infatti, significa affidare ad un'entità esterna tutto il complesso di problematiche legate alla gestione di un servizio che non fa parte delle attività principale dell'azienda. Alleggerita dall'onere di svolgere “in casa” questo compito, l'organizzazione rivolgerà tutta la sua attenzione verso le proprie competenze di base, così da sfruttarle al massimo e divenire più competitiva. Il passo più importante, da questo punto di vista, è l'identificazione precisa dei i confini del proprio business centrale: fatto ciò, l'azienda potrà affidare in outsourcing attività che ritiene lontane dal core business, liberando le risorse precedentemente impegnate nella gestione dei

servizi in questione. La scelta di esternalizzare un servizio, se operata con cura, conduce anche ad affidare una delle proprie attività ad una società specializzata, quindi in grado di svolgerla con un elevato standard qualitativo: i concorrenti dell'azienda che ha terziarizzato si troveranno dunque a competere sul campo del business centrale e con uno specialista esterno, che fa dell'attività ricevuta in outsourcing il suo business centrale. In più, gestire ed erogare un servizio internamente porta all'azienda anche il gravoso onere di seguire lo sviluppo tecnologico di quello specifico settore, col risultato che, spesso, chi fa "in casa" si ritrova ad utilizzare tecniche e attrezzature arretrate rispetto allo stato dell'arte disponibile per quel servizio: affidare quest'ultimo a degli specialisti, garantisce che questa attività sia svolta utilizzando le tecnologie più avanzate disponibili, colmando in breve tempo il gap eventualmente accumulato negli anni. Infine, esternalizzare dei servizi ha la diretta conseguenza di ridurre la complessità aziendale, donando all'organizzazione maggiore flessibilità e velocità di risposta, due caratteristiche decisive per eccellere nei mercati più competitivi. Il management si troverà quindi a gestire un'azienda più snella, dinamica e focalizzata – proprio perché ha a disposizione più risorse per le proprie attività centrali e, di conseguenza, riuscirà a rispondere in modo più efficiente, efficace e rapido al mutamento ambientale.

- **Le opportunità operative**

Affidarsi ad un'entità esterna per l'esecuzione di determinate attività consente di evitare le rigidità operative legate al funzionamento dei processi organizzativi: laddove l'accordo di outsourcing preveda un legame strategico forte tra i due attori (partnership), con ampia condivisione degli obiettivi in termini di qualità, efficienza ed efficacia, il fornitore tenderà a essere proattivo. Ciò significa che spesso il fornitore sarà in grado di rispondere alle necessità dell'azienda in maniera molto più tempestiva e flessibile rispetto a quanto sarebbe stato in grado di fare la struttura interna dell'azienda stessa.

Liberati dal vincolo della gerarchia interna, i processi decisionali acquistano maggiore fluidità. Inoltre, il ricorso a specialisti qualificati può creare un circolo virtuoso che investe la qualità delle attività svolte diffondendo in azienda la cultura del miglioramento continuo.

- **Le opportunità economico-finanziarie**

I benefici dell'outsourcing dal punto di vista economico, sono molti e di varia natura, anche se spesso non tutti immediatamente evidenti. In primo luogo alcuni vantaggi derivano dalla trasformazione in costi variabili di quelli che prima erano costi fissi: è un beneficio talvolta di difficile quantificazione, dato che il costo interno di un'attività è di difficile misurazione e spesso le caratteristiche del servizio in outsourcing sono diverse da quelle del servizio erogato internamente. Un ulteriore beneficio economico deriva dalla migliore qualità dell'attività offerta dal fornitore esterno: quest'ultimo è spesso in grado di garantire costi minori per l'erogazione del servizio perché non solo può vantare una miglior conoscenza dell'attività, ma può anche distribuire su più clienti i suoi investimenti in risorse umane e tecniche, realizzando di fatto economie di scala. Alcune opportunità di riduzione dei costi per l'azienda derivano anche dalla cessione di attività o processi che all'interno appaiono sottoutilizzati o che, per l'impossibilità di sfruttare economie di scala e di specializzazione, implicano un impegno eccessivo in risorse umane e tecniche rispetto alle esigenze e alle dimensioni dell'impresa. Sempre parlando dei possibili vantaggi economici legati all'outsourcing, quando l'azienda instaura con soggetti esterni un rapporto di partnership di lungo termine che prevede la condivisione degli obiettivi, discende automaticamente la tendenza ad adottare un approccio di target costing: si tratta di cercare l'ottimizzazione dei costi determinandoli prima del loro effettivo sostenimento, in un'ottica di miglioramento continuo dei prodotti e dei processi e di ricerca della best performance. Infine, se il processo di outsourcing prevede il trasferimento al fornitore esterno di

impianti e strutture funzionali all'attività esternalizzata, l'azienda otterrà un'ulteriore riduzione dei costi, ponendo le basi per la totale eliminazione dei flussi finanziari riconducibili alle attività esternalizzate e creando l'opportunità di impiegare le risorse liberate in attività alternative interne all'azienda.

1.10.2 Svantaggi nella prospettiva del cliente

In modo duale rispetto ai vantaggi che un'operazione di outsourcing eseguita in maniera efficace può portare, passiamo ora ad esaminare i problemi principali (sintetizzati in Tabella 8), anch'essi riguardanti le tre dimensioni: strategico – organizzativa, operativa ed economico – finanziaria, che possono sorgere nel corso dell'attività di esternalizzazione.

Tabella 8: Principali rischi emergenti dalla letteratura

| <i>Principali criticità individuate</i> | <i>Referenze principali</i> |
|---|---|
| Perdita di know-how | Bettis <i>et al.</i>[37]; Quinn and Hilmer[34]; Khosrowpour <i>et al.</i>[38]; Alexander and Young[36] |
| Perdita di controllo delle attività esternalizzate | Alexander and Young [36]; Aubert <i>et al.</i>; Earl [39]; Alexander and Young[36]; Aubert <i>et al.</i>[39]; Lacity and Hirschheim[30] ; Barthe'lemy[32], |
| Dipendenza dal fornitore | Alexander and Young [36]; Aubert <i>et al.</i> [39] |

- **I rischi strategico – organizzativi**

In un'operazione di outsourcing uno dei rischi maggiori è legato alla possibilità di perdere il controllo e le conoscenze relative all'area esternalizzata: nel caso in cui il rapporto instaurato con il fornitore esterno non sia di vera e propria partnership, l'azienda potrebbe perdere di vista le

modalità con cui viene gestita l'attività esternalizzata. Per questo motivo è sempre essenziale poter disporre di un sistema di controllo, così da verificare costantemente il livello qualitativo del servizio, l'effettivo impiego delle risorse, i costi sostenuti e la coerenza tra l'attività esternalizzata e quelle rimaste all'interno: senza un sistema con queste caratteristiche, di fatto si perde il controllo di attività di cui si è sottostimato il valore strategico. Analogamente, un rapporto scarsamente collaborativo tra azienda e fornitore, a causa delle asimmetrie informative tra le due parti, può aggravare la fuoriuscita di competenze operative che la terzizzazione necessariamente comporta, perché reca anche la perdita delle conoscenze e delle informazioni indispensabili alla valutazione manageriale dell'area esternalizzata. Tra queste conoscenze vi sono proprio anche quelle necessarie all'eventuale e rapida ricostruzione all'interno dell'organizzazione delle attività affidate in outsourcing.

- I rischi operativi

Le criticità operative più significative sono legate alla corretta individuazione delle attività da esternalizzare, alla ricerca del fornitore esterno, alla scelta della forma contrattuale da impiegare e alla gestione del rapporto con il fornitore.

In fase di analisi dei tempi e delle modalità con cui operare l'esternalizzazione è indispensabile identificare accuratamente quali attività spostare all'esterno: questo implica un passaggio di fondamentale importanza, ovvero la corretta valutazione dei costi sostenuti all'interno per le attività considerate, così da poterle confrontare con i costi proposti dal fornitore. L'operazione di outsourcing può rendere necessario anche rivedere il modo nel quale vengono svolte alcune attività, interne all'azienda, che sono direttamente collegate con il servizio esternalizzato: diviene perciò necessario riesaminare e ripensare alcuni meccanismi organizzativi interni, distribuire in

maniera diversa compiti e responsabilità tra le funzioni e sviluppare nuove funzioni che supportino le attività di coordinamento e di interfaccia con il fornitore.

Un'ulteriore difficoltà è legata alla scelta del fornitore: è indispensabile analizzare con estremo rigore le caratteristiche dei potenziali candidati, soprattutto se si intende avviare con il fornitore esterno una relazione di partnership strategica. La selezione presuppone uno studio accurato dei fornitori presenti sul mercato non solo sotto il profilo economico ma anche circa il livello di affidabilità. Va poi verificato che i candidati posseggano le infrastrutture tecniche, umane e finanziarie capaci di garantire solidità e stabilità per le attività svolte, nonché un management competente e aperto al cambiamento. I candidati devono anche mostrare un elevato livello di esperienza, capacità progettuali, modalità di fornitura che permettano la misurabilità economica dei risultati, attitudine al rapporto di partnership con il cliente e la capacità di governo di processi complessi.

- I rischi economico – finanziari

I rischi economico – finanziari sono connessi principalmente all'eventualità di aver sottostimato alcuni costi generati dalle fasi di ricerca del fornitore, di negoziazione e – soprattutto – di controllo e di regolazione del rapporto. Altri costi evitabili possono sorgere da una definizione poco accurata sul prezzo della fornitura nella sua componente variabile. Infine, se l'azienda delega una serie di attività al fornitore esterno riuscendo a concludere una negoziazione sul prezzo molto vantaggiosa e successivamente trova utile delegare altre attività ma è diventata dipendente dal fornitore dal punto di vista operativo e strategico, potrebbe non essere più in grado di spuntare un prezzo allineato con il mercato, incorrendo anzi in costi spropositati rispetto al contenuto e all'importanza delle attività successivamente esternalizzate.

In conclusione, possiamo così sintetizzare i benefici e le criticità analizzati

Tabella 9: Sintesi Benefici/Criticità dell'outsourcing del FM nell'ottica cliente

| |   |   |
|------------------------------------|--|--|
| STRATEGIA E ORGANIZZAZIONE | <ul style="list-style-type: none"> * Concentrazione sulle <i>core competence</i>. * Acquisizione Know-how da fornitori esterni. * Aggiornamento tecnologico. * Riduzione della complessità. * Aumento della dinamicità. | <ul style="list-style-type: none"> * Perdita di controllo dell'area esternalizzata. * Perdita dati su immobili e servizi. |
| OPERATIVITA' AZIENDALE | <ul style="list-style-type: none"> * Incremento della flessibilità. * Aumento della disponibilità di risorse. * Maggiore rapidità di implementazione di nuove soluzioni * Diffusione della cultura del miglioramento continuo | <ul style="list-style-type: none"> * Errata individuazione delle attività da esternalizzare * Aumento della necessità di coordinamento. * Scelta del fornitore. |
| ECONOMICITA' DELLA GESTIONE | <ul style="list-style-type: none"> * Riduzione costi. * Trasformazione di costi fissi in costi variabili. * Riduzione delle attività immobilizzate. | <ul style="list-style-type: none"> * Costi transazionali. * Errata definizione del prezzo in sede contrattuale. |

1.10.3 Vantaggi e svantaggi nell'ottica del fornitore

Lo studio del Facility management nell'ottica del provider dei servizi non è stato affrontato in letteratura quanto lo è stato invece dall'ottica del cliente. La prospettiva con cui un provider si avvicina al Facility management è quella di fornire il minimo indispensabile per generare il massimo profitto e salvaguardare il mantenimento del contratto [21].

Attraverso non tanto lo studio della letteratura, in quanto carente, ma tramite l'analisi di alcune interviste rivolte ai provider stessi è stato possibile realizzare una lista delle criticità e dei benefici da essi evidenziate.

Criticità:

- definizione precisa ed attenta del sistema organizzativo, con identificazione dei ruoli e responsabilità del cliente e del fornitore, curando i meccanismi di interfaccia ed il sistema di comunicazione;
- Il rapporto col cliente è del tipo tradizionale (cliente vs. fornitore) e non basato su una relazione di reale partnership;
- Il rapporto è caratterizzato da mancanza di fiducia;
- Emergono resistenze del cliente a gestire insieme gli imprevisti;
- C'è riluttanza a trasferire il personale più preparato in outsourcing in quanto l'outsourcing viene colto come un'opportunità per liberarsi delle "mele marce";
- Il cliente non è disposto a riconoscere alcuni interventi come manutenzione straordinaria quindi fuori dal canone annuale;
- Gli impianti si dimostrano in condizioni peggiori di come il cliente li aveva ipotizzati (criticità latenti non evidenziate inizialmente);
- I costi previsti di manutenzione si rivelano sottostimati rispetto a quelli consuntivati;
- Necessità di particolare attenzione agli elementi di fondo che garantiscono l'integrazione dei servizi
- Necessità di un sistema informativo in grado di supportare le attività di ricognizione e di gestione dei dati, quale strumento indispensabile per la verifica, il monitoraggio ed il miglioramento continuo delle *performance*;

Benefici:

- fatturato
- possibilità di programmare meglio (lunga durata) e razionalizzare la struttura e l'utilizzo delle risorse
- economie di approvvigionamento (volumi maggiori)

- abbassamento del capital risk degli investimenti (tecnologie e strutture), per la maggiore stabilità e prevedibilità dei flussi in entrata

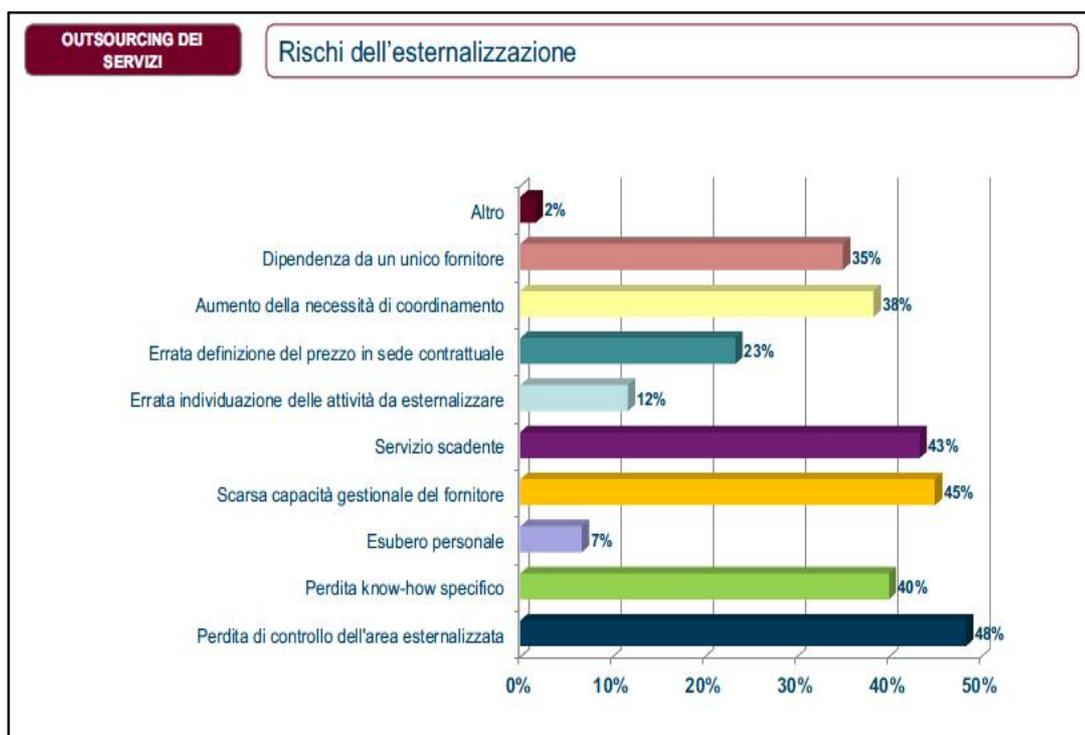
Tabella 10: Sintesi Benefici/Criticità dell'outsourcing del FM nell'ottica fornitore

| BENEFICI | CRITICITA' |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> * Fatturato * Possibilità di programmare meglio (lunga durata) e razionalizzare la struttura e l'utilizzo delle risorse * Economie di approvvigionamento (volumi maggiori) * Abbassamento del capital risk degli investimenti (tecnologie e strutture), per la maggiore stabilità e prevedibilità dei flussi in entrata | <ul style="list-style-type: none"> * Definizione precisa ed attenta del sistema organizzativo * Il rapporto con il cliente è caratterizzato da mancanza di fiducia. * Il cliente non è disposto a riconoscere alcuni interventi come straordinaria e quindi di extra canone * Gli impianti si dimostrano in condizioni peggiori di come il cliente li aveva ipotizzati * Necessità di particolare attenzione agli elementi di fondo che garantiscono l'integrazione dei servizi * Necessità di un sistema informativo in grado di supportare le attività di ricognizione e di gestione dei dati |

1.10.4 Vantaggi e svantaggi percepiti – Studio IFMA

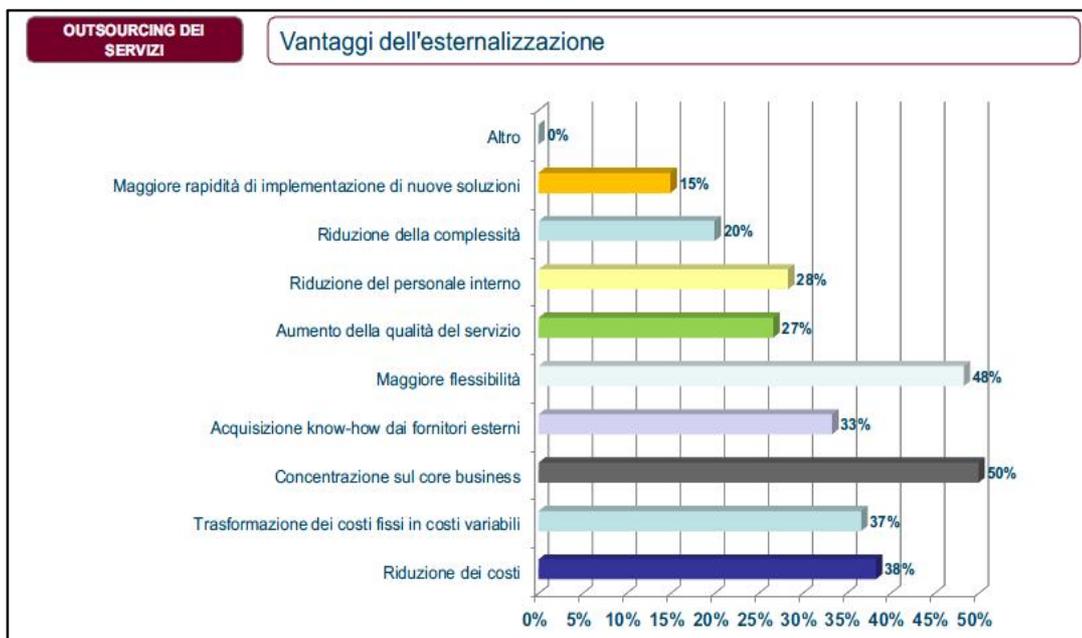
Analizzato ciò che la letteratura definisce come possibili rischi e vantaggi derivanti dall'outsourcing del Facility management è stato interessante andare alla ricerca di report che ci permettessero di capire in che misura, tali rischi e vantaggi, venissero percepiti dalle aziende. Tra tutti quelli individuati il più significativo, a livello italiano, è risultato essere quello proveniente da uno studio portato avanti dall' IFMA (International Facility Management Association – Italian Chapter) nell'ottobre 2012[43] mirato ad indagare la propensione delle aziende italiane all'outsourcing del FM. Lo studio ha raccolto le opinioni di 100 Facility Manager appartenenti ad altrettante aziende attive sul territorio italiano. Ben il 24% di questi professionisti

risponde direttamente all'Amministratore delegato o al Direttore Generale e ricopre quindi il ruolo strategico che è proprio dei Facility Manager nelle realtà più avanzate per il FM a livello mondiale. La ricerca presenta perciò un campione estremamente qualificato, adatto a fornire un'istantanea attendibile di come le aziende italiane percepiscano lo strumento dell'outsourcing.



FONTE: [43]

Figura 25: Percezione quantitativa dei rischi



FONTE: [43]

Figura 26: Percezione quantitativa dei vantaggi

Un primo sguardo ai risultati, mostrati in Fig. 26, fa subito emergere un dato solo all'apparenza sorprendente: tra i motivi che più di tutti spingono le aziende a ricorrere all'outsourcing, la riduzione dei costi occupa solo il terzo posto con il 38%, ben staccata dalle prime due voci di questa classifica, ovvero la possibilità di concentrarsi maggiormente sul core business con il 50% e di guadagnare una maggiore flessibilità con il 48% (ogni intervistato poteva indicare tre voci diverse). Questo dato, da solo, testimonia quanto marcata sia stata la crescita culturale del Facility Management nelle aziende italiane, anche se è giusto notare che il campione della ricerca di IFMA Italia appartiene alla porzione più evoluta della domanda di servizi. Cionondimeno il risultato denota una piena e diffusa presa di coscienza del fatto che affidare a terzi tutta l'attività prettamente operativa, e parte di quella di controllo, consente da un lato all'azienda di concentrare le proprie risorse sul business e dall'altro al Facility Manager di dedicare tutti i suoi sforzi all'attività strategica, così da fornire un contributo ancora più incisivo allo sviluppo della sua organizzazione. La ricerca di una maggiore flessibilità a sua volta

evidenzia come le aziende giudichino che il ricorso al mercato possa aprire una gamma virtualmente infinita di possibili soluzioni riguardanti i servizi, con la possibilità di scegliere di volta in volta quella più adatta alle proprie esigenze. Infine, l'ampia distanza che separa queste due voci da quella relativa alla diminuzione dei costi testimonia come i Facility Manager italiani siano ormai consci di avere un ruolo attivo, strategico e propositivo in azienda, e non siano più percepiti come funzioni utili solo ad operare un comportamento passivo come il taglio delle spese. Una volta stabilite quali necessità spingano all'outsourcing, lo studio si è focalizzato sull'indagine dei rischi. Come mostra il report in Fig. 25, circa il 50% degli intervistati si mostra preoccupato circa la perdita di controllo dell'area esternalizzata a cui fa seguito scarsa capacità gestionale da parte del fornitore, servizio scadente e perdita di know-how specifico. Tra tutti i rischi emersi, la perdita di controllo da parte dell'azienda è quella che occupa il primo posto in tutti i report analizzati. Per un riscontro a livello internazionale vengono riportati i risultati di un'indagine portata avanti nel 2010 dagli esperti di AT Kearney, una delle maggiori realtà internazionali nella consulenza aziendale, dopo aver analizzato il fenomeno dell'outsourcing attraverso lo studio di più di mille imprese attive in 24 settori industriali

Tabella 11: Indagine AT Kearney

| CONTRO | |
|---|------------|
| Perdita del controllo sull'azienda | 72% |
| Protezione della proprietà intellettuale | 68% |
| Business case inadeguato | 53% |
| Dipendenza dal fornitore | 38% |
| Difficoltà di tornare indietro | 30% |

Fonte: AT Kearney

1.11 Dimensioni del mercato di FM europeo ed italiano

Nonostante il Facility Management abbia ormai assunto nell'economia italiana e in quella europea una significativa rilevanza – le stime più accreditate attribuiscono ai servizi in outsourcing un peso tra il 3 e il 5% sul PIL dell'UE – non esiste ancora una metodologia comune e convincente per la quantificazione del volume d'affari di questo mercato sia livello nazionale che internazionale. Di conseguenza, non esiste una quantificazione comunemente accettata del mercato italiano né di quello dei principali paesi europei, né dei relativi tassi di crescita. Diverse fonti producono stime differenti. Un confronto internazionale è stato tentato recentemente da parte del mondo accademico, ma solo in via preliminare e con metodi ancora piuttosto approssimativi.

Diversi ordini di motivazioni rendono la stima molto complessa. Quello del FM è un mercato che, per la sua stessa natura, si presta poco alle quantificazioni. In primo luogo, va tenuto conto del fatto che si tratta di un insieme di attività definite per sottrazione rispetto al core business delle imprese e delle organizzazioni. Inoltre abbiamo già visto come nella sua evoluzione il FM tenda ad allargare progressivamente il proprio raggio d'azione, dalla manutenzione integrata degli edifici alla gestione di servizi diversificati relativi a persone, spazi, infrastrutture. Esiste, in altre parole, un nucleo di attività (tutta la gamma delle manutenzioni, i servizi di pulizia, il catering, la guardiania, i servizi di supporto agli uffici, etc.) che fanno sicuramente parte del mercato potenziale del FM, ma tale attività non ha confini precisi, potendosi estendere di volta in volta a un ventaglio molto più ampio di servizi a seconda delle esigenze specifiche del cliente. Un altro aspetto che rende difficile la stima del mercato (soprattutto per quanto riguarda l'offerta) è connesso strettamente alla natura del Facility

Management, che si fonda sull'integrazione di attività anche molto diverse fra loro.

La caratteristica principale che connota questo settore – l'integrazione fra attività diverse – si scontra, infatti, con quelle che potremmo definire “le ragioni” della statistica. La filosofia alla base della rilevazione statistica delle unità locali e delle imprese nei diversi comparti produttivi è quella di articolare ogni attività in sottosettori il più possibile dettagliati. Ad esempio, la categoria delle attività immobiliari è suddivisa a sua volta in: valorizzazione e vendita immobiliare; compravendita di beni immobili effettuata su beni propri; locazione di beni immobili propri e sublocazione; agenzie di mediazione immobiliare; amministrazione e gestione di beni immobili per conto terzi. Tale modo di procedere risponde ovviamente all'esigenza di avere un quadro sistematico il più possibile particolareggiato, sotto il profilo dell'articolazione settoriale oltre che territoriale, della struttura produttiva nazionale in occasione delle principali rilevazioni. Un approccio adatto soprattutto all'analisi di realtà imprenditoriali, piccole e grandi, fortemente specializzate, ma poco si presta a individuare quelle attività che, come il Facility Management, sono *trasversali* a diversi comparti e tendono anzi a ricomprendere sotto una sola insegna imprenditoriale una molteplicità di servizi. Il risultato è che, almeno finora, gli operatori di Facility Management vengono classificati, nei dati statistici di base, nei diversi settori sulla base della principale attività svolta oppure in base al comparto di provenienza (costruzioni, impiantistica, informatica, ristorazione ecc.) e risultano pertanto “mascherati” all'interno di tali settori. C'è poi il problema di isolare, all'interno dei servizi di supporto esternalizzati, quelli che vengono svolti effettivamente in Facility Management (cioè affidando non solo la mera erogazione ma la gestione del servizio) e quelli che si concretizzano in un tradizionale appalto di servizi o di manutenzione ordinaria. Inoltre la stima del mercato del FM deve tenere conto delle diverse modalità di erogazione

dei servizi quali: servizi svolti in house, servizi esternalizzati verso singoli fornitori, servizi esternalizzati verso operatori integrati di FM. Senza dimenticare che quando i servizi in FM sono svolti ‘in house’, possono non passare per il mercato, e quindi non essere colti dalle statistiche economiche. Stiamo quindi parlando di una stima complessa e inevitabilmente imperfetta, che ha come riferimento un mercato potenziale fatto di servizi di supporto (interni e/o esterni).

1.11.1 Un confronto internazionale su scala europea

Tra i tentativi di stima effettuati recentemente a livello internazionale, il più interessante è probabilmente quello di Sven A. Teichmann [40], ricercatore dell’International Real Estate Business School di Regensburg. Pur utilizzando una metodologia di stima ancora piuttosto approssimativa, lo studio è infatti riuscito ad approssimare un confronto internazionale europeo basato su dati omogenei, e relativo al 2008. Rispetto agli altri studi eseguiti sia a livello internazionale sia per singoli paesi, lo studio di Teichmann ha il pregio di distinguere precisamente tra servizi svolti internamente (internal services) e servizi esternalizzati (external services), fornendo una stima per entrambi i segmenti.

Secondo il modello semplificato di Teichmann, nel 2008 il mercato complessivo dei servizi di supporto in Europa ammontava a 655 miliardi di Euro, tra i quali 324 miliardi è il valore dei servizi effettivamente esternalizzati, e 331 miliardi il valore di quello gestiti internamente. La Gran Bretagna – non è una sorpresa – è il leader europeo del settore, con un mercato complessivo di oltre 204 miliardi, dei quali ben 128 esternalizzati (una cifra più alta di quella riscontrata da altri studi per lo stesso paese), seguono a distanza la Germania (73 miliardi, di cui 37 in outsourcing) e la Francia (59 miliardi di cui 29 in outsourcing). L’Italia è al quarto posto nella

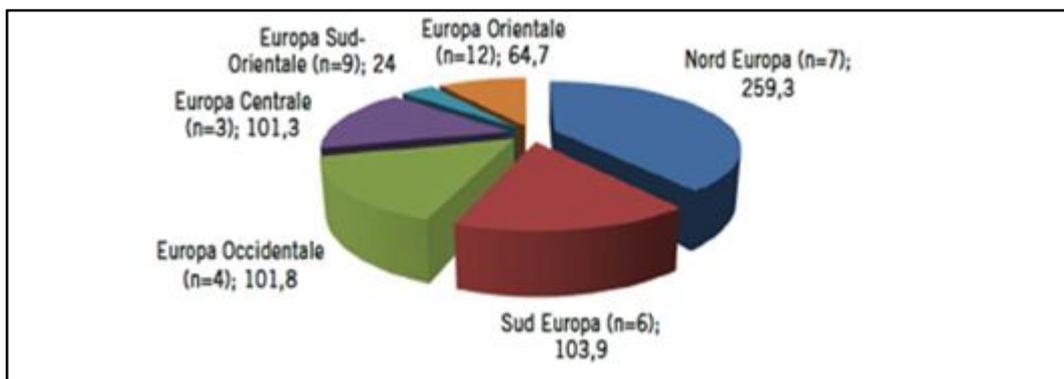
graduatoria europea, con una stima di circa 49 miliardi, dei quali 21,6 effettivamente esternalizzati. Come vedremo, si tratta di una stima sostanzialmente in linea con quelle provenienti da altre fonti. Alla Spagna è invece attribuito un mercato complessivo di 37 miliardi, di cui 16 in outsourcing. Il mercato più ampio è quello dell'Europa del Nord (259 miliardi in 7 paesi), seguono l'Europa Meridionale (104 miliardi in 6 paesi), l'Europa Occidentale (102 miliardi in 4 paesi), l'Europa Centrale (101 miliardi in tre paesi), l'Europa Orientale (65 miliardi in 12 paesi), e quella Sud-Orientale (24 miliardi in 9 paesi).

Tabella 12: Stima del mercato europeo del FM nel 2008 (miliardi di Euro)

| Paese | Regione | Tipo di mercato | Mercato FM potenziale* | Mercato FM effettivo* |
|-------------------------------|----------------------|-----------------|------------------------|-----------------------|
| UK | Nord Europa | Pioniere | 204,4 | 128,3 |
| Germania | Europa Centrale | Sviluppato | 73,4 | 37,8 |
| Francia | Europa Occidentale | Sviluppato | 58,9 | 28,6 |
| Italia | Sud Europa | Sviluppato | 48,8 | 21,6 |
| Spagna | Sud Europa | Sviluppato | 37,3 | 16,2 |
| Russia | Europa Orientale | Emergente | 31,8 | 11,6 |
| Olanda | Europa Occidentale | Pioniere | 26,0 | 15,5 |
| Belgio | Europa Occidentale | Sviluppato | 15,4 | 7,3 |
| Svizzera | Europa Centrale | Sviluppato | 15,2 | 7,2 |
| Turchia | Europa Sud-Orientale | Pre-Emergente | 15,1 | 3,2 |
| Svezia | Nord Europa | Emergente | 14,9 | 5,4 |
| Austria | Europa Centrale | Sviluppato | 12,7 | 6,0 |
| Polonia | Europa Orientale | Emergente | 12,6 | 4,6 |
| Norvegia | Nord Europa | Emergente | 12,3 | 4,5 |
| Danimarca | Nord Europa | Sviluppato | 10,8 | 5,1 |
| Grecia | Sud Europa | Pre-Emergente | 9,4 | 2,0 |
| Irlanda | Nord Europa | Sviluppato | 8,4 | 4,0 |
| Finlandia | Nord Europa | Emergente | 8,0 | 2,9 |
| Portogallo | Sud Europa | Emergente | 7,6 | 2,8 |
| Rep. Ceca | Europa Orientale | Emergente | 5,2 | 1,9 |
| Ungheria | Europa Orientale | Emergente | 4,6 | 1,7 |
| Romania | Europa Sud-Orientale | Pre-Emergente | 4,1 | 0,87 |
| Ucraina | Europa Orientale | Pre-Emergente | 3,6 | 0,76 |
| Slovacchia | Europa Orientale | Emergente | 2,0 | 0,72 |
| Croazia | Europa Sud-Orientale | Pre-Emergente | 1,6 | 0,34 |
| Lussemburgo | Europa Occidentale | Sviluppato | 1,5 | 0,71 |
| Slovenia | Europa Orientale | Emergente | 1,4 | 0,52 |
| Bieloussia | Europa Orientale | Pre-Emergente | 1,2 | 0,26 |
| Bulgaria | Europa Sud-Orientale | Emergente | 1,1 | 0,41 |
| Lituania | Europa Orientale | Pre-Emergente | 1,1 | 0,23 |
| Serbia | Europa Sud-Orientale | Pre-Emergente | 1 | 0,21 |
| Lettonia | Europa Orientale | Pre-Emergente | 0,67 | 0,14 |
| Islanda | Nord Europa | Emergente | 0,66 | 0,24 |
| Cipro | Sud Europa | Pre-Emergente | 0,64 | 0,14 |
| Estonia | Europa Orientale | Pre-Emergente | 0,57 | 0,12 |
| Bosnia Erzegovina | Europa Sud-Orientale | Pre-Emergente | 0,41 | 0,09 |
| Albania | Europa Sud-Orientale | Pre-Emergente | 0,35 | 0,07 |
| Macedonia | Europa Sud-Orientale | Pre-Emergente | 0,24 | 0,05 |
| Malta | Sud Europa | Pre-Emergente | 0,23 | 0,05 |
| Moldova | Europa Orientale | Pre-Emergente | 0,12 | 0,03 |
| Montenegro | Europa Sud-Orientale | Pre-Emergente | 0,09 | 0,03 |
| TOT. Europa (41 paesi) | | | 655 | 324 |

FONTE: Elaborazione CRESME su dati Teichmann(2008)

*Mercato potenziale=servizi esternalizzati+servizi gestiti internamente, mercato effettivo=servizi esternalizzati

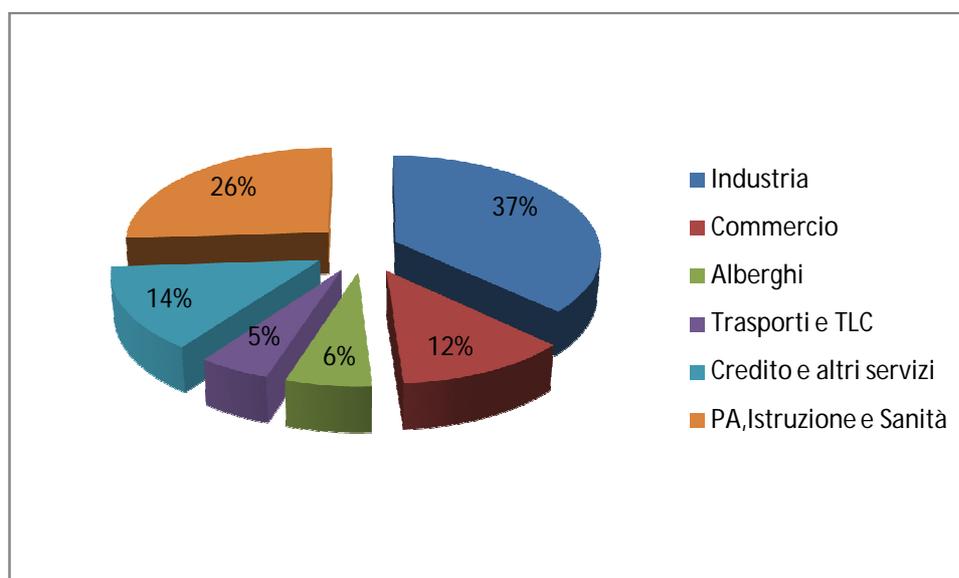


FONTE: Elaborazione CRESME su stime Teichmann (2008)

Figura 27: Mercato europeo del FM nel 2008 (mercato potenziale in miliardi di Euro)

1.11.2 Il mercato italiano

I problemi di analisi riscontrati a livello europeo sono proiettati anche a livello nazionale. Una stima del 2009 effettuata da CRESME suddivideva il mercato potenziale del Facility Management per segmento di domanda nel modo seguente:



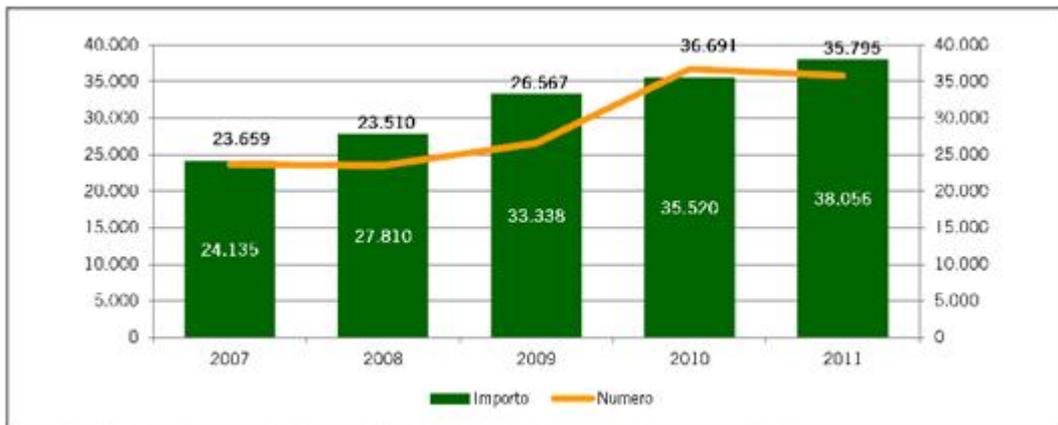
FONTE: Elaborazione stime CRESME[29]

Figura 28: Mercato potenziale italiano del FM nel 2009

All'interno del mercato potenziale sono il settore industriale e la Pubblica Amministrazione ad intercettare la parte economicamente più consistente.

Un'analisi più dettagliata è stato possibile effettuarla solamente per il settore pubblico grazie ai dati rilevati da CRESME Europa Servizi attraverso l'Osservatorio Nazionale del Facility Management [50]. Il Rapporto relativo al 2012 non è ancora disponibile per cui è stato analizzato il Rapporto del 2011 per chiarire un po' le idee circa il mercato pubblico del Facility Management in Italia [51].

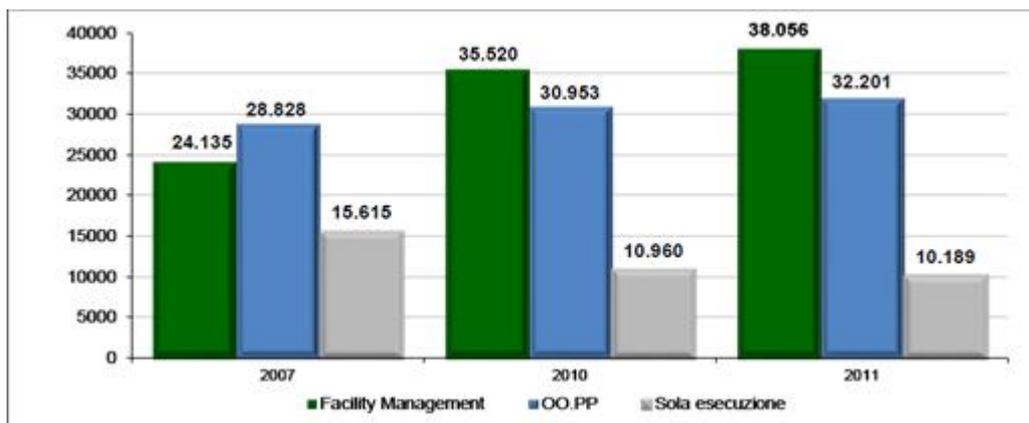
Secondo l'Osservatorio, tra il 2007 e il 2011, il numero di bandi pubblici classificabili come FM è aumentato del 51% circa, mentre gli importi a base d'asta sono aumentati del 58%, passando dai 24 miliardi del 2007 ai 38 del 2011.



FONTE:[49]

Figura 29: Il trend del mercato del FM pubblico in Italia nel periodo 2007/2011-bandi di gara pubblicati- importo in milioni di Euro

La domanda pubblica cambia quindi struttura: da domanda di lavori a domanda di servizi, dagli appalti di sola esecuzione a quelli di progettazione, costruzione, gestione e manutenzione integrata [52]. I bandi di FM nel 2011 rispetto al 2007 hanno avuto un incremento del 57% mentre gli appalti di sola esecuzione hanno avuto un decremento del 34% [53] [54] [55].

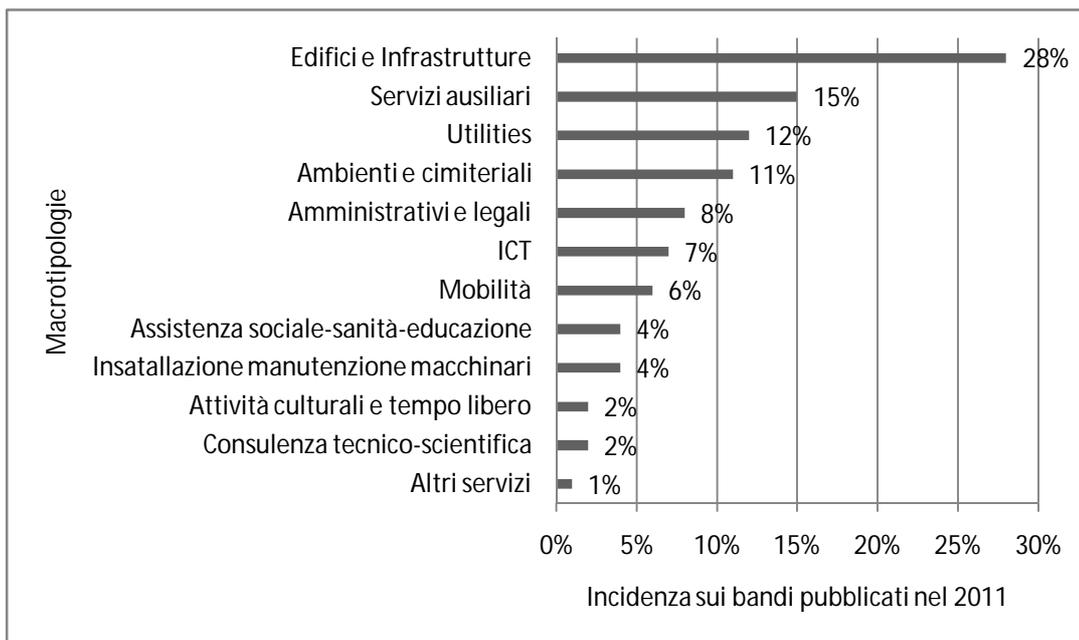


FONTE:[49]

Figura 30: Mercato del FM pubblico a confronto con il mercato delle opere pubbliche e della sola esecuzione-bandi di gara pubblicati-importi in milioni di Euro

L'Osservatorio Nazionale del Facility Management suddivide il mercato del FM in dodici macrotipologie di servizi: gestione e manutenzione di edifici e infrastrutture, servizi di utility, servizi ambientali e cimiteriali, servizi alla mobilità, servizi di consulenza tecnico-scientifica, servizi ICT, installazione e manutenzione macchinari-apparecchiature-strumentazioni, gestione attività culturali e per il tempo libero, servizi ausiliari, assistenza socio-sanitaria ed educativa, servizi amministrativi e legali ed infine altri servizi [56].

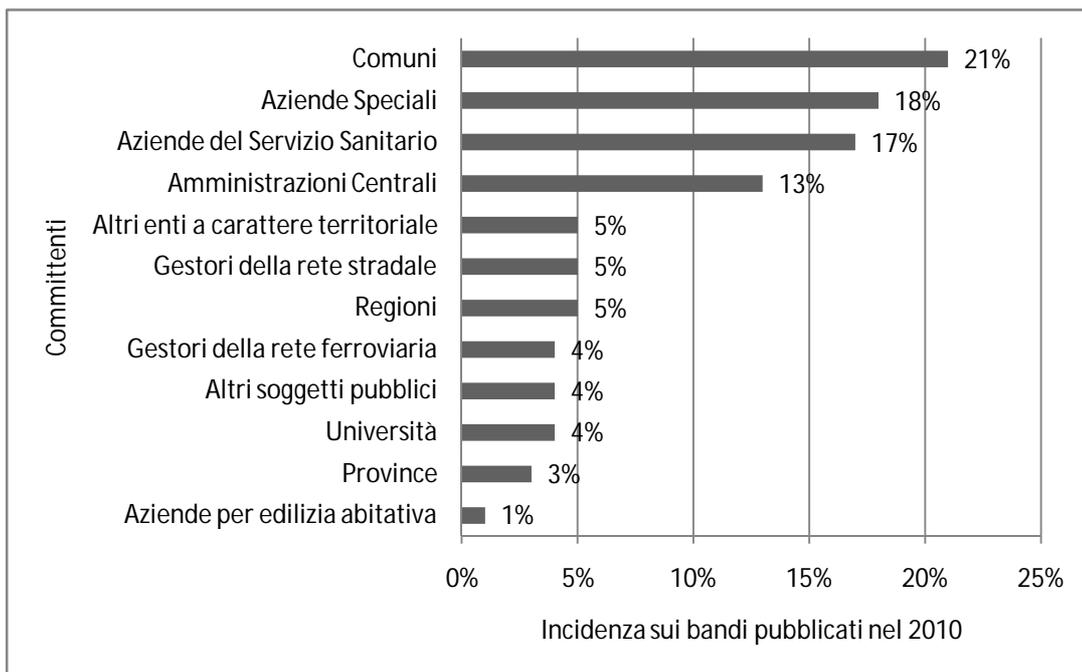
La composizione dei bandi pubblicati nel 2011, ripartita per macrotipologia, risulta così essere distribuita [57].



FONTE: Elaborazione dati dell'Osservatorio Nazionale del FM [49]

Figura 31: Composizione bandi pubblici 2011

Altro dato interessante da analizzare è relativo alla tipologia di committenza che ha emanato il bando [58] [59]. Purtroppo, i dati in nostro possesso fanno riferimento all'anno 2010 ma, come dichiarato dal CRESME, sono comunque significativi della situazione attuale [60].



FONTE: Elaborazione dati dell'Osservatorio Nazionale del FM[49]

Figura 32: Committenti bandi pubblici 2011

Capitolo 2

Programmazione e Controllo Operativo di Produzione e Manutenzione

2.1 Introduzione

Lo studio condotto nasce dalla volontà di analizzare, tramite la System Dynamics, un ambiente di lavoro caratterizzato da due realtà molto diverse ma, allo stesso tempo, strettamente correlate tra loro: la realtà produttiva e quella manutentiva.

Le principali fonti di ispirazione sono state un articolo tratto dalla letteratura della System Dynamics dal titolo “ *Real time production planning and control system for job-shop manufacturing: A system dynamics analysis*”, pubblicato a luglio 2011 dalla rivista *European Journal of Operational Research*, paper scritto da P. Georgiadis e C. Michaloudis [61], per quanto riguarda la logica del modello di simulazione per un sistema di produzione Flow Shop⁴; per la parte relativa alla manutenzione, è stata considerata la tesi di Dottorato dell’Ing. Pasquale Zoppoli intitolata “*Manutenzione su Condizione: modellazione ed ottimizzazione*” [62]; ed, infine, sono stati di fondamentale importanza per la costruzione del modello alcuni lavori di ricerca sviluppati dal gruppo di Impianti Industriali di Napoli in merito ad un modello di simulazione rappresentativo della realtà produttiva.

Si è partiti, infatti, da un modello di simulazione di un sistema produttivo e lo si è arricchito della componente manutentiva, ispirandosi al modello di

⁴ Un sistema di produzione Flow Shop è un particolare sistema produttivo in cui sono presenti più macchine disposte in serie, caratterizzate da un flusso di materiale unidirezionale ed i lavori sono tutti definiti da una sequenza uguale di lavorazione. È il caso tipico delle catene di montaggio dove le macchine sono disposte secondo le fasi di lavorazione del prodotto.

simulazione ad eventi discreti [62]. Il tutto al fine di simulare l'interazione delle due realtà in un ambiente dinamico ed apprezzarne l'eventuale ottimizzazione dal punto di vista dei costi globali di manutenzione.

Per poter realizzare tutto ciò sono stati necessari l'analisi, lo studio e la fusione di conoscenze, di teorie e di strumenti che vedono come concetti fondamentali: i Sistemi Produttivi, la Programmazione della Produzione, lo Scheduling, la Manutenzione, le Politiche Manutentive, la Simulazione e la System Dynamics.

2.2 I Sistemi di Produzione

Tra tutte le attività aziendali, vengono definite *attività di produzione* tutte le attività che riguardano direttamente o indirettamente la trasformazione delle risorse che entrano (input) in prodotti finiti (output). Tutto ciò che fa riferimento alle attività di produzione fa parte del "Sistema Produttivo".

Si definisce *Sistema di Produzione* un insieme di componenti aggregati ed integrati tra loro attraverso il quale vengono acquisite e combinate delle risorse al fine di trasformarle in prodotti finali, secondo piani e programmi stabiliti [84]. Si possono distinguere in *manufacturing system* – sistemi di produzione di beni – ed in *service-oriented system* -sistemi di produzione di servizi. La differenza sostanziale tra le due tipologie di sistemi è che nel caso della produzione di un bene questo può generare scorte mentre il consumo di un servizio risulta contestuale ed immediato. Infatti i sistemi manifatturieri danno origine a beni, prodotti materiali, che possono essere misurati e conservati; quelli di servizi possono, invece, riguardare sia beni materiali che immateriali: nel primo caso si tratta di servizi che consentono e facilitano il consumo di beni già prodotti e disponibili (servizi di manutenzione, controllo, distribuzione);nel secondo caso, si fa riferimento sia a servizi di pubblica utilità (assistenza, istruzione, sanità, trasporto e informazione), sia a servizi di interesse privato.

Anche se ogni sistema produttivo è rappresentativo di una specifica realtà, è sempre possibile individuare una sua classe di appartenenza. In letteratura, infatti, a seconda delle variabili e delle caratteristiche che ne definiscono la configurazione ed il funzionamento, sono riportate una serie di classificazioni.

La **classificazione a tre assi** o classificazione composita, Figura 1, permette di rappresentare ciascun sistema produttivo come un punto in uno spazio a tre dimensioni:

1. modalità di realizzazione del prodotto;
2. modalità di risposta alla domanda;
3. modalità di realizzazione del volume di produzione.



Figura 33 *Classificazione dei sistemi produttivi secondo i tre assi*

Lo spazio così definito comprende tutti i possibili sistemi produttivi.

La modalità di realizzazione del volume di produzione (asse gestionale) distingue *i sistemi a prodotto singolo, a lotti e a flusso*. Queste tipologie di sistemi si differenziano in base alla ripetitività delle operazioni ed alla continuità del flusso entrante/uscente, intesa come uniformità, rispettivamente, delle materie prime e dei prodotti finiti entranti/uscenti in tempi successivi nei/dai reparti produttivi.

I sistemi a prodotto singolo sono caratterizzati da scarsa o nulla ripetitività delle operazioni e da discontinuità del flusso entrante/uscente; ogni prodotto è diverso da quello precedente e da quello successivo.

I sistemi a lotti sono caratterizzati da una produzione di quantità predeterminate di prodotti denominate, appunto, lotti. La dimensione del lotto viene definita sulla base della domanda, del costo di mantenimento a scorte e dei set up; i cicli produttivi sono in questo caso meno variabili, riguardano prodotti tra loro omogenei e l'ampiezza del mix produttivo è generalmente minore rispetto alla produzione unitaria.

Infine i sistemi a flusso sono, invece, caratterizzati da assoluta ripetitività delle operazioni e da continuità del flusso entrante/uscente.

Le modalità di risposta alla domanda (asse del mercato) distinguono sostanzialmente due casi: la *produzione per il magazzino* e la *produzione su commessa*, singola o ripetitiva. In realtà, seguendo la classificazione di Wortmann, è possibile individuare cinque tipologie di sistemi produttivi che soddisfano in maniera differente la domanda commerciale:

- *Make to Stock (MTS)* – **produzione per magazzino**: la produzione dei componenti e dei prodotti finiti avviene per ripristinare il livello di scorta. I piani aziendali garantiscono che i prodotti siano sempre disponibili all'arrivo dell'ordine dei clienti, e le attività si basano sulla previsione della domanda. In questo caso il tempo concesso dal cliente è nullo: le fasi di progettazione, acquisto, fabbricazione e montaggio sono tutte eseguite in virtù delle previsioni di vendita. Si tratta in genere di beni di valore unitario non troppo elevato e per i quali lo sbocco del mercato è vasto; un esempio tipico sono i prodotti di consumo.
- *Assemble to Order (ATO)* – **produzione mista**: in questo caso i clienti sono disposti ad attendere un tempo sufficiente a coprire le fasi di assemblaggio. Il sistema produttivo risulta, pertanto, articolato in due sezioni disaccoppiate da un magazzino: a monte del magazzino si

realizzano su previsione i componenti di montaggio, a valle del magazzino si assemblano i suddetti componenti in virtù di quelli che sono gli ordini dei clienti. Le fasi di progettazione, acquisti e fabbricazione sono eseguite su previsione, il montaggio su ordine. Si usa questo approccio tipicamente quando si vuole offrire una elevata varietà a partire da un insieme molto più limitato di componenti standard, la cui combinazione viene esplicitata dal cliente al momento dell'ordine, quindi realizzata e consegnata (mobili componibili, gruppi meccanici, etc).

- *Make to Order* (MTO) – **produzione standard per commessa**: in questo caso il tempo di attesa concesso dal cliente è sufficiente a coprire l'intero ciclo di trasformazione; pertanto, tutte le fasi di produzione vengono lanciate dagli ordini dei clienti, solo l'acquisto dei materiali viene gestito su previsione. Le fasi di progettazione e acquisto sono svolte su previsione, le fasi di fabbricazione e montaggio su ordine. Questo tipo di sistema produttivo è tipico di prodotti che fanno parte di una gamma molto ampia, fortemente differenziata al suo interno, ma le cui caratteristiche sono note a priori (vendita su catalogo). Esempi tipici sono macchine utensili, servizi di ristorazione, automobili, elettrodomestici.
- *Purchase to Order* (PTO) - **produzioni personalizzate per commessa**: rispetto al caso precedente, il tempo concesso dal mercato è ancora maggiore ed è tale da permettere di effettuare su ordine anche gli approvvigionamenti. Tipicamente ciò trova utilità per componenti costosi per i quali serve certezza di utilizzarli prontamente.
- *Engineering to Order* (ETO) – **produzioni speciali non ricorrenti**: in questo caso il tempo concesso dal mercato si spinge fino alla fase di progettazione. Tutte le fasi di progettazione, acquisto, fabbricazione e montaggio sono eseguite in virtù di quelle che sono le specifiche richieste del cliente. Su previsione il soggetto produttore deve solo

sviluppare le competenze per poter progettare e industrializzare i prodotti che verranno richiesti dal mercato. È un sistema produttivo tipicamente impiegato per gestire commesse singole, non definite a catalogo, ma per le quali il cliente definisce le specifiche, dopodiché l'azienda procede ad una elaborazione ad hoc che porta alla definizione di un prodotto finito. Esempi tipici di questa categoria di sistemi si possono ritrovare nella costruzione di navi, abiti su misura o edifici.

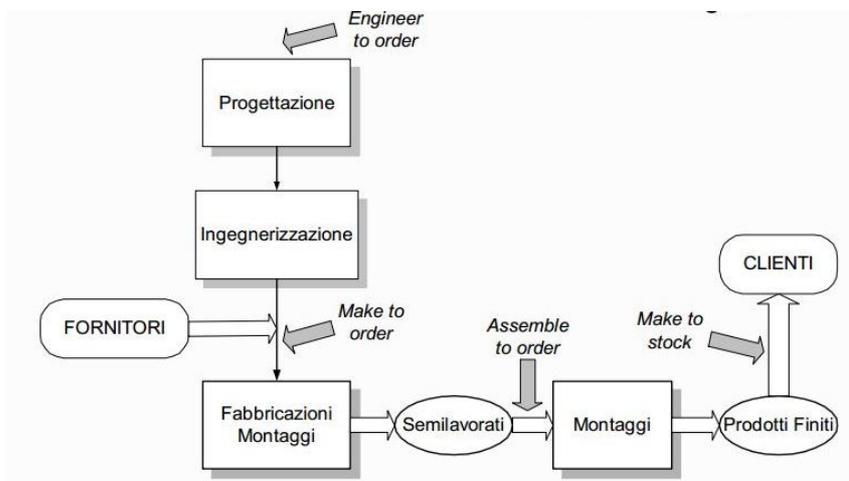


Figura 34 "Punti di Input" relativi agli ordini secondo la classificazione di Wortmann

Infine la modalità di realizzazione del prodotto (asse tecnologico) distingue due casi principali: le *produzioni di processo* e le *produzioni per parti*.

Si parla di produzioni di processo quando i prodotti finali sono ottenuti a partire da una serie di materie prime od elementi iniziali che non possono più essere individuati nel bene finale, perché non più distinguibili o di natura diversa (è il caso ad esempio di prodotti farmaceutici, tessili o di aziende petrolchimiche). Quando, invece, il bene finale risulta costituito da una serie di componenti discreti o parti si parla di processi produttivi per parti (le automobili rappresentano un tipico esempio). A differenza dei primi, caratterizzati da impianti specifici in cui i materiali fluiscono con continuità,

nei sistemi per parti ci sono una serie di macchine che possono svolgere più lavorazioni a seconda delle quali è possibile ottenere prodotti diversi in funzione dei diversi programmi di produzione attuati.

Nelle realtà aziendali convivono spesso più tipi di fabbricazioni. Ciò deriva dal fatto che tutte presentano vantaggi in relazione a certe caratteristiche qualitative e quantitative delle lavorazioni da realizzare (Garetti, 2000).

Sulla base delle caratteristiche di impianto è possibile individuare tre tipologie di sistemi:

- *Job Shop* o produzione per reparti.

I sistemi produttivi di tipo job shop, operano in genere su commessa, ossia realizzano esemplari unici (commessa singola) o un numero limitato di unità (commessa ripetitiva) conformi a predeterminate specifiche. Le macchine sono aggregate per lavorazioni omogenee (reparti con omogeneità tecnologica) e spesso sono utilizzate stazioni di lavoro *general purpose*, maggiormente flessibili, ma meno efficienti. Sono difficili da gestire ma il raggruppamento delle macchine e degli operatori garantisce una flessibilità operativa ed un potenziamento della produttività.

- *Flow Shop* o linee di produzione per prodotto.

Si tratta di sistemi produttivi caratterizzati da elevati volumi di prodotti poco differenziati. Le macchine realizzano una sequenza rigida e prestabilita di lavorazioni e sono, quindi, posizionate secondo la sequenza delle lavorazioni successive. La specificità delle stazioni di lavoro consente il contenimento dei costi unitari di produzione ed un'elevata efficienza. La costanza delle sequenze implica un'elevata semplicità gestionale ma una scarsa flessibilità operativa: i tempi di riattrezzaggio per passare da un prodotto ad un altro sono notevoli ed, inoltre, le fermate delle linee comportano costi significativi in termini di mancata produzione. Questo tipo di sistemi produttivi sono in genere associabili alla produzione ripetitiva e continua.

- *Sistemi a cella*.

La produzione per celle manifatturiere si ha quando è possibile individuare delle famiglie di pezzi con cicli di lavorazione omogenei (secondo i criteri della tecnologia a gruppi, o Group Technology). In questo modo si possono creare gruppi (celle) di macchine - questa volta di natura diversa - adibite alle lavorazioni necessarie per ottenere l'intera famiglia di pezzi. Si trovano in una posizione intermedia tra le prime due tipologie di sistemi, infatti, sono caratterizzati da una produzione ad elevata varietà e da una variabilità piuttosto contenuta, Figura 3.

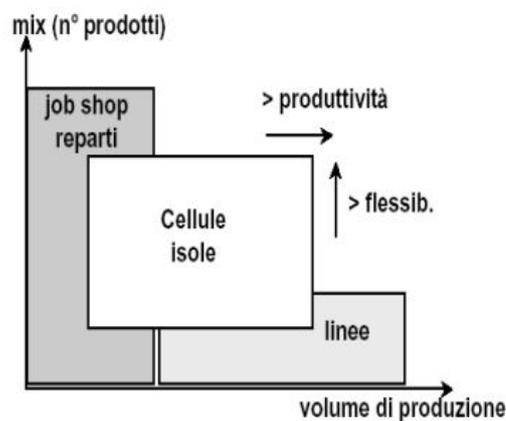


Figura 35 *Job Shop - Cell Manufacturing - Flow Shop*

2.3 Programmazione della Produzione

Per gestire in maniera efficace ed efficiente un sistema di produzione è necessario razionalizzare l'uso delle risorse disponibili, attraverso lo sviluppo di opportune politiche di pianificazione, programmazione e gestione [63].

Tali politiche puntano a definire gli obiettivi, nonché le scelte e le azioni da implementare entro un certo tempo considerando la presenza di eventuali vincoli interni o esterni al sistema. I vincoli esterni sono imposti dal mercato e sono, in generale, il risultato di considerazioni di tipo macroeconomico quali ad esempio l'andamento dei prezzi, della domanda e dell'offerta. I vincoli interni possono riguardare invece le condizioni della produzione, la

disponibilità di risorse (risorse finanziarie, materie prime, manodopera) o le modalità di produzione.

Pianificare, programmare e gestire significa decidere cosa, quanto e come produrre e, dunque, i vincoli esterni incidono sulla definizione di cosa produrre, i vincoli interni su come produrre, mentre quanto produrre viene definito sia dai vincoli interni (capacità produttiva di un certo sistema) sia da quelli esterni (domanda del mercato).

Non è più sufficiente produrre beni di qualità richiesti dal mercato, ma è sempre più importante perseguire la puntualità nelle consegne, la riduzione dei lead time e dei WIP, massimizzando l'utilizzo delle risorse. I processi di pianificazione, programmazione e controllo della produzione svolgono, in questo contesto, un ruolo centrale: a loro compete, infatti, la gestione delle *Operations* coordinando le informazioni che guidano il flusso fisico dei materiali lungo tutta la catena di acquisti, produzione e distribuzione. Si tratta, di processi strettamente legati alla tipologia di sistema produttivo, alle esigenze del mercato, al rapporto con i fornitori, interessano un gran numero di parametri e richiedono la formulazione di ipotesi differenti a seconda del sistema reale preso in esame.

Con il termine inglese “*planning*” vengono indicate tutte le attività di pianificazione e di programmazione senza alcuna distinzione. A seconda, invece, dell'orizzonte temporale di riferimento e dell'aggregazione dei dati si distinguono tre **livelli di pianificazione**.

1. Livello *strategico*: viene realizzata la pianificazione strategica (3-5 anni) ed aggregata; vengono prese decisioni a grandi linee sulla base di informazioni molto aggregate.
2. Livello *tattico*: viene eseguita la pianificazione principale (3-6 mesi) caratterizzata da un orizzonte di riferimento e da un'aggregazione di dati intermedi.
3. Livello *operativo*: prende forma la vera e propria programmazione operativa relativa, ad esempio, ad un mese di produzione o anche una

settimana in cui i dati e le informazioni necessarie risultano essere molto dettagliate.

In Tabella 1 sono indicati alcuni dei problemi decisionali tipici dei diversi livelli di pianificazione.

Tabella 13 *Livelli di Pianificazione e Problemi decisionali*

| Livello di pianificazione | Problemi decisionali |
|----------------------------------|---|
| Lungo termine | Pianificazione degli investimenti, costruzione o apertura degli stabilimenti, impianti, servizi, interventi strutturali sulla capacità produttiva e sui processi produttivi, riassetto strutturale del sistema logistico, ricerca e sviluppo di prodotti e servizi innovativi |
| Medio termine | Impiego ottimale delle risorse umane, tecnologiche e finanziarie, politiche di acquisizione e gestione dei materiali, gestione delle scorte |
| Breve termine | Schedulazione dei processi produttivi. Allocazione delle risorse ai processi, gestione dei flussi dei materiali, distribuzione di beni e servizi |

La pianificazione è un processo costituito da un insieme di fasi mediante le quali si ottiene la trasformazione di un input principale, rappresentato dalla domanda del mercato (espressa in previsioni o ordini), in una serie di output come ordini di produzione, l'assegnazione di ordini di produzione alle singole unità produttive, la pianificazione del fabbisogno di materiali, nonché il sequenziamento ovvero la tempificazione delle lavorazioni sulle singole macchine. In particolare si individuano cinque fasi sequenziali tra loro in cui l'output della fase precedente diventa l'input della successiva:

- **Pianificazione strategica**

In questa fase l'azienda viene vista come una "black box" nella quale entra materia prima ed esce prodotto finito. Viene stabilito quanto produrre e con quali risorse complessive. Non vengono presi in considerazione vincoli critici ed interni (come ad esempio la presenza di

una macchina “collo di bottiglia”), ma solo delle limitazioni di massima relative, ad esempio, al mercato di riferimento.

L’output è rappresentato dal *Budget di Produzione* attraverso il quale vengono quantificate economicamente le attività di pertinenza delle Operations: costi da sostenere per i volumi di produzione programmati e gli investimenti da realizzare relativamente all’area di produzione.

- **Programmazione aggregata**

Discende direttamente da quella strategica ed ha il solo obiettivo di tradurre il budget, quindi i costi, in volume effettivo di produzione mantenendo un alto livello di aggregazione (si parla di famiglie di prodotti). Viene definito il *Piano Aggregato di Produzione* che ha lo scopo di rendere tra loro coerenti la capacità produttiva necessaria e quella disponibile. Quest’ultima potrebbe, infatti, non essere adeguata a coprire le esigenze del mercato, a causa, ad esempio, di un’errata valutazione della previsione della domanda. È in questa fase, quindi, che l’Operations Manager, attraverso una serie di microazioni a disposizione (modifica della forza lavoro, straordinari, consegne ritardate e stock out) può far riconciliare capacità produttiva disponibile e necessaria.

- **Programmazione principale**

Viene stabilito quanto produrre per ciascun prodotto. Il piano aggregato di produzione viene disaggregato e spacchettato per formulare il *Piano Principale di Produzione* (MPS), caratterizzato da un maggior dettaglio, sia sotto il profilo degli oggetti considerati, sia dell’orizzonte temporale di riferimento (più breve, 3-6 mesi). Rappresenta un input fondamentale per la realizzazione dell’MRP ovvero il piano del fabbisogno dei materiali necessari alla produzione (*Material Requirement Planning*). Quest’ultimo è un piano il cui scopo primario è fornire il pezzo giusto, nella quantità necessaria, al momento adatto per poter massimizzare il livello di

servizio, minimizzare gli immobilizzi in scorte e massimizzare l'efficienza del sistema produttivo.

- **Programmazione operativa**
- **Controllo avanzamento**

Nelle ultime due fasi vengono applicati tutti gli algoritmi che permettono di allocare i job (lavori) ai centri produttivi, ovvero stabilire quali componenti realizzare e in quale sequenza, e di controllarne, poi, l'avanzamento. Attività che verranno analizzate e discusse nei paragrafi successivi.

Pertanto, ciò che contraddistingue le fasi di pianificazione sono essenzialmente lo scopo, l'orizzonte di riferimento ed il livello di dettaglio delle informazioni [63].

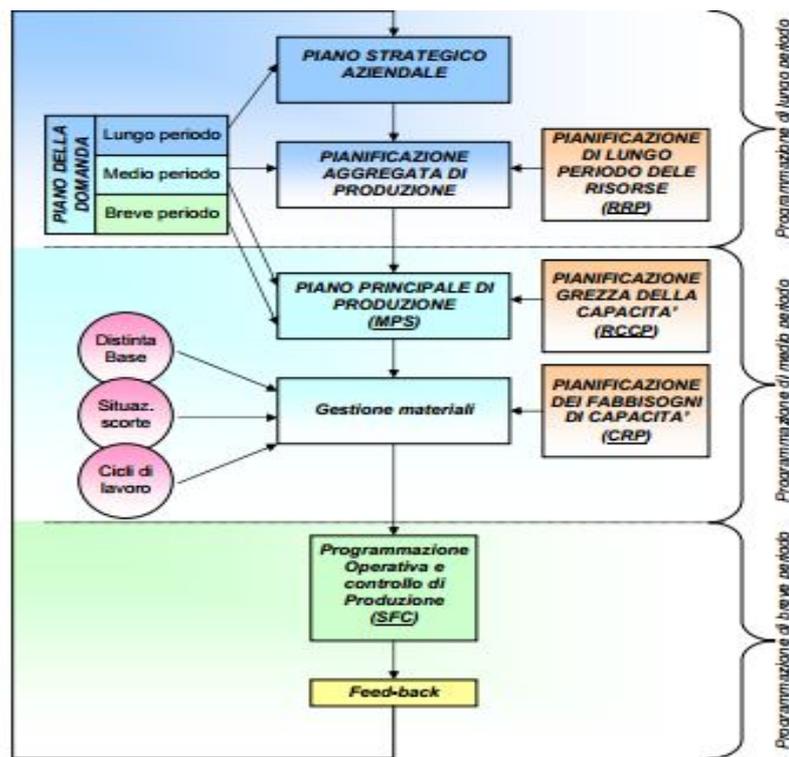


Figura 36 Le fasi della Pianificazione

2.4 La Schedulazione della Produzione

Per poter gestire un sistema di produzione in maniera efficiente ed efficace e consentire così che i prodotti siano realizzati nei tempi giusti, nelle giuste quantità ed al giusto costo sono presenti in azienda una serie di processi decisionali che fanno capo al processo di programmazione della produzione: è in questo contesto che si inserisce lo *scheduling di produzione*. [64] Infatti lo sviluppo di modelli e di algoritmi di scheduling è fortemente legato alle problematiche relative alla pianificazione ed alla programmazione della produzione. In particolare è un'attività che si va ad inserire a valle della programmazione aggregata, della pianificazione dei fabbisogni dei materiali e dei requisiti di capacità, allo scopo di tradurre gli ordini di produzioni in ordini di produzione operativi.

Un processo produttivo si compone di diverse operazioni per effettuare le quali è necessario l'impiego di risorse come manodopera o macchinari. Si pone, pertanto, il problema di allocare le operazioni alle risorse disponibili - *loading*, di determinare la sequenza secondo la quale le operazioni vanno eseguite - *sequencing*, ed, infine, definire, per ciascuna operazione, una schedulazione, ovvero l'individuazione degli istanti di inizio e di completamento di ciascuna operazione (*scheduling*). In particolare, dunque, il termine *scheduling* è usato per indicare la tempificazione secondo la quale le operazioni devono essere realizzate nel corso del processo produttivo, corredate di quelle che sono le date di inizio e di fine, mentre con *schedulazione* ci si riferisce al processo che conduce a tale risultato. [63]

Diverse sono le applicazioni in cui si fa ricorso a problemi di scheduling: la disciplina di accesso di utenti a un servizio, l'assegnazione di operazioni a stazioni di lavoro durante il processo di trasformazione di un prodotto, l'attribuzione di aule a un insieme di classi, la regolazione degli accessi di veicoli ad un incrocio attraverso il controllo semaforico, l'assegnazione di

binari a convogli ferroviari, l'utilizzazione di piste o gates da parte di aerei in arrivo o in partenza da un aeroporto.

Lo scheduling riveste, dunque, un ruolo fondamentale in molti settori da quello produttivo, alla distribuzione, ai trasporti, nel settore informatico nonché in tutti quegli ambiti nei quali una migliore gestione delle risorse può portare a una riduzione dei costi.

È un processo complesso e articolato reso tale anche per via della presenza di vincoli relativi alle attività da svolgere ed alle risorse a disposizione, i cosiddetti *constraint*: possono ad esempio esistere relazioni di precedenza tra le operazioni, vincoli sui tempi di realizzazione o sulle modalità di utilizzo di una risorsa, sui tempi di disponibilità delle risorse, sulla continuità nell'uso delle risorse, sui tempi di attesa per effettuare una data operazione.

I problemi di scheduling possono essere rappresentati mediante opportuni modelli, la cui complessità dipende dalle risorse a disposizione, dalla tipologia dei vincoli presenti, dalla scelta degli obiettivi da perseguire.

2.4.1 Definizioni ed Elementi Fondamentali in un Problema Di Scheduling

Lo scheduling consiste nel determinare la distribuzione e il sequenziamento ottimale delle attività/operazioni che devono essere eseguite su una o più risorse rispettando i vincoli imposti. All'interno dei problemi di scheduling è possibile identificare degli elementi fondamentali. Si definiscono:

- *Task* l'operazione elementare di lavorazione per la cui realizzazione è necessaria una macchina.
- *Job* l'insieme parzialmente ordinato di task che descrivono una lavorazione complessa.
- *Routing* il ciclo di lavorazione (o ciclo tecnologico) del job: l'insieme ordinato di operazioni che devono essere effettuate per la lavorazione

del job, con le macchine che le devono eseguire e con i relativi tempi di occupazione.

- *Macchina* una risorsa che può eseguire al massimo una attività (task) alla volta e può essere indicata anche con i termini *processori* o *stazione di lavoro*. Nel caso di più macchine si possono avere diverse disposizioni quali macchina singola, macchine in parallelo, job shop, flow shop, flexible job shop, open shop.

Una macchina si definisce *dedicata* se può svolgere solo determinate operazione oppure *parallela* se può svolgere indifferentemente tutte le operazioni. Nel caso di macchine parallele si parla, ancora, di *macchine identiche* se processano le operazioni con la stessa velocità, *macchine uniformi* se la velocità delle macchine è differente ma costante ed indipendente dalle operazioni ed infine *incorrelate* se la velocità dipende dalle operazioni da realizzare.

Indicando con m ed n rispettivamente il numero di macchine e di job si possono ancora identificare i seguenti parametri:

- Tempo di processamento o durata, *processing time*, p_{ij} tempo deterministico che il job j richiede alla macchina i per essere eseguito, e se tale tempo è indipendente dalla macchina si indica semplicemente.
- Tempo di rilascio, *release date*, r_j che indica l'istante di tempo rispetto al tempo iniziale, prima del quale non è possibile iniziare l'esecuzione del job j .
- Tempo di consegna, *due date*, d_j che indica l'istante di tempo rispetto al tempo iniziale, entro il quale l'esecuzione del job j dovrebbe essere terminata, in genere una violazione della due date comporta dei costi quali penali o perdita di fiducia da parte del cliente. Nel caso la due

date debba essere necessariamente rispettata, essa prende il nome di *deadline*.

- *Peso*, w_j che rappresenta l'importanza relativa del job j rispetto agli altri e può rappresentare ad esempio il costo di mantenimento del job nel sistema (ad esempio costo di immagazzinamento). È, dunque, un indice di priorità del job in questione rispetto agli altri.
- *Tempo di completamento* C_j indica il tempo, rispetto a un tempo iniziale, necessario affinché il job j sia completato sulla macchina i . Se il pedice i viene omesso ci si riferisce all'intervallo di tempo necessario affinché il job j concluda la sua lavorazione sull'ultima macchina in cui doveva essere processato.
- *Scorrimento (slack)* $sl_j = d_j - r_j - p_j$. Scorrimento possibile per l'esecuzione dell'operazione.
- *Lateness* $L_j = C_j - d_j$, rappresenta la differenza tra il tempo di completamento e il tempo di consegna del job j . Se tale differenza è positiva, la lateness indica un ritardo, se negativa, un anticipo rispetto al tempo di consegna.
- *Tardiness* T_j , il tardiness di un job j è definito come $T_j = \max\{0, L_j\}$ è dunque una quantità sempre positiva o nulla.
- *Earliness* E_j , definito come $E_j = \min\{0, L_j\}$ ed è uguale alla Lateness se il job è in anticipo ed è nullo se invece è in ritardo.

Una soluzione di un problema di scheduling viene rappresentata utilizzando i Diagrammi di Gantt, che in ascissa riportano il tempo mentre le ordinate, vengono suddivise sulla base del numero delle macchine; ciascuna operazione viene poi rappresentata da un rettangolo di base pari al tempo di processamento.

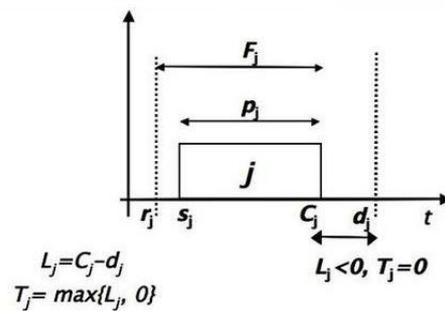


Figura 37 *Rappresentazione della schedulazione di un'operazione*

Risolvere un problema di scheduling significa determinare la tempificazione delle operazioni su ogni macchina nel rispetto dei seguenti vincoli:

- ogni macchina deve effettuare al più una operazione alla volta e, viceversa ogni operazione deve essere eseguita al massimo da una macchina alla volta;
- ogni operazione deve essere eseguita all'interno dell'intervallo $[r_j, d_j]$;
- tutte le operazioni devono essere eseguite nel rispetto dei vincoli tecnologici e sulla disponibilità delle risorse.

I vincoli tecnologici possono essere di vario tipo: si parla di *scheduling preemptive* se l'esecuzione di un'operazione può essere interrotta per poi essere ripresa in tempi successivi; in caso contrario di *scheduling non preemptive*. In alcuni casi si possono verificare vincoli di precedenza tra le operazioni, infatti se per iniziare l'esecuzione di u occorre prima completare v allora si avrà $u < v$ e le operazioni si diranno in questo caso *dependenti*, altrimenti *indipendenti*.

Come tutti i problemi di ottimizzazione, un problema di scheduling è caratterizzato da una *funzione obiettivo*. In generale si possono distinguere tre tipologie di obiettivo:

1. obiettivi orientati all'**efficienza** dell'utilizzazione delle macchine;
2. obiettivi orientati all'**utenza** e quindi alla capacità di soddisfare la domanda;
3. obiettivi orientati alle **scadenze**.

| | | |
|---|---|--------------------------|
| 1 | Tempo di completamento massimo (makespan) | $C_{\max} = \max\{C_j\}$ |
| 2 | Somma pesata tempi di completamento | $\sum w_j C_j$ |
| 3 | Somma pesata dei tempi di flusso | $\sum w_j F_j$ |
| 4 | Somma pesata dei ritardi | $\sum w_j L_j$ |
| 5 | Ritardo massimo | $L_{\max} = \max\{L_j\}$ |
| 6 | Massima tardiness | $T_{\max} = \max\{T_j\}$ |
| 7 | Numero di operazioni in ritardo | $\sum \delta(L_j)$ |
| 8 | Numero pesato di operazioni in ritardo | $\sum w_j \delta(L_j)$ |
| 9 | Somma pesata delle tardiness | $\sum w_j T_j$ |

Figura 38 Possibili obiettivi da minimizzare

Gli obiettivi più importanti sono il makespan (C_{\max}), la somma dei tempi di completamento ($\sum C_j$) e il ritardo massimo (L_{\max}). Inoltre, un obiettivo è *regolare* se il suo valore non può decrescere con l'aumento del tempo di processamento di una qualsiasi operazione.

2.4.2 Classificazione dei Problemi di Scheduling

I problemi di scheduling si possono classificare sulla base di tre parametri:

- caratteristiche delle operazioni e delle macchine.

In virtù delle caratteristiche delle operazioni, è possibile distinguere tra *problemi a fase unica*, in cui tutte le lavorazioni richiedono una sola operazione e, pertanto, si parla indifferentemente di job o task, che possono essere eseguiti su una sola macchina o più macchine e *problemi multifase*, in cui ogni job richiede che si effettuino operazioni su macchine dedicate tra le quali esistono vincoli di precedenza. È possibile distinguere tra problemi Flow Shop nei quali le operazioni sono eseguite dallo stesso insieme di macchine e con lo stesso ordine di precedenza e problemi Job Shop in cui ciascun job può presentare caratteristiche diverse.

- Il tipo e la natura dei vincoli.

Si distinguono i *problemi dinamici*, quando le operazioni si rendono disponibili nel tempo in modo noto apriori ($r_j > 0$ noti apriori), e *problemi statici*, quando le operazioni sono tutte disponibili all'istante di inizio

della schedulazioni ($r_j=0$ per ogni operazione). Possono esistere vincoli sul tempo di fine al più tardi, sulla possibilità di scheduling con interruzione, sull'esistenza di relazioni di precedenza tra le operazioni, oltre a vincoli generali sul processo di schedulazione come, ad esempio, l'esistenza di buffer di capacità limitata.

- Tipologia delle informazioni a disposizione.

A seconda della tipologia di informazioni riguardo i parametri associati alle operazioni (tempi di processamento, tempi di rilascio, scadenze) si distinguono i *problemi deterministici* e quelli *stocastici*.

Un metodo standard per la classificazione di un problema di scheduling è quello della notazione di Graham in base alla quale un problema viene indicato specificando tre tipologie di informazioni:

$$\alpha | \beta | \gamma$$

dove:

α → indica le informazioni relative alle macchine ed alle fasi

β → indica le informazioni relative alla presenza di vincoli

γ → il criterio di ottimizzazione

Ad esempio una simbologia del tipo: *Pm/preemptive/Cmax* indica un problema su macchine parallele con possibilità di interruzione orientato alla minimizzazione del makespan.

Una soluzione di un problema di scheduling può essere: **senza ritardo** se non si verifica mai che una macchina, pur potendo effettuare un'operazione, resti inattiva; **attiva** se, per anticipare il completamento di una qualsiasi operazione, si provoca un ritardo nel completamento di altre operazioni ed infine **non attiva** se, appunto, non è attiva. Inoltre una soluzione senza ritardo è anche attiva ed una soluzione attiva può essere con ritardo. La soluzione ottima di un problema di scheduling è una soluzione attiva ma non necessariamente senza ritardo.

2.4.3 Metodi di Risoluzione

I primi problemi di scheduling studiati dai ricercatori negli anni '50 riguardarono l'ottimizzazione della funzione obiettivo makespan e, nel tempo, sono stati proposti numerosi algoritmi di soluzione sempre più efficienti. Col passare degli anni, i problemi affrontati sono diventati più complessi e i ricercatori non sempre sono stati in grado di sviluppare algoritmi efficienti per la loro trattazione. In seguito, con l'avvento della teoria della complessità computazionale, si è visto che molti di questi problemi erano di difficile risoluzione e negli anni '70 alcuni di questi furono classificati come problemi NP-hard (non deterministic polynomial-time hard); la loro complessità ha spinto verso lo sviluppo di algoritmi euristici che forniscono una soluzione ammissibile quanto più possibile prossima a quella ottimale. Infatti il calcolo della soluzione ottima nei problemi di classe NP-hard può essere computazionalmente molto onerosa, inoltre, possibili approssimazioni nei parametri del modello renderebbero inutile tale sforzo. È questo il motivo per cui, nella pratica, si accettano soluzioni "buone" e non "ottime".

Un problema di scheduling può essere, quindi, risolto con metodi esatti o con metodi euristici in funzione della sua complessità.

Un metodo costruttivo molto utilizzato per risolvere problemi di scheduling è il **metodo delle liste di priorità** (dispatching rules). Si tratta di un metodo costruttivo che, in fase di inizializzazione, ordina le operazioni sulla base di regole o indici di priorità (*dispatching rules*) e, quindi, costruisce la soluzione assegnandole, secondo quest'ordine, alle macchine disponibili. Le regole di priorità sono statiche se il valore dell'indice non dipende dal tempo di inizio dell'operazione, dinamiche altrimenti.

È possibile esaminare alcune delle regole di priorità a cui si può ricorrere per scegliere la sequenza di lavori più opportuna:

- *FIFO* - First In First Out: il primo lavoro a essere eseguito è quello arrivato per primo e che, quindi, attende da più tempo; dunque le lavorazioni vengono eseguite secondo l'ordine con cui arrivano al reparto.
- *LIFO* - Last In First Out: concettualmente opposta alla precedente perché prevede di processare per prima i lavori giunti per ultimi e che, dunque, attendono da meno tempo.
- *EDD* - Earliest Due Date: regola, questa, basata sulla data di consegna più vicina, che prevede di processare per primo gli ordini con data di consegna più prossima.
- *SPT* - Shortest Processing Time: si esegue per prima l'operazione che richiede minor tempo per essere terminata. Il vantaggio di questa regola è quello di smaltire rapidamente un numero elevato di piccoli lavori dando così l'impressione che il sistema presenta una elevata produttività, perché le code diminuiscono ma, in realtà, l'impiego di tale regola produce una temporanea riduzione della produttività dovuta ai frequenti setup. Proseguendo per un tempo troppo lungo secondo tale regola, si rischia di non eseguire quei lavori con un tempo di processamento troppo lungo, spesso, pertanto, in tali condizioni si addotta una regola duale.
- *LPT* - Longest Processing Time: richiede di processare per prima l'operazione che richiede maggior tempo per essere conclusa. Il vantaggio che si ricava dall'applicazione di tale regola è la riduzione dei tempi di setup e, quindi, si assiste a un aumento temporaneo dell'efficienza dell'utilizzo dei macchinari. Anche in questo caso, non si può perseguire troppo nell'applicazione di tale regola, altrimenti i lavori con tempo di processamento minore, non verrebbero processati. Si ricorre, dunque, ad una regola duale per smaltirli.
- *LST* - Least Slack Time: secondo tale criterio, si calcola per ciascun ordine la differenza tra la data di consegna ed il tempo di lavoro

residuo per il completamento, comprendente il tempo di lavorazione e il tempo di set up. La quantità così calcolata prende il nome di Slack Time e si proseguirà col processare per prima il lavoro con tempo di slittamento più piccolo:

$$ST_j = DD_j - PD - TR_j$$

Una variante di questa regola prevede di calcolare il tempo di slittamento per operazione residua, dividendo lo slack time per il numero di operazioni da svolgere per completare l'ordine:

$$ST_{operation} = \frac{DD_j - PD - TR_j}{N}$$

dove N è il numero di operazioni residue.

- *CR* - Critical Ratio: regola basata sul calcolo del rapporto critico, ovvero il rapporto tra il tempo mancante alla consegna e il lead time residuo di lavorazione. Prevede nel processare prima i lavori con rapporto critico più basso. In particolare, un $CR > 1$ indica che il lavoro è in anticipo, un $CR < 1$ indica che il lavoro è in ritardo, e un $CR = 1$ indica che il lavoro sta rispettando lo scheduling

$$CR_j = \frac{DD_j - DP}{MLTR_j}$$

Dove $MLTR_j$ indica il Manufacturing Lead Time Remaining che indica il lead time residuo di lavorazione.

Esistono poi delle regole che considerano la situazione dell'impianto, come:

- NINQ (Number In Next Queue) con cui si assegna priorità al job che ha la lavorazione successiva sulla macchina con il minor numero di job in coda.
- WINQ (Work In Next Queue), con cui si assegna priorità al job che ha la successiva lavorazione sulla macchina con il minor carico di lavoro accodato.

Infine ulteriori regole considerano la data di consegna:

- EDD (Earliest Due Date), con cui si assegna priorità al job con la data di consegna più vicina
- OPDD (Operation Due Date), con la quale viene schedulato il job con l'operation due date più vicina; quest'ultima ottenuta dividendo l'intervallo di tempo tra la data di consegna del job e la sua data di ingresso nel sistema in tanti intervalli quante sono le operazioni.

Per alcuni problemi, scelta opportunamente la regola di priorità, il metodo ottiene la soluzione ottima; la scelta dipende dal tipo di problema e soprattutto dall'obiettivo che si vuole conseguire. L'applicazione di tale procedura è piuttosto semplice e richiede dei tempi di calcolo soddisfacenti.

Una metodologia più sofisticata è rappresentata dall'approccio del collo di bottiglia, *bottleneck*, comunemente applicata al caso di più macchine, e in particolare ai problemi multifase. È presente una macchina più importante delle altre che assume la funzione di collo di bottiglia nel processo di schedulazione. La maggiore importanza di tale risorsa può essere dovuta, ad esempio, alla particolare operazione che essa svolge ed ai tempi di processamento più elevati. In tal caso, la procedura prevede di affrontare inizialmente la schedulazione della macchina collo di bottiglia come un problema a macchina singola. A partire dalla soluzione così determinata, si ricavano le schedulazioni delle altre macchine considerando eventualmente la presenza di vincoli di precedenza rispetto all'operazione eseguita sulla macchina bottleneck.

Da un punto di vista matematico, gli algoritmi costruttivi, individuano iterativamente la soluzione definendo a ogni passo, il valore di una o più variabili decisionali. Essi sono anche detti *greedy*, "affamato", "avid", dato che, ad ogni iterazione viene scelto l'elemento che a quel passo, risulta più conveniente. È comune, infatti, che si verifichi che le ultime iterazioni risultino inefficienti dal momento che le possibilità di scelta risultano molto ridotte. Gli algoritmi migliorativi, di contro, partono da una soluzione del problema, ottenuta attraverso un algoritmo costruttivo, e cercano di

modificarla via via con l'obiettivo di ottenerne una migliore. Definiscono una mossa che consente di individuare l'intorno della soluzione corrente all'interno della quale scegliere la soluzione migliore. Sono per questo anche definiti "algoritmi di ricerca locale" dal momento che dal punto di vista matematico, si basano sull'analisi dell'intorno della soluzione corrente. Se si indica con Ω l'insieme delle soluzioni ammissibili, con $S \in \Omega$ una di queste soluzioni, e con $N(S) \subseteq \Omega$ un intorno della soluzione di S . Si definisce mossa un'operazione che a partire da S , consente di generare un $N(S)$ modificando una o più caratteristiche della soluzione corrente, ovvero all'interno dell'intorno della soluzione corrente è possibile scegliere una soluzione migliore secondo un predefinito criterio di selezione.

Tipicamente una procedura migliorativa può essere implementata attraverso un eventuale scambio tra le operazioni assegnate a una stessa macchina o a macchine diverse.

Gli algoritmi di ricerca locale, quindi, convergono in corrispondenza del primo minimo locale individuato. Per superare questo limite, sono state individuate e sviluppate tecniche definite "*meta euristiche*" perché guidano tecniche di ricerca locale allo scopo di superare la convergenza verso minimi locali. Alcuni di questi algoritmi sono anche detti "naturali" perché rappresentano la traduzione algoritmica di fenomeni di evoluzione naturale.

Le tecniche più utilizzate sono la *Tabu Search*, gli *Algoritmi Genetici* e la *Simulated Annealing*. [63]

2.5 La Manutenzione

Gli ultimi settanta anni sono stati caratterizzati dallo sviluppo di numerose metodologie rivolte al miglioramento dei sistemi produttivi aziendali, in generale, con l'obiettivo comune del raggiungimento della qualità intesa come soddisfacimento del cliente.

Ognuna di queste metodologie pone l'accento su un aspetto preciso o su di uno strumento produttivo specifico e, spesso, accade che vengono per questo utilizzate insieme ed integrate tra di loro (come ad esempio la *Lean Production* e la *Six Sixma* che hanno portato alla nascita della *Lean Six Sigma*).

Il concetto di qualità ha subito nel tempo un notevole sviluppo passando dal controllo del prodotto, a valle del processo produttivo, al controllo del processo, attraverso, ad esempio, le carte di controllo, alla garanzia di qualità, volta ad assicurare la qualità del prodotto attraverso norme e standard specifici; fino a giungere alla gestione della qualità negli anni '90. La qualità non è più solo qualcosa che deve essere garantita dall'azienda, ma deve essere gestita in modo da permettere il massimo soddisfacimento del cliente. Sono nati così concetti come la *Total Quality Management*, *Total Productive Maintenance* e *World Class Manufacturing*: la qualità deve essere totale, deve coinvolgere tutte le persone e le funzioni aziendali e per essere ottenuta ha bisogno di una leadership coinvolta e disposta ad investire nelle risorse necessarie. In particolare la *World Class Manufacturing* si differenzia dalle altre metodologie, in essa integrate, perché alla base della scelta delle strategie e degli impianti "critici" vi è il cosiddetto *Cost Deployment*. Ciò significa che il gruppo di lavoro affronta le problematiche, siano esse manutentive, logistiche, qualitative, di sicurezza ed organizzative sulla base della loro incidenza economica. Le attività di tutti i team sono orientate alla realizzazione di progetti i cui obiettivi sono: zero difetti, zero guasti, zero sprechi e zero magazzino, finalizzate ad una generale riduzione dei costi dello stabilimento.

È in questo contesto che la manutenzione ha acquisito sempre più importanza assumendo un ruolo centrale, perché non è più vista come un evento occasionale, ma come un'attività complessa che ha bisogno di un'opportuna preparazione e programmazione. La tesi, come accennato precedentemente, ha voluto mettere in evidenza lo stretto legame tra manutenzione e

produzione: è alla produzione, infatti, che sono riconducibili la maggior parte delle cause di guasto e dei mal funzionamenti.

La **manutenzione** industriale può essere definita, secondo le norme UNI 9910 poi UNI 10147, come l'insieme di tutte le azioni tecniche ed amministrative, incluse le azioni di supervisione, volte a mantenere o a riportare un'entità in uno stato in cui possa eseguire la funzione richiesta (infatti c'è sempre una performance a cui il sistema deve tendere e che la manutenzione deve aiutare a raggiungere). La successiva norma UNI EN 13306 del 2003 definisce, invece, la manutenzione come la "combinazione di tutte le azioni tecniche, amministrative e gestionali, previste durante il ciclo di vita di un'entità, destinate a mantenerla o riportarla in uno stato in cui possa eseguire la funzione richiesta". Nella sua accezione tradizionale, la manutenzione non era altro che il ripristino del mal funzionamento per riportarlo nello stato di corretto funzionamento. Oggi, invece, sono molto più importanti le attività volte a mantenere, nel tempo, il corretto stato di salute.

Per descrivere compiutamente e approfonditamente le politiche manutentive, è necessario introdurre alcune definizioni e alcuni parametri che derivano dalla "Teoria dell'affidabilità". La disciplina nota con il nome di affidabilità è stata sviluppata con lo scopo di fornire metodi per valutare se un prodotto o un servizio sarà funzionante per la durata in cui l'utilizzatore lo richiederà. Questi metodi consistono in tecniche per determinare cosa potrebbe non funzionare, come si può prevenire il guasto e, nel caso in cui il guasto si verifichi, quali sono gli interventi più adatti a ripristinare rapidamente il funzionamento e limitare le conseguenze.

Si definisce **avaria** lo stato in cui un'entità (ad esempio una macchina) non è più in grado di svolgere correttamente la funzione richiesta. Si definisce, invece, **guasto** l'evento che determina il passaggio dallo stato di corretto funzionamento a quello di avaria. Occorre precisare che la condizione di guasto si riferisce in generale al solo dispositivo preso in esame: se tale

dispositivo è inserito in un sistema più complesso, il suo guasto può anche non causare il guasto dell'intero sistema, pur avendo effetti negativi sulla sua affidabilità.

Per misurare l'affidabilità di un sistema o di un componente non possiamo, quindi, prescindere da quella che è la **funzione richiesta**, dalle **condizioni di funzionamento** e dal **tempo di funzionamento**. Concetti che, insieme, definiscono chiaramente (senza possibilità di equivoco) un evento di cui possiamo calcolarne la probabilità definita **R= Reliability**: la probabilità che la durata di vita di un sistema sia maggiore della durata di missione, ovvero del tempo prefissato che noi abbiamo definito. Pertanto, l'**affidabilità** è la probabilità che la durata di vita del sistema sia maggiore del tempo di missione (definito a priori):

$$R = \Pr \{T > t\}$$

Con

T = durata di vita (variabile aleatoria)

t = durata di missione

Essendo una probabilità è chiaro che: $0 \leq R \leq 1$

L'insieme di tutti i possibili risultati e, quindi, lo spazio campione è partizionabile in due eventi tra loro incompatibili, ovvero mutuamente esclusivi:

| | |
|--|--|
| IL DISPOSITIVO FUNZIONA ALMENO FINO A t | IL DISPOSITIVO SI GUASTA PRIMA DI t |
|--|--|

dove t è un qualunque valore che può essere fissato

↓

La probabilità che si verifichi questo primo evento è l'**AFFIDABILITA'** → **R**

↓

La probabilità che si verifichi questo secondo evento è l'**INAFFIDABILITÀ** → **F**

Con **F= 1-R**

Fin'ora sia l'affidabilità che l'inaffidabilità sono stati considerati come dei concetti legati ad un prefissato istante di tempo, ma riferiti a più istanti di tempo, ovvero valutati al variare del tempo t , $\mathbf{R}(t)$ ed $\mathbf{F}(t)$ si definiscono rispettivamente **funzione di affidabilità** e **funzione di inaffidabilità**. In particolare:

$\int_0^{\infty} f(t) dt = 1 \rightarrow$ la densità di probabilità di guasto, $f(t)$, è tale che se la probabilità infinitesima che l'elemento si rompa al tempo t o in un suo intorno infinitesimo dt , sia proprio $f(t)dt$.

$\mathbf{F}(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau \rightarrow$ probabilità che l'elemento, funzionante all'istante iniziale, si guasti nel tempo t

$\mathbf{R}(t) = \int_0^{\infty} f(\tau) d\tau \rightarrow$ probabilità di sopravvivenza al tempo t

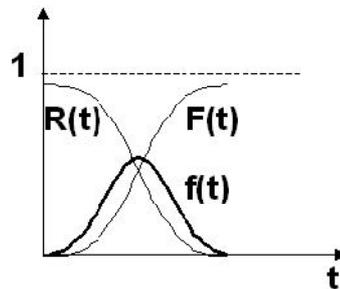


Figura 39 $R(t) - F(t) - f(t)$

Il **tasso di guasto** o hazard function, $\lambda(t)$ è il parametro più usato per caratterizzare l'affidabilità. Rappresenta la probabilità che un componente, funzionante all'istante t , si guasti nell'intervallo $[t, t + \Delta t]$ ed è una grandezza puntuale. È necessario, però, distinguere tra componenti:

- *riparabili*: soggetti a cicli di funzionamento, rottura, funzionamento; in questo caso $\lambda(t)$ corrisponde alla frequenza con cui si guasta un'entità in un determinato intervallo temporale, ovvero $\lambda(t) \equiv f(t)$.
- *Non riparabili*: soggetti a sostituzione in seguito a un guasto. Componenti particolarmente critici da gestire. Il tasso di guasto coincide sempre con la funzione densità di guasto, ma in questo caso

bisogna accertarsi che il componente sia stato funzionante fino al momento dell'osservazione. In altre parole per capire qual è la probabilità che un componente non riparabile si guasti in un intervallo $[t, t + \Delta t]$, bisogna assicurarsi che sia arrivato sano fino al tempo t .

Pertanto si avrà una probabilità condizionata:

$$\lambda(t) = \frac{P(t \leq \tau \leq t + \Delta t | \tau > t)}{\Delta t}$$

E' possibile ricavare $\lambda(t)$ partendo dallo storico dei guasti e utilizzando il Teorema di Bayes, ottenendo la seguente espressione:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

R , l'affidabilità, è proprio la grandezza che fornisce informazioni circa il corretto funzionamento del componente fino al momento dell'osservazione. Inoltre, sempre attraverso una serie di semplificazioni si ha che:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau}$$

R , quindi, dipende dal tasso di guasto come un esponente negativo e cioè come una funzione decrescente nel tempo; infatti, nel tempo l'affidabilità di un componente diminuisce.

In ambito manutentivo un altro evento importante sicuramente è rappresentato dalla **riparazione** ovvero il ripristino del sistema mediante un intervento di manutenzione. La riparazione è un evento opposto al guasto che determina il passaggio dallo stato di avaria a quello di corretto funzionamento. Anche in questo caso si può far ricorso alla teoria dell'affidabilità. Si avranno rispettivamente:

$g(t)$ → densità di probabilità di riparazione al tempo t

$G(t)$ → probabilità di riparazione (rappresenta la curva cumulata di riparazione)

$\mu(t)$ → tasso di riparazione al tempo t

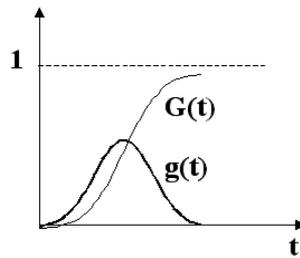


Figura 40 $G(t) - g(t)$

Grandezze utilizzate nel campo della manutenibilità di un sistema dove per **manutenibilità** si intende l'attitudine di un componente in assegnate condizioni ad essere mantenuto o riportato in uno stato nel quale può svolgere la funzione richiesta, quando la manutenzione è eseguita nelle condizioni date, con procedure e mezzi prescritti. È la probabilità che un componente venga mantenuto o riportato alle normali condizioni funzionali/operative entro un prefissato periodo di tempo. Non tutti i componenti di un sistema, infatti, possono essere riparati.

Uno strumento molto importante e di supporto nella scelta dell'azione di manutenzione più adeguata è il diagramma relativo all'andamento nel tempo del tasso di guasto conosciuto come "**Curva a vasca da bagno**".

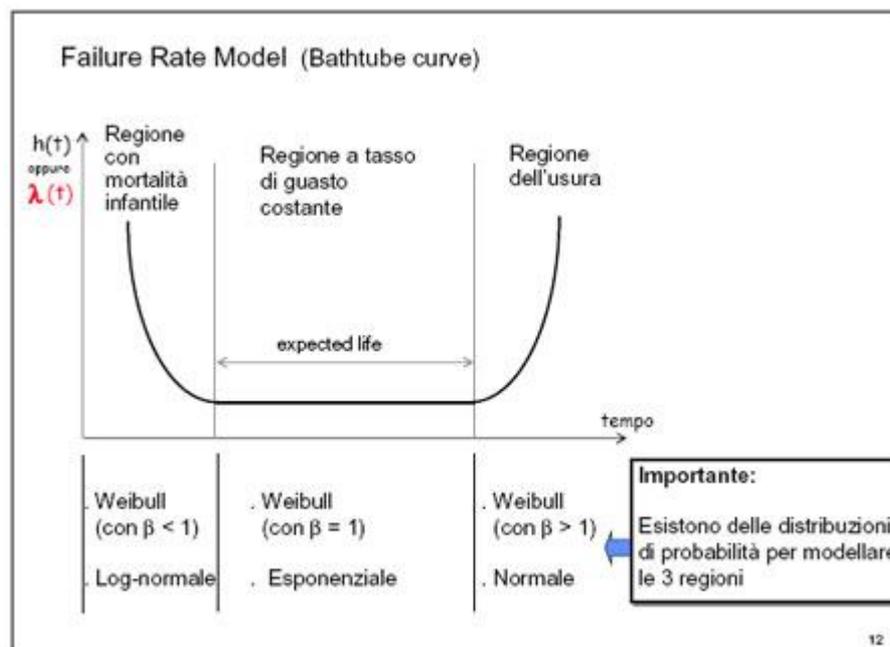


Figura 41 Vita operativa di un componente

La curva assume un andamento diverso in ogni fase a seconda delle specifiche caratteristiche dei singoli componenti. In generale si distinguono 3 fasi:

1. **Rodaggio**: guasti infantili. Il tasso di guasto in questa fase è molto alto a causa, ad esempio, di errori in fase di progettazione, di assemblaggio e di avvio del sistema. Col passare del tempo il fenomeno termina e $\lambda(t)$ tende a diminuire e a rimanere costante per gran parte della vita del componente.
2. Funzionamento normale o **Vita utile**: $\lambda(t)$ ha valore costante perché i guasti avvengono in modo casuale.
3. Invecchiamento o **Usura**: $\lambda(t)$ presenta un andamento crescente poiché il degrado e l'usura hanno ridotto le proprietà di resistenza dei componenti.

Si tratta di un andamento di riferimento comune a molti componenti, ma è possibile trovare diversi andamenti come quelli rappresentati in Figura.

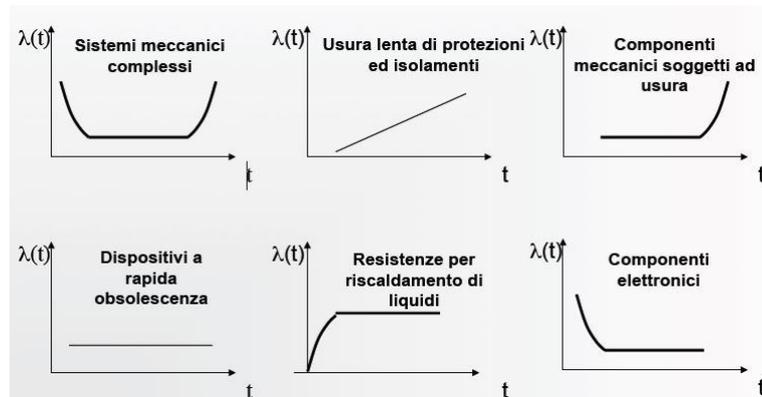


Figura 42 Vita operativa di diversi componenti

Ad ogni fase corrisponde una funzione di probabilità che ne descrive il comportamento. In particolare:

- La **funzione di Weibull** per la fase dei guasti infantili.

Il nome viene da un'ingegnere svedese che, studiando le probabilità di guasto di materiali metallici soggetti a fenomeni di fatica, individuò questo modello per valutare la durata a fatica del sistema sottoposto a delle sollecitazioni.

La funzione di affidabilità è definita da:

$$R(t) = \exp - \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta$$

Dove sono presenti due parametri α e β : α è un **parametro di scala** o **vita caratteristica**, β è un **parametro di forma**. Entrambi numeri positivi, β è un numero adimensionale, mentre α è espresso nella stessa unità di misura della variabile t (ore, minuti, secondi...). Il fatto che esista un parametro di forma ci fa capire come questo sia un modello molto flessibile e non a caso è quello più utilizzato in affidabilità, nonché quello che si collega a quella forma a vasca da bagno. Bisogna, però, fare una precisazione: non esiste un modello di Weibull, così come nessun altro modello, che restituisce esattamente l'andamento della curva. Il diagramma è costituito da segmenti, dove per determinati intervalli di tempo i parametri fanno sì che la funzione $\lambda(t)$ abbia quell'andamento. Il modello Weibull ha la flessibilità o meglio consente, in funzione dei parametri, di definire tutte e tre i rami della funzione tasso di guasto, quindi, in funzione dei parametri abbiamo funzioni tasso di guasto che possono essere crescenti, costanti e decrescenti (mentre nell'esponenziale, funzione tipica della fase di vita utile, la funzione tasso di guasto è sempre costante. Il modello esponenziale, infatti, è un caso particolare del modello di Weibull).

- La **distribuzione esponenziale negativa** per la fase di vita utile.

$$R(t) = \exp \left(-\frac{t}{\theta} \right)$$

Questo tipo di modello può essere utilizzato solo per valutare la probabilità di sistemi che non sono soggetti a fenomeni di usura o di degrado come l'obsolescenza. Il tasso di guasto di un esponenziale è costante e non dipende dal tempo. In termini di teoria dei guasti ciò si registra in dispositivi soggetti solo a guasti accidentali.

- La **funzione normale** o **log-normale** per la fase di usura.

2.5.1 Le Politiche Manutentive

Le politiche di manutenzione - dette anche strategie manutentive - sono il tipo di risposta che coinvolge l'azione manutentiva al manifestarsi di un guasto, di una avaria o di una semplice deriva [65]. Questi eventi generano, infatti, un fabbisogno di manutenzione che l'azione manutentiva consente di risolvere.

Nell'attuale realtà industriale le politiche manutentive possono essere raggruppate in cinque categorie principali:

- correttiva
- preventiva (statica – predittiva – su condizione)
- migliorativa
- produttiva
- opportuna

La **manutenzione correttiva** o **a guasto** è una politica di manutenzione che prevede un intervento di riparazione, sostituzione o revisione, solo a guasto avvenuto. L'azione manutentiva è quindi subordinata all'attesa del manifestarsi del guasto. Solo a guasto avvenuto viene preparato ed eseguito un intervento di "ripristino" che riporta la prestazione di un componente al livello originario. Si tratta di una politica vantaggiosa dal punto di vista dei costi di manutenzione e di fermo macchina che risultano pressoché nulli fin tanto che la macchina funziona [62]. Il verificarsi di un guasto non previsto, però, potrebbe incidere di molto sui tempi e sui costi se, ad esempio, le parti di ricambio non sono disponibili in magazzino ed il tempo di approvvigionamento è lungo.

È diffusa tipicamente in piccole aziende in cui non sono presenti grossi vincoli di tempo, consegne importanti da fare e che non hanno problemi di saturazione della produzione.

I principali aspetti negativi sono: elevata perdita di ricavi dovuta al fermo macchina per guasto, imprevedibilità dell'intervento e quindi delle eventuali operazioni di deviazione del flusso produttivo in corso ed elevati costi di

riparazione (un componente guasto può danneggiare i componenti correlati quindi bisogna sostituirlo il prima possibile). Per poter attuare la politica correttiva è necessario, inoltre, avere una scorta garantita di pezzi di ricambio per poter effettuare prontamente la sostituzione ed avere un personale qualificato che sia in grado di ripristinare la normale attività di produzione.

Oramai è difficile trovare sistemi produttivi gestiti completamente a guasto, non solo perché il guasto è un evento negativo ed imprevedibile, ma anche perché il suo insorgere potrebbe arrecare una serie di problemi che, a lungo termine, potrebbero risultare deleteri per l'azienda.

La **manutenzione preventiva** è definita come la “manutenzione eseguita a intervalli predeterminati o in accordo a criteri prescritti e volta a ridurre le probabilità di guasto o la degradazione del funzionamento di un'entità” (norma UNI 9910). Viene effettuata a seguito dell'individuazione e della misurazione di uno o più parametri e dell'extrapolazione, secondo modelli appropriati, del tempo residuo prima del guasto. È una politica che si basa, quindi, sulla sostituzione programmata di un determinato componente della macchina ancora perfettamente funzionante, con uno nuovo, in modo da prevenire l'insorgere del guasto. La programmabilità dell'intervento consente una maggiore organizzazione del lavoro di manutenzione e garantisce la possibilità di gestire la fermata della macchina nella maniera più conveniente. La difficoltà maggiore riguarda la decisione relativa al momento di analisi e quindi di intervento: se viene eseguita troppo presto crescono i costi, mentre se eseguita troppo tardi, il guasto insorge e viene meno il suo effetto.

Sulla base dei parametri di scelta relativi al momento di intervento è possibile definire 3 “sotto-politiche” preventive:

1. **Manutenzione preventiva ciclica o statica**

In questo caso il parametro a cui si fa riferimento è, appunto, il ciclo di funzionamento espresso, ad esempio, in settimane, ore o numero di pezzi

prodotti. Si tratta di un parametro non molto preciso per stabilire il tempo residuo prima del guasto, ma è facilmente ricavabile dal sistema.

Gli intervalli e i criteri prescritti di intervento sono generalmente fissati per tutta la vita utile del componente o della macchina. Appare evidente come sia possibile con largo anticipo programmare le attività manutentiva, organizzare il personale, predisporre le attrezzature e strumentazioni necessarie e reperire per tempo i pezzi che si vogliono sostituire. Tuttavia non sempre è detto che il componente sia arrivato al limite della sua vita utile in quanto la macchina può aver lavorato di più o di meno nell'intervallo temporale definito.

2. Manutenzione predittiva o preventiva dinamica

3. Manutenzione secondo condizione

Le ultime due “sotto-politiche” utilizzano come parametro di riferimento un parametro distintivo del sistema produttivo ovvero del processo produttivo (ad esempio la temperature, le vibrazioni etc), semplice da rilevare e misurare, ma soprattutto rappresentativo dell'effettivo stato di funzionamento. Nella manutenzione predittiva o dinamica gli intervalli di sostituzione sono determinati in genere in base alla storia della macchina stessa. La rilevazione, ad esempio, del tempo medio tra due guasti (Mean Time Between Failure), che spesso è funzione delle modalità con cui la macchina viene utilizzata, consente di redigere dei calendari di intervento preventivo basati su una determinata probabilità che il guasto non si manifesti nell'arco di tempo che intercorre tra due sostituzioni successive. Risulta una politica efficace quando il guasto presenta una certa regolarità di accadimento, sia in termini economici che di riduzione della indisponibilità della macchina. Tuttavia è rischiosa se si tratta di un sistema caratterizzato da guasti difficili da prevedere.

Nella manutenzione preventiva su condizione la sostituzione del componente è una decisione strettamente collegata alle lavorazioni da esso compiute e quindi si hanno maggiori probabilità che si vada a sostituire il componente solo in prossimità del termine della sua vita utile. Tuttavia in questi casi non

è possibile prevedere con esattezza e con largo anticipo la data in cui si andrà a sostituire un determinato componente. Si tratta di una strategia manutentiva effettuata mediante verifiche ispettive periodiche attraverso le quali andare ad individuare lo stato di un componente che potrebbe provocare un guasto.[62] Il piano di ispezioni sullo stato di una macchina o di un suo determinato componente è spesso correlato ad un programma di manutenzione programmata dinamica e necessita anche di un elevato grado di addestramento del personale nel riconoscimento dell'anomalia.

In generale, quindi, gli interventi manutentivi possono essere decisi sia sulla base di un calendario, che in base alle ore effettive di lavoro nonché al numero di cicli di lavoro.

Nella maggioranza dei casi questo sistema di manutenzione è composto da attività giornaliere, regolarmente organizzate, come ispezioni, regolazioni, pulizie, lubrificazione, sostituzioni minori, riparazioni di componenti, e tutte quelle azioni atte a prevenire guasti improvvisi e problemi al processo produttivo, e ridurre la severità e la frequenza [62].

Gli obiettivi degli interventi di manutenzione preventiva sono rappresentati, dunque, dalla conoscenza della condizione delle macchine e dallo studio accurato dell'andamento dei guasti per predire lo stato di salute delle apparecchiature. Obiettivi raggiungibili, ad esempio, attraverso l'esperienza, attraverso l'utilizzo delle distribuzioni statistiche dei guasti (come la distribuzione di Weibull dalla quale si possono determinare periodicità e probabilità che un guasto occorra) ed attraverso l'analisi di dati passati.

Si tratta di una politica manutentiva basata sul monitoraggio attraverso la quale è possibile ottenere vantaggi come:

- riduzione dei costi di manutenzione;
- aumento della disponibilità operativa delle macchine;
- miglioramento della sicurezza;
- riduzione della quantità e della gravità dei guasti di esercizio.

La **manutenzione migliorativa** è una politica di manutenzione che prevede un intervento di revisione, finalizzato a migliorare il valore o la prestazione di un sistema o di una parte di esso. L'azione manutentiva non è subordinata a malfunzionamenti, ma deriva da esigenze di miglioramento espresse sia dall'utilizzatore sia dal manutentore. Ha, dunque, l'obiettivo di migliorare il comportamento dell'impianto attraverso, ad esempio, una migliore progettazione, migliori procedure e migliore organizzazione del lavoro affinché un guasto non si ripresenti in futuro.

La **manutenzione produttiva** è caratterizzata da un insieme di azioni volte alla prevenzione, al miglioramento continuo e al trasferimento di funzioni elementari di manutenzione al conduttore di un componente o di una macchina, avvalendosi del rilevamento di dati e della diagnostica sull'entità da mantenere. Il "cuore" di questa politica, come evidenziato nel nome stesso, è il legame tra la produzione e manutenzione. È, infatti, una politica nata in un contesto in cui hanno preso piede le nuove filosofie e metodologie produttive (TQM, TPM e WCM) ed il coinvolgimento e l'integrazione di tutte le funzioni aziendali sono due degli obiettivi da perseguire.

La **manutenzione opportuna**, infine, rappresenta forse il concetto più innovativo introdotto negli ultimi anni in materia di manutenzione [62]. Le politiche fin'ora citate, se pur considerate ottimali, sono attuate su macchina singola o su un componente di essa, trascurando le interazioni che si possono, invece verificare tra le macchine stesse. Il concetto di manutenzione opportuna introduce e mette in evidenza proprio una relazione tra macchine in serie della stessa linea produttiva. È bene ricordare che secondo la teoria dell'affidabilità un sistema in serie è funzionante se tutte le sue componenti sono funzionanti: il guasto di uno solo dei suoi componenti determina il guasto dell'intero sistema.

La maggior parte dei costi della manutenzione è da attribuire ai cosiddetti costi indotti, ovvero costi di setup, costi di fermo macchina etc. Pertanto nel

caso si verifichi la necessità di fare manutenzione su una macchina o un guasto che impedisse alla linea di essere produttiva, sarebbe opportuno cercare di sfruttare questo tempo per verificare, appunto, l'opportunità di effettuare una manutenzione sugli altri componenti o macchinari in serie. È possibile, dunque, in qualche modo definire la manutenzione opportuna come: “una manutenzione che può essere effettuata su una macchina qualora sia impossibilitata a produrre a causa di guasti o manutenzione ad altri macchinari in serie con esse o con cui è in rapporto di interdipendenza”. Il concetto alla base di questa politica è quello di cercare di distribuire i costi indiretti della manutenzione su più macchine.[62]

I fattori di influenza nella scelta di una politica manutentiva possono essere:

- gli effetti prodotti sulla sicurezza del personale, sulla conservazione dell'ambiente e sulla produttività aziendale;
- le modalità di guasto e di rilevazione dei segnali dal sistema;
- la convenienza economica di implementazione della politica.

È possibile identificare la corretta politica manutentiva da attuare anche sulla base del tasso di guasto e quindi delle fasi di vita del sistema, Figura 9:

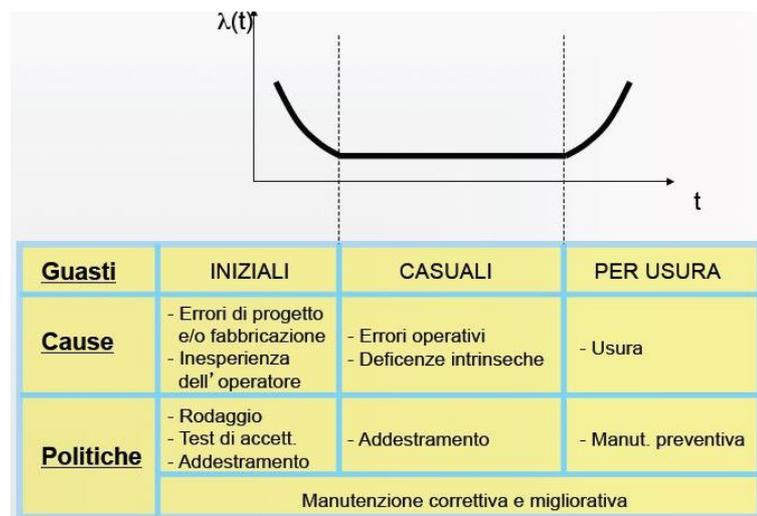


Figura 43 Vita utile e politiche di manutenzione

La manutenzione correttiva come anche quella manutentiva sono politiche attuabili durante tutte le fasi di vita di un sistema produttivo. La

manutenzione preventiva, invece, se applicata nella fase dei guasti infantili potrebbe risultare anche dannosa perché le cause di guasto non sono ancora completamente note e certe.

La scelta ed anche le attività stesse di manutenzione, dunque, rappresentano un momento critico per il sistema produttivo incidendo sulle performance, sui costi sostenuti e sul livello di servizio.

2.5.2 Stato dell'arte

I progressi nell'ambito tecnologico e dell'automazione hanno favorito lo sviluppo di sistemi di produzione moderni altamente automatizzati caratterizzati da complessi sistemi di macchine collegate tra di loro. Queste ultime, con il passare del tempo, a causa dell'uso e dell'età, sono soggette al fenomeno dell'usura che può facilmente portare al guasto se all'interno dell'azienda non viene intrapresa nessuna attività di manutenzione. I guasti alle attrezzature ed ai macchinari interrompono il normale processo di fabbricazione che, insieme ad un'azione manutentiva non tempestiva, potrebbero tradursi in una significativa perdita di produzione ed in una diminuzione dei profitti dell'intero sistema produttivo. Allo stesso tempo anche un'eccessiva attività di manutenzione potrebbe risultare dannosa perché, anche se si ridurrebbero virtualmente i tempi di inattività causati dai guasti, il costo ad essa connesso sarebbe talmente alto da diminuire i profitti. È chiaro, pertanto, che all'interno di un sistema di produzione è fondamentale ricercare una corretta strategia di manutenzione in grado di garantire un giusto compromesso tra i costi ed i benefici ad essa associati.

La scelta della politica manutentiva da attuare, gli effetti che quest'ultima ha sul sistema produttivo da un punto di vista dei costi, del numero di guasti, della mancata produttività, etc.. , una sua ottimizzazione attraverso l'utilizzo di sistemi di simulazione (in grado di rappresentare diversi possibili scenari) ed una corretta schedulazione delle attività manutentive all'interno dei

sistemi di produzione, sono stati alcuni degli argomenti chiave su cui si sono concentrati molti autori e studiosi negli ultimi anni.

Ad esempio Malamura e Murata [66] hanno proposto un modello di simulazione che combina due processi di origine differente: il processo produttivo ed il flusso delle informazioni riguardante gli ordini di manutenzione. Il tutto con lo scopo di studiare gli effetti sulle performance dell'intero sistema produttivo, derivanti dall'interazione dei due processi, e per definire eventuali opportunità di ottimizzazione. L'approccio proposto mira ad estendere le capacità delle tecniche convenzionali di analisi dell'affidabilità, focalizzandosi sugli aspetti dinamici del sistema di produzione ed, allo stesso tempo, propone un metodo per la rappresentazione degli aspetti tecnici, manutentivi, organizzativi ed economici attraverso un modello di simulazione. In particolare il sistema produttivo, che contiene numerose componenti, è simulato come un modello integrato con due moduli che interagiscono tra loro: uno relativo al flusso del processo di manutenzione che rappresenta e replica il flusso degli ordini di manutenzione delle diverse politiche manutentive (correttiva CM, preventiva PM, condizionata CBM). Flusso, poi, gestito dal MC, ovvero dal coordinatore della manutenzione che decide se rimandare o meno le azioni di manutenzione a seconda della disponibilità delle risorse (Resource Pool). Le performance dei vari lavori vengono, in seguito, raccolte nel Complete Orders Point. L'altro modulo, invece, rappresenta la linea di produzione ovvero la tipologia delle componenti, la capacità delle macchine, l'usura ed i guasti.

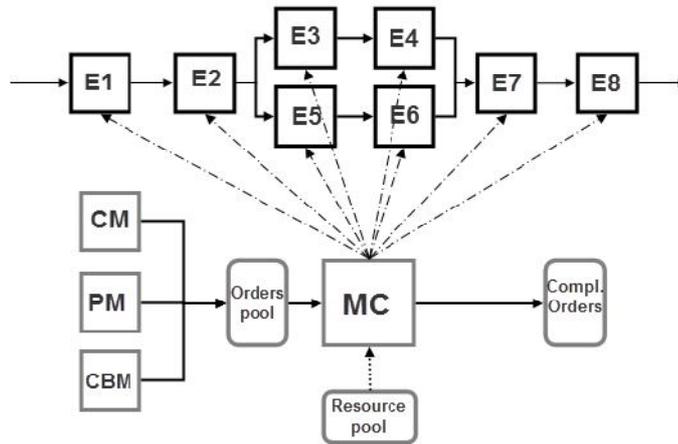


Figura 44 Framework complessivo del modello di simulazione

Per il calcolo delle performance vengono utilizzate differenti tipologie di metriche a seconda della grandezza da calcolare come la disponibilità, l'affidabilità, l'efficienza ed il rendimento della linea.

Attraverso l'impiego di SIMUL8, un software per la simulazione ad eventi discreti, gli autori hanno confrontato diversi scenari relativi a politiche manutentive differenti dimostrando che l'utilizzo di strategie combinate e personalizzate in base all'impianto, consentono di contenere i costi e di concentrare le attenzioni sugli elementi critici della linea. Il modello di simulazione progettato descrive un comportamento di un sistema di produzione semplificato, ma gli autori non escludono la possibilità di future estensioni e modifiche per ottenere valori più realistici degli indicatori di performance e di costo diretti.

Zhu et al [67], invece, descrivono una nuova politica CBM (Condition Based Maintenance) per un sistema multi-componente con deterioramenti stocastici continui (utilizzando un modello a coefficiente casuale - *Random Coefficient Model* - per descrivere l'usura dei componenti), ed un intervallo di manutenzione congiunto per ridurre gli alti costi di set up dovuti alla manutenzione. Nel loro lavoro sviluppano, inoltre, un modello per la minimizzazione del tasso medio dei costi di lungo periodo di manutenzione degli impianti utilizzando come variabili decisionali i limiti di controllo dei

componenti e l'intervallo di manutenzione congiunta. Vengono considerate delle ipotesi semplificative per l'ottimizzazione: le componenti del sistema sono indipendenti tra loro e, quindi, l'effetto complessivo dei guasti non viene considerato; l'orizzonte di riferimento è infinito, le azioni manutentive avvengono a periodi stabiliti e costanti, il sistema continua ad operare a basse performance nel momento in cui le componenti superano la soglia di guasto e le azioni di manutenzione, una volta effettuate, riportano le componenti " *as good as new*". Si tratta di un modello che può essere utilizzato per risolvere problemi di schedulazione degli ordini di manutenzione di diversi impianti con un gran numero di componenti non identici perché, attraverso il *Random Coefficient Model*, possono essere descritti diverse tipologie di usura e di degradazione; può essere integrato con diverse politiche di manutenzione, grazie alla presenza di un intervallo di manutenzione statico che, infine, permette anche una facile e conveniente implementazione del modello stesso. Anche in questo caso gli autori non escludono la possibilità di future estensioni come ad esempio l'introduzione di un intervallo dinamico, per ridurre ulteriormente il tasso di costo di medio - lungo periodo, o di componenti dipendenti tra loro.

Il lavoro di Yang et al [68] affronta un nuovo metodo per la determinazione della schedulazione degli ordini di manutenzione in un sistema manifatturiero basato su una valutazione continua del grado di usura delle macchine e sulla stretta relazione tra il processo produttivo e le operazioni di manutenzione. Gli effetti dei vari programmi di manutenzione sono valutati attraverso una simulazione ad eventi discreti che utilizza i dati relativi alle probabilità di guasto previste per ciascuna macchina. Queste ultime sono calcolate sulla base di specifici algoritmi predittivi o si suppone siano ricavabili dai dati storici relativi all'affidabilità ed ai guasti dei vari macchinari. Gli autori utilizzano, inoltre, una procedura di ottimizzazione, basata un Algoritmo Genetico, per individuare il programma di manutenzione più conveniente considerando sia gli utili di produzione che le spese di manutenzione. Il

rapporto costi – benefici dei vari programmi viene calcolato tenendo conto dell'interazione tra le macchine, delle performance richieste, dei buffer e delle risorse di manutenzione e produzione stabilite nei vari programmi. Il metodo di programmazione proposto ha dimostrato un guadagno significativo sia in termini di costi che di benefici, infatti, gli autori ne prevedono una futura implementazione industriale.

Anche Kaiser e Gebraeel [69] propongono una politica di manutenzione predittiva basata su informazioni relative al grado di usura provenienti da sensori presenti nel sistema (chiamata SUDM *Sensor – Updated Degradation Model*). Le informazioni sono acquisite durante le operazioni di produzione e, in base alle caratteristiche specifiche delle componenti monitorate, viene calcolata la loro vita media residua che determinerà l'azione manutentiva da attuare. Le performance della politica proposta dagli autori sono state valutate attraverso l'impiego di un modello di simulazione relativo ad un semplice sistema di produzione a celle. Sono stati considerate solo due tipologie di costo: il costo di sostituzione programmata ed il costo di sostituzione per rottura. È stato, infine, dimostrato attraverso il confronto con una politica di manutenzione preventiva tradizionale, che l'impiego di una politica SUDM consente una notevole riduzione dei costi di manutenzione.

Charles et al [70] analizzano un modello di ottimizzazione per una politica manutentiva predittiva per la minimizzazione dei costi totali di manutenzione in un sistema produttivo. Considerano il rapporto tra le diverse politiche (correttiva, produttiva e preventiva) ed il sistema produttivo ed i costi ad essi associati. Per valutare i diversi scenari assumono una distribuzione Weibull per i guasti e ricorrono al software di simulazione ad eventi discreti MELISSA C++.

Sawhney et al [71] presentano un modello di simulazione per determinare le strategie di manutenzione all'interno di un sistema produttivo. Il loro modello integra lo scheduling relativo a manutenzioni proattiva e reattiva per aumentare la produttività delle operazioni in sistema produttivo *lean*.

Molte sono stati gli studi relativi all'integrazione tra due diverse tipologie di schedulazione: quella degli ordini di produzione e quella degli ordini di manutenzione preventiva, strettamente correlati tra loro. Ad esempio Adzakpa et al [72] descrivono un'applicazione riguardante l'assegnazione dei job e degli ordini di manutenzione in un sistema di distribuzione. Sviluppano un modello di ottimizzazione che considera i costi delle azioni manutentive, come funzione obiettivo, e la disponibilità in un dato periodo di tempo e la precedenza tra i job come vincoli del problema. Trattandosi di un problema NP-hard utilizzano un algoritmo euristico per risolvere il problema.

Anche Ying et al [73] sviluppano un modello integrato che considera simultaneamente come variabili decisionali lo scheduling della produzione e di manutenzione preventiva. Il loro modello, però, minimizza la tardiness totale dei jobs.

Li e Zuo [74] nel 2007 hanno sviluppato un modello di simulazione che determina l'impatto delle politiche di manutenzione correttiva e preventiva sul costo totale delle rimanenze in un sistema produttivo. Utilizzano lo strumento simulativo per trovare il numero ottimale di guasti ed il livello ottimale della scorta di sicurezza. Sempre secondo gli autori, infine, attraverso la combinazione delle politiche di manutenzione e della schedulazione della produzione è possibile ridurre i costi operativi dell'intero sistema.

Nonostante l'eterogeneità degli studi in ambito manutentivo è possibile trovare una componente comune in molti lavori: la necessità di ridurre i costi manutentivi attraverso problemi di ottimizzazione in grado di rappresentare non solo i costi diretti della manutenzione stessa, ma anche il forte legame tra questi ed i costi indotti a livello produttivo. Il costo di manutenzione negli impianti industriali è stato, infatti, stimato intorno al 15-40% (una media del 28%) dei costi totali di produzione e la quantità di denaro che le aziende spendono ogni anno per la manutenzione può essere paragonato al reddito

netto guadagnato [75]. I tassi di utilizzo delle macchine nei sistemi di produzione moderni sono di gran lunga superiori a quelli dei sistemi tradizionali ed è, quindi, naturale che le prestazioni del sistema siano fortemente influenzate dallo stato dei macchinari e dalle azioni di manutenzione intraprese. Pertanto, è importante capire le implicazioni di un dato piano di manutenzione su un sistema prima di una sua implementazione. Trovare, ad esempio, la sequenza migliore di operazioni di manutenzione per ciascun componente durante tutto l'orizzonte di pianificazione sotto opportuni vincoli (di affidabilità, di budget, etc) ed obiettivi, può aiutare a risolvere questo problema.

- Dall'analisi degli studi effettuata, infine, è emerso anche un crescente interesse nella rilevazione e nella gestione delle informazioni ottenute in tempo reale relative allo stato di salute dei macchinari e questo grazie alle innovazioni in ambito tecnologico dei sensori di rilevamento. Di conseguenza si è spostata l'attenzione sulla politica manutentiva su condizione (detta anche CBM, acronimo di *Condition Based Maintenance*), che a differenza di quella predittiva, è in grado di sfruttare i dati provenienti dal monitoraggio relativi allo stato di salute dei dispositivi (come emissioni di temperatura, vibrazioni e acustica), per programmare le routine di manutenzione.

Capitolo 3

Sistemi Di Simulazione Integrati

3.1 La Simulazione

La simulazione può essere considerata come uno degli strumenti più potenti che un responsabile della progettazione e del funzionamento dei processi produttivi e/o di sistemi complessi ha a disposizione. Rende, infatti, possibile l'analisi, lo studio e la valutazione di alcuni casi non altrimenti realizzabili.

Si può definire la simulazione come *“il processo di progettazione di un modello di un sistema reale sul quale condurre poi degli esperimenti al fine di comprendere il comportamento del sistema e / o valutare diverse strategie per il suo funzionamento”* [76].

Al giorno d'oggi, in un mercato sempre più competitivo, l'utilizzo della simulazione si è notevolmente sviluppato nel settore industriale, ma anche in quello dei servizi, diventando uno strumento indispensabile per l'attività manageriale, di gestione e di sviluppo di nuovi prodotti.

I frequenti mutamenti dei mercati inducono, infatti, i management aziendali ad un continuo rinnovamento dei propri processi per continuare ad essere competitivi. Questo comporta la realizzazione di sistemi di produzione sempre più complessi e costosi per rispondere in modo tempestivo alle richieste del mercato. Qualsiasi perdita di tempo e di efficienza determinano perdita di competitività e la conseguente uscita dai mercati. Per rispondere in modo efficiente a tali cambiamenti e per essere sicuri di adottare politiche giuste ed ottimali per quelle che sono le linee da seguire, si fa sempre più ricorso allo strumento simulativo.

È uno strumento molto flessibile che può essere utilizzato per studiare la maggior parte dei sistemi esistenti; di conseguenza, sono molteplici i sistemi modellabili e dalla cui simulazione si può ricavare profitto. Ad esempio: processi di produzione, gestione dei sistemi di scorte, analisi dell'utilizzazione delle risorse, dei costi e dell'efficienza, analisi dei rischi finanziari, progettazione e definizione delle procedure operative dei sistemi di produzione e di manutenzione, gestione del personale e degli aspetti logistici, schedulazione delle operazioni ed esame delle risorse richieste, etc. La simulazione replicando, per mezzo di opportuni modelli, una realtà già esistente o da progettare, offre la possibilità di comprendere al meglio il contesto aziendale (e non) oggetto di studio, rappresentando una delle principali fonti da cui desumere informazioni, ricavate solitamente dall'esperienza. In questo modo consente un notevole risparmio di tempo, di risorse e di costi oltre che una notevole riduzione dei rischi derivanti dalle sperimentazioni reali.

È possibile, quindi, affermare che *dirigersi verso la simulazione* significa:

- costruire un modello che replichi il comportamento di un sistema reale, già esistente o da progettare, nel tempo;
- predire, attraverso il modello, il comportamento futuro del sistema in esame (come ad esempio gli effetti derivanti da cambiamenti apportati al sistema);
- condurre esperimenti sul modello;
- analizzare i risultati ricavando informazioni circa le decisioni studiate, le alternative considerate e le prestazioni del sistema.

È bene ricordare che, in alcuni casi, si può riprodurre il funzionamento di un sistema nel tempo attraverso un certo numero di espressioni logico-matematiche, costituenti nel loro insieme il cosiddetto Modello Matematico, che possono essere risolte con i metodi dell'algebra tradizionale o del calcolo differenziale, o con modelli di ricerca operativa di tipo deterministico. [64]

La scelta relativa allo strumento di analisi è dettata principalmente dall'applicabilità e dai costi.

3.1.1 Vantaggi e Svantaggi della Simulazione

La simulazione, come strumento di analisi dei sistemi, presenta una serie di vantaggi rispetto ai tradizionali modelli analitici o matematici. [76]

Sicuramente risulta essere più chiaro, di semplice comprensione e più facile da giustificare alla direzione o ad eventuali clienti. Inoltre, un modello di simulazione può essere considerato più attendibile sia perché il suo comportamento è stato confrontato con quello del sistema reale sia perché richiede, spesso, un minor numero di ipotesi semplificatrici, catturando così le diverse caratteristiche del sistema reale studiato.

In generale i vantaggi derivanti dall'uso di tale tecnica sono innumerevoli:

- permette di testare nuovi progetti, processi, layout, senza impiegare risorse per la loro attuazione;
- può essere utilizzato per esplorare nuove politiche del personale, procedure operative, regole decisionali, strutture organizzative, flussi di informazioni, etc, senza interrompere le operazioni in corso;
- permette di identificare eventuali colli di bottiglia nei flussi di informazioni, materiali e prodotti e di testare le operazioni per aumentarne le portate;
- consente di testare varie ipotesi relative al come ed al perché avvengono alcuni fenomeni nel sistema;
- permette di controllare il tempo: è possibile in pochi secondi osservare il comportamento di un sistema di un intero mese o anno. Si possono così analizzare e studiare velocemente lunghi orizzonti temporali o si può far rallentare il tempo per comprendere a pieno un certo fenomeno di interesse;

- permette di ottenere intuizioni su come un sistema effettivamente funziona ed evidenziare eventuali variabili importanti per le prestazioni;
- è possibile sperimentare situazioni nuove, non familiari e, quindi, applicare “what if” analisi;
- permette una notevole riduzione dei costi.

La simulazione, pur possedendo molti punti di forza e di vantaggi, presenta, al tempo stesso, anche degli inconvenienti.

Bisogna sempre tener presente che, in generale, la simulazione fornisce indicazioni sul comportamento del sistema, ma non “risposte ” esatte.

Inoltre:

- un modello di simulazione non è semplice da realizzare e, spesso, richiede una persona specializzata con un alto livello di formazione in vari campi. L’efficacia e l’efficienza di una simulazione dipende, quindi, dalla qualità del modello e dall’abilità del modellatore;
- raccogliere dati di input affidabili può richiedere molto tempo ed i dati raccolti necessitano di ulteriori analisi. L’implementazione di un modello di simulazione potrebbe essere laboriosa;
- l’output della simulazione, infine, deve essere interpretato per identificare la soluzione migliore e questo può comportare un’analisi di dati molto complessa.

Si deduce come lo scopo della simulazione sia quello di ricreare in un ambiente controllato le dinamiche del sistema reale, dandone una sua visione globale; essa, infatti, evidenzia le interdipendenze tra le diverse parti, mostra l’evolvere del sistema nel tempo, monitorando i valori dei parametri che lo influenzano, e fornisce gli indicatori di performance.

Risulta, quindi, chiara l’importanza della simulazione come strumento di supporto alle decisioni.

3.1.2 La Simulazione come Strumento di Supporto alle Decisioni

Negli anni passati lo strumento simulativo è stato ampiamente utilizzato in relazione a problemi strategici e tattici, per lo studio e l'analisi di sistemi di produzione e logistici.

“La simulazione era impiegata per analizzare le cause di eventuali disastri nel sistema di produzione o come strumento per testare nuovi progetti di sistema prima di investire in essi” [77].

Possiamo definire il processo decisionale come il processo attraverso il quale, in seguito al rilevamento di una problematica, si arriva alla scelta dell'azione da intraprendere e poi alla sua realizzazione. [64] Lo studio dei processi decisionali, la capacità di analizzare e scomporre i meccanismi e, soprattutto, la messa a punto di strumenti di supporto sia metodologici che tecnici, risultano indispensabili per prendere “buone” decisioni.

Il punto di partenza di un processo decisionale è l'individuazione della realtà che richiede un cambiamento o una decisione. Successivamente la realtà può essere analizzata e da essa può essere ricavato il sistema da studiare relativamente alle decisioni da prendere. Vengono così scelti quegli elementi che risultano più rilevanti, evidenziate le relazioni che li collegano e definiti gli obiettivi da raggiungere.

A questo punto si può costruire un modello formale che permetta di riprodurre e, cioè, simulare, il sistema individuato allo scopo di comprenderne il comportamento e di arrivare ad individuare le decisioni da prendere.

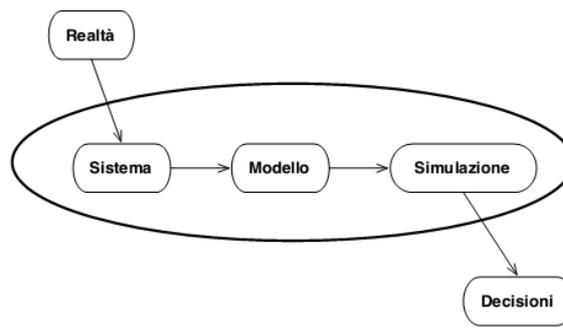


Figura 45 *Processo Decisionale*

Il processo appena descritto e sinteticamente rappresentato in Figura, parte, quindi, dalla realtà ed arriva alle decisioni finali, attraverso tre passi:

1. l'individuazione del sistema da studiare;
2. la costruzione del modello;
3. la simulazione.

È evidente, quindi, come la simulazione sia un ottimo ed importante strumento di supporto alle decisioni in quanto permette di testare rapidamente e di rendere immediatamente visibili gli effetti delle eventuali azioni o decisioni che si vogliono attuare all'interno del sistema in esame.

È importante, però, specificare che esistono, a livello aziendale, diverse tipologie di decisioni a seconda delle quali i modelli di simulazione svolgono un ruolo specifico e presentano caratteristiche diverse.

Nella letteratura manageriale vengono definite due diverse categorie di decisioni: le decisioni operative e quelle strategiche. Le prime fanno riferimento alla gestione quotidiana del business (tipici esempi sono la definizione dei livelli di produzione o l'assunzione di ulteriori risorse umane).

Le decisioni strategiche, al contrario, riguardano la politica aziendale in generale e le scelte di lungo periodo (come l'ingresso in un nuovo mercato, l'acquisizione di un'azienda concorrente o l'uscita da un settore).

Una distinzione più dettagliata è stata proposta da Madan G. Singh [78] che considera tre categorie di decisioni:

- decisioni operative
- decisioni tattiche
- decisioni strategiche

Le decisioni operative, nella configurazione di Singh, sono quelle assunte dal personale di “front line”. Gli operatori prendono quotidianamente migliaia di decisioni, in tempi rapidi e sulla base di informazioni concrete. Si tratta comunque di decisioni di poco peso che influenzano una gamma ristretta di attività.

Le decisioni tattiche e strategiche, come già accennato, sono più orientate al lungo periodo. I dati necessari che occorrono per prenderle sono molto più ampi, estendendosi al di fuori dell'organizzazione e le informazioni che se ne traggono sono meno precise, meno aggiornate e più soggette a errori.

In particolare le decisioni tattiche coprono alcune settimane o alcuni mesi e riguardano, ad esempio, il pricing di beni e di servizi e i livelli di spesa per la pubblicità e il marketing.

Le decisioni strategiche, invece, hanno un orizzonte temporale più lungo (1-5 anni), e possono riguardare, ad esempio, l'ingresso di un nuovo prodotto nel sistema.

Per affrontare le decisioni, e quindi attuare il processo decisionale, i manager possono impiegare una vasta gamma di modelli, schemi di riferimento, strumenti e tecniche. La simulazione, tra queste, è sicuramente la tecnica più diffusa nelle aziende, soprattutto negli ultimi anni e questo grazie al miglioramento delle prestazioni dei computer e alla disponibilità di linguaggi di programmazione adeguati. Sempre negli ultimi anni si è sviluppato un ambito interessante della simulazione, ovvero la simulazione operativa in termini di supporto alle decisioni operative, quali la pianificazione ed il controllo di breve termine per sistemi di produzione e logistici. Questo tipo di simulazione prevede la realizzazione di modelli di simulazione molto dettagliati e continuamente aggiornati in accordo con il sistema reale.

Grazie a questo tipo di modelli e all'integrazione con altri sistemi informativi aziendali, infatti, è possibile realizzare la simulazione in tempo reale o in parallelo con il sistema reale. I tipi di problemi in cui può essere adoperata la simulazione operativa sono lo scheduling, la pianificazione della capacità e controllo [79].

È evidente, quindi, come a seconda delle decisioni da prendere, il modello di simulazione cambi, presentando caratteristiche particolari ed assumendo ruoli differenti. A livello strategico la simulazione è impiegata perlopiù al fine di selezionare la migliore configurazione tra diversi sistemi, esistenti o da progettare, in termini di performance, risorse critiche, carico di lavoro, dimensione dei lotti costi, etc. A livello tattico la simulazione può essere impiegata ad esempio per la pianificazione del rilascio degli ordini per una produzione make-to-order ed, infine, a livello operativo, come già accennato precedentemente, la simulazione permette di selezionare le decisioni operative che permettono il raggiungimento degli obiettivi aziendali.[80]

Per comprendere al meglio la natura del modello di simulazione parametrico realizzato in questo elaborato è necessario fornire una descrizione dettagliata del contesto in cui esso si colloca. Infatti il paragrafo successivo è incentrato sui sistemi di simulazione integrati che rappresentano uno strumento simulativo innovativo, nel quale si fa ricorso a modelli generati da fonti di dati esterne e definiti sulla base di specifici parametri.

3.2 I sistemi di simulazione integrati

I sistemi di simulazione integrati rappresentano un particolare strumento di supporto alle decisioni. Si tratta, infatti, di strutture più o meno centralizzate focalizzate sull'impiego della simulazione. Non è semplice darne una definizione univoca perché si tratta di sistemi strettamente correlati al particolare scopo per il quale vengono sviluppati ed alla particolare struttura ottenuta. [80]

In generale quando viene sviluppato un modello di simulazione si fa riferimento ad una specifica realtà. Di conseguenza una qualsiasi modifica di questa realtà, anche minima, comporterebbe una modifica dell'intero modello e, quindi, una sua ulteriore verifica e validazione.

L'idea di base, seguita durante lo studio condotto, è quella di avere un modello valido, funzionante, parametrizzato secondo opportune regole e secondo opportuni valori, integrato all'interno del sistema in esame. In questo modo, un eventuale cambiamento o un eventuale utilizzo del modello in un altro contesto aziendale o nello stesso, modificato, si tradurrebbe in un'azione di modifica relativa ai soli parametri. Il modello di simulazione continuerebbe ad essere valido e risulterebbe solo customizzato a quella particolare realtà aziendale.

La differenza sostanziale, secondo Wy et al. [81], è che mentre un generatore di programmi di simulazione crea un codice di simulazione differente per ogni istanza di sistema, un modello generato automaticamente dai dati può essere usato per diverse istanze senza dover cambiare il codice. Naturalmente i sistemi a cui potrà essere applicato dovranno presentare caratteristiche strutturali simili.

Per rappresentare i sistemi di produzione moderni, sempre più complessi e in continuo mutamento, negli ultimi anni, ha acquisito peso la necessità di disporre di sistemi di simulazione e, quindi, modelli, in grado di riprodurre la difficile logica tra le entità interconnesse presenti in un'azienda. Di conseguenza la modellazione e la simulazione, in particolar modo di un processo produttivo, sta diventando sempre più impegnativa, richiedendo conoscenze specialistiche e un notevole effort.

Questa è la ragione per cui nel corso degli anni molti sono stati gli studi nel campo della *“generazione automatica di modelli di simulazione”* relativamente al contesto produttivo e logistico; per permettere, così, anche ad un ingegnere industriale con limitata conoscenza ed esperienza nel campo della simulazione, di effettuare studi, analisi e valutazioni attraverso lo

strumento simulativo ed anche per ridurre drasticamente i tempi necessari per la verifica e la validazione del modello.

Si può parlare di generazione automatica o semi-automatica di un modello quando un modello di simulazione non viene realizzato “manualmente” attraverso l’utilizzo degli strumenti di modellazione, propri del simulatore prescelto, ma, al contrario, questo viene generato da fonti di dati esterne utilizzando le interfacce del simulatore e particolari algoritmi. Viene spesso utilizzato un termine specifico per indicare questa tecnica, si parla, infatti, di “*data-driven model generation*” (generazione di un modello guidata dai dati). [82].

Si tratta, pertanto, di un metodo che consente all'utente di creare ed eseguire un modello di simulazione senza la necessità di fare alcuna programmazione [83]. Può essere definito come un modello di simulazione che può essere completamente parametrizzato fornendo dati attraverso insieme di dati, moduli, tabelle, fogli di calcolo o modelli ed è progettato, specificamente, per modellare un insieme identificato di sistemi [84].

In questo modo qualsiasi utente, non solo gli utenti specializzati, potrà predisporre ed eseguire simulazioni e riconfigurare i modelli per valutare gli scenari modificati o alternativi.

Nel processo di modellazione e simulazione “guidato dai dati”, le informazioni che definiscono il modello devono essere rappresentate in modo da poter essere utilizzate, in una fase successiva, direttamente da un programma di creazione di modelli per generare modelli appropriati.[85]

Le informazioni necessarie, come ad esempio distinte base (BOM), capacità delle risorse, tempi di processo ed informazioni su clienti/fornitori, possono essere ottenute da fonti di dati già esistenti in azienda, come ad esempio sistemi ERP (Enterprise Requirements Planning) o sistemi MES (Manufacturing Execution System). [86]

L'acronimo ERP identifica una architettura software che, attraverso un insieme di moduli e funzioni, permette di gestire in modo integrato tutte le

funzioni interne e, spesso, esterne di una organizzazione complessa quali la produzione, gli acquisti, le vendite, l'amministrazione, la finanza, le risorse umane, etc. Dal punto di vista tecnologico un ERP si caratterizza, infatti, per la presenza di un database comune (elemento di raccolta dei dati elementari e delle loro relazioni) e da diverse applicazioni ognuna delle quali è preposta alla gestione di uno specifico processo (funzione aziendale). Mentre i software MES rappresentano un sistema di controllo centralizzato per i macchinari. Consentono di passare dall'automazione della singola macchina o impianto, all'automazione integrata di stabilimento e garantiscono l'ottimizzazione globale dei processi produttivi. Tra le varie funzionalità di un sistema MES ci sono: schedulazione delle operazioni e di dettaglio, allocazione e stato delle risorse, controllo dei documenti, gestione della manutenzione, manodopera, dei processi, etc.

Bergmann e Strassburger [82] definiscono una classifica di dati da loro ritenuti rilevanti per la realizzazione automatica di un modello, dati provenienti sia da fonti esterne, come ad esempio quelle già citate, ma anche da sistemi IT, ovvero sistemi informativi. Questi sono:

- **dati tecnici**(tecnica data) che definiscono la tipologia dei sistemi di produzione e tutte le sue componenti;
- **dati organizzativi** (organization data) che definiscono la schedulazione del lavoro e l'organizzazione del processo, flussi di informazione e allocazione delle risorse;
- **dati caricati nel sistema** (system load data) ovvero i dati relativi agli ordini ed ai prodotti reali o simulati.

La Figura successiva rappresenta lo schema logico tra questi dati ed il modello di simulazione secondo i due studiosi.

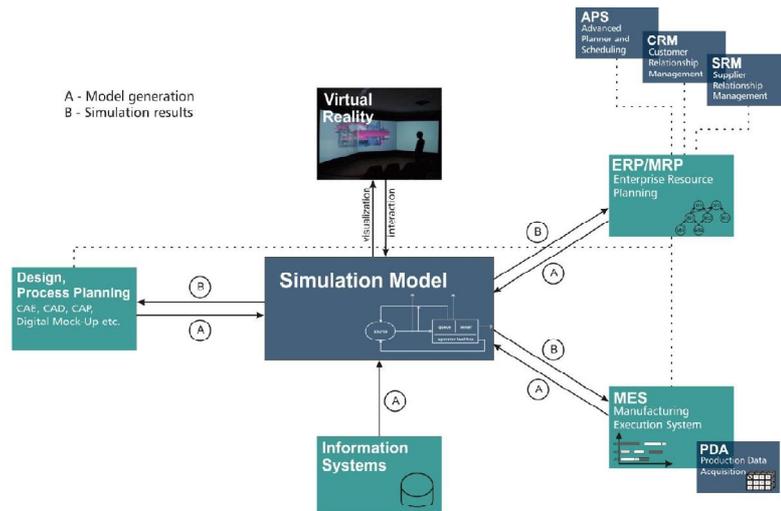


Figura 46 Fonti di dati rilevanti per la generazione automatica di un modello [82]

Come abbiamo già accennato in questi ultimi anni si sono susseguiti una serie di studi e di lavori in questo ambito, la maggior parte dei quali sviluppati utilizzando modelli di simulazione ad eventi discreti e, quindi, simulatori come ARENA e WITNESS, per la rappresentazione di realtà produttive e logistiche impiegati sia a livello strategico che operativo.

Nel paragrafo successivo se ne riportano alcuni tra i più recenti ed importanti.

3.2.1 Stato dell'arte

I sistemi di simulazione integrati sono stati impiegati a livello strategico per la definizione delle diverse configurazioni del sistema e, come descritto nel paragrafo precedente, il modello di simulazione definito per il particolare sistema, interagisce in maniera dinamica con un sistema di raccolta dati al fine di generare una struttura self-building (ovvero in grado di auto generarsi). [80]

In letteratura, però, il numero più ampio di studi, differenziati tra loro, si è registrato relativamente a sistemi integrati sviluppati a livello tattico ed operativo.

La quasi totalità dei lavori che hanno affrontato il problema, ha fatto uso di pacchetti di simulazione già presenti in commercio (ovvero software di tipo interattivo per la simulazione).

Ad esempio Lee et al. [87] hanno proposto un quadro concettuale per generare automaticamente un modello di simulazione WITNESS per un sistema produttivo job shop a partire dai piani di processo, rappresentati attraverso dei grafi, e dalle configurazioni delle risorse.

Son e Wysk [88] hanno sviluppato una struttura ed un architettura integrata per la generazione automatica di un modello basandosi su due modelli: uno relativo alle risorse che fornisce le informazioni di tipo statico (come informazioni sulle risorse e sui layout aziendali); ed uno relativo al controllo di uno “shop floor”, che fornisce tutte le informazioni dinamiche (come le parti in movimento e le parti in arrivo). La struttura è stata sviluppata attraverso ARENA e PROMODEL ed è limitata ad un sistema di produzione discreto di tipo job shop in cui i pezzi entrano uno per volta nel sistema.

Il sistema di controllo dello shop floor (SFCS), in particolare, riceve gli ordini di produzione ed una serie di informazioni attraverso lo stesso database per il controllo della produzione ed ha il compito di selezionare route specifiche di processo, allocare le risorse, monitorare le attività del processo nonché individuare eventuali errori. È nato dall'idea che un simulatore può essere utilizzato non solo per fare delle valutazioni, ma anche come base per un sistema di controllo. In un sistema di controllo “simulation-based” un modello di simulazione genera attività di alto livello per un sistema di esecuzione shop level che, a sua volta, si interfaccia con le effettive apparecchiature.

Il modello generato è stato poi utilizzato per la determinazione del piano di produzione e di schedulazione delle attività.

Gli stessi autori, per rispondere alla necessità di diminuire i costi necessari per lo sviluppo di software per il controllo di sistemi shop floor, hanno sviluppato successivamente una struttura per la realizzazione rapida, in tempo

reale del sistema di controllo in questione, per un sistema di produzione discreto[89], in parte basandosi sul lavoro precedente.

Ancora, Son et al [90] sono stati gli autori di un lavoro focalizzato sulla creazione di librerie “neutrali” in grado di semplificare il processo di generazione automatica dei modelli di simulazione. In particolare, attraverso un esempio relativo ad un semplice sistema produttivo hanno dimostrato come l’utilizzo delle librerie, così da loro definite, può notevolmente ridurre le difficoltà, il tempo e gli errori nella fase di preparazione di un modello. Queste rappresentano dei veri e propri moduli base di costruzione per modellare il sistema di interesse.

Lo strumento di simulazione di montaggio della Ford [91], poi, è un esempio di data-driven generation model, infatti presenta un’interfaccia flessibile con WITNESS che consente automaticamente una costruzione dei modelli delle linee di assemblaggio dei motori a partire dai dati contenuti all’interno di un foglio Excel. L’utente deve solo premere un pulsante.

Sono stati realizzati anche studi incentrati su integrazioni del modello di simulazione con il sistema ERP (Enterprise Resource Planning), per migliorarne le prestazioni e l’efficacia.

Musselman et al [92], ad esempio, hanno descritto una funzione di scheduling simulation-based integrata con un sistema ERP. Quest’ultimo è un sistema informativo che contiene tutti i dati necessari per la pianificazione dettagliata della produzione; come ad esempio: informazioni sul prodotto (BOM e routing delle parti), sul sistema (layout e risorse), e sullo stato di quest’ultimo (livelli di scorte e WIP). Questi dati sono necessari alla funzione APS (Advanced Planning and Scheduling) per determinare la pianificazione delle operazioni. Quest’ultima viene realizzata tenendo conto dei vincoli di capacità e, sempre con l’ausilio della funzione APS, viene definito un piano schedulabile sulla base del routing delle parti, della distinta base, del livello di scorte, della capacità disponibile e della domanda prevista.

Ancora una volta come strumento di supporto alla pianificazione ed alla schedulazione, Concannon et al [93] hanno sviluppato un'applicazione software SIMUL8-Planner, realizzata da SIMUL8 Software e Visual8 Corporation. L'approccio simulativo, in questo caso, è un mezzo per la realizzazione di piani di produzione corretti e fattibili in grado di compensare l'incapacità di adeguamento ai cambiamenti, tipica dei sistemi ERP aziendali, con i quali si integra. Infatti, i sistemi ERP non riescono ad adeguarsi rapidamente a situazioni impreviste dell'impianto, come break down delle macchine, carenza di materiali e risorse, non possedendo un elevato livello di dettaglio. Simul8-Planner si collega direttamente all'ERP del sistema per ottenere informazioni relative ai processi di produzione, agli ordini, alle distinte base e ai dati relativi alle scorte per supportare le decisioni di scheduling. Sulla base dei vincoli di capacità e degli obiettivi di gestione, si genera un piano di produzione pre-simulazione. Questo confronta gli ordini di produzione con le scorte di prodotti finiti e definisce le esigenze di produzione nel tempo. Il vantaggio di tale approccio rispetto ai tradizionali metodi statici è il collegamento diretto e dinamico con lo shop floor. Infine, il sistema può essere connesso con altre applicazioni, come ad esempio i sistemi di Manufacturing Intelligence (MIS) per aggiornare i dati in tempo reale sullo stato del sistema. La struttura ottenuta permette, quindi, una schedulazione flessibile e reattiva ai cambiamenti attraverso la sincronizzazione con i sistemi dinamici di produzione.

Una struttura più complessa è stata proposta da Marvel et al [94]. Gli autori hanno integrato il modello di simulazione con sistemi di generazione automatica del piano di produzione e di schedulazione per migliorarne le prestazioni. In particolare hanno considerato l'integrazione della DES nell'ambito della pianificazione della capacità, utilizzando come caso studio un'industria di prodotti metallurgici. La pianificazione della capacità ha come obiettivo la determinazione della sequenza di prodotti su ciascuna linea e la quantità di produzione necessaria alla soddisfazione del cliente. Il modello di

simulazione è caratterizzato da cinque moduli in input ognuno dei quali contenente una serie di informazioni e dati necessari per poter poi effettuare la simulazione del processamento di tutti i prodotti schedulati.

L'integrazione del modello ha permesso: di verificare la fattibilità del piano, di schedulare i prodotti che il processo di pianificazione non riesce a gestire, di pianificare la fornitura dei materiali e di identificare le aree di miglioramento della produzione al fine di definire gli interventi migliorativi da realizzare.

Wang et al [85] hanno, invece, sviluppato un metodo per la generazione automatica di un modello di simulazione per un sistema di produzione che può essere rapidamente modificato in base ai requisiti dinamici ed alle informazioni acquisite in tempo reale. Si tratta di una metodologia in grado di fornire una capacità di "prototipazione" rapida per il sistema di produzione che consente al tempo stesso un rimodellamento della capacità per rispondere alle fluttuazioni della domanda di mercato. Può essere, inoltre, utilizzato per indagare scenari operativi differenti e ottimizzare i sistemi di produzione.

Nello specifico gli autori hanno studiato ed analizzato un tipico sistema generale di assemblaggio nel settore automotive (GA) e sviluppato un metodo di simulazione data-driven per integrare il sistema di assemblaggio con la logica Just in Time (JIT) e con il sistema di gestione dei materiali (MHS). I moduli relativi alla linea di assemblaggio ed alla gestione dei materiali sono stati sviluppati e poi connessi sulla base degli ordini provenienti dalle varie stazioni di lavoro presenti all'interno dell'impianto.

L'intera metodologia è stata realizzata in ambiente ARENA con l'ausilio di linguaggi di programmazione quali SIMAN e VBA per la parte relativa ai codici di controllo personalizzati.

La Figura successiva rappresenta il quadro complessivo della metodologia proposta.

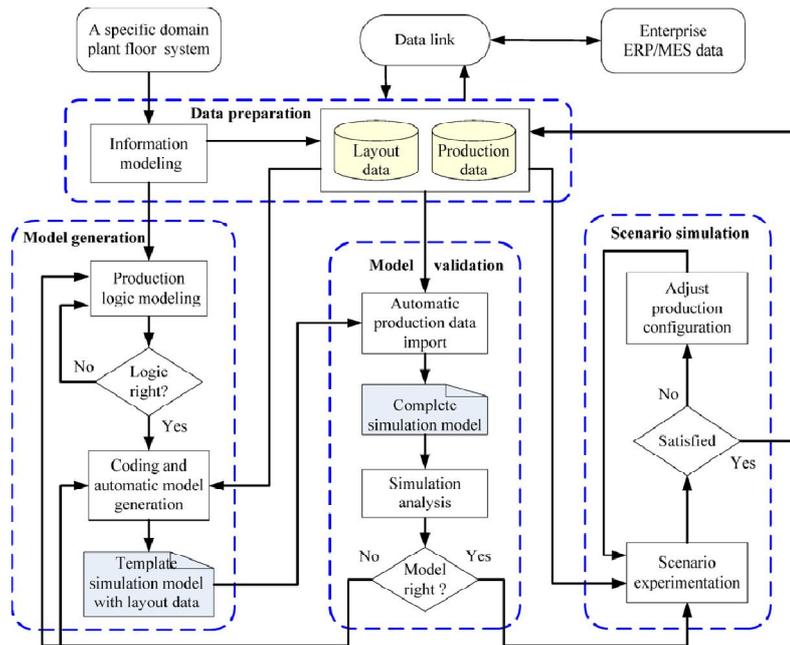


Figura 47 Framework della metodologia proposta da Wang et al [85]

Possiamo identificare 4 fasi principali :

1. Preparazione dei dati (Data preparation)

Devono, prima di tutto, essere specificati gli obiettivi del modello e della simulazione per lo specifico impianto in esame; in questo modo possono essere identificati e classificati i relativi dati necessari, come il layout dell'impianto ed i dati di produzione. La modellazione dell'informazione è utilizzata per descrivere il complesso rapporto tra i dati dell'impianto. Il modello delle informazioni che si ottiene è utile, poi, per la configurazione dei database del modello di simulazione. Per poter modellare questo sistema delle informazioni gli autori hanno utilizzato IDEF1X: un metodo per la progettazione di database relazionali con una sintassi progettata per supportare i costrutti semantici necessari nello sviluppo di uno schema di informazioni di carattere concettuale [95].

Al fine di ottenere i dati necessari per il modello delle informazioni, deve essere configurato un modulo, chiamato "data-link", che svolge la funzione di collegamento con i dati presenti in sistemi informativi come ERP, MES o altri. Infine, sulla base del modello delle informazioni, vengono generate

tabelle contenenti i dati necessari ed i dati di produzione vengono memorizzati in altre tabelle dati per poter poi essere utilizzati successivamente nella generazione automatica del modello.

2. **Generazione del modello** (Model Generation)

In questa fase viene generata la specifica logica di produzione dell'impianto. Ne viene verificata la correttezza ed in caso positivo lo step successivo prevede lo sviluppo di codici personalizzati per la generazione dei moduli di simulazione. I codici si basano sulle logiche di produzione e vengono sviluppati attraverso l'interfaccia di programmazione (API) del software di simulazione.

I moduli di simulazione conterrà non solo i dati statici relativi ai layout di impianto, ma anche vari input derivanti da informazioni dinamiche di produzione e da possibili cambi di produzione avvenuti durante l'esecuzione del modello. In questo modo la simulazione può rappresentare la dinamicità degli stati produttivi, garantendo un modello di simulazione flessibile nei confronti dei possibili scenari produttivi.

3. **Validazione del modello** (Model Validation)

In questa fase è possibile determinare se il modello di simulazione rappresenta accuratamente il sistema reale. Si testa il modello con una serie di dati campione e si confrontano i risultati.

4. **Scenario simulation**

Quest'ultima fase rappresenta la fase in cui vengono progettati e condotti una serie di esperimenti di simulazione.

Le varie configurazioni di produzione considerate vengono ricavate direttamente dai database e vengono generati i rapporti sulle prestazioni dell'impianto in corrispondenza di ogni configurazione. Infine, in seguito ad un'analisi ed una valutazione accurata, si giunge alla scelta di una specifica soluzione di impianto che potrà essere adottata.

Come software di simulazione, come già precisato, è stato utilizzato ARENA e per la generazione dei codici di programmazione i linguaggi VBA e SIMAN.

Come accennato precedentemente, la metodologia di Wang et al è stata applicata ad un tipico sistema di produzione GA e, pertanto, le ipotesi alla base del modello sono strettamente correlate allo specifico processo di assemblaggio. In particolare per quanto riguarda il tipo di produzione ci sono più tipologie di auto e la logica di produzione che seguono è quella di un sistema PULL. La sequenza di input delle auto è rilasciata sulla base della domanda dei consumatori ed è gestita attraverso un sistema ERP.

Sono presenti due linee di montaggio, una principale ed una secondaria, composte da sezioni, ovvero stazioni di lavoro, e buffer. Una stazione rappresenta una specifica area dove vengono effettuate le operazioni relative ad uno specifico job ed il numero delle stazioni può variare in accordo con la produzione. Per ogni sezione si registrano dati quali il MTBF ed il MTTR, rispettivamente il tempo medio tra due guasti ed il tempo medio previsto per la riparazione. Sono, inoltre, previsti buffer ogni due sezioni .

Le parti all'interno del sistema sono assemblate in maniera sequenziale all'interno di ciascuna sezione o stazione di lavoro. Il processo di movimentazione dei materiali riguarda il trasporto all'occorrenza delle parti richieste in corrispondenza della giusta stazione. È presente un magazzino centrale in cui giacciono i vari componenti in attesa di essere utilizzati, magazzino con capacità ipotizzata illimitata. Il flusso dei materiali, quindi delle varie parti all'interno dell'impianto, viene gestito attraverso un sistema di programmazione Kanban.

Per poter descrivere l'entità dinamiche e statiche presenti nella linea di montaggio è stato sviluppato un modello IDEF1X. Come entità dinamiche si intendono tutti i dati di produzione (come sequenza di assemblaggio delle parti, BOM dei prodotti, sequenza di produzione, tempi di consegna e route relative al trasporto dei materiali), mentre con entità statiche ci si riferisce

alle informazioni relative al layout fisico dell'intero impianto (stazioni, buffer, trasportatori). Il modello in questione è stato utilizzato per interagire facilmente con il database MS ACCESS e per definire i dati dell'impianto GA considerando le varie interrelazioni presenti. In questo modo tutti i dati generati possono essere memorizzati per poi poter consentire la generazione automatica del modello di simulazione.

Pertanto, una volta disponibili i dati relativi all'impianto, come quelli riportati nella Tabella seguente, memorizzati all'interno di database MS ACCESS, il modello dell'impianto GA può essere rapidamente generato.

Tabella 14 *Dati di input ed output per la generazione automatica del modello[85]*

| Inputs required | | Outputs expected |
|--------------------------------------|--|-------------------------------------|
| Number of section, station, buffer | BOM per product model | Throughput |
| Length and speed of section conveyor | Assembly station and assembly time of each part | Operator/driver utilization |
| MTBF and MTR of sections | Initial online stock and its reorder rule of each part | Buffer utilization |
| Buffer capacity | Part delivery group for drivers | Part reorder and supplement records |
| Takt_time of each line | Part delivery quantity per trip | |
| Mixed production sequence | Part load/delivery/unload time | |

Quest'ultimo presenta tre strutture su tre livelli differenti:

1. nel primo livello sono presenti le quattro componenti dei moduli di simulazione; ovvero le parti in ingresso, la linea di assemblaggio generale, il sistema di gestione dei materiali e la partenza delle auto completate;
2. il secondo livello mostra la decomposizione dei moduli di primo livello. Sono presenti due modelli di arrivo uno per la linea relativa al corpo principale dell'automobile e l'altra relativa alle porte. I moduli relativi alle otto sezioni considerate ed ai sette buffer ed infine sedici moduli rappresentativi dei driver che si occupano delle consegne all'interno dell'impianto;
3. al terzo livello sono presenti i moduli di flusso dettagliati per ogni sezione, buffer o driver.

In Figura 14 è rappresentata l'intera struttura del modello appena descritta.

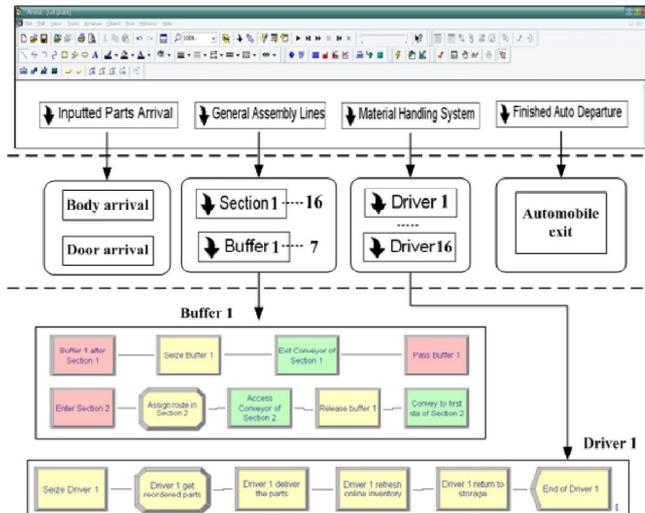


Figura 48 *Struttura complessiva del modello*[85]

Come gli stessi autori hanno specificato, la loro ricerca ha messo in luce la possibilità di ri-modellare ed aggiornare un modello di simulazione sulla base dei cambiamenti dinamici e dei dati in tempo reale, ricavabili dal sistema in analisi, mantenendo comunque le funzionalità di base del modello di partenza. In questo modo i tempi, i costi ed anche l'effort tipici della modellazione e della simulazione vengono ridotti drasticamente.

Per poter realizzare, però, una simulazione in tempo reale per decisioni da stabilire nel breve termine, relative ad esempio al controllo dell'impianto, è necessaria l'introduzione di un meccanismo che raccolga automaticamente e direttamente dal sistema IT dell'impianto tutti i dati di produzione. È indispensabile, quindi, costruire in "data-link" tra il sistema IT ed il simulatore. Questo perché sicuramente una raccolta di dati "manuale" può risultare un processo lungo e soggetto a errori.

Infine, sempre Wang et al, hanno specificato come questa metodologia possa essere applicata ed estesa ad altri software di simulazione.

Un altro esempio di sistema integrato è quello proposto da Kuhen et al [36] che hanno sviluppato un Simulation Based Job Shop Analyser come strumento di analisi a supporto della pianificazione e del controllo operativi che integra, appunto, l'impiego di applicazioni Java e di database. Il Simulation Based Analyser offre la possibilità di un approccio flessibile e

efficiente per simulare in maniera rapida un sistema di produzione ad elevate dimensioni di tipo jobshop. Tale strumento consente una generazione automatica del modello, una simulazione integrata, un'interfaccia con i database, tempi ridotti di simulazione, l'integrazione del sistema nell'ambiente produttivo e la possibilità di customizzazione.

I dati in input possono essere ottenuti da un'interfaccia con il database o XML ed in particolare sono classificabili in tre categorie:

- *dati relativi alle risorse*: parametri di produzione, macchine, centri di lavoro. Dati statici che generalmente non cambiano se non attraverso modifiche sostanziali del sistema;
- *dati operativi*: assegnazione dei calendari, dati di produzione. Dati che si modificano nel caso di interventi sul processo;
- *dati relativi ai job*: lista dei job, date e priorità. Dati che cambiano con frequenza giornaliera.

I dati sono impiegati per la generazione automatica del modello. Se necessario, alcune aree specifiche possono essere modellate più in dettaglio utilizzando specifici building blocks. In Figura 15 è rappresentata la struttura del sistema descritto:

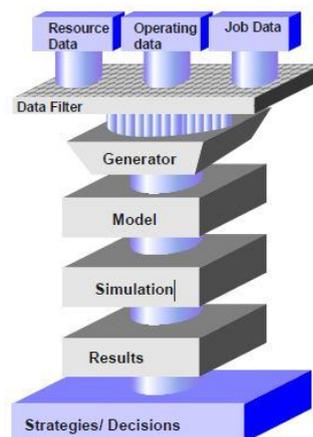


Figura 49 Automatic model generation[96]

L'architettura software dell'ultima versione è basata sull'impiego di linguaggi Java. L'analisi dei risultati, riportati su database, può essere

effettuata direttamente impiegando le interfacce utente dal modello o rilevando i dati dal database. Il simulatore può essere pienamente integrato con il sistema informativo esistente, ad esempio le interfacce utente per l'immissione di dati e l'analisi dei risultati possono essere collocate su un qualunque computer della rete.

Questo strumento permette la modellazione e simulazione di ogni tipo di produzione job shop nonché la possibilità di analizzare in maniera molto flessibile diverse strategie relative alla gestione operativa della produzione.

Abbiamo visto, quindi, come la simulazione nel corso degli anni è stata utilizzata per valutare diversi aspetti dei sistemi di produzione come: la pianificazione strategica della capacità d'impianto, la progettazione di un sistema di automazione, la validazione di un sistema produttivo e la valutazione di diversi scenari produttivi.

L'ultimo studio proposto è il lavoro di ricerca portato avanti da Wy et al [81] nato sempre con lo scopo di rispondere all'esigenza di disporre di un modello di simulazione di facile costruzione ed implementazione, ma soprattutto riutilizzabile. I sistemi di simulazione integrati, infatti, consentono proprio una rapida costruzione del modello ed un loro possibile riutilizzo per l'analisi e lo studio di diversi progetti di simulazione.

Wy et al propongono una struttura per lo sviluppo di un generico modello di simulazione per un sistema di produzione ad assemblaggio caratterizzato da tempi ridotti di costruzione. Il modello è stato sviluppato tenendo in considerazione, in modo particolare, gli aspetti logistici come ad esempio il flusso dei materiali.

Il simulatore da loro proposto rientra nella categoria dei "data-driven generic simulator", in quanto può essere applicato per la simulazione di diverse linee di assemblaggio, ed, idealmente, le istanze del sistema possono essere specificate solo attraverso dati di input senza l'ausilio della programmazione.

L'approccio seguito dagli autori presenta le seguenti caratteristiche:

- i dati relativi al layout fisico dell'impianto rappresentati in CAD vengono convertiti e tradotti all'interno del modello di simulazione. I dati comprendono le posizioni delle stazioni di lavoro, delle aree di stoccaggio dei materiali, le reti del percorso della movimentazione dei materiali;
- il generico modello di simulazione è progettato per linee di assemblaggio (cellulari o di trasporto tradizionali);
- il processo di produzione e quello di movimentazione dei materiali sono integrati nel modello generale;
- viene utilizzato il software di simulazione AutoMod (Brooks Automation Inc., 2006) come linguaggio di simulazione di base;
- le "work list" (liste di lavoro) presenti in AutoMod, ovvero la lista dei possibili job relativi alle risorse del processo di movimentazione, viene generata automaticamente e non manualmente.

La struttura proposta è composta da due software di modellazione sviluppati dagli stessi autori di questo lavoro: AutoLay e AutoLogic-Assembly. Il primo è stato sviluppato per convertire i dati di layout in formato CAD all'interno del modello di simulazione, mentre il secondo è un generico modello di simulazione AutoMod generato per considerare gli aspetti generali delle linee di assemblaggio.

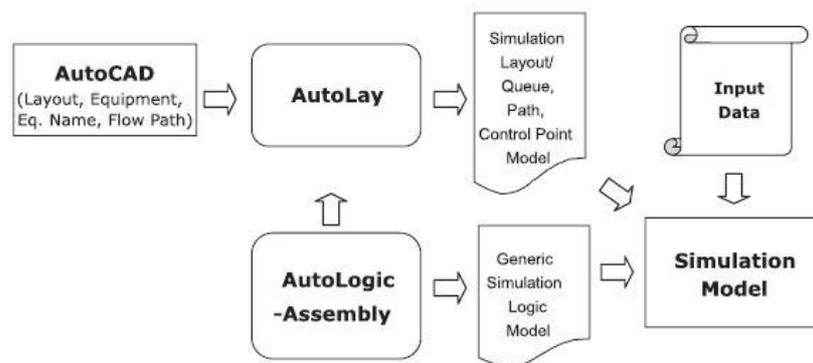


Figura 50 Framework proposto[81]

AutoLay, implementato in Borland C ++, legge i file del layout di impianto e genera le componenti all'interno di AutoMod come code, risorse e i percorsi dei vari flussi. Questo software è stato sviluppato per la fase di progettazione delle risorse nella costruzione del modello. Utilizzandolo un analista di simulazione può facilmente ricavare la posizione delle stazioni di lavoro, le aree di stoccaggio, definire la direzione di movimento dei percorsi e scrivere un modello AutoMod con tutte le caratteristiche necessarie (code, risorse, punti di controllo, etc). Possono essere impostati, in un secondo momento, gli "assembly tasks" del sistema che si vogliono simulare, ovvero gli assemblaggi da eseguire, preparando opportuni dati di input: materiali necessari, risorse per la movimentazione dei materiali e dati relativi al settaggio della simulazione.

AutoLogic-Assembly è un modello di simulazione generica data-driven che può essere applicato a diversi sistemi di linee di montaggio, perché il processo logico alla base delle catene di montaggio è lo stesso: parti o componenti sono in movimento nell'impianto per essere assemblate in corrispondenza delle stazioni di lavoro. Le risorse addette al processo di movimentazione dei materiali, sia operatori che veicoli hanno il compito di trasferire al momento giusto ed al posto giusto le parti necessarie. È sulla base di questa considerazione che gli autori hanno sviluppato un modello di simulazione generico per le catene di montaggio.

È stato realizzato un "data model" ovvero una rappresentazione in forma tabellare di tutte le informazioni ed i dati necessari per poter modellare una linea di assemblaggio. Il formato dei dati è intuitivamente comprensibile perché segue il naturale processo delle operazioni di assemblaggio. Esempi di dati sono: materiale necessario, tipologia di prodotto-processo, schedulazione della produzione, acquisti, risorse, tutti strettamente correlati tra loro.

Questo software si concentra principalmente sul flusso dei materiali (parti o componenti). Il flusso logico del modello generale è rappresentato nella figura successiva.

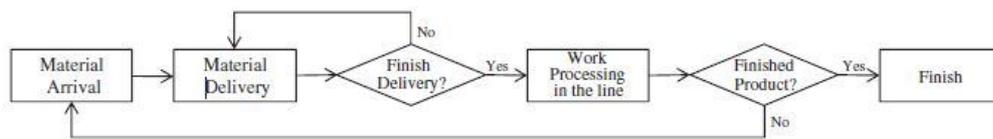


Figura 51 *Flusso logico del modello[81]*

In seguito all'arrivo di un lotto di materiali nella linea di montaggio, lo stesso viene trasferito in un deposito o direttamente sulla linea a seconda del percorso di consegna e della programmazione della produzione dell'intero lotto. Quando viene consegnato ad una linea, ogni parte del lotto sarà assemblata in una componente o in un prodotto finito. Un prodotto potrà lasciare il sistema solo quando l'assemblaggio di ogni sua parte risulta terminato.

La Figura seguente rappresenta, invece, la logica specifica del modello AutoLogic-Assembly: vengono letti i dati di input e verificata la loro integrità. Le principali procedure della logica sono collegate al flusso dei carrelli e dei materiali che regolano il flusso delle risorse impegnate nella movimentazione dei materiali (come le consegne degli operatori o dei veicoli) ed al break down delle risorse.

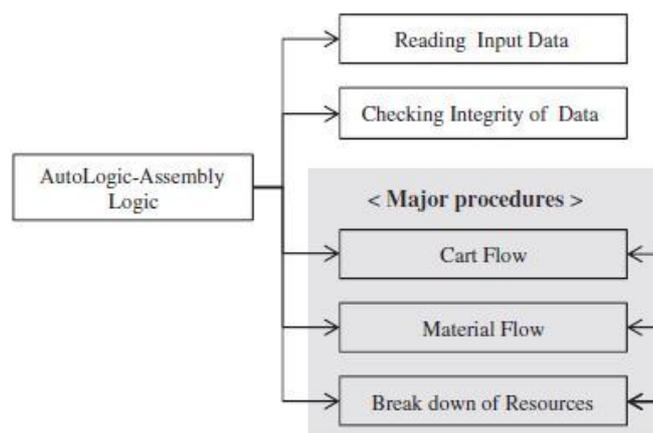


Figura 52 *Logica del modello AutoLogic Assembly[81]*

Il modello sviluppato da Wy et al prevede anche una funzione di reporting: può essere visualizzato l'avanzamento in tempo reale di alcuni parametri di

sistema come il numero di prodotti assemblati, il tempo di lavorazione della linea e l'utilizzo delle risorse impegnate nella movimentazione dei materiali. Risulta essere una struttura in grado di sviluppare un modello di simulazione integrato di un processo produttivo e di un processo di movimentazione dei materiali in un tempo molto ridotto rispetto alle metodologie di simulazione tradizionali. È, infatti, caratterizzato, come descritto, da una struttura di base, da un modello di dati, da un software di layout e da un flusso logico che permettono una facile generazione del modello di simulazione.

Un altro concetto, strettamente collegato ai sistemi di simulazione integrati, si è sviluppato in questi ultimi anni ovvero il concetto di **Digital Factory**.

La simulazione svolge un ruolo fondamentale all'interno di questo concetto che nasce con l'obiettivo di offrire un approccio integrato per il miglioramento dei processi ingegneristici di prodotto e di processo [97]. Differenti tipologie di simulazione, infatti, come quella ad eventi discreti o 3D, possono essere impiegate all'interno di "modelli virtuali" su diversi livelli di pianificazione o su diverse fasi per migliorare il prodotto e la pianificazione del processo a tutti i livelli: dal top level al factory floor. È evidente, quindi come il fattore chiave sia appunto l'integrazione che, in particolare, riguarda i seguenti processi:

- sviluppo, test ed ottimizzazione del prodotto;
- sviluppo dei processi di produzione e di ottimizzazione;
- progettazione e miglioramento degli impianti;
- controllo e pianificazione delle operazioni di produzione.

Di conseguenza per poter introdurre ed applicare questo nuovo approccio bisogna sicuramente disporre di un sistema di raccolta dati efficiente e completo che funga da ponte di collegamento tra le varie aree aziendali.

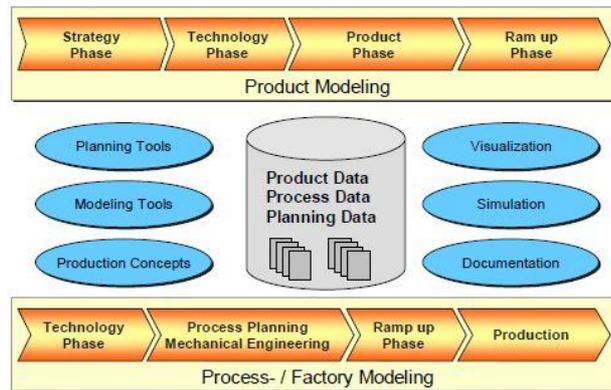


Figura 53 Il concetto di *Digital Factory*

La Digital Factory [98]:

- consente la gestione integrata dei dati su prodotti, processi e risorse ed, inoltre, la gestione della conoscenza riguardo l'organizzazione sistematica della produzione;
- consente la realizzazione di una pianificazione attraverso l'impiego di modelli opportuni, nonché una combinazione armonizzata di sottomodelli costruiti sulla base di differenti aspetti progettuali;
- consente di valutare diversi scenari di produzione e/o progettazione attraverso lo strumento simulativo.

Kühn [97], pertanto, propone un vero e proprio esempio di sistema integrato in cui la simulazione svolge un ruolo neurale.

Nella Tabella seguente si riportano i principali lavori analizzati per la descrizione e lo studio dei Sistemi di Simulazione Integrati. Per ogni articolo è indicato il riferimento bibliografico, gli autori, il titolo, ne viene data una valutazione soggettiva (su una scala crescente da 1 a 3) in merito al contributo scientifico (nell'analisi da noi realizzata) ed all'innovazione tecnologica ed, infine, viene indicato il campo di applicazione dei modelli di simulazione proposti dagli autori.

Tabella 15 *Quadro sinottico dei lavori analizzati nell'ambito dei Sistemi di Simulazione Integrati*

| Riferimento | Autori | Titolo | Contributo scientifico | Innovazione Tecnologica | Modello di simulazione proposto : si/no | Campo di Applicazione del modello |
|--------------------|---------------------------------------|--|-------------------------------|--------------------------------|--|---|
| [81] | Wy, Jeong, Kim, Park, Shin, Yoon, Lee | A data-driven generic simulation model for logistics-embedded assembly manufacturing lines | XXX | XXX | si | Logistica e linee di assemblaggio |
| [82] | Bergmann, Strassburger | Challenges for Automatic Generation of Simulation Models for Production System | XXX | XX- | no | - |
| [85] | Wang, Chang, Xiao, Wang, Li | Data driven production modeling and simulation of complex automobile general assembly plant | XXX | XXX | si | Sistema di gestione dei materiali, impianto di assemblaggio |
| [86] | Mertins, Rabe, Gocev | Integration of factory planning and ERP/MES systems: adaptive simulation models | XX- | XX- | si | Sistema di Produzione (ERP,MPS) |
| [87] | Lee, Cho, Jung, | A conceptual framework for the generation of simulation models from process plans and resource configuration | X-- | XX- | si | Sistema di produzione |
| [88] | Son, Wysk | Automatic simulation model generation for simulation-based, real-time shop floor control | XX- | XX- | si | Sistema di produzione discreto |
| [89] | Son, Wysk, Jones | Simulation-based shop floor control: formal model, model generation and control interface | XX- | XX- | si | Sistema di produzione discreto |

| | | | | | | |
|------|----------------------------|--|-----|-----|----|--|
| [90] | Son, Wysk, Jones | Automatic generation of simulation models from neutral libraries:an example | X-- | XX- | si | Sistema di produzione |
| [91] | Tjahjono, Fernandez | Practical approach to experimentation in a simulation studyin: Proceedings of the Winter Simulation Conference | X-- | XX- | si | Linee di assemblaggio |
| [92] | Musselman, O'Reilly, Duket | The role of simulation in advanced planning and scheduling | XX- | XX- | si | Sistema di produzione (ERP) |
| [93] | Concannon, Hunter, Tremble | Simul8-Planner simulationbased planning and scheduling | XX- | XX- | si | Sistema di produzione (pianificazione) |
| [94] | Marvel, Schaub, Weckman | Validating the capacity planning process and flowline product sequencing through simulation analysis | XX- | XX- | si | Sistema di produzione (pianificazione) |
| [96] | Kuehn, Draschba | Simulation based job shop production analyser | XX- | XX- | si | Sistema di produzione |
| [97] | Kühn | Digital Factory –Simulation enhancing the product and production engineering process | XX- | XXX | no | Sistema di produzione |
| [98] | Kádár, Pfeiffer, Monostori | Discrete event simulation for supporting production planning and scheduling decisions in digital | XX- | XX- | si | Sistema di produzione |

3.3 Conclusioni

Dall'analisi effettuata si evince come gli studi e gli approcci sviluppati nel corso degli anni, in merito ai sistemi integrati, siano fortemente particolarizzati sulla base delle esigenze dello specifico processo produttivo preso in considerazione. Ed, inoltre, pochi sono i lavori in cui i sistemi di simulazione sono globalmente integrati all'interno dell'ambiente produttivo, infatti, nella maggior parte dei casi si fa ricorso alla simulazione per risolvere problemi emersi all'interno di una particolare funzione aziendale.

Tuttavia, come abbiamo visto per la Digital Factory, è sempre maggiore l'attenzione posta all'integrazione di più ambienti, soprattutto in relazione ai numerosi vantaggi ottenibili in termini di: efficienza, efficacia, dinamicità, flessibilità, semplicità di utilizzo e riduzione di tempi, effort e costi.

È stato, inoltre, evidenziato come attraverso l'impiego di questa tipologia di sistemi è possibile realizzare una generazione automatica dei modelli di simulazione. Come è stato bene descritto da Wang et al [85], la simulazione guidata dai dati (data driven simulation) non deve essere vista come un sostituto degli strumenti generali di simulazione, ma come un valore aggiunto, quindi come una tecnica preziosa in situazioni dove è necessario creare molti modelli di simulazione per la valutazione di un'ampia varietà di scenari. Questo perché riduce drasticamente i tempi ed abbassa il livello di competenza normalmente richiesto in questo ambito.

Quando il sistema di simulazione è combinato con opportuni database, come quello di produzione, è possibile aggiornare istantaneamente i parametri del modello ed avviare delle simulazioni in parallelo al sistema reale di produzione per supportare e/o rafforzare le decisioni relative all'impianto [98].

Un sistema di simulazione integrato non è sicuramente semplice da realizzare, infatti, spesso si può essere scoraggiati dai molti problemi che si devono affrontare, come [82]:

- carenza o non completezza dei dati del sistema.

Nella fase di progettazione di un particolare sistema in cui è importante la simulazione per avere un'idea del funzionamento dell'impianto, molto frequentemente i dati risultano essere incompleti o con un livello di dettaglio piuttosto basso.

Nella fase operativa potrebbero essere disponibili dati strutturali sul sistema di produzione (ricavabili ad esempio da sistemi ERP), ma non disponibili i dati dettagliati provenienti dalla fase di progettazione. Inoltre potrebbe non essere considerati alcune informazioni necessarie per la simulazione come distribuzioni di probabilità dei tempi di degradazione;

- difficoltà nel rappresentare il comportamento dinamico e complesso del sistema;
- riutilizzabilità del modello in più fasi del ciclo di vita del sistema produttivo.

Spesso risulta difficile adattare modelli nati nella fase di pianificazione a lavorare nella fase operativa. Se non si riescono, infatti, ad introdurre automaticamente nel modello di simulazione del sistema produttivo tutte le modifiche e gli aggiornamenti tipici della fase operativa, il modello diventa obsoleto e rischia di fornire previsioni imprecise.

Questi sono solo alcuni delle difficoltà che si possono incontrare nella realizzazione di un sistema di simulazione integrato.

Gli innumerevoli vantaggi offerti da questo strumento, però, sono la ragione per cui negli ultimi anni molte sono state le ricerche in merito, all'interno del settore della simulazione. In Tabella se ne riportano alcuni:

Tabella 16 *Principali vantaggi nell'utilizzo dei Sistemi di Simulazione Integrati*

| VANTAGGI |
|--|
| Rapida costruzione del modello |
| Realizzazione di un modello riutilizzabile per l'analisi e lo studio di diversi progetti e scenari |

| |
|--|
| Possibilità di aggiornamento dei dati in tempo reale in seguito ad eventuali cambiamenti nel sistema reale |
| Ridotti tempi, costi ed effort della modellazione |
| Facilità di utilizzo da parte di tutti gli utenti |
| Gestione integrata dei dati sui prodotti, processi etc |

È importante, infine, sottolineare un elemento che ha accumulato la maggior parte, se non la totalità degli studi proposti: l'utilizzo di modelli di simulazione ad eventi discreti. La ragione è forse da ricercare nel fatto che sono considerati meglio rappresentativi dei sistemi di produzione. Quando si parla della Discret Event Simulation, infatti, il sistema analizzato viene descritto da una successione di operazioni che iniziano e terminano in istanti ben definiti, ovvero gli eventi ed il sistema al verificarsi di un evento subisce una evoluzione, un cambiamento di stato, mentre nel tempo che intercorre tra due eventi successivi permane nello stesso stato.

Il seguente elaborato di tesi è, invece, incentrato sull'utilizzo di modelli di simulazione continui, perché più adatti a problemi riguardanti processi continui in cui il feedback influisce in modo significativo sul comportamento dinamico del sistema. Quando si parla di simulazione in continuo l'evoluzione del sistema avviene, appunto, in continuo e la simulazione si basa su una serie di fotogrammi ugualmente distanti nel tempo. Lo stato del sistema in ogni istante è univocamente determinato dallo stato iniziale e dai parametri del modello.

Attraverso l'impiego della System Dynamics, tecnica per la rappresentazione e l'analisi del comportamento dinamico di sistemi continui, l'obiettivo dello studio proposto ha riguardato in particolare la definizione di un modello di simulazione parametrico, integrato, per la gestione dell'integrazione delle operations negli impianti industriali. L'attenzione si è concentrata, in particolare, su due importanti funzioni aziendali: la produzione e la manutenzione. Nei capitoli successivi verranno descritti, in maniera più

dettagliata, la System Dynamics, il software di simulazione utilizzato, il lavoro sviluppato ed i risultati raggiunti.

Capitolo 4

La System Dynamics

4.1 Introduzione

Le attuali necessità aziendali hanno trovato una concreta risposta nella simulazione poiché risulta essere un valido strumento attraverso il quale è possibile, in un ambiente protetto e con costi e tempi ridotti, orientare le scelte strategiche di un'impresa ed analizzare le cause e le conseguenze di azioni inattese. Fare simulazione significa, infatti, costruire un modello che sia in grado di funzionare nel tempo in modo simile al sistema in esame, condurre esperimenti sul modello, per poterne studiare il comportamento, ed analizzarne i risultati.

È possibile schematizzare lo studio di un problema basato sulla simulazione in otto fasi:

- formulazione del problema e scelta dell'obiettivo
- raccolta ed elaborazione dati
- costruzione di un modello
- scelta del software e costruzione di un programma
- validazione del modello di simulazione
- progettazione della simulazione
- esecuzione della simulazione e analisi dei risultati
- presentazione delle conclusioni

Bisogna, quindi, prima di tutto, comprendere il problema cercando di capire quali sono gli scopi dello studio e di identificare quali sono le componenti essenziali e le misure di prestazione che interessano. Solo una volta stabiliti i termini esatti del problema è possibile iniziare la raccolta dati: attraverso rilevazioni, banche dati o attraverso generazioni casuali di distribuzioni di

probabilità relative alle quantità di interesse. Generalmente è possibile solo stimare queste distribuzioni derivandole, ad esempio, dall'osservazione di sistemi simili esistenti oppure, nel caso ciò non sia possibile, ricorrendo ad altre fonti di informazioni (come studi sperimentali, specifiche e manuali dei macchinari). La fase relativa alla costruzione del modello riguarda l'individuazione delle componenti del sistema in esame e le relazioni funzionali che legano tali componenti tra loro: deve essere possibile descrivere interamente il sistema mediante formule matematiche e logiche relative alle variabili in gioco. Prima della scelta del software è importante che siano definiti: il diagramma di flusso della simulazione, l'elenco degli elementi (macchine, entità, magazzini) e gli attributi (stati) che ne descrivono le posizioni nel sistema; l'elenco delle operazioni e degli eventi di inizio e fine operazioni, le loro durate, altre informazioni, ad esempio in forma tabellare, ed un piano, provvisorio, dell'esperimento di simulazione con l'elenco delle performance che si intendono tenere sotto controllo.

Dopo aver costruito il modello questo deve essere tradotto in un programma [99]. È possibile utilizzare linguaggi "general purpose" come C++ e FORTRAN, molto utilizzati alla nascita della simulazione, ma oggi sostituiti con linguaggi specifici per la simulazione che richiedono un tempo di programmazione inferiore; linguaggi di simulazione generali, come MODSIM, GPSS, SIMSCRIPT, etc; simulatori ovvero pacchetti di simulazione orientati alle applicazioni. Ne esistono diverse tipologie di tipo interattivo come ARENA, WITNESS ed EXTEND, alcuni abbastanza generali anche se dedicati a specifici tipi di sistemi (impianti industriali e sistemi di comunicazione), altri invece sono molto specifici. I simulatori permettono di costruire un programma di simulazione utilizzando menù grafici senza bisogno di programmare. Sono abbastanza facili da imparare anche se molti di essi sono limitati a modellare quei sistemi previsti dalle loro caratteristiche standard. Alcuni prevedono la possibilità di incorporare routines scritte in un linguaggio general purpose per trattare elementi non

standard. Spesso hanno anche capacità di animazione per mostrare la simulazione in azione e per facilitare un loro utilizzo anche a persone non esperte; fogli elettronici (spread sheets) come ad esempio Excel. Un loro utilizzo è indicato quando si hanno problemi di piccole dimensioni.

Nella fase di validazione è necessario verificare se il modello realizzato fornisce risultati validi per il sistema in esame: bisognerà testarlo con opportune sperimentazioni allo scopo di collaudarlo e, se necessario, migliorarlo. Prima di passare all'esecuzione della simulazione bisogna effettuare un'accurata pianificazione degli esperimenti. Lo scopo di uno studio di simulazione, infatti, è quello di poter condurre esperimenti virtuali senza che ci siano cambiamenti sul sistema reale: si può osservare il comportamento del sistema in particolari condizioni estreme, oppure cosa succede applicando modifiche ad alcuni parametri. Per ottenere risultati accurati, normalmente, il modello viene fatto funzionare per un certo tempo prima di raccogliere qualsiasi dato di tipo statistico. Inoltre, gli esperimenti che possono essere condotti sono essenzialmente di due tipi: *interattivi e comparativi*. Nel primo caso, facendo funzionare il modello, si osserva cosa succede (in seguito ad esempio all'implementazione di un'azione). Con esperimenti di tipo comparativo, invece, si modifica lo stesso parametro più volte per vedere come si comportano i vari modelli e per scegliere poi la soluzione che più si avvicina alla soluzione reale o che meglio ottimizza i parametri.

Effettuato l'esperimento di simulazione si passa all'analisi dei risultati che devono poter essere facilmente esaminati e compresi da chi deve prendere le decisioni. È importante mettere in evidenza la relazione tra variabili di decisione, legate alle alternative impiantistiche o alle pratiche operative, e quelle di prestazione come la produttività, oppure il costo o il profitto che si ottiene.

- Al termine dello studio è necessario redigere una relazione ed una presentazione che riassume il lavoro effettuato, come è stato condotto,

i risultati raggiunti, le considerazioni e le conclusioni a cui si è giunti evidenziando i limiti della simulazione e le ipotesi semplificative adottate.

4.2 I modelli di simulazione

Alla base di qualsiasi studio simulativo, come suggerisce la stessa definizione del termine – simulazione: “*il processo di progettazione di un modello di un sistema reale sul quale condurre poi degli esperimenti al fine di comprendere il comportamento del sistema e / o valutare diverse strategie per il suo funzionamento*” [76] – sono presenti i modelli di simulazione.

Un modello non è altro che il modo con cui viene formalizzato il sistema che rappresenta la realtà in esame. Lo studio e l’analisi di sistemi tramite una rappresentazione astratta o una sua formalizzazione è utilizzato in molte e differenti discipline scientifiche, dall’informatica alla fisica, dalla biologia all’economia.

Esistono diverse tipologie di modelli come i classici *modelli in scala*, utilizzati prima della diffusione dei calcolatori elettronici, che riproducono fedelmente in scala una qualsiasi struttura, ovvero una realtà che si vuole studiare. I *modelli analitici* in cui le componenti del sistema sono rappresentate da un insieme di variabili, di parametri e un insieme di relazioni matematiche che limitano e definiscono i valori ammissibili delle variabili in gioco. La valutazione del sistema richiede il calcolo di una soluzione del modello analitico tramite metodi analitici o soluzioni numeriche. Spesso, infatti, è presente una funzione obiettivo da massimizzare o minimizzare attraverso algoritmi di ottimizzazione (i modelli analitici sono ad esempio quelli studiati nell’ambito della programmazione matematica o nella teoria delle code).

Fra le tecniche modellistiche per l'analisi dei sistemi ci sono poi i *modelli di simulazione* che rappresentano il comportamento dei sistemi attraverso un certo numero di equazioni e algoritmi logici, codificati in un linguaggio di programmazione. La valutazione di un sistema tramite questa tipologia di modello richiede, infatti, l'esecuzione (run) di un programma di simulazione o di un simulatore che rappresenta l'evoluzione del sistema e su cui si effettuano delle misure per stimare le grandezze di interesse.

4.2.1 Elementi di un Modello di Simulazione

All'interno di un modello di simulazione è possibile identificare alcuni elementi caratteristici [99]:

- *Variabili di Stato*

Si tratta di grandezze numeriche o logiche che descrivono il sistema in ogni istante di tempo. Variano nel tempo perché caratteristiche di un determinato stato (istante) del sistema. E' bene ricordare che esistono sistemi discreti, in cui le variabili cambiano istantaneamente in corrispondenza di precisi istanti di tempo che sono finiti, oppure appartenenti ad un insieme numerabile, e sistemi continui in cui le variabili variano con continuità rispetto al tempo. Non necessariamente, però, la scelta relativa alla tipologia di modello corrisponde al tipo di sistema rappresentato.

- *Stati*

Variabili (numeri o valori logici) che descrivono lo stato del sistema e delle sue componenti per ogni istante di tempo.

- *Eventi*

Si definisce evento un qualsiasi accadimento istantaneo che fa cambiare il valore di almeno una delle variabili di stato. L'arrivo di un utente ad un sistema a coda è un evento, così come il completamento

di un servizio o di una lavorazione. Esistono eventi esterni al sistema (eventi esogeni) ed eventi interni (eventi endogeni).

- *Entità ed Attributi*

Le entità sono dei singoli elementi del sistema che devono essere definiti. Sono temporanei, subiscono passivamente le trasformazioni ed, inoltre, a seconda o meno di un loro ingresso e, quindi, movimento nel sistema, si possono distinguere in dinamiche o statiche. Esempi di entità possono essere: le materie prime, le informazioni, un utente in coda, un servente o anche un cliente.

Le entità possono essere caratterizzate da attributi che forniscono un valore di un dato assegnato all'entità stessa. Sulla base degli attributi è possibile anche raggruppare le entità in classi.

- *Code*

Sono insiemi di entità che non possono accedere alle trasformazioni successive in quanto una risorsa o una macchina risultano occupate.

- *Risorse*

Le risorse sono elementi del sistema che forniscono un servizio alle entità. Quest'ultima può richiedere una o più risorse e dovrà attendere o intraprendere un'altra azione se queste non risultano disponibili. Se invece la risorsa è libera può essere "catturata" dall'entità, "trattenuta" per il tempo necessario e poi "rilasciata". In base a come viene costruito il modello una risorsa potrebbe coincidere con un'entità.

- *Macchine*

Rappresentano gli elementi fissi del sistema e anch'esse possono essere considerate delle risorse. Le macchine possono essere fisiche, cioè realmente presenti nel sistema da modellare, o logiche in quanto compiono operazioni fittizie, ma presenti a livello logico nel sistema.

- *Operazione*

Rappresenta una particolare trasformazione che interesserà una o più entità. Le operazioni riguardanti le macchine rappresentano gli stati

che la macchina attraverserà e le lavorazioni che eseguirà; mentre quelle riguardanti un “pezzo” non sono altro che i percorsi delle entità nel sistema, le macchine attraversate e le trasformazioni subite.

- *Attività e Ritardi*

Un’attività rappresenta un’operazione la cui durata è nota a priori. Tale durata può essere una costante, un valore aleatorio generato da una distribuzione di probabilità, data in input oppure calcolata sulla base di altri eventi presenti nel sistema.

Un ritardo è, al contrario, un periodo di tempo di durata indefinita determinata dalle condizioni stesse del sistema (ad esempio è considerata un ritardo l’attesa in coda di un’entità).

- *Parametri fissi*

Sono grandezze numeriche o logiche decise in fase di modellazione che non variano nel corso della simulazione.

Si tratta di elementi tipicamente presenti all’interno di un modello ma, in generale, a seconda del livello di astrazione, quindi di dettaglio, desiderato per il modello stesso ed a seconda delle alternative di studio che si vogliono intraprendere si possono trovare altri elementi o grandezze rappresentative del sistema in esame.

4.2.2 Classificazione dei Modelli

I modelli di simulazione possono essere classificati in base a diversi criteri. Una prima distinzione, accennata anche nei paragrafi precedenti, sicuramente è quella tra i modelli continui e discreti. Si differenziano per il modo in cui il sistema evolve nel tempo. In un *modello discreto* lo stato cambia solamente in un numero finito di punti dell’asse temporale e le variabili assumono un insieme ben definito di valori, in precisi istanti di tempo: il sistema commuta il suo stato solo in corrispondenza di un evento. In un *modello continuo*, invece, lo stato, e dunque le variabili, variano con continuità.

Un'altra distinzione è tra i modelli statici e dinamici che si differenziano per il ruolo delle variabili di stato nel tempo. I *modelli statici* rappresentano un sistema in un particolare istante di tempo e, dunque, le variabili non dipendono dal tempo ed hanno un valore costante. I *modelli dinamici*, al contrario, rappresentano un sistema in evoluzione nel tempo: contengono il tempo come variabile esplicita e le componenti del sistema possono essere espresse in termini di equazioni differenziali continue o di equazioni discrete, che sono integrate per descrivere il comportamento del sistema nel tempo.

Infine si possono distinguere i modelli deterministici, che non contengono componenti probabilistici, e stocastici che, al contrario, presentano elementi soggetti ad aleatorietà. Un *modello deterministico* effettua una previsione fornendo come output un valore numerico senza dare nessuna misura della distribuzione probabilistica di quel risultato ed, inoltre, l'evolversi del sistema è strettamente correlato agli input, alle caratteristiche ed alle condizioni iniziali del sistema considerato. Si parla di *modelli di simulazione stocastici*, invece, se sono presenti elementi aleatori che a seconda dei valori assunti possono portare a differenti comportamenti.[99]

La scelta di una particolare tipologia di modello è sicuramente collegata e dipendente dall'obiettivo prefissato e dalle prestazioni che si possono ottenere.

Si parla di *Simulazione ad Eventi Discreti* (DES) quando il sistema è rappresentato, nella sua evoluzione nel tempo, con variabili che cambiano istantaneamente il loro valore in ben definiti istanti di tempo appartenenti ad un insieme numerabile, in corrispondenza dei quali si verificano specifici eventi. Ogni evento segna, quindi, il cambiamento di stato del sistema che resta, invece, invariato tra due eventi successivi. Un evento può essere identificato, ad esempio, con un'azione specifica o con un'occorrenza spontanea dovuta alla natura delle cose ed ad esso deve essere associata una procedura, detta transizione di stato, che definisce come lo stato del sistema,

ossia le variabili di stato associate alle entità, evolvono a causa dell'evento. Molte applicazioni sono ben rappresentate da modelli di questo tipo come i sistemi a coda, i sistemi di comunicazione ed i sistemi di trasporto. Questa metodologia di simulazione è molto utile anche nell'analisi e nello studio dei sistemi di produzione, del tasso di utilizzo delle risorse e per evidenziare eventuali punti critici del sistema, i cosiddetti "bottlenecks".

La simulazione discreta fornisce una fotografia dei momenti salienti dell'evoluzione dello stato ed è proprio questo che la differenzia dalla Simulazione Continua. Quest'ultima infatti traccia costantemente le dinamiche del sistema nel tempo. Non esistono istanti privilegiati, ma la realtà è osservata ed analizzata nella sua interezza: lo stato del sistema in ogni istante è univocamente determinato dallo stato iniziale e dai parametri del modello.[4]

Una specifica metodologia di simulazione continua è rappresentata dalla System Dynamics (SD), tecnica meglio approfondita nel paragrafo successivo.

4.3 La System Dynamics

La System Dynamics nasce alla fine degli anni '50 presso l' MIT - *Massachusetts Institute of Technology* - di Cambridge (USA) ad opera di J. W. Forrester ed è una metodologia utilizzata per comprendere i cambiamenti dei sistemi nel tempo. Consente, infatti, di rappresentare questi ultimi come insiemi di più componenti che interagiscono tra loro e di analizzarne il comportamento dinamico.

L'approccio System Dynamics può essere definito come una disciplina che si compone di un ricco repertorio di strumenti teorici e tecnici per la modellazione, la simulazione, tramite computer, e l'analisi del comportamento dei sistemi dinamici. Originato dall'accostamento di elementi provenienti da più discipline, quali la teoria del controllo ottimo, la teoria dei

servosistemi e le teorie comportamentistiche delle decisioni, la System Dynamics offre un contesto in cui è possibile costruire teorie del comportamento dei sistemi aziendali.[101]

I fenomeni studiati mediante la teoria della SD sono sostanzialmente dei sistemi complessi, in primo luogo dinamici e che evolvono nel tempo in maniera continua: in particolare si tratta di sistemi socioeconomici ma risulta ben applicabile a molti altri contesti. Negli ultimi quarant'anni i modelli in System Dynamics sono stati impiegati, ad esempio, per affrontare problemi strategici, problematiche relative al comportamento di sistemi economici, problemi manageriali, modellazione di sistemi biologici e medici, problemi energetici e ambientali, teorie di sviluppo di scienze sociali e naturali, problemi di decision making, problematiche relative a dinamiche complesse non lineari e problemi di supply chain management. Caratteristica comune a tutte le varie tipologie di sistemi sta nel fatto che la struttura di ogni sistema ne determina il particolare comportamento. Tuttavia, nonostante il vasto range di applicazioni, la modellazione dei sistemi in SD risulta ancora poco conosciuta rispetto ad altre metodologie [102].

La SD, attraverso un approccio sistemico, fornisce una prospettiva nuova all'analisi e allo studio dei sistemi e dei processi continui, non focalizzandosi su quelli che sono i singoli oggetti e le singole entità che costituiscono un sistema, bensì cogliendo quello che è il comportamento del sistema nel suo complesso. È proprio questa caratteristica che lo rende efficace in questioni di tipo strategico dove ciò che è fondamentale è avere una visione generale della dinamica del sistema.

L'ipotesi principale su cui si basa questa metodologia è che la struttura dei sistemi è generalmente caratterizzata da circuiti di feedback, da processi di accumulazione e da ritardi tra causa ed effetto. I feedback ed i ritardi (delay) causano e determinano il comportamento di un certo sistema, pertanto, è la struttura stessa di un sistema, rappresentata da una serie di relazioni causalmente collegate fra loro, la causa dei suoi successi o fallimenti.

Nel seguito verranno analizzati gli elementi fondamentali della struttura di un modello SD.

4.3.1 Elementi Fondamentali in un Modello SD

Come già accennato il linguaggio simbolico con il quale, nell'ambito del System Dynamics, si rappresentano i sistemi si basa sui concetti di variabile di livello, variabile di flusso e circuito di retroazione. Ogni sistema aziendale può essere rappresentato come un insieme di interconnesse variabili livello e variabili flusso che formano un'ossatura di circuiti di retroazione concatenati.[101]

Le *variabili di livello (stock)* rappresentano lo stato di un sistema in un dato istante come risultato di processi che hanno già avuto luogo. Esempi di stock sono gli impianti, un magazzino o anche le conoscenze all'interno di un'azienda. Le *variabili di flusso (flow)* rappresentano, invece, i processi che operano per cambiare lo stato del sistema agendo sulle variabili livello. Raccogliendo le informazioni che scaturiscono dalle prime, contengono le indicazioni per cambiarne lo stato, ed esprimono le variazioni positive o negative delle variabili di livello.

Secondo Forrester gli stocks rappresentano quella che è la memoria del sistema nel senso in cui il risultato delle azioni passate rimane accumulato in essi, creano continuità tra presente e futuro, tra momenti successivi nel tempo, perché contengono le informazioni necessarie per definire le decisioni, e quindi le azioni future. Evolvono in maniera incrementale nel tempo per successive accumulazioni o sottrazioni e le variabili di flusso costituiscono il canale tramite il quale affluisce o defluisce il contenuto del livello.

Il terzo elemento fondamentale è il *circuito di retroazione* o di *feedback*, che rappresenta il meccanismo alla base del comportamento dinamico di un

sistema. I circuiti di retroazione hanno origine dalla presenza di variabili livello e variabili flusso. I processi descritti dalle variabili flusso, infatti, per funzionare, hanno bisogno, come già accennato, di ricevere informazioni che partono dalle variabili livello. In questo modo, lo stato delle variabili livello regola i processi che influiscono sul proprio stato in momenti successivi. Pertanto, i circuiti di retroazione regolano il "tasso" (rate) di accumulazione o erosione delle variabili livello (stock) in essi compresi. Possono essere definiti come una catena di due o più variabili che si influenzano reciprocamente ed, inoltre, ciascuna variabile può essere parte di più circuiti di retroazione contemporaneamente.

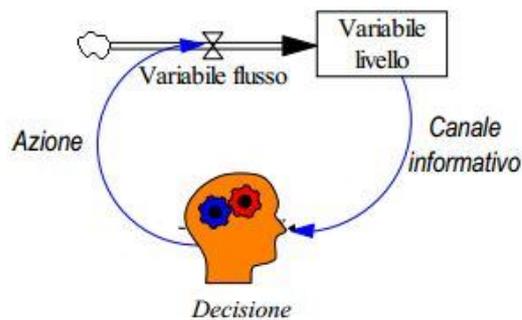


Figura 54 *Struttura circuiti di retroazione*

La Figura sintetizza la struttura dei circuiti di feedback e, quindi, il legame presente tra i vari elementi in gioco. Oltre agli elementi sopra descritti è possibile trovare anche un tessuto di canali che trasporta le informazioni tra le variabili, ed un insieme di decisioni, o funzioni di decisione, che descrive il modo in cui le informazioni, circa lo stato delle variabili stock, sono utilizzate per azionare le variabili di flusso.

L'impiego dei termini "livello" e "flusso" trae origine dalla cosiddetta metafora idraulica che considera un flusso d'acqua in entrata ed in uscita da un serbatoio. È infatti più semplice pensare allo stock come un serbatoio d'acqua ed ad una variabile di flusso come un rubinetto: la quantità d'acqua nella vasca, in qualsiasi istante di tempo, è pari al flusso d'acqua che scorre

attraverso il rubinetto meno quello che fluisce dal rubinetto di scarico. Allo stesso modo la quantità di materiale nello stock è pari alla quantità di materiale in entrata meno quella in uscita.

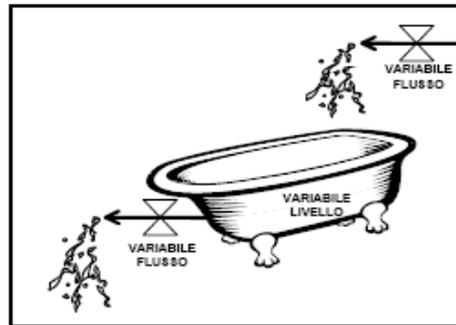


Figura 55 *Metafora della vasca da bagno*

La sostanza contenuta all'interno delle variabili/vasca e rubinetti, deve necessariamente essere la stessa, ma per misurarla è necessario utilizzare unità di misura diverse (ad esempio se l'acqua contenuta nella vasca può essere misurata in litri, l'acqua che entra e esce dal rubinetto può essere misurata in litri al secondo). Quanto detto sottolinea ancora di più il fatto che mentre le variabili livello rappresentano lo stato di un sistema in un certo istante, indipendentemente dal tempo, le variabili di flusso contengono informazioni circa la dinamica del sistema e devono quindi essere descritte con riferimento ad un determinato intervallo temporale.

La relazione matematica che lega una variabile di livello ed una di flusso può essere descritta come segue:

$$\mathbf{Livello_{t+1} = Livello_t + Flusso * \Delta t}$$

Da cui, introducendo la notazione continua:

$$\mathbf{Livello_t = Livello_{t-\Delta t} + \Delta t * Flusso}$$

Che da luogo a:

$$\frac{\mathbf{Livello_t - Livello_{t-\Delta t}}}{\Delta t} = \mathbf{Flusso}$$

Considerando intervalli di tempo infinitivamente piccoli, al limite uguali a 0, si ottiene:

$$\mathbf{\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{Livello_t - Livello_{t-\Delta t}}{\Delta t} \right) = \frac{d(Livello)}{dt} = Flusso}$$

Quindi:

$$\frac{dL}{dt} = F$$

Integrando entrambi i lati si ottiene che:

$$\int_{t_0}^t \frac{dL}{dt} = \int_{t_0}^t F$$

e

$$L_t - L_{t_0} = \int_{t_0}^t F * dt$$

e quindi

$$L_t = L_{t_0} + \int_{t_0}^t F * dt$$

In sintesi $F = \frac{dL}{dt} = f(L)$. Tale equazione è spesso rappresentata come $\dot{L} = f(L)$ dove $\frac{dL}{dt} = \dot{L}$.

Un modello di System Dynamics può essere, quindi, matematicamente descritto da complessi sistemi di equazioni differenziali di ordine n-esimo del tipo:

$$\begin{cases} \dot{L}_1 = f(L_1, L_2, \dots, L_n) \\ \dot{L}_2 = f(L_1, L_2, \dots, L_n) \\ \dots \\ \dot{L}_n = f(L_1, L_2, \dots, L_n) \end{cases}$$

Dunque, in termini matematici, le variabili di flusso sono le derivate rispetto al tempo delle variabili di livello cui sono collegate, mentre le variabili di livello sono gli integrali delle variabili di flusso. Il legame che unisce questi due tipi di variabili, è il processo di integrazione nel primo caso o, al contrario, la differenziazione nel secondo. Inoltre si può affermare che le variabili di flusso rappresentano il tasso con il quale una variabile livello si modifica nel tempo.

Alle variabili di livello e di flusso si aggiungono poi le *variabili ausiliarie* che sono funzioni delle scorte, di costanti o di input esogeni il cui scopo principale è quello di accrescere e semplificare la definizione delle equazioni

di flusso. Possono essere considerate come scomposizione algebriche dei tassi, e da un punto di vista matematico, possono essere sempre eliminate, riducendo così il modello a un più complesso sistema di equazioni relativo esclusivamente a stock e flow, rendendo però il modello molto più difficile da leggere e comprendere.

È ormai chiaro che un circuito di retroazione esiste ogni volta che lo stato di un sistema stimola una decisione che si manifesta attraverso un'azione in grado di determinare un cambiamento dello stato originale del sistema creando, così, le premesse per le decisioni future (Figura 20). Prima di definire le differenti tipologie di circuiti di retroazione che possono essere impiegate per la modellazione di un sistema, è bene introdurre il concetto di *casualità*. In generale si è in presenza di un legame casuale quando una variabile X influenza un'altra variabile Y:

$$X - Y$$

La relazione tra due variabili x e y può essere positiva o negativa:

- è positiva se, a parità di tutte le altre condizioni, all'aumentare (diminuire) di x, y aumenta (diminuisce) $\rightarrow \frac{\delta y}{\delta x} > 0 \rightarrow X -^+ Y$
- è negativa se, a parità di tutte le altre condizioni, all'aumentare (diminuire) di x, y diminuisce (aumenta) $\rightarrow \frac{\delta y}{\delta x} < 0 \rightarrow X -^- Y$

Contando, all'interno di un circuito di retroazione, il numero di segni “-” delle relazioni causali tra variabili è possibile distinguere tali circuiti in due categorie, a seconda della loro polarità: i circuiti a retroazione positivi (se la somma dei segni “-” è pari) e i circuiti a retroazione negativi (se la somma dei segni “-” è dispari). La polarità di un circuito definisce il tipo di manifestazione dinamica che caratterizza la risposta dello stesso ad uno stimolo prodotto dall'esterno su una delle variabili comprese in esso.

I circuiti di retroazione positivi (*loop positivi*) tendono ad amplificare in modo esponenziale eventuali stimoli esterni. Nel caso in cui un sistema si

trovi in equilibrio, gli stimoli che disturbano tale situazione di equilibrio saranno amplificati e il comportamento dinamico del sistema si discosterà in modo esponenziale dallo stato di equilibrio iniziale. Il circuito di retroazione positivo dà origine, quindi, ad un processo di autorinforzo e viene indicato con la lettera “R” (Rinforzo). Un esempio è riportato in Figura 22.

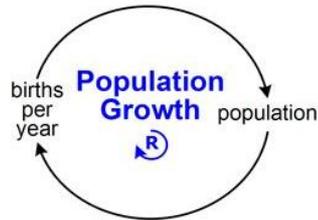


Figura 56 Reinforcing Loop

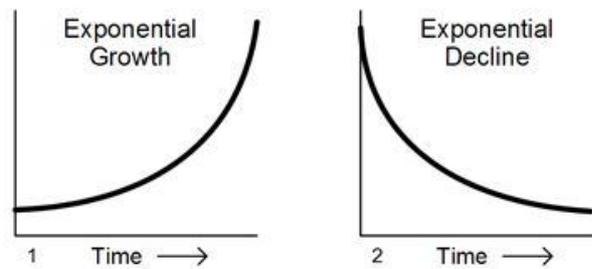


Figura 57 Possibili andamenti esponenziali

I circuiti di retroazione negativi (*loop negativi*) tendono, invece, ad attutire eventuali stimoli esterni. Nel caso in cui un sistema si trovi in equilibrio, gli stimoli che disturbano tale situazione di equilibrio saranno assorbiti e il comportamento dinamico del sistema sarà riportato allo stato di equilibrio iniziale. Il circuito di retroazione negativo dà origine, quindi, ad un processo di autoregolazione o auto-bilanciamento e viene indicato con la lettera “B” (Bilanciamento). In Figura ne è rappresentato un esempio.

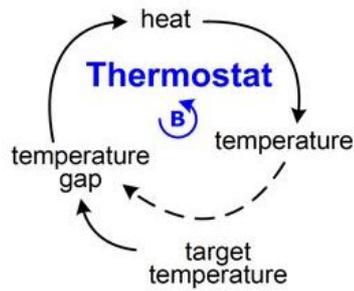


Figura 58*Balancing Loop*

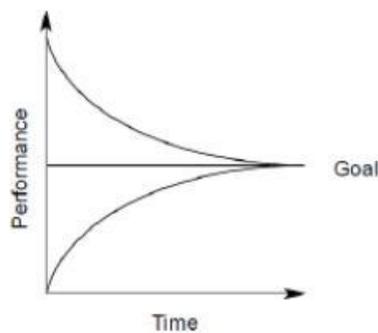


Figura 59*Andamento di Stabilizzazione o Goal Seeking*

Il Goal rappresenta la situazione di equilibrio ovvero il livello desiderato per una grandezza, come la temperatura nell'esempio proposto.

Individuare e rappresentare tali circuiti e la loro concatenazione costituisce un passo fondamentale per interpretare il comportamento del sistema stesso in quanto ai circuiti di retroazione sono associati comportamenti dinamici conosciuti, i cosiddetti archetipi. Un archetipo rappresenta un fenomeno che compare frequentemente nella realtà ed è importante in quanto costituisce un vero e proprio schema di riferimento utile per interpretare i fenomeni dinamici che emergono dall'osservazione della realtà.

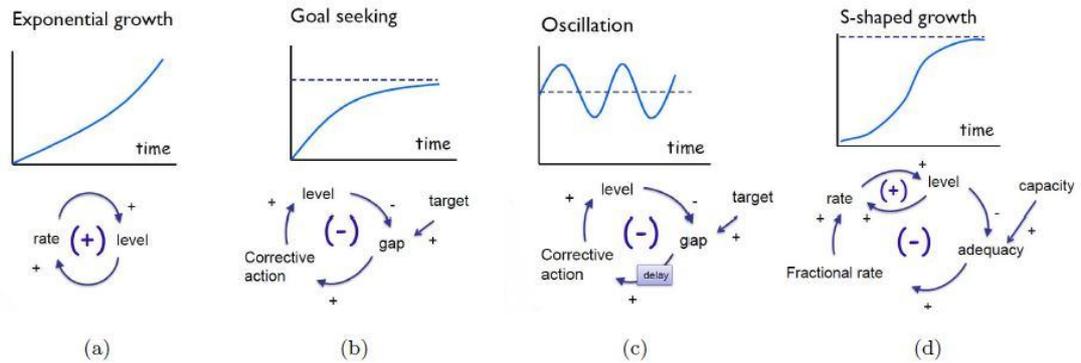


Figura 60 Archetipi

Non tutte le relazioni di causa ed effetto accadono istantaneamente, infatti, un altro elemento fondamentale nella SD è rappresentato dai ritardi, *delay* (Figura c – Circuito di retroazione negativa con ritardo): ci vuole tempo per prendere le decisioni e occorre tempo affinché queste influenzino lo stato del sistema. Un ritardo è di per sé connesso all'esistenza di uno stock e di un flusso collegati tra loro. Come è noto, infatti, le variabili livello non mutano istantaneamente, ma in modo incrementale.

È importante capire come avvengono i delays, come rappresentarli, come sceglierli tra varie tipologie e come stimare la loro durata perché possono indurre nei sistemi comportamenti interessanti e complessi. È possibile distinguere due diverse tipologie di ritardo: materiale ed informativo. Nel primo caso il ritardo riguarda flussi di risorse fisiche come merci, mezzi finanziari, personale, che pervengono dopo essere “transitate” da uno o più stock intermedi, cioè uno o più ritardi intermedi. I delay informativi, invece, sono una conseguenza di congetture soggettive che danno luogo ad una percezione di un dato fenomeno da parte dei soggetti decisori nel sistema in esame. Tale ritardo viene modellizzato sempre con riferimento ad una variabile stock.[100]

Nell'ambito della SD vengono utilizzati anche una serie di strumenti, come i *Causal Loop Diagram* e gli *Stock and Flow Diagram*, per aumentare la consapevolezza circa le caratteristiche dinamiche dei sistemi di riferimento e per formalizzare le conoscenze e le informazioni disponibili. In particolare la

mappa casuale è la rappresentazione dell'intera struttura retroattiva ed ha lo scopo di individuare ed evidenziare i meccanismi di feedback che legano le variabili considerate. Attraverso l'impiego delle frecce, Figura 27, che mettono in diretta connessione le variabili, la mappa esprime le relazioni di diretta o inversa casualità esistenti tra le stesse.

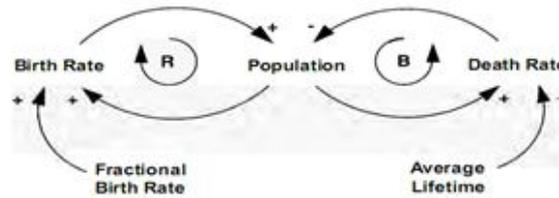


Figura 61 *Casual Loop Diagram*

Nell'esempio proposto il diagramma mostra che le nascite dipendono dal tasso di nascita in modo tanto maggiore quanto maggiore è il tasso di nascita, di conseguenza tanto maggiori saranno le nascite. Le nascite influenzano a loro volta la popolazione e sono da questa influenzate con relazioni di proporzionalità diretta: si realizza così un ciclo causale positivo. Dunque se avessimo solo nascite la popolazione crescerebbe all'infinito. Una limitazione alla crescita della popolazione è rappresentata dal fatto che gli individui hanno una vita media che influenza le morti: tanto è più alta la vita media minore saranno le morti e viceversa. Le morti influenzano a loro volta la popolazione riducendola, mentre la popolazione agisce sulle morti aumentandole. Si realizzano così due cicli causali, uno positivo, uno negativo, la cui interazione determina l'andamento effettivo nel tempo della popolazione. [64]

Con l'utilizzo delle mappe casuali è possibile rappresentare qualsiasi tipo di variabile, qualitativa o quantitativa, purché tra esse sussista un legame casuale. Sono uno strumento in grado di fornire una prima interpretazione grafica del problema ed una rappresentazione semplice e schematica delle ipotesi elaborate in relazione alle cause responsabili degli andamenti problematici, illustrando chiaramente i meccanismi di feedback.

Gli Stock and Flow sono, invece, diagrammi che, a differenza dei primi, consentono una rappresentazione del sistema in esame in termini di accumulazione delle risorse e tassi di variazione. Permettono di capire a pieno le dinamiche caratterizzanti il modello di comportamento del sistema e di evidenziare la differenza tra le variabili in gioco: di livello e di flusso.

In Figura 28 è riproposto lo stesso caso analizzato in Figura 27 questa volta, però, attraverso l'impiego di uno Stock and Flow Diagram: risulta facile risalire alle risorse chiave che si intendono controllare, gli stocks, e alle risorse che ne determinano l'aumento (inflows) o la riduzione (outflows), ovvero una variazione.

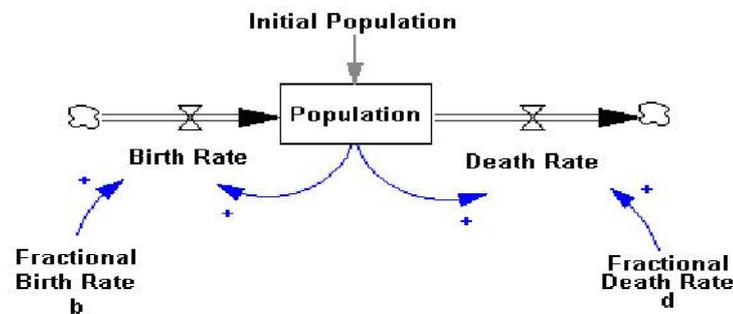


Figura 62 *Stock and Flow Diagram*

Nella System Dynamics le mappe causali vengono arricchite dalla costruzione di modelli di simulazione al computer che permettono di avere la conferma che la struttura ipotizzata sia alla base del comportamento osservato e per testare gli effetti di politiche alternative sulle principali variabili nel tempo.

Pertanto, oltre al linguaggio simbolico, utilizzato per costruire rappresentazioni dei sistemi dinamici, ed ai principi che facilitano l'interpretazione del legame tra struttura e comportamento di un sistema, l'approccio System Dynamics è completato da un ambiente di simulazione dove è possibile animare la rappresentazione simbolica del problema strategico e osservare le conseguenze, lungo un determinato arco temporale, dei piani concepiti per realizzare la strategia. I vari software disponibili in commercio per la modellazione SD permettono di costruire sistemi di

equazioni differenziali, il cui comportamento è simulabile al computer, partendo da una descrizione simbolica cui si perviene spostando degli 'oggetti' sullo schermo del computer.[101]

Esistono quattro programmi software che sono stati progettati per facilitare la costruzione e l'uso di modelli System Dynamics: Dynamo, iThink / Stella, PowerSim e Vensim. In particolare, per la realizzazione di questo lavoro si è scelto di sviluppare il modello in ambiente PowerSim.

4.4 Powersim

A metà degli anni '80 il governo norvegese sponsorizzò la ricerca finalizzata a migliorare la qualità della scuola di istruzione superiore utilizzando modelli System Dynamics. Questo progetto portò allo sviluppo di Mosaic, un sistema finalizzato principalmente allo sviluppo di giochi di simulazione per l'istruzione. Powersim fu successivamente sviluppato come un ambiente Windows per lo sviluppo di modelli System Dynamics, che facilita anche la costruzione di giochi interattivi o ambienti di apprendimento.

PowerSim è, quindi, un software di simulazione fondato sulla logica della System Dynamics ed è un valido strumento impiegato per modellare e simulare il comportamento dei sistemi che progrediscono secondo eventi continui. Trova applicazione in vari e diversi ambiti: dalla biologia all'economia, dalla fisica all'ecologia.

Il processo di modellazione avviene mediante la costruzione di un diagramma: sono disponibili una serie di oggetti grafici ciascuno dei quali ha un preciso significato nonché una specifica funzione. Ciascun elemento del diagramma ottenuto sarà in grado di influenzare gli altri a cui è collegato mediante specifici link. Gli oggetti e le funzioni rappresentano i tipici elementi e concetti chiave presenti all'interno di un modello SD, ampiamente trattati in precedenza.

Un modello così creato risulta essere un diagramma di flusso che riproduce il sistema secondo variabili di flusso, livelli, costanti e variabili ausiliarie. Il diagramma, viene poi automaticamente tradotto in equazioni che conferiscono una rappresentazione analitica del modello.

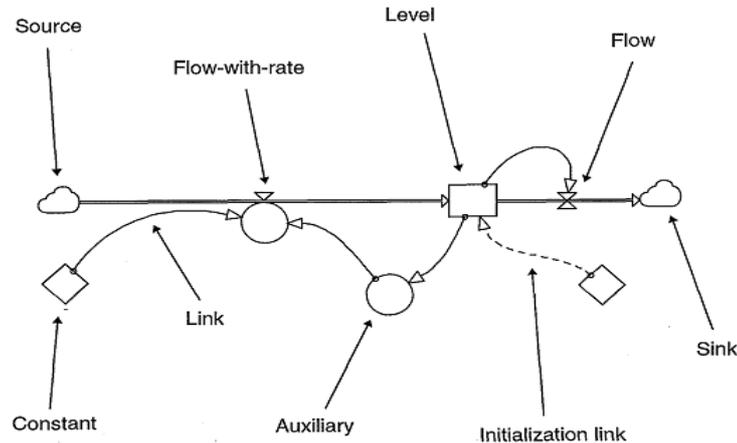


Figura 63 Elementi grafici in Powersim

Gli elementi principali di un modello in Powersim [103], rappresentati anche nella precedente Figura, sono:

- **LEVEL** → rappresentano le variabili di stato; come ad esempio l'ammontare di acqua, di energia o la popolazione intesa come numero di individui.
- **FLOW** → sono i flussi che apportano materiale al livello; come ad esempio un flusso d'acqua o il numero di nascite .
- **SOURCE/SINK** → rappresentano l'origine o la destinazione dei flussi.
- **CONSTANT** → sono valori che caratterizzano il sistema. Una costante è definita da un valore iniziale e mantiene questo valore in tutta la simulazione, a meno che l'utente non cambi manualmente il valore.
- **AUXILIARY** → rappresentano le variabili ausiliarie cui compete il compito di valorizzare le espressioni matematiche.

- **LINK**→ legami che descrivono come le variabili si influenzano l'un l'altra.
- **INITIALIZATION LINK**→ rappresenta un link collegato a un livello; un tipico esempio è il caso di un link che determina il valore iniziale di un certo livello.

In particolare, le variabili ausiliarie sono spesso usate per controllare i flussi, ma possono anche essere usate per valutare delle quantità di interesse o per rendere il diagramma più chiaro. Possono, inoltre, avere un qualsiasi numero di input, a differenza dei flussi che, invece, possono avere un unico input. Viene spesso utilizzato il *flow-with-rate* che consiste in una variabile ausiliaria collegata a un flusso, Figura 30.

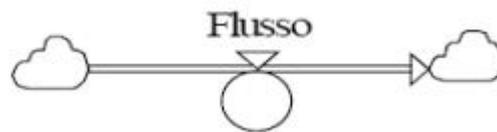


Figura 64 *Flow with Rate*

Una variabile ausiliaria è definita da una certa equazione ma, oltre alle semplici operazioni aritmetiche, Powersim mette a disposizione tutta una serie di funzioni (matematiche, statistiche, funzioni collegate al tempo, etc).

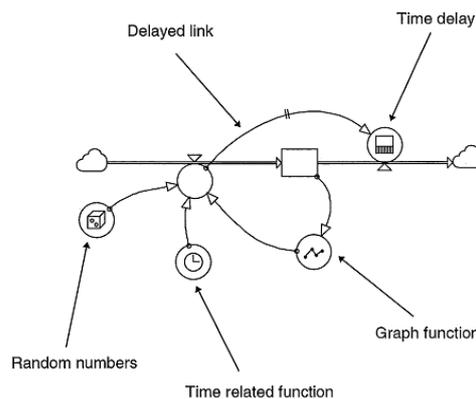


Figura 65 *Altri simboli in Powersim*

Per chiarire come si lavora in Powersim si riporta di seguito un semplice esempio relativo all'evoluzione di una popolazione di conigli (rabbit) introdotti su di un'isola deserta.[103] I conigli, inizialmente 10, si nutrono,

crescono e poi muoiono. È noto che il cibo disponibile è costante e si stima pari a 100 kg/mese. È noto che il numero di conigli nati ogni mese è proporzionale alla dimensione della popolazione e alla radice quadrata dell'ammontare di cibo per ciascun coniglio. La costante di proporzionalità è pari a 0.2, mentre la vita media di ciascun coniglio è pari a 20 mesi il che, equivale a dire che il 5% della popolazione muore ogni mese.

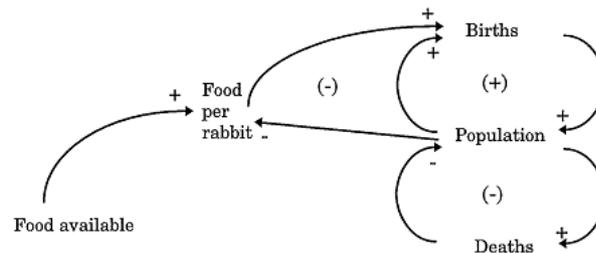


Figura 66 *Casual Loop Diagram del modello dei conigli*

Assumendo le costanti $C1=0.2$ e $C2=0.05$, il modello in Powersim diventa:

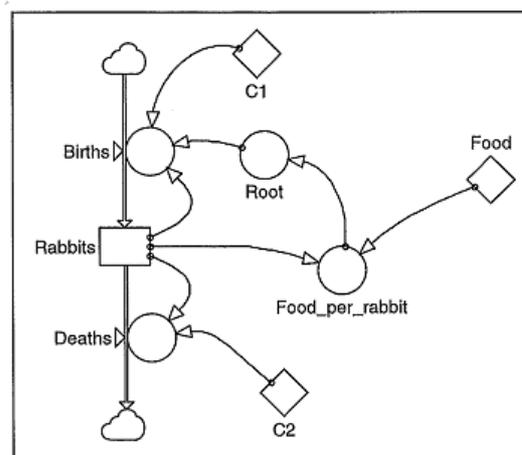


Figura 67 *Diagramma in Powersim del modello dei conigli*

A partire, dunque, dal diagramma Powersim genera automaticamente le equazioni caratterizzanti ogni singolo simbolo, definendone così la rappresentazione matematica. In questo caso le equazioni caratterizzanti il modello sono:

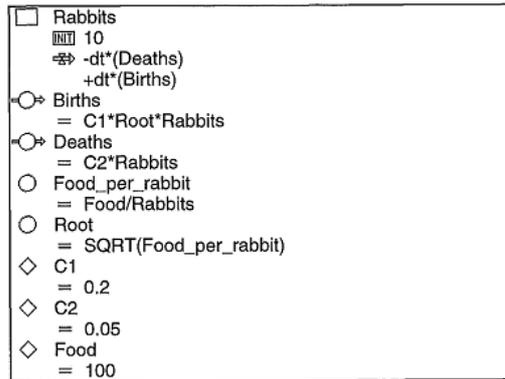


Figura 68 Equazioni matematiche [103]

Una volta definito il modello, nonché le variabili e le equazioni che lo contraddistinguono, lo si può simulare così da poter vedere il suo comportamento nel tempo.

Come già accennato nel paragrafo precedente, Powersim non è l'unico software di simulazione per sistemi SD presente in commercio, Figura 35, ma presenta alcune caratteristiche fondamentali in uno studio basato sulla simulazione ed, inoltre, è di semplice utilizzo.

| SOFTWARE | Velocità di calcolo | Interfaccia grafica | Disponibilità versione trial | VALUTAZIONE GLOBALE |
|-----------------|---------------------|---------------------|------------------------------|---------------------|
| Powersim | ██████████ | ██████████ | ██████████ | ██████████ |
| Vensim | ██████████ | ██████████ | ██████████ | ██████████ |
| STELLA | ██████████ | ██████████ | ██████████ | ██████████ |
| Exposé | ██████████ | ██████████ | ██████████ | ██████████ |

Figura 69 Software di simulazione a confronto

Tra le funzionalità caratteristiche di Powersim ci sono:

- un **Diagram Editor** che permette di creare un modello SD attraverso un linguaggio grafico.
- un **Pannello di Controllo** grazie al quale è possibile visualizzare l'andamento delle variabili del modello nel tempo

- un'**Interfaccia utente** grazie alla quale si possono generare intuitivamente gli scenari.

Altre importanti caratteristiche sono sicuramente: la possibilità di trasferimento dei dati da Microsoft Excel e SAP aziendali, la possibilità di generare scenari anche senza conoscere la struttura del modello ed, infine, la possibilità di utilizzare una vasta libreria di funzioni matematiche per simulare i comportamenti dinamici complessi delle variabili in gioco.

È chiaro, infine, che al crescere della familiarità con il software e con l'approccio SD, è possibile rendere la descrizione del problema e del sistema in esame sempre più realistica.

4.5 System Dynamics vs Discret Event Simulation

La SD e la DES rappresentano due importanti tecniche di simulazione molto diffuse ed utilizzate come strumento di supporto alle decisioni. In letteratura, infatti, spesso, vengono messe a confronto per evidenziarne pregi e difetti ma soprattutto per definire una sorta di linee guida nella scelta di una o dell'altra in relazione ad uno specifico problema. Ad esempio Greasley [102] afferma che sebbene sussistano delle particolari nonché sostanziali distinzioni tra le due tecniche, in termini di approccio alla modellazione, entrambe vengono applicate per capire come un certo sistema evolve nel tempo, e come il suo comportamento possa cambiare se vengono modificati opportuni parametri o elementi.

La metodologia System Dynamics mappa il problema tenendo conto di quella che è la sua struttura generica, in modo da poter capire e sottolineare le cause che originano il comportamento di un certo sistema.

La DES, invece, è una tecnica che tenta di riprodurre le strutture di un dato sistema per poi seguirne e valutarne le performance, valutandole in scenari differenti. È evidente come i due approcci siano differenti: la SD può essere applicata per studiare i legami causali del problema in esame ed è focalizzata su quella che è l'analisi del sistema; la DES, invece, permette di tracciare il

percorso seguito da un singolo elemento all'interno di un certo sistema, mostrando il comportamento delle code e generando metriche di performance di processo; in pratica è focalizzata alla modellazione di un particolare processo e non sull'intero sistema. Nel modello in questione, infatti, è stata utilizzato la SD per poter rappresentare il comportamento "combinato" e dipendente dei due processi simulati.

Ancora Greasley, nel suo lavoro, propone una tabella nella quale sono elencate le caratteristiche delle due tecniche e che riassume le differenze sostanziali. Se ne riportano le più significative in Tabella 5:

Tabella 17 *Confronto SD e DES*

| FATTORE | SYSTEM DYNAMICS | DISCRETE EVENT SIMULATION |
|---|--|--|
| Obiettivo | Investigare il modello di comportamento di un sistema | Investigare le performance operative dei processi |
| Determinazione dei comportamenti | Il comportamento dei sistemi è determinato da strutture di feedback e accumulazione | Il comportamento dei sistemi è determinato dalla natura stocastica e dall'interdipendenza dei processi |
| Unicità del problema | Il problema è riferito a un comportamento ricorrente in tutto il sistema | Il problema è unico |
| Livello di implementazione | Solitamente a un livello manageriale e strategico | Solitamente a un livello operativo e tattico |
| Scala temporale di analisi | Da giorni a mesi a anni | Da minuti a giorni |
| Presentazione dei risultati | Statistiche: mostrano il comportamento del sistema. Grafici: mostrano il comportamento e i feedback loop | Statistiche: riportano le performance delle operazioni, incluso il percorso dei singoli elementi |
| Livello di aggregazione | I singoli elementi sono aggregati nei livelli | Ogni singolo elemento può essere modellato |

| | | |
|-------------------------------|------------------------|--------------------|
| Dimensioni del modello | Piccolo | Da medio a grande |
| Modello concettuale | Diagrammi di influenza | Mappa dei processi |

Nella SD, come descritto nei paragrafi precedenti, il sistema viene rappresentato da un certo numero di livelli e di flussi. Una caratteristica importante dei livelli è che essi permangono nel sistema anche se i flussi si azzerano: agiscono, quindi, disaccoppiando i flussi. La scorta di sicurezza di prodotti finiti è un tipico esempio di stock che fornisce un buffer tra il sistema produttivo, che lavora con un certo tasso di produzione e la domanda variabile del mercato[102].

La DES, invece, viene applicata per modellare sistemi caratterizzati da un certo numero di eventi. La simulazione descrive ogni singolo evento, seguendo la loro evoluzione nel tempo. In questo caso gli elementi del sistema simulato consistono in un certo numero di entità come, ad esempio, prodotti o persone le quali presentano un certo numero di attributi, come la tipologia di prodotto o l'età. Quando è richiesta una certa risorsa, che però non risulta essere disponibile, accade che gli elementi si accumulano fino a formare delle code. Inizialmente i sistemi DES generavano solo dei report sulle performance del sistema creato ma, con l'evoluzione subita dai sistemi software e hardware, riescono oggi a riprodurre l'intera dinamica del sistema. Nella SD si assume che la particolare struttura di un sistema ne determina un certo tipo di comportamento. Il focus d'analisi della DES, invece, è la replica di strutture esistenti per poi identificarne il comportamento in differenti scenari. Per catturare fedelmente le performance di un processo, la DES, inoltre, necessita di una accurata raccolta di dati e informazioni relative al comportamento passato del sistema in esame. Il livello di dettaglio rappresenta un fattore critico nella costruzione dei modelli di simulazione ad

eventi discreti in quanto probabilmente saranno necessari tempi maggiori per realizzarli e possono, inoltre, risultare meno affidabili.

Ad esempio se l'analisi deve essere focalizzata sul monitoraggio di specifiche unità di prodotti lungo una linea produttiva, la Discrete Event Simulation (DES) è più appropriata; se, invece, l'obiettivo dell'analisi è l'ammontare di work-in-progress circolanti in un sistema produttivo, la variazione del magazzino o anche il numero di ordini di manutenzione eseguiti (come per il nostro caso), la SD risulta congeniale.

In conclusione, dunque, nel decidere quale approccio è più adatto per modellare un particolare problema, le domande chiave da porsi sono sicuramente: *che tipo di modello rappresenta meglio il sistema in esame? Quali sono le risposte che il decisore desidera dal modello? Per quali scopi sarà utilizzato?*[104]

La SD è, certamente, più adatta a problemi riguardanti processi continui in cui il feedback influisce in modo significativo sul comportamento dinamico del sistema. La DES, al contrario, è in grado di fornire un'analisi dettagliata dei sistemi caratterizzati da processi lineari e cambiamenti discreti. Sono, inoltre, da preferire quando l'obiettivo dello studio riguarda una stima statisticamente valida delle prestazioni del sistema.

Vi è certamente una grande area di sovrapposizione tra i due approcci. Molti problemi potrebbero essere modellati con entrambi gli approcci e produrre risultati simili. Utilizzati in modo appropriato possono contribuire a fornire una maggiore comprensione e possono essere di grande aiuto al processo decisionale.

Capitolo 5

Il modello di Simulazione

5.1. Introduzione

Gli studi illustrati fino ad ora hanno consentito di concepire un modello simulativo che si propone di rappresentare la complessa realtà aziendale da due punti di vista molto importanti: quello della produzione e quello della manutenzione. Il modello, infatti, è in grado di simulare l'interazione tra le regolari attività di produzione, presenti in un generico impianto industriale, e le conseguenti politiche manutentive, programmate e/o necessarie, per il mantenimento della produttività e del livello di servizio stabiliti sul piano strategico.

Tale risultato è stato raggiunto grazie al contributo di precedenti studi, sviluppati sia in ambito produttivo che in ambito manutentivo ([61] e [62]). Difatti, a partire da una serie di idee, spunti e considerazioni, tratte dal mondo letterario e dal team di supporto è stato possibile giungere al cuore di questo lavoro: la realizzazione di un modello di simulazione parametrico per la gestione integrata delle operations aziendali.

In particolare tra le fonti di maggiore ispirazione: il lavoro di Georgiadis ed alcuni lavori di ricerca sviluppati dal gruppo di Impianti Industriali di Napoli sono stati un valido riferimento per la costruzione del modello rappresentativo della realtà produttiva; mentre il lavoro condotto dall'Ing. Zoppoli ha rappresentato il substrato dal quale si è partiti per inserire la logica manutentiva nel modello simulativo. Da quest'ultimo, inoltre, sono stati tratti i dati di costo, le informazioni sui tempi, sulle soglie manutentive e sulla configurazione del sistema produttivo in modo da rendere confrontabili

i risultati ottenuti dal modello in DES dell'Ing. Zoppoli e il nuovo modello in SD.

In una prima fase l'obiettivo che ci si è posti ha riguardato la realizzazione di un modello di simulazione che riuscisse a riflettere la realtà produttiva e la realtà manutentiva di un sistema azienda. Sono stati necessari diversi accorgimenti, logici e pratici, per poter introdurre nella catena degli eventi ordini di manutenzione, oltre che di produzione. La necessità di attivazione di un ordine di manutenzione è stabilita sulla base di una condizione che, come verrà meglio descritto nei paragrafi successivi, sarà dettata da un parametro di usura e da determinate soglie manutentive.

In una seconda fase, invece, sono stati eseguiti alcuni test di prova sul modello per verificarne il corretto funzionamento e per correggere eventuali errori. Sono stati simulati diversi scenari relativamente al processo manutentivo: si sono considerate diverse soglie di manutenzione, intervalli di ispezione e di allarme, per poter verificare una corretta interazione tra le due operations simulate (produzione e manutenzione)

L'ultima fase ha riguardato l'introduzione di un modello di ottimizzazione della manutenzione. Sulla base di una serie di ipotesi semplificative riguardo il numero di macchine, la tipologia del sistema produttivo, i tempi di lavorazione e manutenzione e le voci di costo [62], sono state lanciate un gran numero di ottimizzazioni, necessarie per comprendere la migliore politica manutentiva da adottare, ovvero il giusto dimensionamento delle soglie, dal punto di vista dei costi totali di manutenzione. Le ottimizzazioni sono state fondamentali anche per realizzare un'ulteriore validazione, mediante "confronto" dei risultati, del modello sviluppato rispetto al modello discreto, definito e validato [62]. Infatti, per il nostro modello, abbiamo deciso di fare ricorso ai concetti della System Dynamics (e non alla DES) attraverso la quale si è ritenuto di poter meglio analizzare il comportamento di un sistema caratterizzato dalla presenza di due processi correlati tra loro.

Per poter comprendere al meglio le varie logiche di funzionamento ed i vari meccanismi considerati è importante, prima di tutto, specificare e descrivere gli elementi base presenti nel modello.

5.2. Elementi base del modello

Ogni sistema può essere rappresentato attraverso tre momenti essenziali: l'ingresso di un elemento nel sistema, la sua evoluzione e l'uscita dal sistema stesso. In particolare l'evoluzione rappresenta il viaggio di un oggetto nel sistema attraverso la transizione tra i diversi stati noti a priori. Il percorso di evoluzione è, infatti, deterministicamente assegnato all'oggetto all'ingresso del sistema. Lo **stato**, primo elemento essenziale presente in un modello di simulazione, non è altro che una fase di lavorazione alla quale sono associate delle risorse. Nello specifico il modello sviluppato fa riferimento a 18 stati:

- 3 stati fittizi: *Start*, *End* e *Free*;
- 3 stati produttivi con 2 buffer interoperazionali;
- 3 attività manutentive relative alle diverse macchine considerate, con 1 stato che ne indica il termine;
- 1 stato rappresentativo di un'attività di ispezione con un altro che ne indica il termine;
- 3 attività manutentive dovute ad eventuali guasti, con 1 stato di termine attività.

Questi rappresentano gli stati da noi considerati, ma in generale, a seconda dell'impianto oggetto di studio, il numero e la tipologia può variare.

La **matrice degli stati**, Tabella 4, fotografa la situazione dell'impianto istante per istante e rappresenta la **catena degli eventi**. Per poter considerare le due logiche oggetto del nostro studio, si è pensato di strutturarla in modo da rappresentare sia gli stati produttivi (in arancione), che gli stati manutentivi (in grigio). In colonna sono riportati gli stati e sulle righe i tokens.

Tabella 18 *Matrice degli Stati*

| | START | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | END | FREE |
|---|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|-----|------|
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

I **tokens** rappresentano l'elemento abilitante per descrivere l'evoluzione dello stato. Nel nostro caso sono stati considerati un certo numero di tokens totali suddiviso in **Token di Produzione** e **Token di Manutenzione**. La dimensione dei tokens, inoltre, rappresenta il numero di oggetti che può navigare contemporaneamente nel sistema ed è data come input del modello. Il percorso che un generico token avrà all'interno del sistema, quindi del modello, è definito all'inizio, è un dato, e come tale non è più modificabile. Quest'ultimo aspetto potrebbe anche essere visto come un **LIMITE del modello** perché, al contrario, la possibilità di definire il percorso dei vari tokens in funzione di qualcosa, consentirebbe una gestione del sistema più realistica e più efficiente. Si è deciso, però, di considerare una versione semplificata del modello e per questo si sono ipotizzati: 4 token per la manutenzione e 3 token di produzione, per un totale di 7 (numero di righe nella matrice degli stati).

La transizione tra uno stato ed un altro può avvenire se e solo se ci sono risorse disponibili per effettuare quella particolare transazione. I tokens di manutenzione, inoltre, possono eseguire solo alcune attività, le ultime nella

matrice, che riguardano, appunto, la manutenzione. Quando si arriva all'end, a seconda che questo si verifichi sulla parte arancione o grigia della matrice si avrà che, rispettivamente, il prodotto finito andrà a magazzino o la macchina mantenuta tornerà "as good as new", ovvero nelle stesse condizioni, in termini di prestazioni, che aveva al momento dell'acquisto.

L'*End*, così come *Start* e *Free*, rappresentano i cosiddetti **stati fittizi**.

Secondo il significato da noi attribuitogli:

- **Start** porta al primo stato effettivo di lavorazione → a cui corrisponde l'indice 1, ovvero il primo numero del **range** considerato (quest'ultimo rappresenta il numero degli stati esaminati nel modello. Pertanto, su un totale di 18 stati, lo stato di *Start* è il primo stato → indice 1).
- **End** indica la fine della lavorazione.
- **Free** indica che il token è libero.

Questi ultimi due stati saranno identificati dagli ultimi due "numeri" del range relativo agli stati (quindi, 17 e 18).

In un'ottica di parametrizzazione, infatti, si ragiona sempre in termini di **Ranges**. Si possono definire ad esempio:

1. **work_states** il range relativo al numero di stati del processo produttivo.
2. **maintenance_states** il range del numero degli stati relativo al processo di manutenzione.

Di conseguenza per il nostro modello gli stati totali della catena degli eventi saranno **states=work_states + maintenace_states + 3**, dove i 3 stati finali rappresentano sempre gli stati fittizi *start*, *end*, e *free*. Si tratta di una regola da ricordare in generale perché non è possibile sul Powersim definire un range sulla base di altri ranges.

I ranges stabiliti nel modello verranno descritti più avanti una volta definiti tutti gli elementi e le caratteristiche fondamentali del modello di simulazione per poterli comprendere a pieno.

I **Buffers** rappresentano, invece, un elemento che è stato introdotto in una fase avanzata relativa alle modifiche del modello esistente, dopo aver riscontrato dei problemi riguardanti la transizione dei token tra i vari stati. Dal momento che le risorse si liberano solo se sono disponibili le risorse per lo stato successivo, i buffer, non richiedendo nessuna disponibilità di risorsa, consentono un loro “smaltimento” e permettono il passaggio dei tokens all’interno della matrice. È stato associato un buffer ad ogni lavorazione, questo è il motivo per cui sono presenti due buffers interoperazionali.

In generale per gli stati manutentivi il discorso è analogo, ma nel nostro caso, poiché l’attività manutentiva si conclude in una sola operazione, non è stato aggiunto alcun buffer a valle degli stessi. Mentre sono presenti stati quali *Fine Manutenzione*, *Fine Ispezione* e *Fine Manutenzione per Guasto*, per ragioni simulative, ovvero per poter individuare risorse/oggetti utilizzati in particolari attività. Queste ragioni risulteranno più chiare in avanti.

I Buffers, inoltre, sono stati ipotizzati a capacità illimitata, ovvero possono essere occupati da tutti i token presenti nel sistema, ma è sempre possibile renderli a capacità limitata.

Un altro elemento fondamentale è rappresentato dalle **Routes**: i percorsi seguiti dagli oggetti all’interno del sistema. Nel nostro caso, avendo considerato la distinzione tra token di produzione e token di manutenzione, i tokens non possono eseguire tutti i percorsi e di conseguenza il numero di routes possibili si semplifica di molto. In particolare si sono ipotizzate:

- 2 routes di produzione → 3 tokens di prod. x 2 routes
- 5 routes di manutenzione → 3 tokens di manut. x 5 routes
- 1 route per l’attività di ispezione → 3 tokens di manut. x 1 route
- 3 routes per l’attività di manutenzione per guasto → 3 tokens di manut. x 3 routes.

Per un totale di $6+15+3+9=42$ **Routes**.

Il calcolo è stato eseguito sulla base di una considerazione: ad ogni route viene associato un token, quindi, se ci sono più tokens che possono eseguire

una stessa route si ha una duplicazione di queste oltre che una duplicazione di risorse necessarie. Si è ipotizzato, inoltre, che il numero di route è funzionale non solo allo specifico percorso, ma anche alle risorse impiegate. Questo significa che se è possibile eseguire lo stesso ciclo con risorse differenti, bisognerà considerarlo come una route differente. Quindi avere due routes potrà significare sia avere lo stesso percorso realizzabile con risorse differenti che avere percorsi e risorse diverse.

I **Modes** rappresentano i cicli di produzione di un certo oggetto ed i cicli di manutenzione e di ispezione. Il nostro modello di simulazione è caratterizzato da 9 mode ai quali è stato attribuito il seguente significato:

- 2 per la produzione. La sequenza delle macchine è la stessa ma fa riferimento a due tipologie di prodotti differenti;
- 3 per la manutenzione, differenti e relative alle 3 macchine da mantenere considerate;
- 1 per l'ispezione;
- 3 per la manutenzione correttiva sulle 3 macchine.

Inizialmente erano stati ipotizzati modes differenti per ciascuna route, anche per quelle alternative che utilizzavano risorse diverse, ma poiché la sequenza degli stati è sempre la stessa devono essere considerati come un unico mode. È importante specificare che è possibile eseguire in diversi modi l'attività di manutenzione e di conseguenza è possibile avere N route collegate allo stesso mode.

Per quanto riguarda l'attività di ispezione abbiamo ipotizzato un unico mode perché abbiamo voluto rappresentare un sistema in serie, ovvero un sistema in cui le macchine sono dipendenti l'una dall'altra, come proposto nel lavoro [62]. Dunque abbiamo supposto che l'attività di ispezione dovesse essere una e riguardare contemporaneamente tutte le macchine della linea. In un caso più generale, in cui è ammessa la presenza di più macchine tra di loro indipendenti, si potrebbero, però, considerare modes diversi a seconda della macchina da ispezionare, caratterizzati, ad esempio, da tempi e/o risorse

differenti. Si tratta, naturalmente, di una decisione da prendere in fase di progettazione del modello in relazione all'impianto che si vuole simulare.

Infine un altro elemento è rappresentato dalle **Risorse**. Per risorse si intende tutto ciò che è necessario per effettuare un determinato processo. In particolare nel modello ci sono un certo numero di risorse non utilizzate per il normale processo di lavorazione (produzione sia di un bene che di un servizio) ma solo per alcuni processi (ad esempio di manutenzione). Esempi di risorse possono essere: risorse umane (manutentori, ispettori, etc), macchine, componenti della macchina, attrezzature (utilizzate sia nella lavorazione che per la manutenzione), e qualsiasi oggetto da mantenere.

Un'ipotesi importante considerata per il nostro modello riguarda la cardinalità massima delle risorse, fissata pari ad uno; ovvero abbiamo ipotizzato di non avere una molteplicità di risorse a livello di manutenzione: se ad esempio si hanno a disposizione due risorse dello stesso tipo, queste vengono rappresentate nel modello come due risorse differenti, solo ed esclusivamente per semplificarne la rappresentazione ed il funzionamento del modello. L'assegnazione delle risorse, dunque, avviene solo per tipologia e per disponibilità, non viene considerata, per ora, la molteplicità perché altrimenti si potrebbe e si dovrebbe considerare anche il problema del bilanciamento delle risorse.

Il numero totale di risorse considerate è pari a 6:

- R1: operatore 1 di produzione [OP1];
- R2: operatore 2 di produzione oppure operatore 2 di manutenzione [OP2 oppure OPM2];
- R3: macchina M1;
- R4: macchina M2;
- R5: macchina M3;
- R6: operatore di manutenzione 1/ ispettore[OPM1].

Nel momento in cui partirà un ordine di manutenzione una o più risorse dovranno risultare indisponibili per la produzione e disponibili per un ordine

di manutenzione. La logica di funzionamento dell'intero modello sarà meglio affrontata nei paragrafi successivi.

All'interno del modello svolgono un ruolo importante le cosiddette **Risorse Critiche** perché stabiliscono l'entrata o meno di un oggetto nella catena degli eventi. Le risorse in questione possono anche non riguardare il primo stato (ad esempio una macchina o un operatore impegnati nel primo stato di lavorazione), ma in generale devono essere vincolanti per l'esecuzione di una determinata route. Potrebbe, ad esempio, essere una delle macchine utilizzate nella route. Per poter testare il modello, però, si sono ipotizzate critiche, nel nostro caso, tutte le risorse necessarie per il primo stato e di conseguenza risultano essere 2 per ogni routes. Per le routes di manutenzione risulta critica, oltre all'operatore, anche la macchina sulla quale deve essere svolta l'attività manutentiva. Mentre per la route di ispezione la risorsa critica è rappresentata dall'ispettore. È stato necessario stabilire, oltre alle risorse critiche, le **Risorse necessarie** per svolgere ciascuna route. Queste ultime non sono altro che le risorse impegnate per eseguire una certa operazione/attività. Assumono importanza le risorse necessarie per le attività di manutenzione. Infatti, per poter simulare un processo in serie, quindi rigido, oltre all'operatore e alla macchina da mantenere, anche le altre risorse-macchine dell'intera linea produttiva si sono dovute considerare necessarie. Ricordiamo, infatti, che in un sistema in serie il guasto o comunque l'interruzione di un solo elemento della serie causa l'interruzione di tutta la serie. Mentre per l'attività di ispezione si è stabilito necessario solo l'ispettore perché abbiamo ipotizzato un monitoraggio on-line delle macchine che non richiede il fermo dell'impianto.

Tabella 19 Tabella riepilogativa degli elementi base del modello

| ELEMENTI BASE | Numero elementi considerati | Descrizione | |
|-------------------------|-----------------------------|--|-----------------|
| Stati | 18 | 1-17-18 Start, End e Free 2-10 Manutenzione 11-12 Ispezione 13-16 Manut. Correttiva | |
| Token | 7 | 1-3 Produzione 4-7 Manutenzione | |
| Mode | 9 | 1-2 Produzione 3-5 Manutenzione 6 Ispezione 7-9 Manut. Correttiva | |
| Risorse | 6 | R1 Op. Produz. R2 Op. Produz./Manut <u>R3-R5 Macchine</u> R6 Manut./Ispett. | |
| Route | 42 | 1-6 Produzione 7-26 Manutenzione 27-30 Ispezione 31-42 Manut. Correttiva | |
| Risorse Critiche | 2 per ogni route | Route | Risorsa |
| | | 1-3 | R1 ed R3 |
| | | 4-6 | R2 ed R3 |
| | | 7-10/31-34 | R2 ed R3 |
| | | 11-14 | R6 ed R3 |
| | | 15-18/35-38 | R6 ed R4 |
| | | 19-22/39-42 | R2 ed R5 |
| 23-26 | R6 ed R4 | | |
| 27-30 | R6 | | |

Tutte questi dati ed informazioni sono riportate all'interno di specifici file Excel. Una delle caratteristiche più importanti del software Powersim, infatti, come già accennato, è la possibilità di trasferimento dei dati da Microsoft Excel. È stata proprio questa peculiarità del software che ci ha permesso di realizzare un modello di simulazione parametrico, flessibile, adattabile, ma soprattutto integrato: un eventuale cambiamento o utilizzo del modello in un altro contesto industriale si ripercuoterebbe unicamente sui parametri e sui file Excel, che dovranno essere modificati ed adattati al caso in esame. La funzionalità del modello continuerebbe ad essere valida.

In particolare sono stati creati 4 file Excel:

1. “*NEG Schedula2*” nel quale sono riportati i tempi di arrivo previsti degli ordini di produzione, la tipologia, la priorità assegnata ad ogni ordine e tutta una serie di informazioni che andranno poi a costituire la **schedula**, ovvero l’ordine secondo il quale gli oggetti entranti nel sistema verranno processati. Il file viene richiamato all’interno del modello attraverso una costante:



Figura 70: costante *Schedule_Objects*

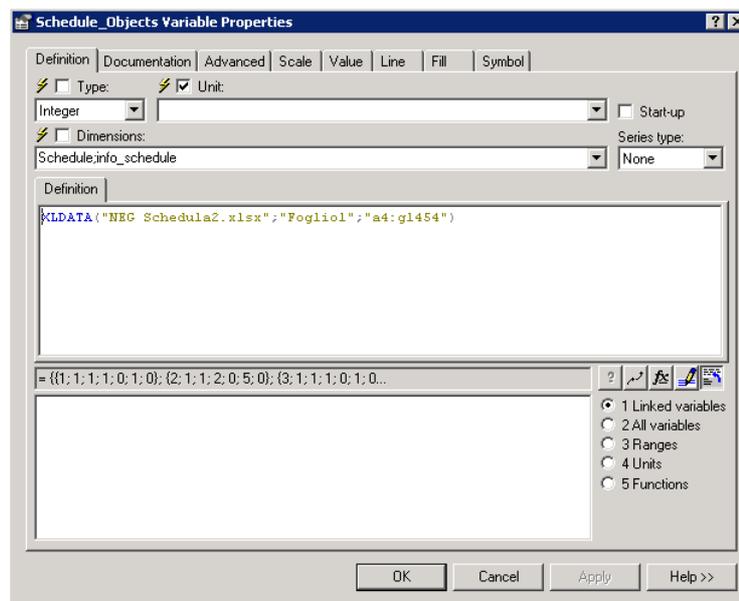


Figura 71 Finestra di dialogo: costante *Schedule_Objects*

2. “*Dati_Route2*” nel quale sono riportate tutte le risorse necessarie per ogni routes. Richiamato dalla costante:



Figura 72: Resource Required by route

3. “*NEG Matrici2*” dove nel Foglio 2 è riportato per ogni token il tipo di attività corrispondente (produttiva →Comp1, manutenzione→Comp2) ed il tipo di prodotto; nel Foglio 3 viene definita per ogni mode e per ogni token corrispondente la matrice degli stati ed, infine, nel Foglio Ris.Critiche sono riportate, appunto, le risorse critiche per ciascuna route. Le rispettive costanti sul Powersim sono:



Figura 73: *Source Target Matrix*



Figura 74: *Object Info Token*



Figura 75: *Critical Resources per Route*

4. “*Costi*” file sul quale sono riportati i costi associati alle varie attività di manutenzione e produzione.



Figura 76: *Costi*

Il modello si genera e si adatta automaticamente sulla base di tutti questi dati forniti in input.

Nella tabella seguente, infine, sono elencati tutti i **Ranges** stabiliti nel modello parametrico:

Tabella 20 Ranges del modello

| | | |
|---|----------------------------------|---------|
| ↔ | Combination_ObjType_Stop_Company | 1..7 |
| ↔ | Critical_Resources | 1..2 |
| ↔ | Info_obj | 1..3 |
| ↔ | info_schedule | 1..7 |
| ↔ | mode | 1..9 |
| ↔ | Resources | 1..6 |
| ↔ | Routes | 1..42 |
| ↔ | Schedule | 1..1451 |
| ↔ | Schedule_Maintenance | 1..50 |
| ↔ | Stack_Queue | 1..500 |
| ↔ | States | 1..18 |
| ↔ | states_token_mode | 1..20 |
| ↔ | states_type_mode | 1..20 |
| ↔ | Token | 1..7 |
| ↔ | type_x_mode | 1..9 |

Oltre a quelli relativi agli elementi già citati, sono importanti i ranges relativi alla dimensione della schedula. La schedulazione dei job di manutenzione, in realtà, si va ad aggiungere a quella di produzione già presente. Dal momento che la schedula presenta un numero finito di elementi (in base al range considerato, *Schedule*, ne sono 1451), ai job di manutenzione sono state riservate alcune posizioni, in particolare le ultime 50, infatti, l'ordine degli elementi nella schedula non è importante, perché il modello eseguirà i vari job in base al tempo e non in base all'ordine. È stato creato, quindi, un nuovo range definito *Schedule_Maintenance* di 50 elementi e, di conseguenza, sono state eliminate dalla schedula degli ordini di produzione gli ultimi 50 job.

5.3. La logica della produzione

Come più volte specificato, all'interno del modello parametrico si sono volute inserire due logiche distinte:

- la logica della produzione
- la logica della manutenzione

In particolare la prima rappresenta il vero e proprio processo produttivo responsabile del deterioramento delle macchine che, quindi, determinerà gli incrementi di usura e la probabilità che si verifichi l'evento di guasto. La logica della manutenzione, invece, rappresenta l'intero processo di manutenzione che, come vedremo, sarà caratterizzato dalle fasi di ispezione, attraverso le quali è possibile determinare lo stato delle macchine, e dai diversi processi di manutenzione.

Si è considerato un sistema produttivo di tipo Flow Shop, piuttosto semplice, costituito da due linee produttive (Mode 1 e Mode 2), nelle quali le operazioni necessarie per la realizzazione dei prodotti (uno nel nostro caso, essendo due linee produttive, ma dello stesso tipo), devono essere effettuate sullo stesso insieme di macchine, ovvero 3, secondo lo stesso ordine di precedenza. In particolare, per poter effettuare i test di prova abbiamo ipotizzato i seguenti cicli di produzione:

Tabella 21 Cicli di Produzione

| | START | 2 | Buffer1 | 4 | Buffer2 | 6 |
|---------------|--------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|
| Mode 1 | | R1-R3 | | R2-R4 | | R1-R5 |
| Mode 2 | | R2-R3 | | R2-R4 | | R1-R5 |

Dove R1 ed R2 rappresentano gli operatori di produzione ritenuti necessari e le risorse macchine sono rispettivamente R3, R4 ed R5.

Il flusso degli elementi lungo la linea è unidirezionale ed esistono vincoli di precedenza tra le operazioni, ovvero:

- le operazioni devono essere eseguite secondo l'ordine stabilito;
- ogni macchina può effettuare al massimo un'operazione alla volta;
- la lavorazione su una macchina può iniziare solo dopo il completamento della lavorazione sulla macchina precedente.

Come già accennato, il ciclo delle lavorazioni e le risorse necessarie sono state definite sul file Excel delle Routes e su quello relativo alla matrice degli stati ed, inoltre, i job in attesa di essere eseguiti su una particolare risorsa sono ospitati nei buffers interoperazionali.

Andiamo ora ad analizzare più nel dettaglio il flusso degli oggetti all'interno del modello e la logica di funzionamento dello stesso.

5.3.1. Ingresso

Il modello è alimentato in input dagli oggetti in arrivo che rappresentano gli ordini di produzione, ovvero di manutenzione. La produzione, infatti, può avere inizio a valle di un ordine relativo ad un particolare prodotto (definito *Customer Orders* da Georgiadis [61]). Nel nostro caso gli oggetti sono gestiti tramite un file Excel, *Schedule*, che rappresenta il piano di produzione. Nel file sono riportate tutta una serie di informazioni (range *info_schedule*) necessarie al modello per stabilire il percorso e le azioni che quel particolare oggetto potrà subire:

- nella colonna denominata **schedula** è riportato il tempo di schedulazione, ovvero il tempo previsto tra due ordini;
- nella colonna **tipo** viene identificato attraverso un indice la tipologia del prodotto. Nel nostro caso sarà sempre 1;
- in **tipo ordine**: un numero identifica la tipologia di ordine: 1 se di produzione, 2 se di manutenzione;
- la colonna relativa a **famiglia** è stata utilizzata nel nostro caso per indicare il mode corrispondente a quell'ordine;
- la colonna **ID** è riservata agli ID che il modello assegna all'ordine;
- nella colonna **priorità** può essere specificata la priorità degli ordini;
- nella colonna **risorsa_manutenzione** viene indicata la macchina da mantenere corrispondente a quel particolare ordine di manutenzione.

Queste ultime due informazioni hanno comportato la modifica del rispettivo range *info_schedule*, ed altre modifiche all'interno delle variabili interessate (*Assign_ID* ed *Assign_obj*).

La variabile di livello *Sim_Time* scandisce lo scorrere del tempo di simulazione in secondi (nello specifico in una frazione di secondi perché abbiamo stabilito un **TIMESTEP** di 0,5 sec) e consente l'individuazione dell'istante di arrivo di ogni singolo ordine. In generale il **TimeStep**, ovvero "il passo" con cui avanza la simulazione, rappresenta un modo per simulare il comportamento discreto di un sistema. In un sistema che supporta solo i flussi continui, come l'ambiente in Powersim, è necessario ricorrere a soluzioni alternative per esprimere le caratteristiche ed i comportamenti discreti che possono esserci in un sistema continuo; un modo per farlo è proprio l'uso esplicito del "passo temporale della simulazione".

La variabile ausiliaria *planned_arrive*, infatti, effettua un controllo: verifica se coincidono il tempo di arrivo, riportato nella schedula, e l'orario attuale di simulazione. Solo in quel caso, restituendo un valore pari ad 1 e non nullo, la variabile va ad alimentare il tasso degli arrivi, *Rate_Arrives*, e la coda degli arrivi attraverso la variabile ausiliaria *Assign_obj*. Il comando nel modello della variabile *planned_arrive*, infatti, è

FOR(i=Schedule|IF(Arrive_Time(i)=Sim_Time;1;0)

è, attraverso un "fantasma", la variabile è stata collegata con *Rate_Arrives* ed *Assign_obj*, come mostrano le due figure successive. Queste figure, inoltre, rappresentano la parte del modello relativo alla gestione degli arrivi.

È bene precisare che con il termine "fantasma" si intende una qualsiasi variabile utilizzata e richiamata più volte all'interno del modello per essere poi collegata con le altre. Una qualunque modifica sulla variabile originaria si trasmette sui rispettivi "fantasmi" in automatico. Inoltre, come per questa sintassi, è stato spesso utilizzato il *ciclo for* all'interno del modello: una struttura di controllo iterativa che determina l'esecuzione dei comandi

imposti per un certo numero di volte. In questo caso per il numero degli elementi relativi al range *schedula*. È chiara, dunque, l'importanza dei range. Sono molte i comandi e le funzioni presenti all'interno del software di simulazione, nel nostro modello le più utilizzate sono state:

- SCANEQ che ricerca all'interno di un array l'indice di un particolare valore specificato; la funzione trovato il primo elemento nell'array uguale al valore specificato, restituisce, mediante un indice, la sua posizione.
- COUNT conta gli elementi presenti in un array.
- ARRMAX restituisce il valore massimo in un array.
- INTEGER considera e restituisce la parte intera di un valore.
- INDEX e NUMBER: trasformano un certo valore in un indice o in un numero , a seconda dei casi.
- ARRSUM somma gli elementi di un array
- ARRPRODUCT esegue il prodotto tra due array.
- CONCAT unisce uno o più parti provenienti da diverse matrici/vettori.
- SORT ordina gli elementi secondo un ordine stabilito (decrescente TRUE, crescente FALSE)

Molte delle funzioni, come vedremo, possono anche essere utilizzate insieme, ovvero in maniera combinata.

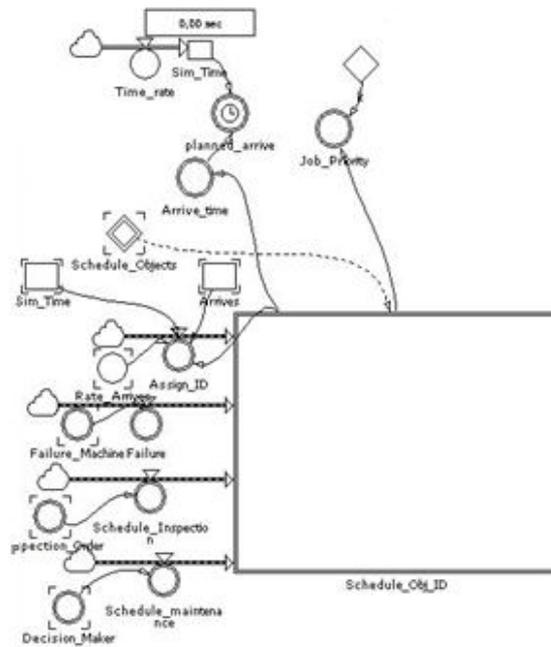


Figura 77Modello: Arrivi

All'istante di arrivo ogni oggetto presenta un ID pari a zero perché e il modello stesso, attraverso la variabile *Assign_ID*, che assegna l'indice di identificazione solo dopo l'ingresso effettivo di un ordine di produzione e di manutenzione nel sistema. Quest'ultimo viene registrato dal livello *Arrives* se e soltanto se la variabile ausiliaria *Rate_Arrives* verifica la presenza di spazio nella coda (*Queue_Arrives*):

***IF(Arrives<COUNT(Stack_Queue)<<obj>> AND
(ARRSUM(planned_arrive))>=1;IF(SCANEQ(Queue_Arrives;0)=0;0<<obj>>;1<
<obj>>;0<<obj>>)***

La dimensione della coda deve essere impostata basandosi sul numero medio di oggetti entranti nel sistema nel periodo di riferimento; ad esempio, nel nostro caso, abbiamo impostato una dimensione della coda pari a 451 elementi (range *stack_queue*), considerando anche gli ordini di manutenzione.

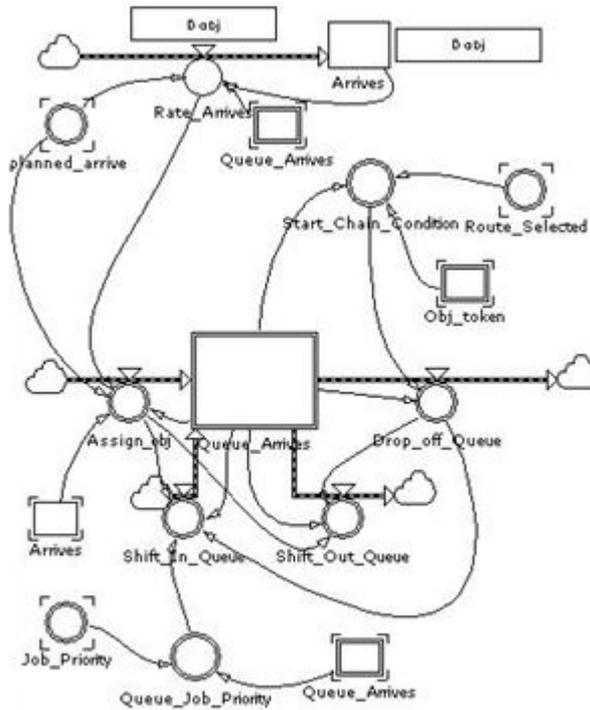


Figura 78Modello: Arrivi e Coda degli arrivi

Rate_Arrives, quindi, va ad alimentare gli arrivi se e soltanto se gli arrivi registrati fino a quel momento non superano la dimensione massima della coda ($COUNT(Stack_Queue)$) e se effettivamente è arrivato un ordine ($ARRSUM(planned_arrive)) \geq 1$). Verificate queste condizioni l'oggetto può essere inserito nella prima posizione libera all'interno della coda. Quest'ultimo è un aspetto molto importante del modello perché la coda, fungendo da buffer, evita il blocco della linea di produzione a monte, ma al tempo stesso, se viene superata la capienza della coda l'oggetto in arrivo viene perso. Il dimensionamento di *stack_queue* è, dunque, molto delicato.

La variabile ausiliaria *Assign_ID* assegna un numero identificativo pari all'intero della somma di ($Arrives + Rate_Arrives$) e lo va ad inserire nella colonna 5 ($COUNT(info_schedule) - 2$) di *Schedule_Obj_ID*.

Gli oggetti svolgono un doppio ruolo all'interno del modello, in produzione e in manutenzione e, quindi, abbiamo dovuto modificare la logica di gestione

della coda per fare in modo da non creare confusione relativamente all'assegnazione successiva delle route.

Nella *Queue_Arrives* sono presenti sia ordini di produzione che di manutenzione identificati da specifici ID. Gli oggetti entrano in coda finché non sono occupate tutte le posizioni. Il problema sorge nel momento in cui un oggetto deve andare in manutenzione, ovvero in presenza di un ordine di manutenzione, perché, secondo la logica che abbiamo voluto adottare, bisogna definire un certo indice di priorità che ne consenta il passaggio nella prima posizione della coda. Infatti, sicuramente un'attività di manutenzione, soprattutto se correttiva, deve poter essere eseguita tempestivamente all'interno di una linea di produzione o comunque deve svolgersi prima dell'inizio di qualsiasi altro ordine di produzione già schedato.

Le variabili ausiliarie che nel modello consentono gli spostamenti degli ID degli oggetti nella coda sono *Shif_In_Queue* e *Shif_Out_Queue*. Queste variabili hanno la funzione di ricompattare la coda non appena si registrano posizioni libere all'interno della stessa, ovvero posizioni contrassegnate da un indice nullo, secondo la logica FIFO (First in First out): la lavorazione degli oggetti, infatti, avviene secondo la sequenza di ingresso nel sistema. Per poter introdurre un movimento degli oggetti in coda basato, oltre che dal momento di arrivo, quindi dall'ID, anche dalle priorità è stato necessario andare a modificare la logica di funzionamento di queste variabili. Prima di tutto abbiamo introdotto nel modello un meccanismo di assegnazione delle priorità: abbiamo creato una costante k identificativa del numero massimo di oggetti schedabili, posta pari a 9000, una variabile ausiliaria *job_priority* che esegue il calcolo e la variabile *queue_job_priority* che assegna la priorità calcolata all'ID dell'oggetto corrispondente nella coda.

Abbiamo, inoltre, ipotizzato un range di priorità in cui il più basso valore di priorità per la manutenzione è sempre più alto di quelli relativi alla produzione: 0-5 per gli ordini di produzione, 6-10 per quelli di manutenzione. Questo valore può essere inserito nel foglio di lavoro Excel *Schedule* nella

colonna 6 oppure per la manutenzione, come vedremo più avanti, direttamente da una variabile ausiliaria del modello.

Job_priority è, quindi, la variabile che nel modello calcola la priorità per ciascun elemento nella schedula, in particolare due sono le azioni che deve svolgere per ogni elemento in Schedule (*FOR(i=Schedule)*):

1. se l'ID non è stato ancora assegnato, ovvero **ID=0**, deve assegnare un numero pari a **k** → *IF(Schedule_Obj_ID[i;5]=0;k ;*
2. se, al contrario, **ID≠0** bisogna assegnare un numero pari a **k*Priorità+(k-ID)** → *k*Schedule_Obj_ID[i;6]+k-Schedule_Obj_ID[i;5].*

In questo modo la variabile *Shif_In_Queue*, attraverso la funzione di Powersim SORT, può ordinare gli elementi nella coda secondo il giusto ordine e sempre seguendo una logica FIFO.

IF(ARRSUM(Drop_off_Queue)= 0 AND

ARRSUM(Assign_obj)=0;SORT(Queue_Job_Priority;FALSE;Queue_Arrives);0)

Gli oggetti potranno liberare la coda, attraverso la variabile *Drop_off_queue*, solo una volta entrati nella catena degli eventi, ovvero in seguito all'assegnazione dello stato di *Start*, ma soprattutto del token. Questo perché, in realtà, l'ingresso di un oggetto nel sistema è condizionato da un altro aspetto chiave del modello, i *tokens* che rappresentano una vera e propria autorizzazione che consente all'oggetto il movimento nel sistema. Come già accennato, infatti, il numero di tokens corrisponde al numero di oggetti che possono transitare contemporaneamente nel sistema ed, inoltre, rappresenta un dato del modello. Il token viene assegnato ad un oggetto quando la *route* relativa è selezionabile. La variabile *Start_Chain_Condition*, letteralmente "condizione di inizio della catena", infatti, assume il valore "TRUE" quando:

1. è disponibile un elemento nella coda "Queue Arrives";
2. è selezionabile la route, ovvero sono disponibili le risorse per il primo stato di lavorazione;
3. è disponibile il token.

La sintassi della variabile risulta essere proprio:

***FOR(i=Token/IF(Queue_Arrives[1]>0 AND
INTEGER(ARRSUM(Route_Selected[i;*]))>0 AND Obj_token[i]=0;1;0))***

Verificate le tre condizioni, il token viene assegnato all'oggetto, l'ID corrispondente viene riportato nella variabile di livello *Obj_token*, lo stato del token non è più free, ma "start" (utilizzabile) e la route viene selezionata.

Tutto questo, però, riguarda la fase di evoluzione del sistema.

5.3.2. Evoluzione

L'evoluzione dei vari oggetti attraverso i diversi stati del sistema è descritta dalle *routes*. Abbiamo visto come possano esserci routes diverse a seconda delle lavorazioni e delle operazioni che si vogliono considerare e, quindi, simulare, ognuna delle quali descritta in termini di risorse necessarie e critiche. La route di volta in volta viene selezionata dalla variabile *Route_Selection*, Figura successiva, sulla base delle routes utilizzabili. Una route è considerata "usable" se risultano libere e disponibili le risorse critiche ad essa associate, condizione necessaria per la sua selezione.

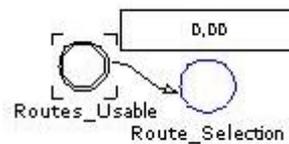


Figura 79 *Route Selection*

Nella figura seguente è riportata la parte relativa all'identificazione delle routes utilizzabili ed è evidente il collegamento tra le *Routes_Usable*, le *Routes_Available* ed i *Tokens_Usable*. Il percorso di uno specifico oggetto all'interno del sistema, infatti, è condizionato dal tipo di token ad esso assegnato perché abbiamo visto che nel nostro modello i tokens possono transitare solo in alcuni stati: di produzione o di manutenzione, a seconda dell'ordine da eseguire. La variabile ausiliaria *Check-Token-Obj-Info-Token* verifica di volta in volta, durante la simulazione, la corrispondenza tra il tipo di ordine ed i tokens utilizzabili (i primi 3 nel caso di un ordine di

produzione) e, se questi ultimi sono liberi, *free*, la variabile *Tokens_usable*, restituisce un vettore di dimensione token, con un valore unitario nelle posizioni corrispondenti ai tokens utilizzabili:

***FOR(i=Token|IF(State[i;COUNT(States)]=1 AND
SCANEQ(Check_Token_Obj_Info_Token;i)>0;1;0))***

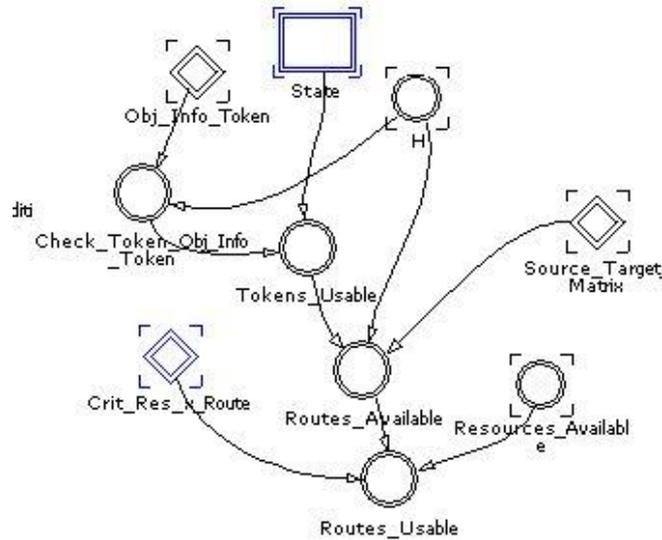


Figura 80 Tokens e Routes utilizzabili

Solo una volta identificati i tokens che possono transitare nel sistema, la variabile *Routes_Available* può selezionare, all'interno del file nel quale sono riportati gli stati associati alle Routes per ogni Tokens (*Source_Target_Matrix*), la route disponibile in quel particolare istante della simulazione:

FOR(i=Routes|IF(Tokens_Usable[INDEX('Source_Target_ Matrix'[i;COUNT(States)+1)])=1 AND 'Source_Target_ Matrix'[i;COUNT(States)+2]=H[3];1;0))

La variabile restituirà sempre un vettore, questa volta di dimensione route, con valori unitari in corrispondenza delle routes disponibili.

Solo a questo punto, a valle di tutti questi controlli, la variabile *Routes_Usable*, può selezionare tra le routes disponibili quelle per le quali sono disponibili le risorse critiche e per questo utilizzabili. L'output sarà

sempre un vettore di dimensione routes con elementi unitari lì dove sono verificate le condizioni sopra descritte:

$$\mathbf{FOR}(i=\mathbf{Routes}/\mathbf{IF}(\mathbf{ARRPRODUCT}(\mathbf{FOR}(j=\mathbf{Critical_Resources}/\mathbf{IF}(\mathbf{ABS}(\mathbf{Resources_Available}[\mathbf{INDEX}(\mathbf{NUMBER}(\mathbf{Crit_Res_x_Route}[i;j]))])>0 \mathbf{AND} \\ \mathbf{Routes_Available}[i]=1;1;0)))=1;1;0))$$

In generale l'evoluzione dello stato, definita anche catena degli eventi, rappresenta qualcosa che si conosce a priori attraverso la matrice degli stati, stabilita a monte e fornita in input al modello mediante la costante *Souce_Target_Matrix*. Un modello di simulazione, però, è la rappresentazione di un sistema dinamico che, come tale, presenta una propria dinamica che varia nel tempo. Durante la simulazione, quindi, a seconda di una serie di eventi che si susseguono i tokens si troveranno in uno stato piuttosto che in un altro, alcune risorse saranno utilizzate ed altre disponibili, il sistema si troverà ad eseguire un ordine di produzione piuttosto che di manutenzione, una risorsa, funzionante fino ad un certo istante, potrebbe rompersi. Per poter rappresentare e modellare queste ed altre possibili dinamiche, nel nostro modello sono presenti una serie di “costrutti” che forniscono informazioni differenti, ma tutte inerenti l'evoluzione da uno stato all'altro.

La vera e propria **catena degli eventi** è rappresentata dalla variabile di livello *State*, Figura successiva, che indica lo stato nel quale si trova un particolare token in un preciso istante di tempo. Il livello porta memoria dello stato attuale di tutti i tokens presenti all'interno del sistema e si aggiorna Timestep per Timestep ogni qual volta si registra un cambiamento di stato. A quel punto è la variabile ausiliaria *Shift_out* che “svuota” e modifica il livello del token selezionato per la transizione di stato. Questa informazione è fornita dalla variabile ausiliaria *EvtChg* che ha dimensione tokens.

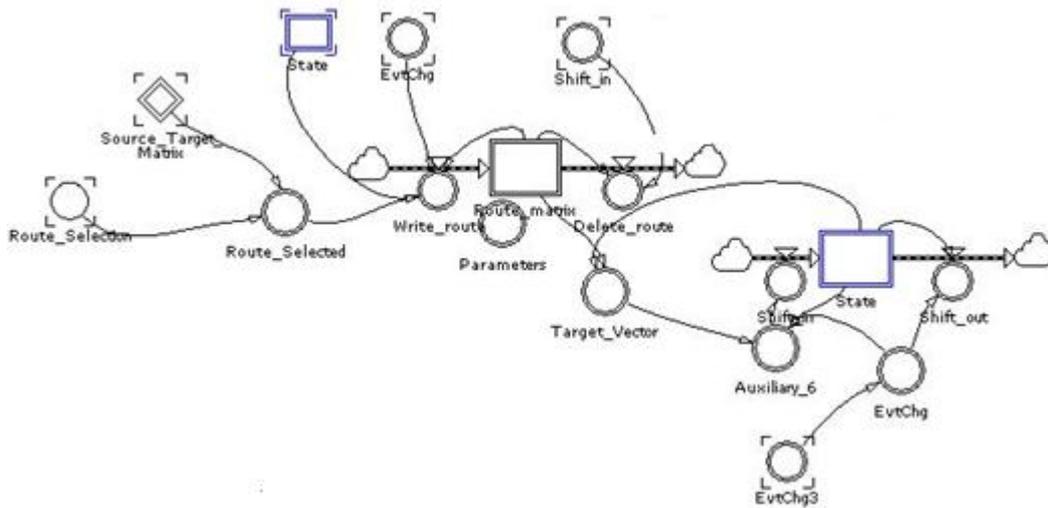


Figura 81 *Evoluzione del sistema: State e Route_Matrix*

Come mostra anche la Figura precedente, *EvtChg* è collegata oltre che a *EvtChg3*, che descriveremo più avanti, anche alla variabile *Write_route* che alimenta il flusso del livello *Route_matrix*. Quest'ultima è una matrice con le stesse dimensioni della matrice degli stati (Tokens,States), infatti, porta memoria degli stati verso i quali si devono muovere i token. Una volta selezionata la route la variabile *Write_route*, sulla base degli stati presenti nella route, se il token corrispondente è libero e non deve cambiare stato, definisce all'interno della *Route_matrix* gli stati nei quali dovrà transitare il token:

$$\begin{aligned}
 & \text{FOR}(i=\text{Token}|\text{IF}(\text{ARRSUM}(\text{Route_matrix}[i; *])=0 \text{ AND} \\
 & \text{ARRSUM}(\text{Route_Selected}[i; *])>0 \text{ AND } \text{State}[i; \text{INDEX}(\text{COUNT}(\text{States}))]=1 \text{ AND} \\
 & \text{EvtChg}[i]=0; \text{INTEGER}(\text{Route_Selected}[i; *]; 0))
 \end{aligned}$$

Target_Vector, invece, non fa altro che estrarre dalla matrice a cui è collegato, un vettore di dimensione tokens che, quindi, rappresenta lo “step” successivo in termini di stati, istante per istante durante la simulazione, di tutti i tokens occupati nel sistema:

$$\text{FOR}(i=\text{Token}|\text{Route_matrix}[i; \text{INDEX}(\text{SCANEQ}(\text{State}[i; *]; 1))])$$

La variabile di livello che accumula il tempo relativo ad ogni oggetto all'interno del sistema è *Time_obj*, Figura seguente.

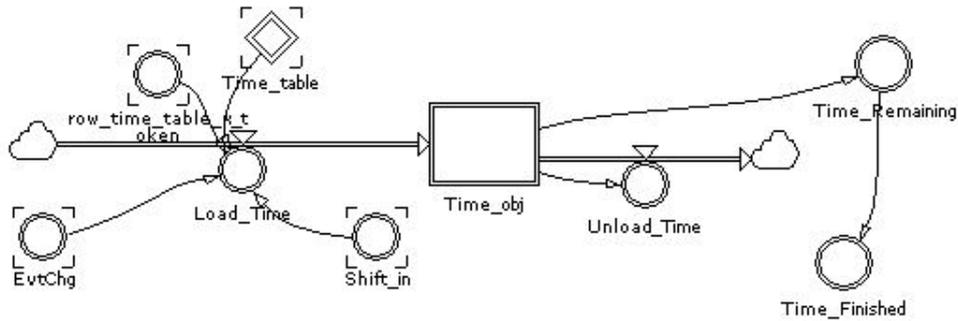


Figura 82*Evoluzione: Clessidra*

In particolare la variabile ausiliaria *Load_Time* “carica” il tempo di lavorazione di ciascun token in corrispondenza di ciascuno stato e lo inserisce nel livello. I tempi di lavorazione rappresentano un input del modello e vengono letti attraverso la costante *Time_Table*, Figura 43. Questa costante è di dimensione “type_x_mode;states_type_mode” perché al suo interno sono specificati i tempi di tutte le tipologie di lavorazioni considerate (produzione/manutenzione), ovvero di tutti i modes, in ogni stato.



Figura 83*Costante TIME_TABLE*

La Figura successiva mostra la finestra di dialogo corrispondente sul Powersim con tutti i tempi, espressi in secondi, che abbiamo ipotizzato.

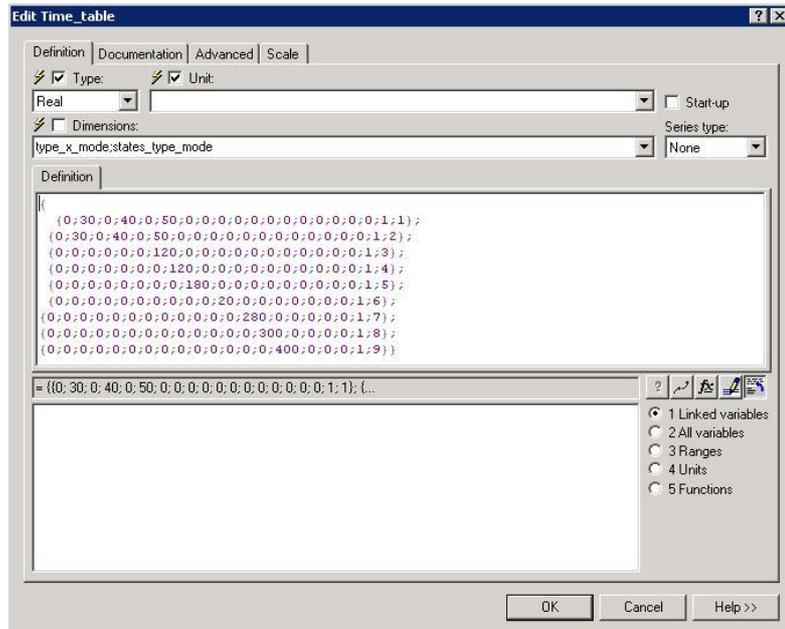


Figura 84 Finestra di dialogo: *Time_Table*

Il tempo viene letto sulla riga corrispondente a ciascun token non appena la variabile *EvtChg* indica il cambiamento di stato per quel particolare token:

$$\text{FOR}(J=\text{Token} \mid \text{FOR}(I=\text{States} \\ \text{IF}(\text{row_time_table_x_token}[j]>0;\text{EvtChg}[J]*\text{Shift_in}[J;I]*\text{Time_table}[\text{INDEX}(I \\ \text{NTEGER}(\text{row_time_table_x_token}[j]);I]*1\langle\langle\text{sec}\rangle\rangle/\text{TIMESTEP};0)))$$

Durante la simulazione, Timestep per Timestep, il livello *Time_obj* si aggiorna per poi azzerarsi al termine della lavorazione. La variabile *Time_Finished*, di dimensione token, definisce un vettore di valori 1 ed 0 a seconda o meno che il tempo di lavorazione di quel token sia terminato:

$$\text{FOR}(i=\text{Token} \mid \text{IF}(\text{Time_Remaining}[i]=0\langle\langle\text{sec}\rangle\rangle;1;0))$$

Questa variabile, infatti, è collegata alla variabile *Candidate_EvtChg*, Figura 45, che identifica i tokens candidati a cambiare di stato.

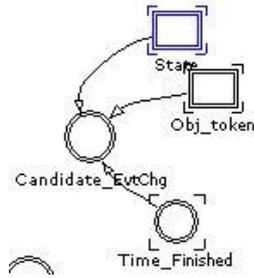


Figura 85 *Candidate_EvtChg*

Ogni token, come abbiamo visto, può aver bisogno in ogni singolo stato di un certo numero e tipo di risorse a seconda della route assegnatagli dal sistema, risorse specificate nella costante *Resource_Required_by_route*. Pertanto, quando un nuovo oggetto (token) entra nel sistema la variabile di flusso *Write_Resource* inserisce nel livello, ad essa collegato, Figura 46, le risorse richieste per l'esecuzione di ciascuna route (in termini di indici unitari) ricavate dalla costante. Naturalmente la variabile, come mostrano anche i collegamenti nella figura seguente, è connessa ad una serie di altre variabili che permettono l'identificazione dei tokens per ciascuno stato occupati da una specifica route.

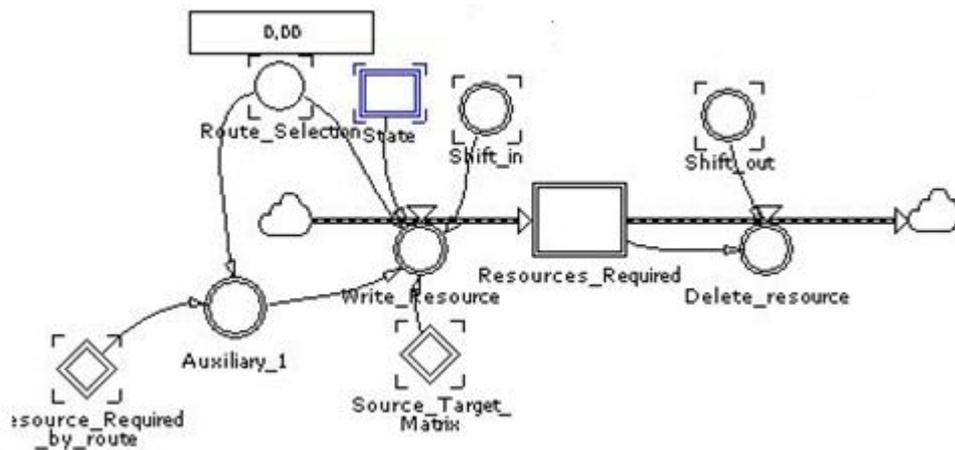


Figura 86 *Risorse Richieste da ciascuna Route*

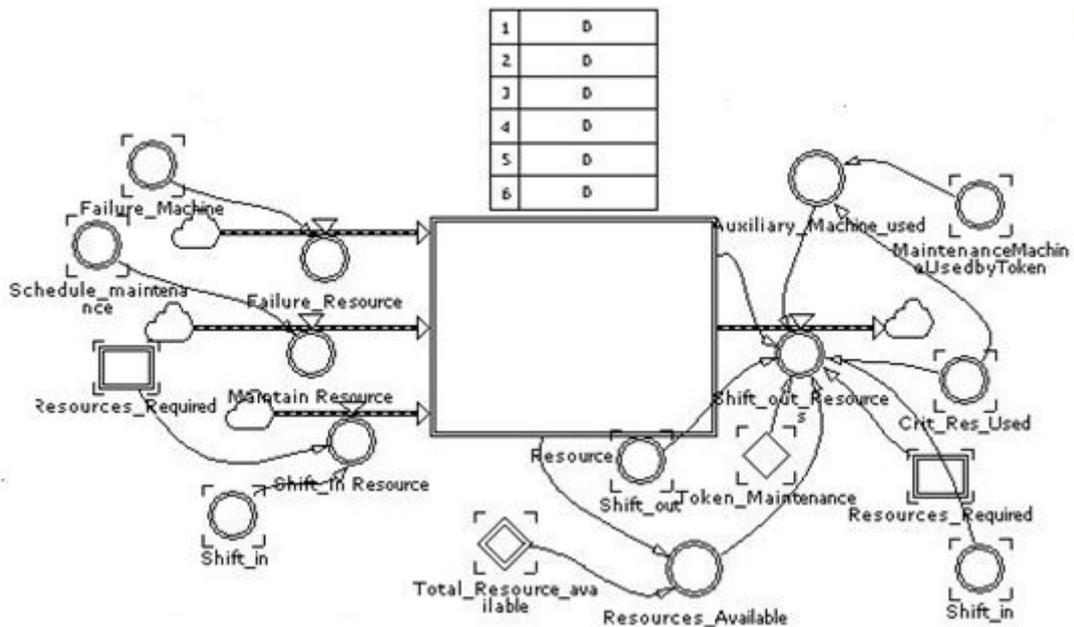


Figura 87 Livello Risorse impegnate

In particolare si sono dovuti differenziare i seguenti casi: $FOR(r=Resources/ARRSUM(FOR(i=Token/ FOR(j=States/$

1. se l'indice della risorsa r è negativo ed il token che la sta liberando non è di manutenzione, la variabile non deve apportare nessun cambiamento (infatti vedremo che per identificare una risorsa occupata in manutenzione utilizzeremo degli indici negativi)→

$IF(Resources_Available[r]<0 AND i \leq COUNT(Token)-Token_Maintenance;0;$

2. se l'indice r è negativo, il token è di manutenzione e si trova nello stato "Fine Manutenzione" ($\equiv 10$), deve riportare l'indice di quella risorsa a uno, ovvero deve sottrarre al livello la quantità definita nella sintassi in blu.→

$IF(Resources_Available[r]<0 AND i > COUNT(Token)-Token_Maintenance AND j = COUNT(States)-8 AND Shift_in[i;INDEX(COUNT(States)-8)]=1 AND ARRSUM(Resources_Required[i;r;*])>0; INTEGER(Crit_Res_Used[r])*Resource[r]+INTEGER(Auxiliary_Machine_used[r;i]);$

Questa quantità è pari ad un vettore di dimensione Resources ottenuto sommando due vettori: il vettore con elementi unitari in corrispondenza della macchina mantenuta in quel particolare ordine di manutenzione (coincidente con la risorsa critica per quella specifica route), ed il vettore contenente elementi unitari in corrispondenza delle risorse macchina considerate all'interno delle linee produttive (il ripristino deve, infatti, riguardare anche le altre macchine della linea per l'ipotesi considerata di linea rigida, ovvero in serie).

3. Se l'indice r è negativo, il token è di manutenzione e si trova nello stato "Fine Manutenzione per Guasto" ($\equiv 16$), deve riportare l'indice di quella risorsa a uno, ovvero deve sottrarre al livello la quantità definita nella sintassi in blu \rightarrow

***IF(Resources_Available[r]<0 AND i>COUNT(Token)-Token_Maintenance
AND j=COUNT(States)-2 AND Shift_in[i;INDEX(COUNT(States)-2)]=1
AND ARRSUM(Resources_Required[i;r;*])>0 ;
INTEGER(Crit_Res_Used[r])*Resource[r]+INTEGER(Auxiliary_Machine_Used[r;i]);***

Anche in questo caso valgono le stesse considerazioni viste al punto precedente anche se riferite ad un ordine di manutenzione per guasto.

4. Negli altri casi, ovvero se il token è di manutenzione e si trova nello stato di *end* (come ad esempio nel caso di un ordine di ispezione che utilizza come risorsa solo l'ispettore e nessuna macchina), o se la risorsa è impegnata in produzione (è quindi occupata ma presenta un indice di disponibilità positivo), *Shift_out_Resource* non deve fare niente nel primo caso e liberare, ovvero portare a 1, le risorse dei token di produzione che passano allo stato di *end*, nel secondo caso \rightarrow

***IF(i>COUNT(Token)-Token_Maintenance AND j=COUNT(States)-1) AND
Shift_out[i;INDEX(COUNT(States)-1)]=0; 0; IF(Resource[r]>0 AND
Resources_Available[r]>=0;
INTEGER(Shift_out[i;j]*Resources_Required[i;r;j];0))))))***

Molte delle variabili fin ora descritte, come *State*, *Candidate_EvtChg*, *Target_Vector*, *Resources_Available*, *EvtChg*, *Load_Time* ed altre ancora, sono coinvolte in un altro costrutto del modello che regola il grado di copertura e la percentuale di copertura attribuito alle risorse durante l'evoluzione da uno stato all'altro, Figura successiva. Una generica transazione di stato può avvenire se e soltanto se per lo stato successivo sono disponibili le risorse necessarie. In particolare la copertura delle risorse viene calcolata tenendo conto di due aspetti: se la risorse è impegnata in produzione o in manutenzione e se la risorsa necessaria per lo stato successivo è già "posseduta" e cioè è stata utilizzata nello stato precedente dal token che deve cambiare di stato.

Se le risorse disponibili associate allo stato corrente (*RR_Current_State*) sono maggiori delle risorse disponibili associate allo stato futuro (*RR_Future_State*) e si tratta di risorse già possedute dal token ($RR_Current_State[i;k]>0$ AND $RR_Future_State[i;k]>0$) la variabile assegna una sorta di priorità alle risorse necessarie allo stato futuro (+0,1). Inoltre se il token è di manutenzione, se la risorsa necessaria al token nello stato futuro non è impegnata in produzione e se il valore assoluto delle risorse disponibili sono maggiori o uguali alla differenza tra $RR_Future_State[i;k]$ e $RR_Current_State[i;k]$, la copertura è pari a $RR_Future_State[i;k]$. Se, invece, le stesse condizioni sono soddisfatte dai token di produzione è ad essi che viene associata la stessa copertura.

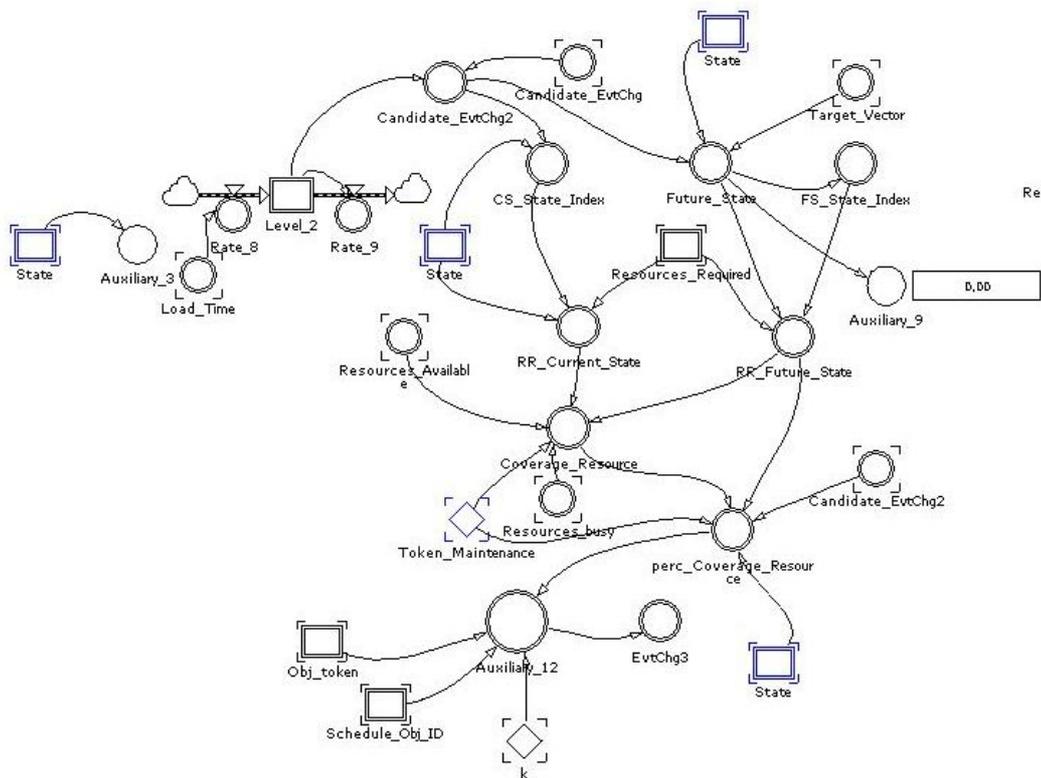


Figura 88 *Copertura delle risorse e cambiamento di stato*

Il cambiamento di stato finale, EvtChg3, nella versione originale del modello, veniva stabilito dalla variabile ausiliaria *perc_Coverage_Resource* che calcolava il rapporto, in termini percentuali, tra la copertura delle risorse e le risorse necessarie al cambiamento di stato. La diversa natura degli ordini gestiti dal modello, come già accennato, ci ha costretti ad introdurre un meccanismo di assegnazione delle priorità agli oggetti in movimento nel sistema e di conseguenza, per poterne mantenere memoria, abbiamo dovuto modificare il criterio di selezione del token che può cambiare di stato. La variabile *Auxiliary_12* seleziona il token che presenta una priorità più alta tra quelli che nel vettore, definito dalla variabile *perc_Coverage_Resource*, ha un valore più alto:

FOR($i=Token$ |**IF**($perc_Coverage_Resource[i]=MAX(1;ARRMAX(perc_Coverage_Resource))$); $k*Schedule_Obj_ID[INDEX(SCANEQ(Schedule_Obj_ID[*];5);Obj_token[i]));6]+k-$

$Schedule_Obj_ID[INDEX(SCANEQ(Schedule_Obj_ID[*];5);Obj_token[i]));5];0)$

In base alla variabile *perc_Coverage_Resource* quando una risorsa è contesa tra produzione e manutenzione viene sempre data la precedenza alla manutenzione e, quindi, i token di manutenzione avranno una percentuale maggiore; inoltre, sempre se c'è copertura di risorse per gli stati successivi, avranno una percentuale più alta i token che sono arrivati per prima e che devono completare la propria route.

***FOR(i=Token|IF(i>COUNT(Token)-
Token_Maintenance;0,00001;0)+IF(ARRSUM(RR_Future_State[i;*])>0 OR
(Candidate_EvtChg2[i]>0 AND
ARRSUM(RR_Future_State[i;*])>0);ARRSUM(FOR(r=Resources|Coverage_Re
source[i;r]/ARRSUM(RR_Future_State[i;*]));IF(ARRSUM(RR_Future_State[i;
*])=0 AND
State[i;COUNT(States)]=0;1*Candidate_EvtChg2[i];IF(ARRSUM(RR_Future_S
tate[i;*])=0 AND State[i;COUNT(States)]=1;2*Candidate_EvtChg2[i];0))))***

I token, dunque, avanzano sempre in base alla percentuale di copertura, come nel modello originario, ma anche in base alla propria priorità (più alta per gli ordini di manutenzione). Un'altra variazione in questo costrutto, Figura 48, è stata l'introduzione della variabile *Resource_busy*, Figura successiva, collegata a *Coverage_resource*. Questa variabile è in grado di verificare se una risorsa sta lavorando o meno, perché nel caso in cui è, ad esempio, impegnata in produzione, non può essere contemporaneamente impegnata da un ordine di manutenzione.

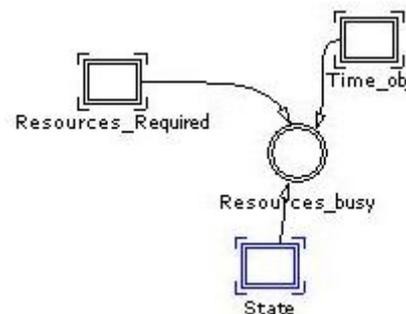


Figura 89*Resources_busy*

È la variabile *EvtChg3*, dunque, collegata attraverso *EvtChg* alla catena degli eventi, che determina i token prescelti durante la simulazione al cambiamento di stato, contribuendo così allo svolgimento della fase di evoluzione.

5.3.3. Uscita

Una volta terminata una particolare lavorazione associata ad un oggetto all'interno del sistema simulato, il token corrispondente può transitare nello stato fittizio *End*. È proprio il verificarsi di questo evento a segnare la fase di uscita dell'oggetto dal sistema. Il tempo necessario all'esecuzione di ciascuna delle operazioni previste nel ciclo produttivo o manutentivo (a seconda dei modes), viene regolato attraverso le clessidre. Nel nostro modello un esempio di clessidra è rappresentato dal costrutto di *Time_obj*, Figura 82, regolato dalla *Time_Table*; infatti, abbiamo visto che si tratta di un meccanismo a cui compete la funzione di scandire il tempo necessario ad una data operazione. Quando il tempo si esaurisce, l'operazione può considerarsi conclusa e solo allora, a seconda dei casi, se tutti i vincoli sono stati rispettati:

- il prodotto in lavorazione può passare alla risorsa successiva (ovvero allo stato successivo) per subire una ulteriore lavorazione oppure può essere trasportato in magazzino in quanto prodotto finito. Naturalmente questo nel caso di un ordine di produzione;
- la risorsa macchina può tornare ad essere “as good as new” al termine di un ordine di manutenzione preventiva, opportuna o correttiva;
- si può risalire ad una serie di informazioni circa lo stato di salute delle macchine a valle di un ordine di ispezione.

I vincoli, di cui sopra, possono riguardare sia l'utilizzo delle risorse per la presenza di precedenze da rispettare, che vincoli temporali in generale.

Il passaggio dei tokens nello stato di *end* comporta all'interno del modello il verificarsi di tutta una serie di eventi:

- l'ID assegnato ai tokens in stato di *end*, riportato nella variabile di livello *Obj_token*, si azzerà. Questo livello, infatti, non è altro che un

vettore di dimensione tokens che in ogni riga riporta l'ID dei tokens che entrano di volta in volta nella catena degli eventi, ovvero i tokens in lavorazione in un particolare istante di tempo. Nella Figura successiva ne è riportato un esempio.

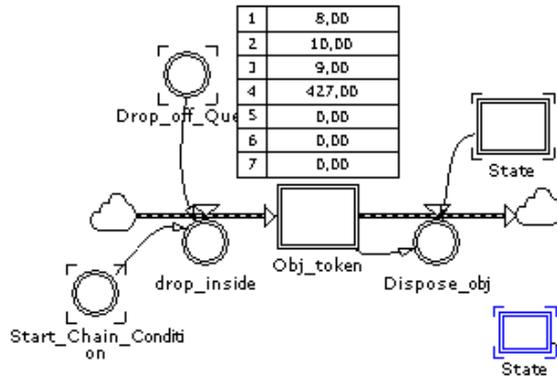


Figura 90*Obj_token*

- la riga della matrice "Route Matrix", relativa alla route associata al token in stato di "END" si azzerava, così come anche i livelli di *Resources_Required* e di *Time_obj* sempre per ciò che riguarda quel particolare token;
- le risorse associate all'ultimo stato attraversato dal token in questione si liberano ed incrementano la variabile livello "Resource Available".

In generale i meccanismi di funzionamento delle fasi (ingresso-evoluzione-uscita) appena descritte non riguardano la sola logica di produzione, ma anche la logica di manutenzione. Sono stati introdotti, infatti, degli elementi all'interno del modello che permettono al sistema di differenziare le azioni da intraprendere e gli eventi da considerare, a seconda del tipo di ordine da processare. Molti di questi elementi (collegamenti, variabili di flusso e di livello o anche specifici comandi e funzioni) sono stati già introdotti e descritti, altri, invece, verranno chiariti nella parte del modello relativa alla logica di manutenzione.

5.4. La logica della manutenzione

La logica di funzionamento delle attività di manutenzione che abbiamo voluto rappresentare all'interno del modello, trae spunto, come più volte specificato, dalla tesi di Dottorato intitolata “*Manutenzione su condizione: modellazione e ottimizzazione*”. [62] In particolare l'obiettivo che ci siamo posti è stato quello di creare un modello di simulazione parametrico in System Dynamics, e non in DES, che integrasse gli stessi meccanismi considerati dall'Ing. Zoppoli riguardanti l'interfacciamento dei due processi, produttivo e manutentivo. Il modello che abbiamo sviluppato, infatti, ingloba e gestisce contemporaneamente sia le attività di produzione che le attività di manutenzione. Al contrario, invece, del lavoro di Dottorato in cui sono stati creati in Arena due modelli separati che comunicano all'occorrenza e che non condividono alcuna entità. Le attività da noi considerate riguardanti il processo manutentivo sono 3:

1. Ispezione

Ipotizzando le risorse soggette a manutenzione accessibili e monitorabili, abbiamo rappresentato due tipologie di monitoraggio/ispezione: continuo, da noi definito *Online_Monitoring*, in grado di rilevare e di aggiornare automaticamente lo stato di usura delle macchine durante il loro ciclo di lavorazione senza dover ricorrere, ad esempio, alla figura dell'ispettore; e ad intervalli discreti, il cosiddetto *Monitoring_by_Inspection*. In questo ultimo caso un ispettore ha il compito di ispezionare le macchine ad intervalli programmati per poter stabilire il loro grado di usura e, quindi, l'azione da intraprendere (avvicinamento prossima data di ispezione o manutenzione preventiva). Il monitoraggio “by inspection”, infine, a seconda delle risorse necessarie specificate nelle routes, può prevedere o meno lo spegnimento delle linea produttiva.

2. Manutenzione Preventiva ed Opportuna

Il processo di manutenzione preventiva ha luogo qualora, a seguito di un processo di ispezione oppure mediante un monitoraggio continuo, si verifica che il valore di usura di una particolare risorsa supera un valore limite. La manutenzione opportuna funzionerà esattamente come la prima perché non è altro che un suo caso particolare. L'unica differenza sarà la condizione necessaria affinché tale azione potrà essere performata: è, possibile, infatti, fare manutenzione opportuna solo qualora un altro componente in serie con quello oggetto è in manutenzione (per sostituzione o per riparazione) e il valore dell'usura è maggiore della soglia di manutenzione opportuna.

3. Manutenzione Correttiva

Abbiamo ipotizzato di conoscere un valore di usura al di sopra del quale il componente è da considerarsi guasto e, dunque, da sostituire perché non più in grado di fornire gli standard di performance richiesti dall'azienda. Pertanto un ordine di manutenzione correttiva si differenzia da quello di manutenzione preventiva od opportuna perché non si genera a valle di un'ispezione, bensì, in automatico, non appena il sistema rileva un superamento della soglia di riferimento. A differenza dell'attività di ispezione, un qualsiasi ordine di manutenzione comporta il blocco della linea. I cicli di Manutenzione simulati sono riportati in Tabella 10:

Tabella 22 *Cicli di Manutenzione*

| Mode | Stato | Descrizione | Stato di Termine Attività | Risorse necessarie | Risorse critiche |
|------------------------------|-------|-----------------------------------|---------------------------|--------------------|------------------|
| 3 Alternativa 1 | 7 | Manutenzione R3 (macchina1) | 10 | R2-R3-R4-R5 | R2-R3 |
| 3 Alternativa 2 | | | | R3-R4-R5-R6 | R3-R6 |

Segue pagina successiva

Continua da pagina precedente

| Mode | Stato | Descrizione | Stato di Termine Attività | Risorse necessarie | Risorse critiche |
|--------------------|-------|-------------------------------|---------------------------|--------------------|------------------|
| 4 | 8 | Manutenzione R4 (macchina2) | 10 | R3-R4-R5-R6 | R4-R6 |
| 5 Alternativa 1 | 9 | Manutenzione R5 (macchina3) | 10 | R2-R3-R4-R5 | R2-R5 |
| 5 Alternativa 2 | | | | R3-R4-R5-R6 | R5-R6 |
| 6 | 11 | Ispezione | 12 | R6 | R6 |
| 7 | 13 | Manutenzione per guasto su R3 | 16 | R2-R3-R4-R5 | R2-R3 |
| 8 | 14 | Manutenzione per guasto su R4 | 16 | R3-R4-R5-R6 | R4-R6 |
| 9 | 15 | Manutenzione per guasto su R5 | 16 | R2-R3-R4-R5 | R2-R5 |

I tempi ipotizzati per ogni ciclo, riportati nella costante *Time_Table*, sono stati stabiliti tenendo conto del seguente vincolo temporale:

$$Tisp < Tpre < Tgua$$

5.4.1. Usura, guasto e soglie di manutenzione

Prima di andare ad analizzare i costrutti creati all'interno del modello per quanto riguarda la logica della manutenzione, è bene precisare e definire il

significato dato ad alcuni termini ed elementi chiave che contraddistinguono le attività di manutenzione: l'usura, il guasto e le soglie di manutenzione. Infatti, anche se si tratta di argomenti affrontati nel primo capitolo in relazione alle diverse politiche manutentive che un'azienda può adottare, abbiamo considerato specifiche ipotesi di base.

Le macchine rappresentano l'oggetto di una qualsiasi operazione di manutenzione ed, al tempo stesso, l'elemento essenziale affinché si possa svolgere il processo produttivo. Ognuna di esse presenta, però, una propria vita utile e per poter stabilire il momento in cui è necessaria una sua manutenzione occorre far riferimento ad un particolare parametro considerato critico. All'interno di un sistema produttivo, ad esempio, possono essere utilizzati dei sensori che ne monitorano il funzionamento e che raccolgono una serie di informazioni, differenti a seconda dei casi, riguardo il loro utilizzo ed il loro stato. In questo modello a determinare lo stato delle risorse da mantenere è stato scelto un parametro rappresentativo dell'indice di **usura**, identificabile ed osservabile attraverso il tempo di utilizzo delle macchine, ipotizzando una proporzionalità tra le due misure: una macchina, dunque, si usura solo se viene utilizzata dalla produzione. In generale, però, si possono avere, oltre al tempo, anche altre variabili a determinare il parametro di usura (come il numero di battute nel caso di uno stampo), infatti, la funzione di usura può essere interpretata come una $f(x)$ in cui la variabile x può assumere più significati. Inoltre, avendo a disposizione una serie di dati ricavabili dal modello di simulazione, è sempre possibile, attraverso l'utilizzo di una o più variabili sul Powersim, andare a conteggiare i parametri di interesse.

Il **guasto** è un evento sicuramente collegato all'usura di un macchinario caratterizzato da un tempo di accadimento aleatorio. Abbiamo voluto riproporre l'idea, considerata in [62], di modellare la **probabilità di guasto** attraverso una distribuzione Weibull, legata non al tempo, come talvolta in letteratura scientifica accade di trovare, bensì al valore di usura. Durante lo

sviluppo del modello, però, per verificarne il corretto funzionamento, questa probabilità non è stata calcolata di volta in volta, ma le è stato attribuito un valore molto alto una volta superato un particolare valore di usura: la macchina, dunque, superata la cosiddetta **soglia di guasto** non è più in grado di assolvere alle proprie funzioni. Questa condizione dà il via alla generazione di un ordine di manutenzione correttiva.

Sono state considerate altre tre soglie di manutenzione.

La **soglia di manutenzione preventiva** il cui superamento da parte del parametro di usura impone al sistema di manutenzione di intervenire per evitare il guasto. La **soglia di manutenzione opportuna** che è legata all'ipotesi di voler rappresentare un sistema produttivo con più componenti in serie. In questo caso ogni volta che il sistema viene fermato per effettuare una manutenzione per guasto o per un ordine di manutenzione preventiva, si pone la questione se convenga o meno effettuare la manutenzione anche su uno o più componenti che non abbiano ancora raggiunto la soglia di manutenzione preventiva, al fine di sfruttare comunque la fermata in corso ed evitarne un'altra successiva. Si tratta cioè di effettuare una valutazione di convenienza economica tra la quota di vita utile ancora disponibile del componente da mantenere ed i costi generali per la fermata del sistema che si andranno a risparmiare. Il problema può essere risolto proprio attraverso una soglia opportuna, il cui raggiungimento indica, appunto, l'opportunità di effettuare la manutenzione sul componente una volta che l'impianto si è fermato per ripararne o sostituirne un altro. È bene precisare, come vedremo in dettaglio dopo, che nel nostro modello, in realtà, le azioni di manutenzione opportuna avvengono in sequenza e non in parallelo alle altre operazioni di manutenzione dalle quali sono dipese: in altri termini, un ordine di manutenzione opportuna viene effettuato non appena termina la manutenzione preventiva sulla linea. È come se ci fosse un'unica squadra di manutentori per macchina. L'introduzione di un meccanismo in grado di far

lavorare in parallelo più squadre è qualcosa che può certamente rientrare negli sviluppi futuri di questo modello.

Infine vi è la **soglia d'allarme** il cui raggiungimento indica la necessità di avvicinare la data della successiva ispezione per evitare che il guasto si verifichi prima.

In una prima fase di test del modello sono state considerati particolari valori **di soglia** per ogni macchina del processo produttivo simulato, forniti in input al modello attraverso **delle costanti**:

- *Maintenance_Threshold* → soglie di manutenzione preventiva.

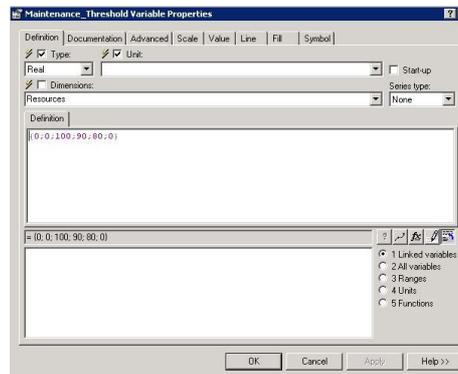


Figura 91: Soglie preventive

- *Mopp_Threshold* → soglie di manutenzione opportuna

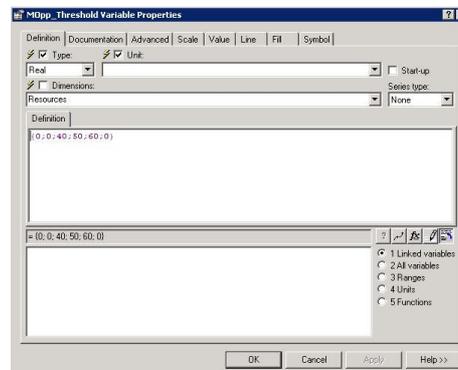


Figura 92: Soglie opportune

- *Failure_Threshold* → soglie di guasto

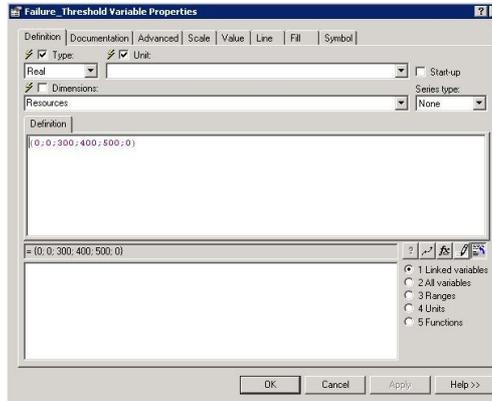


Figura 93: Soglie di guasto

- *Alarm_Trheshold* → soglie di allarme

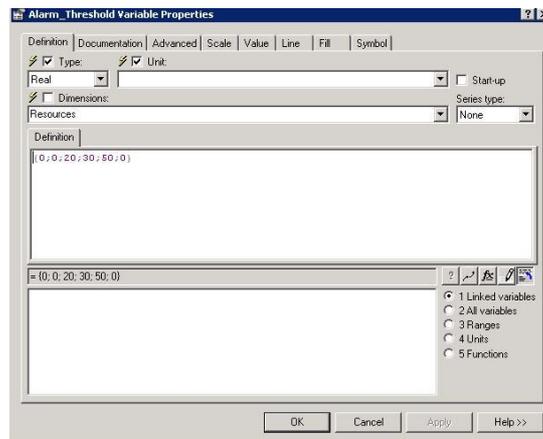


Figura 94: Soglie di allarme

I valori di test, riportati nelle ultime quattro Figure, sono stati ipotizzati tenendo presente del vincolo dimensionale espresso dalla seguente espressione:

$$\mathbf{Soglia_{allarme} < Soglia_{opportuna} < Soglia_{preventiva} < Soglia_{guasto}}$$

La costante *Initial_Inspection_Period*, Figura successiva, definisce, invece, l'intervallo di tempo previsto tra due ispezioni che varia, ovvero diminuisce di un terzo (nell'ipotesi considerata), se a valle di un'ispezione vengono

superate, anche solo da una delle macchine della linea, le rispettive soglie di allarme. Come valore di test è stato utilizzato un tempo pari a 60 secondi.



Figura 95 *Intervallo ispezioni*

5.4.2. Monitoraggio

È chiaro, a questo punto, il duplice ruolo che le risorse, ovvero le macchine, svolgono all'interno del nostro modello ed è chiaro che la logica della manutenzione è strettamente collegata al concetto di monitoraggio.

Per poter gestire l'utilizzo delle risorse tra i vari tokens abbiamo ipotizzato un **sistema di INDICI** in grado di regolare i passaggi di stato a seconda dei casi. In generale le risorse, *Resource*, possono risultare impegnate o disponibili per un'attività di produzione. Nel nostro caso, però, è importante identificare quella particolare risorsa richiesta dal processo di manutenzione che non può essere, quindi, più utilizzata dalla produzione. Lo stato delle risorse è stato così rappresentato mediante i seguenti indici:

- $i = 0$ → risorsa impegnata
- $i = 1$ → risorsa disponibile (libera)
- $i \leq -1$ → risorsa impegnata in un ordine di manutenzione / indisponibile per la produzione

Cosa significa, in realtà, far partire un ordine di manutenzione?

Un ordine di manutenzione entra nel sistema nel momento in cui una risorsa deve andare in manutenzione e viene considerato prioritario rispetto agli altri di produzione presenti nella schedula. La risorsa da mantenere dovrà risultare indisponibile per la produzione (indice negativo) e potrà tornare in funzione (indice unitario) solo al termine del ciclo di manutenzione. Nel caso

in cui la stessa risorsa risulta occupata (indice nullo) in uno stato di produzione, dovrà essere rilasciata e resa disponibile per la manutenzione al termine della lavorazione che era in corso.

Per poter simulare tutti questi meccanismi è stato necessario procedere per fasi. Abbiamo prima di tutto distinto due importanti concetti: quello di **AZIONE** e quello di **CONTROLLO**. Le azioni hanno riguardato il corretto funzionamento del modello di simulazione nel momento in cui parte un ordine di manutenzione. Mentre il criterio sulla base del quale viene definito il passaggio delle risorse ad un indice negativo, identificativo del momento in cui è necessario far partire la manutenzione, rientra nel **CONTROLLO**.

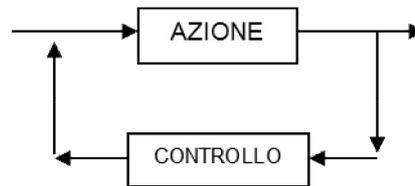


Figura 96*Azione_Controllo*

In una prima fase, per testare la parte riguardante le azioni, abbiamo stabilito un preciso istante di simulazione in corrispondenza del quale far partire un ordine di manutenzione. La condizione di test è stata: *Sim_Time* pari ad un certo valore di tempo espresso in secondi ed un indice pari ad uno (disponibile) per la risorsa da mantenere considerata. Abbiamo ipotizzato e simulato cinque scenari possibili diversi tra loro per numero di ordini, per risorsa e, quindi, per mode. Naturalmente gli ordini sono stati inseriti manualmente nella schedula in corrispondenza di istanti di tempo diversi ed, inoltre, è stato considerato un tempo di schedulazione pari a 2 secondi. Il **tempo di schedulazione** è il tempo riportato in prima colonna nel file Excel *Schedule*: si va a sommare (nel caso degli ordini di manutenzione) o coincide (per gli ordini di produzione) con il tempo di simulazione in corrispondenza del quale avviene un generico evento nel sistema (in questo caso la generazione di un ordine di manutenzione).

Nella descrizione riguardo il funzionamento del modello relativamente alla logica di produzione, abbiamo visto che i vari ordini di produzione sono specificati all'interno di un file nel quale sono state riservate delle posizioni per la manutenzione (*Schedule_maintenance*). Per poter inserire, dunque, degli ordini di manutenzione è stato necessario collegare alla variabile di livello *Schedule_Obj_ID*, dei flussi in ingresso (in rosso): ciascuno per ogni ordine considerato. Nella versione finale del modello, che vedremo più avanti, l'introduzione degli ordini di manutenzione nella schedula è stata realizzata attraverso tre flussi: uno per gli ordini di manutenzione preventiva/opportuna, uno per le ispezioni ed uno per gli ordini di manutenzione correttiva (rispettivamente *Schedule_maintenance*, *Schedule_Inspection*, *Failure*).

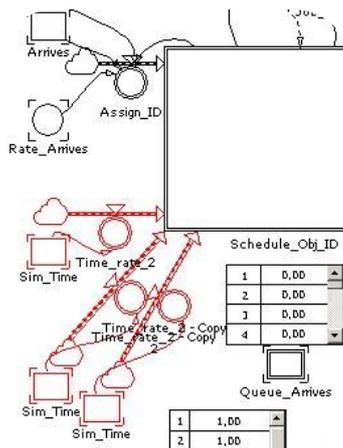


Figura 97 *Inserimento ordini di manutenzione*

Inoltre, per poter introdurre il meccanismo degli indici, è stato necessario modificare anche la struttura della variabile di livello *Resource*: sono state introdotte e modificate alcune variabili. Qui di seguito si sono voluti elencare i principali cambiamenti effettuati in questa fase, perché nella fase finale di modellazione (di controllo), ne sono stati realizzati molti altri che verranno, poi, analizzati più in dettaglio.

- È stata definita una costante, *Token_Maintenance* relativa al numero dei token destinati alla manutenzione:



Figura 98 *Token Maintenance*

- È stata aggiunta una colonna in *Schedule* denominata *Risorsa_Manut* per poter identificare la risorsa-macchina da mantenere.
- Attraverso la variabile ausiliaria *Rate_12*, in rosso Figura 57, (poi modificata in *Maintenance_Resource* e *Failure_Resource*) è stato possibile far entrare nel livello un flusso pari a 2 in corrispondenza delle risorse oggetto di un ordine di manutenzione. Questo flusso, insieme alla logica presente in *Shif_out_Resources*, ha consentito la realizzazione del meccanismo in base al quale l'indice delle risorse da mantenere passa da 0/1 a -2/-1 (indice negativo) e viceversa.

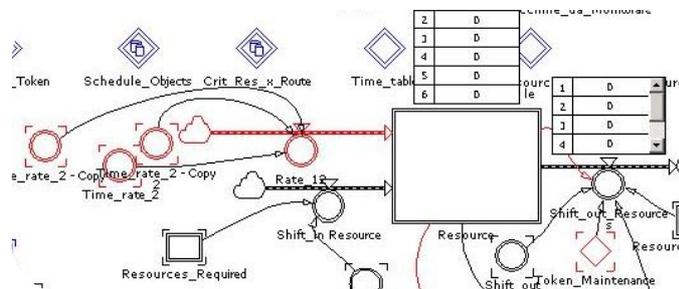


Figura 99 *Modello di prova: flussi di input in Resource*

- Sono state poi modificate le variabili *Coverage_Resource*, *perc_Coverage_Resource*, *Obj_type_in_queue* ed è stata aggiunta la variabile *Resources_busy*, cambiamenti già affrontati precedentemente.

Testato il funzionamento complessivo del modello, nella fase successiva, di controllo, è stato introdotto l'elemento di logica relativo alla generazione

automatica degli ordini di manutenzione. Abbiamo cioè introdotto una serie di costrutti in grado di simulare le attività di monitoraggio e, quindi, di manutenzione del sistema, il cosiddetto *Monitoring Online & by Inspection*, Figura .

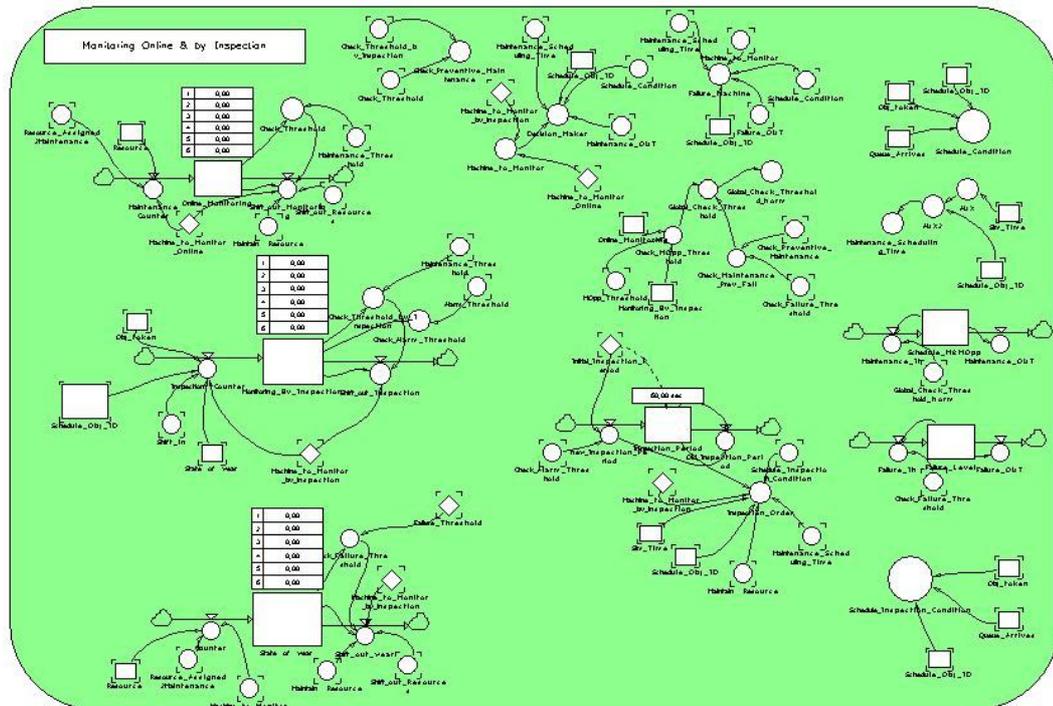


Figura 100 Modello finale: *Monitoring Online & By Inspection*

In dettaglio: sono state create due variabili di livello, *Online_Monitoring* e *State of wear*, di dimensione resources, attraverso le quali abbiamo simulato l'accumulo di usura nel tempo di ciascuna macchina presente nella linea produttiva. Il flusso in ingresso per entrambe le variabili presenta la stessa logica di funzionamento: l'aumento di usura si registra solo in corrispondenza delle macchine ($Machine_to_Monitor[k;1]>0$) che risultano occupate in produzione ($Resource[k]=1$ AND $Resource_Assigned2Maintenance[k]=0$). In questo modello di prova è stato ipotizzato un aumento di usura di un'unità ogni Timestep, ma si tratta di un valore che può essere modificato a seconda dei casi e delle considerazioni

alla base di uno specifico studio. Si riporta in seguito la sintassi della variabile di flusso *Counter* collegata a *State of wear* (stato di usura):

FOR(k=Resources/IF(Machine_to_Monitor[k;1]>0 AND Resource[k]=1 AND Resource_Assigned2Maintenance[k]=0;1;0))

In questa variabile, come in molte altre all'interno di questa struttura, viene richiamata la variabile *Machine_to_Monitor* nella quale sono elencate tutte le macchine del sistema produttivo simulato sulle quali è possibile effettuare la manutenzione. In particolare la variabile non è altro che la somma di due costanti: *Machine_to_Monitor_Online* e *Machine_to_Monitor_by_Inspection*.


Machine_to_Monitor_Online


Machine_to_Monitor_by_inspection

In queste due costanti sono specificate, rispettivamente, le macchine monitorate online e quelle per le quali è necessaria l'azione di un ispettore ed, inoltre, per ogni macchina, sono specificati i modes di manutenzione: preventiva (seconda colonna – in una o nell'altra costante, a seconda del tipo di monitoraggio della macchina), di ispezione (terza colonna) e di manutenzione correttiva (quarta colonna). È possibile considerare sia situazioni in cui tutte le macchine possono essere monitorate in un modo o in un altro e sia situazioni in cui possono coesistere nel sistema due tipologie di monitoraggio. Sarà compito di un decisore optare, a seconda dell'impianto da simulare e studiare, per una o l'altra delle due scelte.

In generale i cicli di manutenzione potrebbero cambiare per una stessa risorsa, ma ciò significherebbe dover mantenere memoria degli interventi effettuati in precedenza. La logica di generazione degli ordini non sarebbe così solo funzionale al *Monitoring*, ma anche agli interventi precedenti. Nel

nostro caso, invece, si sono ipotizzati dei cicli di manutenzione fissi per una certa risorsa e per questo motivo sono stati specificati in una costante.

Nelle due Figure successive si possono osservare le finestre di dialogo delle due costanti che mostrano il caso in cui tutte le macchine sono monitorate da un ispettore.

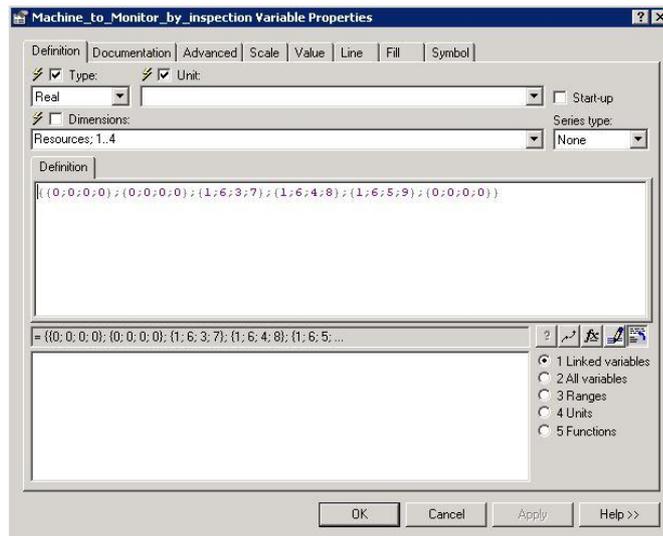


Figura 101 Finestra di dialogo : Machine to Monitor by Inspection

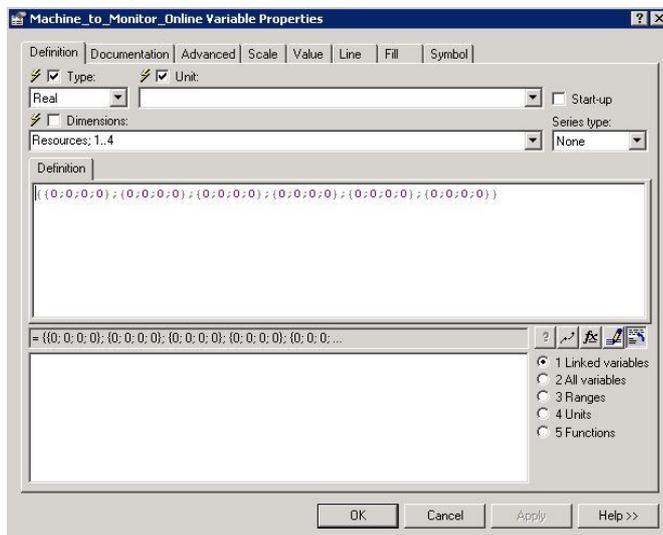


Figura 102 Finestra di dialogo : Machine to Monitor Online

Analizziamo ora in dettaglio le logiche di monitoraggio considerate:

- Monitoraggio Online

Una volta letto il livello di usura le variabili ausiliare *Check_Threshold_by_Inspection* e *Check_Alarm_Threshold* effettuano un controllo rispetto alle soglie. In particolare la prima verifica il superamento delle soglie di manutenzione preventiva come per il monitoraggio online:

$$FOR(k=Resources/IF$$

$$(Monitoring_By_Inspection[k]>Maintenance_Threshold[k];1;0))$$

La seconda, invece, controlla il superamento delle soglie dall'allarme in base alle quali viene stabilita l'azione riguardo la data di prossima ispezione:

$$FOR(k=Resources/IF(Monitoring_By_Inspection[k]>Alarm_Threshold[k];1;0))$$

Il risultato sarà sempre un vettore di dimensione resources con valore unitario là dove la condizione viene verificata.

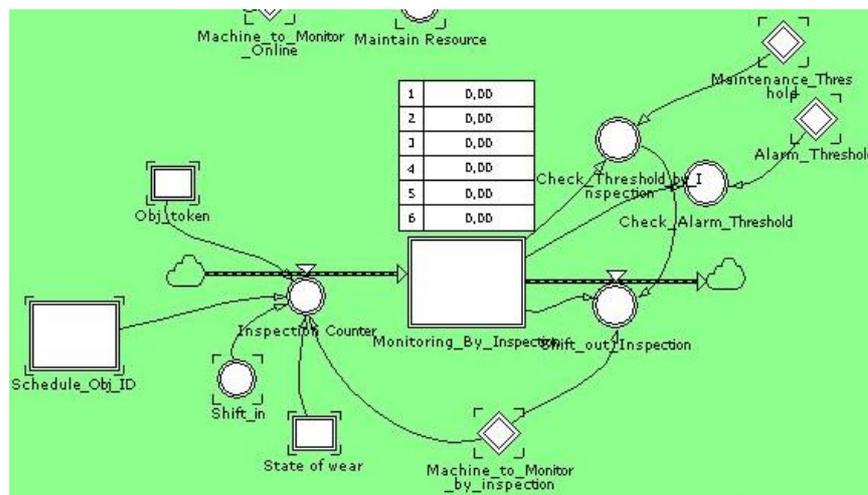


Figura 104 *Monitoring By Inspection*

La generazione vera e propria degli ordini all'interno del modello spetta alle variabili *Decision_maker*, per quanto riguarda le manutenzioni preventiva ed opportuna, *Failure_machine*, per la manutenzione correttiva, ed *Inspection_order*, per quanto riguarda la gestione degli ordini di ispezione.

- **Ordini di Manutenzione Preventiva ed Opportuna**

L'attivazione di un'azione di manutenzione su una risorsa viene gestita dal sistema da una serie di variabili ausiliare e di livello.

La variabile *Check_Preventive_Maintenance* definisce un vettore pari alla somma dei vettori a cui è collegata, Figura successiva, stabilendo mediante un valore unitario le macchine del sistema sulle quali è stato rilevato, online o by inspection, un superamento delle soglie di manutenzione preventiva.

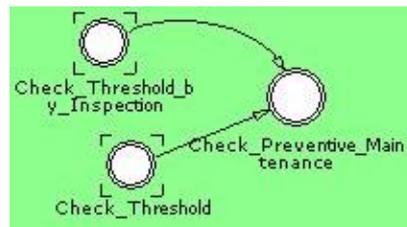


Figura 105 Variabile ausiliaria *Check_Preventive_Maintenance*

Questo vettore a sua volta viene sommato al vettore *Check_Failure_Threshold*, rappresentato da una variabile ausiliaria di stessa dimensione, che controlla il superamento delle soglie di guasto. Si ottiene così la variabile *Check_Maintenance_Prev_Fail*. Quest'ultima è sommata, all'interno della variabile *Global_Check_Threshold*, ad una altra variabile che verifica il superamento delle soglie di manutenzione opportuna: *Check_MOpp_Threshold*, Figura seguente.

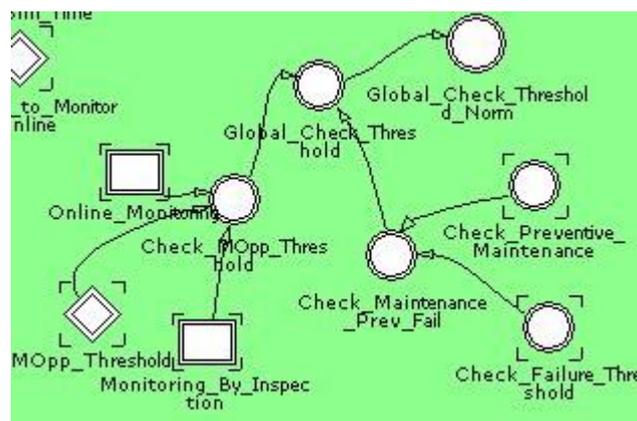


Figura 106 Variabile ausiliaria *Global_Check_Threshold_Norm*

Il vettore finale della struttura è stato definito *Global_Check_Threshold_Norm* e rappresenta la normalizzazione della variabile ad esso collegata.

È stato necessario creare tutti questi meccanismi collegati tra di loro per poter rappresentare la generazione di ordini di manutenzione opportuna. Abbiamo visto, infatti, che la scelta di questa politica manutentiva viene a porsi nel momento in cui, in un sistema in serie, una delle macchine deve essere riparata o sostituita. Non è sufficiente che il valore di usura delle macchine superi le soglie opportune, ma è necessario che si sia verificato, su una o più risorse, un superamento delle soglie preventive, di guasto o entrambe. In questo ultimo caso si ottiene un vettore che non più unitario ma che, per ragioni simulative, si è deciso di renderlo tale attraverso una sua normalizzazione:

$$IF(ARRSUM(Check_Maintenance_Prev_Fail)\geq 1;Check_MOpp_Threshold+Check_Maintenance_Prev_Fail;0)$$

Per poter, poi, gestire la generazione simultanea di più ordini di manutenzione preventiva ed opportuna è stato creato il livello *Schedule_M&MOpp*, Figura seguente.

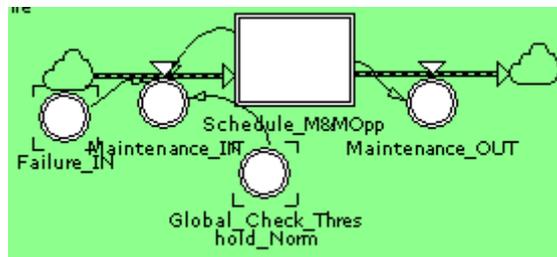


Figura 107 Variabile di Livello: Ordini di manutenzione Preventiva ed Opportuna

Può accadere, infatti, che in corrispondenza di un preciso istante di tempo, una o più macchine superino le soglie di manutenzione. È stato, dunque, necessario prevedere una variabile di livello che ne portasse memoria e che ne consentisse una schedulazione “ritardata”, anche se di un TIMESTEP. La variabile in input al livello, *Maintenance_IN*, collegata alla variabile *Global_Check_Threshold_Norm* ed alla variabile *Failure_IN* (infatti non devono essere gestiti dalla variabile gli ordini di guasto $\rightarrow Failure_IN[i]=0$),

inserisce un valore unitario nel livello in corrispondenza delle risorse da mantenere:

***FOR(i=Resources|IF(Global_Check_Threshold_Norm[i]>Schedule_M&MOpp[i]
AND Failure_IN[i]=0;Global_Check_Threshold_Norm[i];0))***

Mentre la variabile in output, *Maintenance_OUT*, estrae dal livello, mediante uno SCANEQ, un vettore unitario per volta:

FOR(i=Resources|IF(i=NUMBER(SCANEQ(Schedule_MOpp;1));1;0))

Infine è la variabile *Decision_maker* a definire l'ordine di schedulazione da inserire nella schedula, Figura 37, una volta verificate le condizioni di schedulazione. Queste ultime sono valide anche per gli ordini di manutenzione correttiva e sono gestite dalla variabile ausiliaria *Schedule_Condition*. Un ordine può essere schedulato se e soltanto se:

1. all'interno di *Schedule_Obj_ID* non è presente un ordine già schedulato in precedenza relativo alla stessa macchina. Gli ordini sui quali la variabile esegue il controllo sono sia quelli in coda e cioè che attendono l'assegnazione del token e dell'ID, sia quelli che, al contrario, sono entrati nella catena degli eventi;
2. l'ordine presente sulla stessa macchina non è di ispezione (<>6);

***FOR(i=Schedule|IF(((Schedule_Obj_ID[i;7]>0 AND Schedule_Obj_ID[i;4]<>6
AND (((NUMBER(SCANEQ(Obj_token;Schedule_Obj_ID[i;5]))>0 OR
NUMBER(SCANEQ(Queue_Arrives;Schedule_Obj_ID[i;5]))>0) AND
Schedule_Obj_ID[i;5]>0) OR (Schedule_Obj_ID[i;5]=0
)));Schedule_Obj_ID[i;7];-1))***

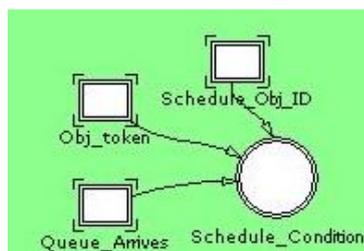


Figura 108 *Schedule_Condition*

La variabile di dimensione schedule, restituisce come valore l'indice della macchina oggetto dell'ordine in corrispondenza delle righe in schedule che non soddisfano le condizioni e un valore pari a -1 in corrispondenza delle altre.

Schedule_Condition è connesso, quindi, a *Decision_Maker*, Figura seguente, ed anche a *Failure_Machine*.

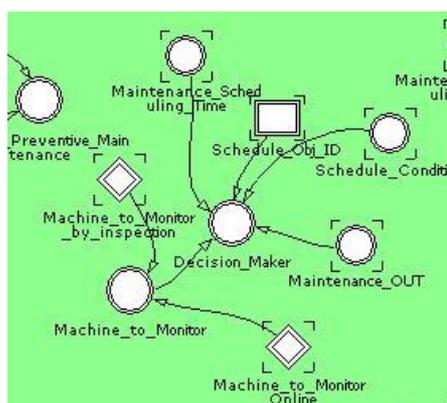


Figura 109 *Decision Maker*

In definitiva un generico ordine di manutenzione, preventiva ed opportuna, registrato dal sistema ($NUMBER(SCANEQ((Maintenance_OUT);1)) > 0$) potrà entrare nella schedula solo una volta verificate le due condizioni, ovvero solo se all'interno di *Schedule_Condition* non è presente il numero della macchina da mantenere ($NUMBER(SCANEQ(Schedule_Condition;NUMBER(SCANEQ((Maintenance_OUT);1)))) = 0$).

Inoltre, sempre attraverso la variabile *Decision_Maker*, è possibile associare all'ordine tutte una serie informazioni (*info_schedule*) fondamentali per il corretto funzionamento del modello:

1- Tempo di schedulazione

La prima colonna è riservata al tempo di schedulazione. In particolare questo sarà pari al primo tempo disponibile stabilito dalla variabile *Maintenance_Scheduling_Time*, Figura successiva. Questa variabile, infatti, ordina in maniera crescente il tempo pari a $\text{Sim_Time}/1\ll\text{sec}\gg+2,5$ se quest'ultimo non è già presente nella prima colonna di *Schedule_Obj_ID*, relativa agli ordini di produzione; altrimenti assegna un valore pari ad un numero elevato (99999). In questo modo è stato, quindi, possibile gestire il tempo di schedulazione relativo ad ordini di natura diversa ed evitare, di conseguenza, possibili conflitti relativi all'assegnazione degli ID da parte del modello.

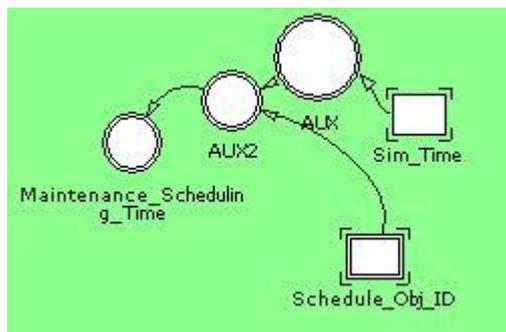


Figura 110 Tempo di schedulazione degli ordini di manutenzione

2- Tipologia Oggetto

Per le ipotesi considerate, la colonna presenta un valore fisso pari ad 1.

3- Tipo Ordine

Trattandosi di un ordine di manutenzione nella terza colonna dovrà essere inserito il valore 2.

4- Mode

La quarta colonna è riservata al mode associato a quel particolare ordine. I modes, come abbiamo visto, variano a seconda della macchina selezionata per un particolare ordine di manutenzione e rappresentano delle informazioni di input del modello contenute nella costante *Machine_to_Monitor*. Attraverso l'utilizzo della funzione SCANEQ di Powersim, il mode viene di

volta in volta selezionato, a seconda della macchina da mantenere, nella colonna 3 della costante.

5- ID

L'informazione relativa all'indice di identificazione degli oggetti nel sistema viene stabilita da un'altra variabile presente nel modello, *Assign_ID*, per questo questa colonna inizialmente contiene un valore nullo.

6- Priorità

La variabile assegna una priorità costante pari ad 8, valore da noi ipotizzato per gli ordini di manutenzione preventiva ed opportuna.

7- Macchina da mantenere

L'ultima colonna contiene l'indice della macchina oggetto dell'ordine di manutenzione che viene selezionato sempre mediante una funzione SCANEQ.

I comandi relativi a *Decison_Maker* sono riportati di seguito:

```
FOR(j=Schedule/ IF( j>=COUNT(Schedule)-COUNT(Schedule_Maintenance)
AND Schedule_Obj_ID[j;1]==0 AND
NUMBER(SCANEQ((Maintenance_OUT;1))>0 AND
NUMBER(SCANEQ(Schedule_Condition;NUMBER(SCANEQ((Maintenance_O
UT;1))))=0 AND j==NUMBER(SCANEQ(Schedule_Obj_ID[*;1];0;TRUE)));
FOR( i=1..7/ IF(i==1;Maintenance_Scheduling_Time[1]; IF(i==2;1; IF(i==3;2;
IF(i==4;Machine_to_Monitor[INDEX(SCANEQ(Maintenance_OUT;1));3];
IF(i==5;0; IF(i==6;8;IF(i==7;SCANEQ(Maintenance_OUT;1);0) ) ) )
)))) ;FOR(i=1..7/0)))
```

▪ Ordini di Manutenzione Correttiva

La generazione degli ordini di manutenzione dovuti ad eventuali guasti è del tutto indipendente dal monitoraggio online e by inspection. Infatti il guasto rappresenta, in generale, un evento aleatorio che può verificarsi in qualsiasi momento e per qualsiasi ragione, anche in seguito ad una riparazione. Durante la realizzazione del nostro modello, però, abbiamo pensato di considerare l'esistenza di opportune soglie di guasto in corrispondenza delle quali la probabilità di rottura delle macchine è molto alta. Si tratta,

naturalmente, di una semplificazione della realtà che, in questo primo approccio, ci ha permesso di analizzare il corretto funzionamento dei meccanismi introdotti ma, non è da escludere, una possibile evoluzione del nostro modello in grado di rappresentare anche la natura aleatoria del guasto. All'interno del modello, dunque, il superamento o meno delle soglie di guasto è verificato dalla variabile ausiliaria *Check_Failure_Threshold* sulla base del livello di usura accumulato dalla variabile di livello *State_of_wear*, Figura successiva.

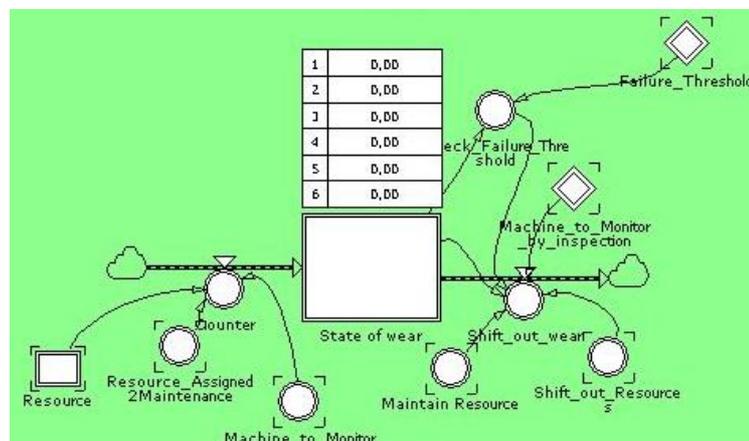


Figura 111 *State of wear*

Il meccanismo di funzionamento è sempre lo stesso: la variabile di dimensione resources, restituirà un vettore nullo con elementi unitari in corrispondenza delle risorse che superano la soglia e che, quindi, presentano un'alta probabilità di guasto:

$$FOR(k=Resources|IF ('State of wear'[k]>Failure_Threshold[k];1;0))$$

Questo vettore è collegato, poi, alla variabile ausiliaria *Failure_Machine* che gestisce la schedulazione degli ordini per guasto, Figura seguente.

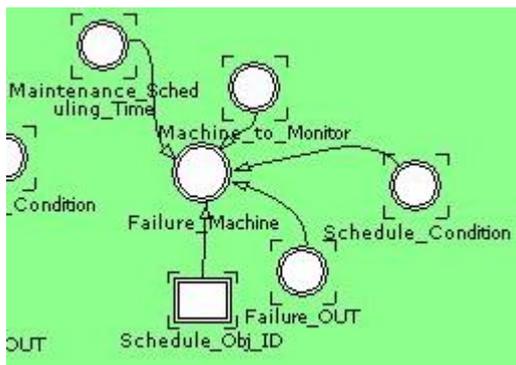


Figura 112*Failure_Machine*

Anche in questo caso un ordine di manutenzione correttiva potrà essere inserito nelle posizioni libere ad esso riservate nella schedula solo se risultano verificate le due condizioni di schedulazione, *Schedule_Condition*. Le informazioni che gli dovranno essere associate, infine, si differenziano da quelle di manutenzione preventiva solo per quanto riguarda la priorità, ipotizzata pari a 10, per il mode, contenuto nella colonna 4 di *Machine_to_Monitor*, e non in colonna 3 ed, infine, per il tempo di schedulazione che risulta essere pari al valore più piccolo tra i tempi di schedulazione disponibili in quell'istante.

La sintassi della variabile è, infatti, molto simile a quella di *Decision_Maker*:

```

FOR(j=Schedule| IF( j>=COUNT(Schedule)-COUNT(Schedule_Maintenance)
AND Schedule_Obj_ID[j;1]=0 AND NUMBER(SCANEQ((Failure_OUT);1))>0
AND
NUMBER(SCANEQ(Schedule_Condition;NUMBER(SCANEQ((Failure_OUT);
1))))=0 AND j==NUMBER(SCANEQ(Schedule_Obj_ID[*;1];0;TRUE));FOR(
i=1..7| IF(i==1;Maintenance_Scheduling_Time[3]; IF(i==2;1; IF(i==3;2;
IF(i==4;Machine_to_Monitor[INDEX(SCANEQ(Failure_OUT);1)];4);
IF(i==5;0; IF(i==6;10; IF(i==7;SCANEQ(Failure_OUT);1);0) ) ) ) ) )
;FOR(i=1..7|0))

```

Anche per gli ordini di manutenzione correttiva, infine, è stato inserito un livello, *Failure_Level*, per poter gestire la generazione simultanea di più ordini.

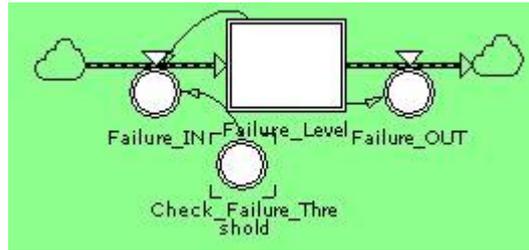


Figura 113*Failure_Level*

▪ **Ordini di Ispezione**

Il meccanismo di generazione automatica degli ordini di ispezione è gestito nel modello da due variabili, Figura successiva: dal livello *Inspection_Period* che stabilisce l'intervallo di tempo tra due ispezioni, e dalla variabile ausiliaria *Inspection_Order* che definisce le informazioni dell'ordine da inserire nella schedula una volta verificate le condizioni di schedulazione.

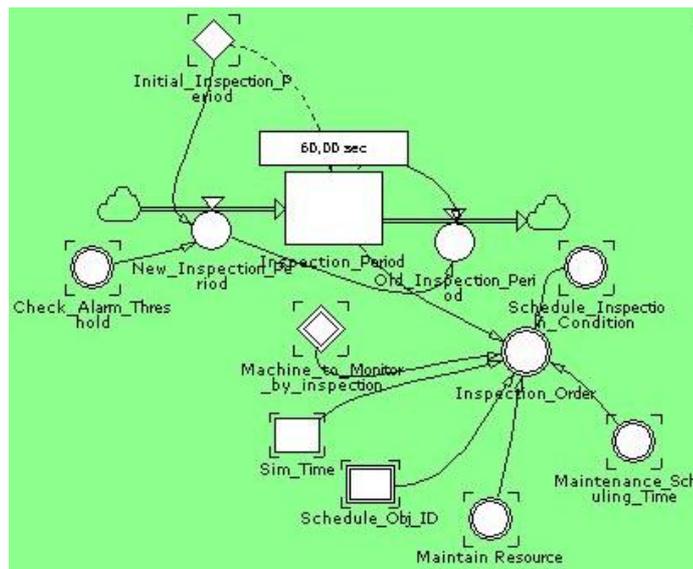


Figura 114*Inspection_Period ed Inspection_Order*

A differenza di quelle relative agli ordini di manutenzione, queste ultime sono gestite dalla variabile ausiliaria *Schedule_Inspection_Condition*, Figura successiva, che restituisce un array di dimensione *Schedule* con il valore della risorsa in corrispondenza degli elementi che non soddisfano le condizioni e con un valore pari a -1 in caso contrario. È solo una la condizione che dovrà essere verificata:

1. all'interno di *Schedule_Obj_ID* non deve essere presente un ordine di ispezione già schedulato. Anche in questo caso gli ordini sui quali la variabile deve eseguire il controllo sono sia quelli in coda e cioè che attendono l'assegnazione del token e dell'ID, sia quelli che, al contrario, sono entrati nella catena degli eventi.

```

FOR(i=Schedule|IF((Schedule_Obj_ID[i;7]>0 AND Schedule_Obj_ID[i;4]==6
AND (((NUMBER(SCANEQ(Obj_token;Schedule_Obj_ID[i;5]))>0
OR NUMBER(SCANEQ(Queue_Arrives;Schedule_Obj_ID[i;5]))>0)
AND Schedule_Obj_ID[i;5]>0) OR (Schedule_Obj_ID[i;5]=0
));Schedule_Obj_ID[i;7];-1))

```

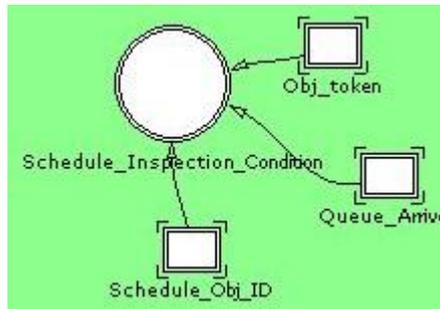


Figura 115*Schedule_Inspection_Condition*

L'intervallo tra due ispezioni è regolato dalle soglie di allarme che se superate, anche solo da una risorsa, causano un ravvicinamento della data di prossima ispezione. In particolare è compito della variabile di flusso *New_inspection_Period* aggiornare l'intervallo sulla base dei seguenti comandi:

```

IF(ARRSUM(Check_Alarm_Threshold)>0
INTEGER(Initial_Inspection_Period*,3);
Initial_Inspection_Period)*1<<sec>>/TIMESTEP

```

L'ordine di ispezione vero e proprio viene inserito in *Schedule_Obj_Id* dalla variabile *Inspection_Order* che ne definisce tempo di schedulazione (allo stesso modo degli altri ordini di manutenzione), tipo, mode (costante e pari a 6), ID (nullo perché assegnato in seguito dal sistema), priorità (questa volta pari ad 8) e macchina. La macchina risulterà essere sempre la prima tra le

macchine da ispezionare presenti nella costante *Machine_to_Monitor_by_Inspection* ma, di fatto, per gli ordini di ispezione, rappresenta solo un valore di riferimento perché l'“ispettore” controllerà sempre tutte le risorse della linea di produzione.

L'inserimento potrà, infine, essere eseguito solo in corrispondenza dell'istante di tempo programmato, ovvero se il tempo di simulazione è multiplo del tempo di ispezione (*Sim_Time MOD Inspection_Period==0*). I comandi eseguiti sono:

```
FOR(j=Schedule/ IF( j>=COUNT(Schedule)-COUNT(Schedule_Maintenance)
AND Schedule_Obj_ID[j;1]==0 AND
j==NUMBER(SCANEQ(Schedule_Obj_ID[*;1];0;TRUE)) AND
Sim_Time<>0<<sec>> AND Sim_Time MOD Inspection_Period==0<<sec>>
AND 'Maintain
Resource'[INDEX(SCANEQ(Machine_to_Monitor_by_inspection[*;1];1))]<2
AND
NUMBER(SCANEQ(Schedule_Inspection_Condition;NUMBER(SCANEQ(Mac
hine_to_Monitor_by_inspection[*;1];1))))=0 ; FOR( i=1..7/
IF(i==1;Maintenance_Scheduling_Time[2];IF(i==2;1; IF(i==3;2; IF(i==4;6;
IF(i==5;0; IF(i==6;8;
IF(i==7;SCANEQ(Machine_to_Monitor_by_inspection[*;1];1;0))))))
;FOR(i=1..7/0)))
```

A questo punto, sulla base dei test eseguiti nella fase di azione, introdotta la logica di generazione automatica degli ordini, nella fase di controllo, è stato possibile apportare le modifiche finali ai costrutti di *Schedule_Obj_ID* e di *Resource*. In particolare sono stati aggiunti in input le variabili di flusso:

- relative a tutte le tipologie di ordini del processo di manutenzione, Figura seguente:

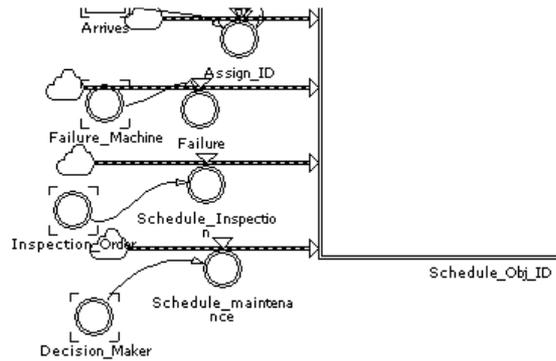


Figura 116Modello finale: *Flussi di input in Schedule_Obj_ID*

- relative agli ordini di manutenzione preventiva e di guasto, Figura 75. Nel primo caso la variabile inserisce un flusso pari a 2 in corrispondenza della risorsa su cui è scattata la soglia di manutenzione preventiva:

FOR(k=Resources|IF(k=ARRSUM(Schedule_maintenance[*]; INDEX(COUNT(info_schedule)))) ;2;0))

Nel secondo, invece, la variabile inserisce un flusso pari a 20 in corrispondenza della macchina che si è guastata:

FOR(k=Resources|IF(k=ARRSUM(Failure_Machine[*]; INDEX(COUNT(info_schedule)))) ;20;0))

Abbiamo deciso di considerare due valori differenti per poter facilmente distinguere le macchine guaste tra le risorse disponibili, ma entrambi i flussi contribuiscono alla rappresentazione nonché realizzazione del sistema di indici ipotizzato per le risorse.

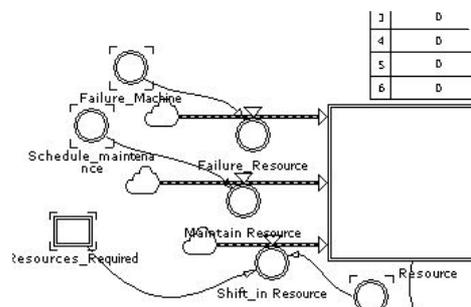


Figura 117Modello finale: *flussi di input in Resource*

Gli ordini di manutenzione, dunque, si generano in corrispondenza del superamento delle soglie di manutenzione ed ogni qual volta in cui è necessario ispezionare la linea, ma *cosa accade quando termina il ciclo di manutenzione o di ispezione?*

Le risorse devono poter tornare in una condizione, da noi definita, “as good as new”: il loro grado di usura, quindi, dovrà essere azzerato ed il loro indice identificativo nel sistema dovrà tornare positivo ovvero “disponibile per la produzione”.

Le variabili che nel sistema svolgono queste funzioni sono le variabili di flusso in output: *Shift_out_wear*, *Shift_out_Monitoring*, *Shift_out_Inspection*, ed, infine, *Shift_out_Resources* per quanto riguarda il ripristino degli indici delle risorse. Analizziamole in dettaglio.

Shift_out_wear, azzerata il livello di usura in corrispondenza delle risorse sulle quali è stato schedato un ordine di manutenzione preventiva in seguito ad un’ispezione oppure un ordine di manutenzione correttiva per via del superamento delle rispettive soglie di guasto:

FOR(i=Resources/IF('Maintain Resource'[i]>1 OR (Shift_out_Resources[i]>1 AND Machine_to_Monitor_by_inspection[i;1]=1) OR (Check_Failure_Threshold[i]>0);'State of wear'[i];0)) *TIMESTEP/TIMESTEP

Anche la variabile di flusso *Shift_out_Monitoring*, esegue delle azioni molto simili, infatti, azzerata il livello a cui è collegata in corrispondenza delle risorse occupate negli ordini di manutenzione preventiva oppure delle risorse sulle quali è scattata la soglia di manutenzione preventiva online:

FOR(i=Resources/IF('Maintain Resource'[i]>1 OR (Shift_out_Resources[i]>1 AND Machine_to_Monitor_Online[i;1]=1) OR (Check_Threshold[i]>0);Online_Monitoring[i];0))

La variabile *Shift_out_Inspection*, invece, non solo azzerata il livello in corrispondenza delle risorse che superano le soglie di manutenzione preventiva in seguito ad un’ispezione ma, azzerata anche l’intero livello ogni

qual volta viene eseguita una lettura dello stato di una risorsa a valle di un ordine di ispezione; perché è importante che, ad ogni ispezione, si vada a “leggere” un valore aggiornato del parametro di usura:

***FOR(j=Resources/IF((Check_Threshold_by_Inspection[j]>0 OR
Monitoring_By_Inspection[j]<>0) AND
Machine_to_Monitor_by_inspection[j;1]==1;
Monitoring_By_Inspection[j]; 0))***

Infine c'è la variabile ausiliaria di flusso *Shift_out_Resources*, la cui logica di funzionamento è stata descritta nei paragrafi precedenti. Questa variabile ripristina gli indici delle risorse al termine di tutte le attività produttive e manutentive simulate all'interno del modello. Ne siamo riusciti a garantire il corretto funzionamento grazie all'introduzione di due strutture raffigurate in Figura successiva.

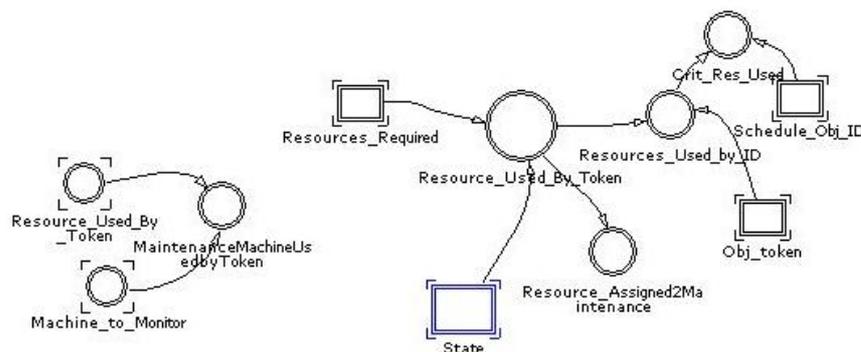


Figura 118*Resource_Used_By-Token, Crit_Res_Used & MaintenanceMachineUsedbyToken*

Queste due strutture ci hanno permesso di:

- identificare all'interno di un vettore, di dimensione tokens-states, le risorse utilizzate dai tokens, durante la simulazione, nei vari stati di lavorazione (a partire, quindi, dallo stato 2 allo stato 16). Le risorse sono identificate attraverso degli indici unitari, in accordo con l'ipotesi relativa alla molteplicità, all'interno della variabile *Resource_Used_By-Token*:

FOR(r=Resources/FOR(t=Token/ARRSUM(FOR(s=2..(COUNT(States)-2)/State[t;s]*Resources_Required[t;r;s])))

- rappresentare le risorse utilizzate dai tokens negli stati di lavorazione durante la simulazione in termini di ID associato ai propri tokens. Tutto questo attraverso la variabile ausiliaria *Resource_Used_By_ID*:

*FOR(r=Resources/FOR(t=Token/IF(Resource_Used_By-Token[r;t]=1
;Obj_token[t];0)))*

- risalire alle risorse critiche relative ad un particolare ordine di manutenzione in esecuzione, ovvero ad una specifica route selezionata ed in corso. La variabile *Crit_Res_Used*, infatti è collegata alla struttura di *Resource*, dove viene utilizzata per il ripristino delle macchine mantenute presenti in un ordine di manutenzione, che noi abbiamo considerato critiche. I comandi che esegue sono i seguenti:

*FOR(r=Resources/ARRSUM(FOR(
t=Token/IF(SCANEQ(Schedule_Obj_ID[*];5]
;Resources_Used_by_ID[r;t])>0 AND
INTEGER(Schedule_Obj_ID[INDEX(SCANEQ(Schedule_Obj_ID[*];
5];Resources_Used_by_ID[r;t]);7])=r;1;0)))*

Individuato, dunque, tramite il rispettivo ID all'interno della schedula, l'ordine di manutenzione in esecuzione, associa alla risorsa specificata nella colonna 7 un indice pari ad 1.

- individuare, attraverso la variabile *MaintenanceMachineUsedbyToken*, anch'essa collegata al costrutto di *Resource*, le risorse macchina utilizzate dai tokens in lavorazione. Anche in questo caso le risorse saranno rappresentate da un indice unitario in un vettore di dimensione *resources*:

*FOR(r=Resources/FOR(i=Token/IF(Machine_to_Monitor[r;1]=Resource_Us
ed_By-Token[r;i] AND Machine_to_Monitor[r;1]=1;1;0)))*

5.4.3. Raccolta dei dati

Un modello di simulazione costituisce uno strumento attraverso il quale le aziende possono orientare le proprie scelte strategiche, ma anche operative in relazione, ad esempio, ad un problema emerso. Per poter giungere, però, a dei risultati è necessario stabilire in fase di progettazione lo scopo e, quindi, i dati, gli output o le misure di prestazione che si desiderano ricavare dal modello. Questo è il motivo per cui, una volta definita la configurazione finale del modello in questione, in grado di simulare l'interazione ed il funzionamento di un generico processo produttivo e manutentivo, per completare la fase di costruzione, sono state inserite sul Powersim una serie di strutture – insieme di variabili ausiliarie e di livello, Figura successiva – necessarie per la “raccolta” dei dati di nostro interesse. I due elementi principali all'interno del complesso sistema integrato che abbiamo simulato sono sicuramente gli output dei due processi: i *prodotti finiti*, nel caso della produzione, ed i *macchinari ripristinati* attraverso le

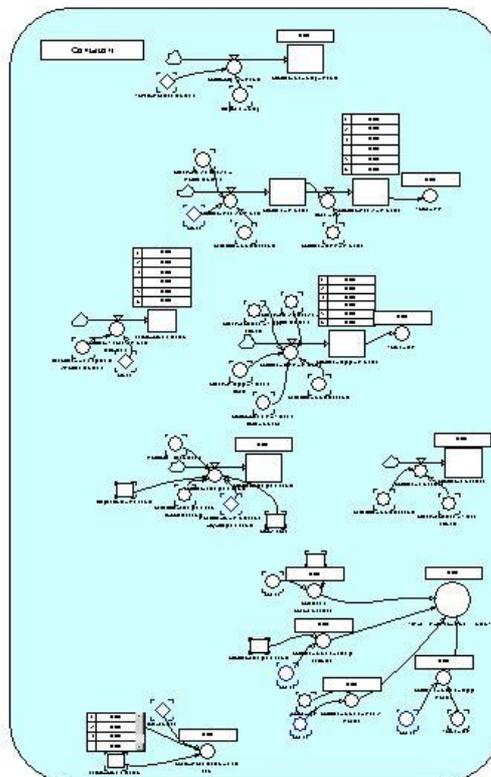


Figura 119 Modello: contatori

operazioni di manutenzione e di ispezione. Come abbiamo più volte specificato, lo stato di salute di una macchina è collegato non solo ad un suo utilizzo nella produzione di un bene, sulla base delle ipotesi considerate, ma soprattutto al dimensionamento delle soglie di manutenzione. La generazione di un ordine di manutenzione preventiva, correttiva e di ispezione è, infatti, legato al superamento o meno delle rispettive soglie che, in genere, vengono stabilite dall'azienda sulla base di considerazioni di tipo economico sulle performance di impianto.

La scelta di voler riprodurre le stesse logiche delle attività di manutenzione e le stesse ipotesi considerate nel lavoro dell'Ing. Zoppoli [62] è nata dalla decisione di voler mettere a confronto i risultati dei due studi dal punto di vista dei costi di manutenzione. Infatti anche nel nostro caso, come vedremo più avanti, il fine ultimo dello studio di simulazione da noi condotto riguarderà la definizione di un modello di ottimizzazione della manutenzione in cui l'obiettivo è quello di ricercare il bilanciamento ottimo tra i costi ed i benefici della manutenzione. Una corretta politica manutentiva, in effetti, che sia preventiva, opportuna, correttiva o anche mista, dovrebbe tendere ad ottimizzare l'equilibrio tra i costi diretti ed indiretti ad essa imputabili, in modo da minimizzare la risultante, il cosiddetto costo reale di manutenzione. Definito, quindi, lo scopo finale del lavoro è chiaro che bisogna cercare di estrapolare dal modello delle informazioni di tipo economico circa:

- i costi di ispezione
- i costi della manutenzione preventiva
- i costi della manutenzione opportuna
- i costi di guasto
- i costi di macchina libera

e tutti quei dati necessari per poterli calcolare, ovvero:

- numero dei prodotti finiti realizzati dal sistema produttivo nell'arco della simulazione;

- tempo di fermo macchina accumulato da ciascuna macchina della linea per attività di manutenzione;
- ordini totali di manutenzione preventiva ed opportuna;
- ordini totali di manutenzione correttiva;
- ordini totali di ispezione.

Analizziamo nel dettaglio ciascuna voce di costo [62].

Il processo di ispezione all'interno del sistema rappresenta un'attività programmata che richiede l'utilizzo di personale specializzato e di particolari apparecchiature che possono avere un costo variabile con il tempo ($C_{v,isp}$). Oltre ai costi di natura variabile, l'ispezione è caratterizzata da un costo fisso legato all'esecuzione stessa dell'attività che indicheremo con $C_{f,isp}$. Il **costo di un'ispezione** sarà quindi dato dall'espressione:

$$C_{isp} = C_{f,isp} + C_{v,isp} * t_{isp}$$

dove con t_{isp} è indicata la durata dell'ispezione.

Non sono stati considerati costi di tipo indiretti nella produzione causati da un'attività di ispezione perché abbiamo ipotizzato di poter svolgere questo tipo di attività a macchine in moto (come risorsa necessaria per il mode 6 abbiamo, infatti, indicato solo l'ispettore).

Il processo di manutenzione preventiva si attiva nel momento in cui, a valle di un'ispezione, viene registrato un superamento delle soglie da parte del parametro di usura, pertanto, il costo ad esso associato si andrà ad aggiungere al costo di ispezione. La manutenzione preventiva, inoltre, può essere svolta necessariamente a macchine ferme causando l'insorgere di costi indiretti, distinti in fissi e variabili. I costi indiretti fissi sono legati ai costi di set up dei macchinari ($C_{f,ind}$), quelli variabili, invece sono legati al tempo di fermo delle macchine ($C_{v,ind}$). Come per l'ispezione, poi, per l'esecuzione di un ordine di manutenzione preventiva sono necessarie tutta una serie di risorse sia umane, i manutentori, che materiali, le attrezzature, quindi si dovranno considerare anche dei costi diretti, fissi e variabili. I primi sono

principalmente dovuti alla sostituzione del componente e all'utilizzo di materiale di consumo ($C_{f,man}$); quelli variabili sono associabili all'utilizzo della manodopera e delle attrezzature ($C_{v,man}$). Se indichiamo, quindi, con t_{man} il tempo di manutenzione sulla macchina, il costo di manutenzione preventiva è pari a:

$$C_{man} = C_{isp} + C_{ind,man} + C_{dir,man} = \\ (C_{f,isp} + C_{v,isp} * t_{isp}) + (C_{f,ind} + C_{v,ind} * t_{man}) + (C_{f,man} + C_{v,man} * t_{man})$$

Anche per il **costo di manutenzione opportuna** vale la stessa espressione perché il processo a cui è associato non è altro che un caso particolare della manutenzione preventiva; infatti, anche nel modello abbiamo considerato per le due attività gli stessi meccanismi di funzionamento. A distinguerli è solo la condizione necessaria per la generazione dell'ordine di manutenzione.

La manutenzione correttiva è, invece, diversa da quella preventiva perché è del tutto indipendente dal monitoraggio "by inspection". Le attività di manutenzione per guasto generano sempre due costi di natura diversa, diretti ed indiretti, legati all'utilizzo delle risorse, nel primo caso, ed imputabili al fermo dell'impianto, nel secondo caso. I costi indiretti ($C_{ind,guas}$), sia fissi che variabili, dunque, sono legati esclusivamente alla perdita di opportunità produttive a causa della manutenzione e risultano essere identici a quelli contabilizzati per la manutenzione preventiva. Mentre i costi diretti ($C_{dir,guas}$), fissi e variabili, sono specifici per la manutenzione correttiva, in quanto il guasto potrebbe richiedere delle operazioni molto differenti dalla semplice manutenzione e delle volte anche la sostituzione dell'intero macchinario. Pertanto il costo della manutenzione correttiva o **costo di guasto** è calcolabile in base alle seguente espressione:

$$C_{gua} = C_{ind,gua} + C_{dir,gua} = \\ (C_{f,ind} + C_{v,ind} * t_{gua}) + (C_{f,man} + C_{v,man} * t_{gua})$$

dove t_{gua} indica la durata dell'attività di manutenzione correttiva. La struttura dei costi di manutenzione preventiva e correttiva è simile a meno dei costi di ispezione.

I **costi di macchina libera**, infine, si determinano quando una macchina rimane improduttiva per l'assenza di pezzi da lavorare ma, nel nostro caso, per via dei meccanismi adottati nel modello, la situazione appena descritta si verifica solo se una macchina della serie va in manutenzione. Per questo coincide, di fatto, con il **costo di fermo impianto**. Questo costo è stato calcolato come :

$$C_{v,mlib} * t_{fermo} * T_p$$

dove:

- $C_{v,mlib}$ rappresenta il costo variabile di macchina libera
- t_{fermo} rappresenta il tempo di fermo totale delle macchine della linea
- T_p rappresenta il tasso di produzione (ogni quanto viene prodotto un pezzo dalla linea di produzione)

Il prodotto $t_{fermo} * T_p$ rappresenta il numero di prodotti non realizzati a causa delle attività di manutenzione e, dunque, moltiplicandolo per il costo di macchina libera si ottiene il costo di mancata produzione, ovvero di fermo impianto. In realtà nella valutazione di questo costo si dovrebbero considerare altre voci di costo, come ad esempio il costo diretto di manodopera ed i costi indiretti di produzione, ma abbiamo preferito valutarlo attraverso un'espressione semplificata perché è di nostro interesse il suo impatto nel processo manutentivo e non produttivo, e cioè sul posizionamento delle soglie e sui costi totali di manutenzione.

Un'ulteriore semplificazione in questo senso è stata considerata anche per le altre voci di costo. In particolare, come vedremo, nel modello di ottimizzazione dei costi di manutenzione, non è stata presa in considerazione la natura variabile dei costi del personale e delle attività di manutenzione/ispezione in generale. Sono stati ipotizzati tempi deterministici

per le attività, ed una capacità illimitata delle risorse della manutenzione (ispettori e manutentori), condizioni che hanno reso il costo del personale, per ogni tipologia di intervento, una quantità stabilita e nota che si va ad aggiungere alla parte fissa del costo totale di intervento.

Tutte queste informazioni di costo possono essere ricavate dal nostro modello di simulazione sul Powersim, attraverso l'impiego di una o più variabili ausiliarie e di livello che abbiamo definito *contatori*.

La variabile di livello *Number_of_obj_Prod*, Figura successiva, ad esempio, rappresenta il contatore relativo al numero di prodotti finiti realizzati dal sistema produttivo simulato. Il flusso in ingresso *Count_obj_Prod* accumula nel livello una quantità pari ad uno ogni qual volta un token di produzione transita nello stato di *end* ($Dispose_obj[t]>0$). Abbiamo visto, nei paragrafi precedenti, che questa condizione rappresenta la fase di uscita dal sistema dell'oggetto e, per la produzione, coincide proprio con la fine del ciclo di lavorazione, ovvero con la produzione di un bene:

***ARRSUM(FOR(t=Token/IF(t<=COUNT(Token)-Token_Maintenance
;IF(Dispose_obj[t]>0;1);0)))***

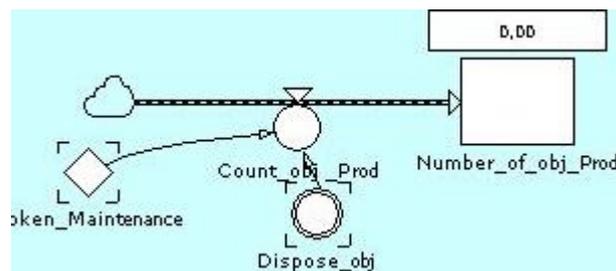


Figura 120 Contatore: numero prodotti finiti

Sono stati poi introdotti quattro contatori per calcolare, rispettivamente, il numero totale di ordini di manutenzione preventiva, opportuna, correttiva e di ispezione realizzati dall'impianto durante tutto l'arco temporale della simulazione. In particolare:

1. il livello *Number_Prev_Maint*, Figura successiva, indica il numero di ordini di manutenzione preventiva schedulati per ciascuna macchina mentre la variabile *Total_PM*, mediante un ARRSUM, ne calcola il totale.

Gli ordini vengono individuati dalla variabile ausiliaria di flusso *Counter_Prev_Main* che rileva, attraverso un indice unitario, il verificarsi di un ordine di manutenzione preventiva. L'indice sarà pari ad 1 se per una particolare risorsa, che non rientra nel personale (*Staff[*]=0*), è verificata la condizione di schedulazione in seguito al superamento della soglia di manutenzione preventiva:

**IF(
NUMBER(SCANEQ(Schedule_Condition;NUMBER(SCANEQ((Check_Preventive
ve_Maintenance);1))))=0 AND Staff[*]=0 AND
Check_Preventive_Maintenance[*]=1 ;1;0)**

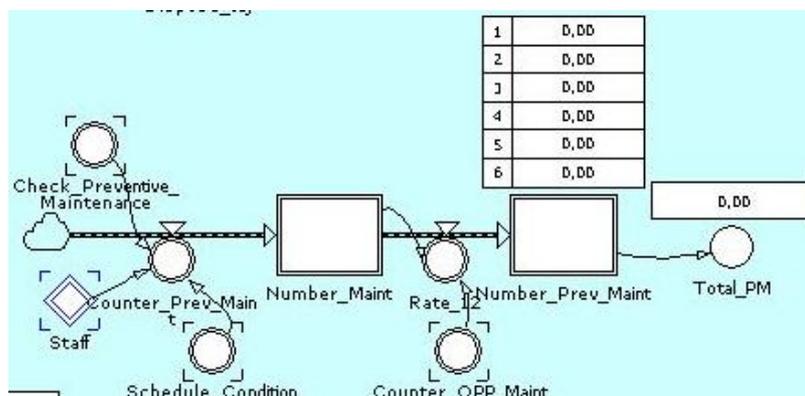


Figura 121 Contatore: numero ordini di manutenzione preventiva

2. Il livello *Number_Opp_Maint*, Figura successiva, allo stesso modo, indica il numero di ordini di manutenzione opportuna schedulati per ciascuna macchina, mentre la variabile *Total_OM*, mediante un ARRSUM, ne calcola il totale. Il meccanismo di funzionamento è lo stesso anche se, naturalmente, la variabile *Counter_Opp_Main*, in questo caso, rileverà un ordine di manutenzione, opportuna, se per una risorsa si

è verificato il superamento delle soglie preventive e/o correttive oltre a quelle opportune e se è stata verificata anche la condizione di schedulazione, ovvero:

***IF(Global_Check_Threshold_Norm[*]=1 AND
Check_Preventive_Maintenance[*]=0 AND Check_Failure_Threshold[*]=0 AND
Check_MOpp_Threshold[*]=1 AND
NUMBER(SCANEQ(Schedule_Condition;NUMBER(SCANEQ((Check_MOpp_Threshold);1))))=0;1;0)***

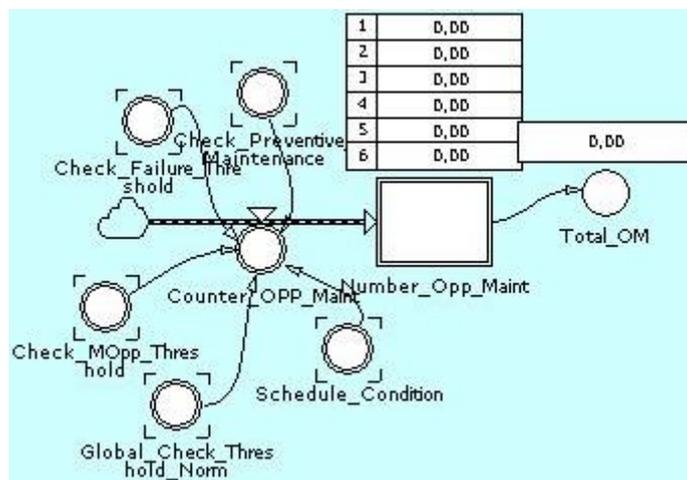


Figura 122 Contatore: numero ordini di manutenzione opportuna

3. La variabile di livello *Number_Inspection*, Figura successiva, segnerà, invece, al termine della simulazione il numero totale di ispezioni eseguite. In particolare la variabile *Counter_Inspection* aumenta il livello di un'unità ogni qual volta sono verificate le condizioni di schedulazione previste per gli ordini di ispezione in accordo con l'intervallo di ispezione. Infatti, come per i contatori precedenti, gli ordini vengono conteggiati solo se vengono effettivamente schedulati. I comandi utilizzati nella variabile sono molto simili a quelle visti per *Inspection_order*:

***IF(Sim_Time<>0<<sec>> AND Sim_Time MOD Inspection_Period==0<<sec>>
AND 'Maintain
Resource'[INDEX(SCANEQ(Machine_to_Monitor_by_inspection[*];1);1)]<2
AND***

NUMBER(SCANEQ(Schedule_Inspection_Condition;NUMBER(SCANEQ(Machine_to_Monitor_by_inspection[*;1];1))))=0;1;0)

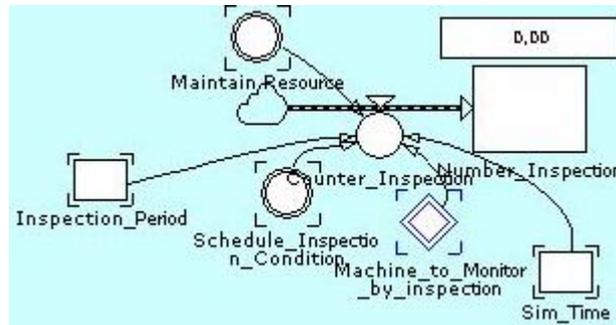


Figura 123 Contatore: numero di ispezioni

4. *Number_failure*, Figura successiva, rappresenta, invece, il numero totale dei guasti registrati dal sistema per tutte le macchine della linea e, quindi, il numero totale degli ordini di manutenzione correttiva eseguiti. La variabile ausiliaria *Counter_Failure* aumenta il livello di un'unità ogni volta che il sistema rileva un superamento delle soglie di guasto. Il superamento, però, non è l'unica condizione che deve essere analizzata, infatti è necessario che l'ordine di guasto, ad esso associato, verifichi le condizioni di schedulazione:

IF(NUMBER(SCANEQ((Check_Failure_Threshold);1))>0 AND NUMBER(SCANEQ(Schedule_Condition;NUMBER(SCANEQ((Check_Failure_Threshold);1))))=0;1;0)

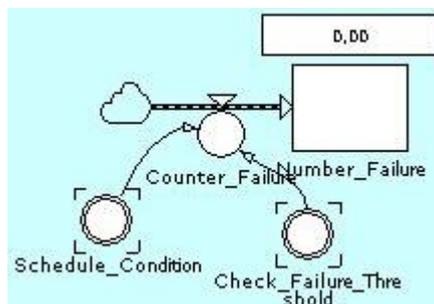


Figura 124 Contatore: numero guasti

Un altro contatore inserito è stato il livello *Fermo_macchina*, Figura successiva, in grado di conteggiare per ogni macchina il rispettivo tempo di improduttività dal punto di vista del sistema produttivo. Questo tempo, inoltre, equivale, per le ipotesi adottate, al tempo trascorso in attività manutentive. La variabile ausiliaria di flusso *Counter_Time_Maintenance*, infatti, aumenta il livello per ciascuna macchina ($Staff[r]=0$) di una quantità pari al TIMESTEP (0,5 nel nostro caso) ogni qual volta le macchine si trovano impegnate in un ordine di manutenzione. L'aumento è fisso e costante, timestep per timestep, durante tutto lo svolgimento della manutenzione:

FOR(r=Resources/
IF(Resource_Assigned2Maintenance[r]=1 AND Staff[r]=0;0,5;0))

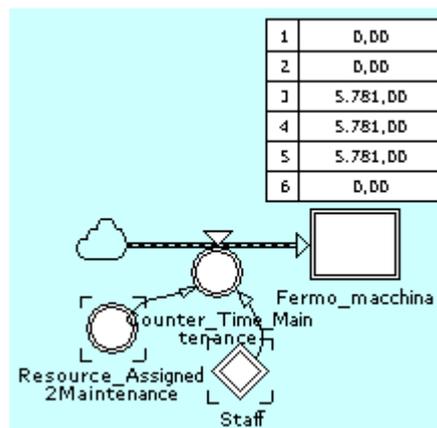


Figura 125 Contatore: *fermo macchina*

Per ultimare la struttura di raccolta dei dati, infine, sono stati inseriti i contatori delle voci di costo precedentemente analizzate, Figura 127. Come specificato nel paragrafo 4.2, le informazioni circa i costi fissi e variabili attribuiti a ciascuna attività manutentiva, espressi in unità monetarie (u.m.) [62], sono riportati nel file Excel *Costi*, poi richiamato sull'interfaccia di Powersim. È chiara, ancora una volta, la flessibilità e l'adattabilità del nostro

modello, infatti, i costi possono essere facilmente aggiunti o modificati direttamente dal file.



Figura 126 Costante dei costi

Richiamando la voce di costo all'interno di ciascuna variabile ausiliaria ed i dati necessari, sono stati così calcolati i:

- costi di guasto → $Number_Failure * Costi[4]$
- costi di ispezione → $Number_Inspection * Costi[1]$
- costi di manutenzione preventiva → $Total_PM * Costi[2]$
- costi di manutenzione opportuna → $Total_OM * Costi[3]$

La somma di tutte queste voci di costo e del costo di fermo macchina rappresenterà il **costo totale di manutenzione**.

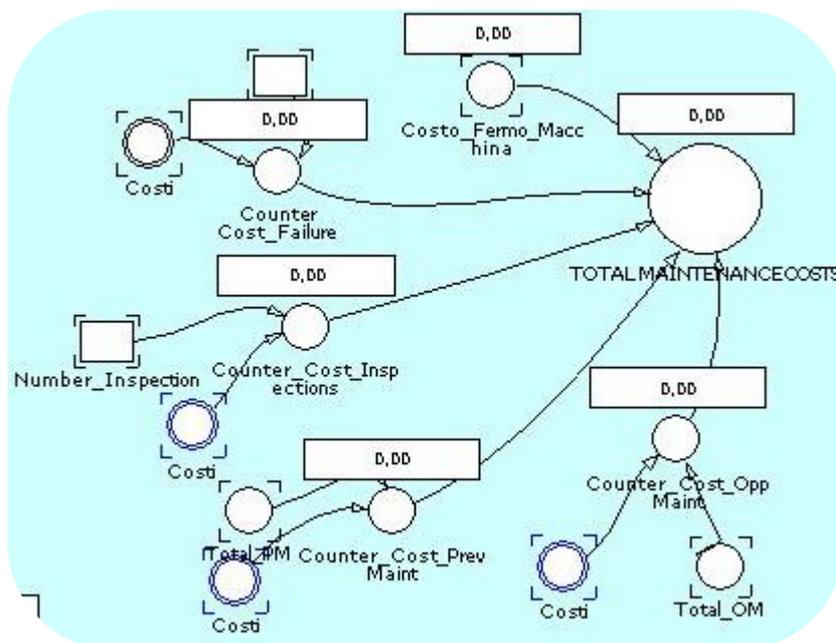


Figura 127 Contatore: costi della manutenzione

Il costo di fermo macchina/impianto o anche di macchina libera è stato calcolato attraverso la variabile della successiva figura e secondo la seguente espressione:

$$\text{Costi}[7]*((\text{ARRSUM}(\text{Fermo_macchina})/\text{ARRMAX}(\text{Time_table}[1;*])))$$

Dove il tasso di produzione è stato identificato come il tempo di lavorazione della macchina “collo di bottiglia” della linea di produzione simulata, ovvero la macchina che presenta il tempo maggiore di lavorazione (informazione ricavabile dalla *Time Table*). Nell’ipotesi da noi considerate, anche se i cicli di produzione sono due, i tempi di lavorazione delle due linee sono identici per questo abbiamo richiamato solo la prima riga della *Time Table* ma, in un caso più generico, è necessario modificare il comando in modo da identificare i tassi di produzione relativi a ciascuna linea di produzione ottenendo, così diversi costi di macchina libera per linea.

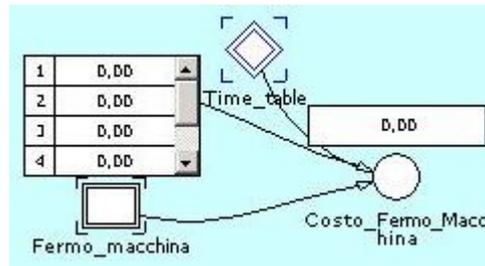


Figura 128 Contatore: costo di macchina libera

5.5. Validazione del modello

Per poter dimostrare la validità del modello di simulazione in relazione all’impianto produttivo considerato, sono stati eseguiti diversi test sia durante la realizzazione del modello, che al termine della sua modellazione. È stato necessario, infatti, in primo luogo, verificare il corretto funzionamento dei meccanismi di volta in volta introdotti per osservare ed eventualmente correggere la loro interazione con gli elementi già presenti nel modello originario; in secondo luogo, prima di poter procedere con l’ottimizzazione delle soglie di manutenzione, dal punto di vista dei costi, è stato indispensabile verificare la correttezza e la validità dei risultati forniti dal modello.

Attraverso la simulazione di diversi scenari è stato osservato:

- il comportamento dei tokens di manutenzione e produzione nelle transizioni da uno stato all'altro;
- la schedulazione dei diversi ordini;
- le priorità assegnate ai vari oggetti dal sistema;
- il funzionamento del sistema degli indici ipotizzato per le risorse;
- l'aumento di usura;
- il ripristino delle risorse e dei livelli di usura per ogni macchina.

È stato, dunque, appurato il corretto funzionamento di tutti i nuovi meccanismi ed elementi introdotti.

Nel corso delle varie simulazioni, ad esempio, è stato constatato che l'attività di ispezione è svolta dal sistema in parallelo alle attività di produzione, come da ipotesi, e che, sulla base delle priorità assegnate agli ordini, un ordine di guasto, prima di poter essere eseguito, deve attendere il termine delle lavorazioni in corso in produzione. Quest'ultimo aspetto è strettamente legato alla definizione delle policy di manutenzione nelle quali si stabiliscono le azioni da intraprendere nel momento in cui una macchina necessita di manutenzione. Cambiando, poi, alcuni parametri, come i valori delle soglie di manutenzione, gli intervalli di ispezione e la tipologia di monitoraggio per macchina (online o by inspection), sono stati analizzati e verificati i risultati forniti dai contatori in corrispondenza dei diversi scenari

Solo a valle di tutte queste verifiche è stato possibile procedere con l'ultima fase del nostro studio: la realizzazione di un modello di ottimizzazione dei costi di manutenzione.

Capitolo 6

Il modello di Ottimizzazione

6.1. Introduzione

Nel capitolo precedente è stata fornita una descrizione completa e dettagliata riguardo il modello di simulazione parametrico sviluppato nel corso di questo lavoro, sono state analizzate le logiche ed i meccanismi rappresentati al suo interno ed, infine, sono state evidenziate e chiarite una serie di caratteristiche che permettono di adattarlo a differenti realtà aziendali.

Quest'ultimo capitolo sarà, invece, incentrato sull'ultima fase dello studio di simulazione condotto: la definizione di un modello di ottimizzazione della manutenzione.

Possiamo considerare i **modelli di ottimizzazione della manutenzione** come quei modelli, matematici o simulativi, il cui obiettivo è ricercare il bilanciamento ottimo tra i costi e i benefici della manutenzione, tenendo conto dei diversi tipi di vincoli che intervengono.[62] Dunque, le diverse ottimizzazioni del modello aiutano a comprendere quali sono i comportamenti che il sistema di manutenzione deve adottare per cercare di contenere i costi di manutenzione. I comportamenti, in realtà, si traducono in un corretto dimensionamento delle soglie di manutenzione in relazione all'impianto analizzato. Nei paragrafi precedenti sono state descritte le principali voci di costo che si generano a causa delle attività manutentive, legate alle soglie, ed abbiamo visto che un peso notevole è associato proprio

alle aliquote fisse ovvero allo svolgimento vero e proprio delle attività che è, certamente, regolato dalle soglie della manutenzione.

L'ottimizzazione, in generale, riguarda la capacità di trovare la migliore soluzione al problema, descritto con una funzione obiettivo (da minimizzare nel nostro caso) ed un set di vincoli per restringere il valore di determinate variabili decisionali in un dominio ammissibile.

È stato possibile impostare il modello di ottimizzazione direttamente sul software di simulazione utilizzato per sviluppare il modello. Powersim, infatti, consente di realizzare diverse tipologie di analisi sui risultati ottenibili dalle simulazioni. In particolare esistono quattro metodologie differenti, che nascono dalla combinazione di due fattori (Figura seguente):

1. presenza/assenza di dati certi → Simulation Vs. Risk Analysis;
2. presenza/assenza di “Goal Seeking”, ovvero la ricerca del set di migliori decisioni mediante un algoritmo di ottimizzazione → Optimize Vs. Play.

| | ▶ Play | ⊕ Optimize |
|--|--|---|
|  Simulation |  Scenario Control |  Optimization |
|  Risk Analysis |  Risk Assessment |  Risk Management |

Figura 129 Tipologie di analisi sul Powersim

Nel nostro studio, in riferimento agli obiettivi da raggiungere ed alle ipotesi considerate, abbiamo focalizzato la nostra attenzione sull'*Optimization*, ovvero sulla definizione di un problema di ottimizzazione circa le decisioni da prendere (sul dimensionamento delle soglie) per trovare una strategia ottima di manutenzione multisoglia che minimizzi i costi.

Il processo di ottimizzazione sul Powersim, Figura successiva, si fonda sull'algoritmo di ricerca della soluzione del Dr. Nikolaus Hansen, dell'Università di Berlino.

Si tratta fondamentalmente di una tecnica meta-euristica, l'*Algoritmo Genetico*, in cui l'idea di base è quella di considerare una popolazione di soluzioni che evolve in accordo con un meccanismo di selezione in modo da

produrre soluzioni con buoni valori della funzione obiettivo. In genere vengono casualmente individuati due genitori appartenenti ad una popolazione e, a partire da questi, vengono generati uno, due o più figli che hanno alleli (caratteristiche) provenienti da entrambi, in maniera casuale. Se i figli creati hanno migliori caratteristiche della funzione obiettivo rispetto a quelle che presentano i membri della popolazione esistente, entrano a far parte della popolazione. L'uscita dei membri già presenti, può essere fatta su base probabilistica o deterministica secondo criteri opportuni per ogni istanza del problema. L'algoritmo presenta caratteristiche di convergenza, pertanto, sarà esso stesso ad arrestarsi in un determinato momento. Tuttavia si possono verificare casi di convergenza prematura ed è per questo che, spesso, si preferisce adottare opportune strategie di diversificazione della popolazione. Un'ulteriore caratteristica degli algoritmi genetici è quella della mutazione: vengono modificati "ex abrupto" alcuni dei valori delle variabili per introdurre eterogeneità nella popolazione.

L'algoritmo sul Powersim termina una volta trovata la decisione migliore (non necessariamente ottima, trattandosi di una metodologia euristica), in accordo ad una particolare funzione obiettivo; oppure se è stato raggiunto il numero massimo di generazioni consentite.

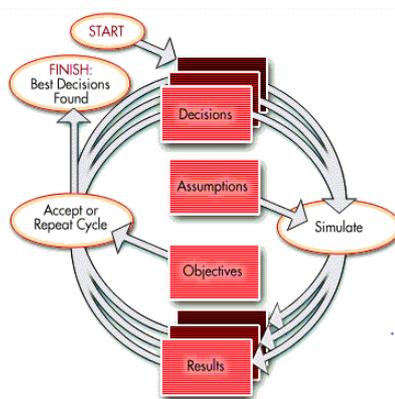


Figura 130 Powersim: the Optimize Process

Prima di far partire un'ottimizzazione è, però, necessario definire alcune impostazioni generali relative all'algorithmo di calcolo, Figura seguente.

The screenshot shows the 'Optimize' dialog box with the following settings and callouts:

- Maximum generations:** 10. Callout: "Numero massimo di generazioni possibili (10-1000)".
- Parents:** 3. Callout: "Numero di Parent (set di valori in input per un generico Run di simulazione). Default = 3".
- Offsprings:** 15. Callout: "Numero di Offsprings (set di numeri generati dal Parent) da usare nella prossima simulazione. Deve essere pari ad almeno 3 volte il numero dei Parent (genitori)".
- Minimum convergence:** 0,000000001. Callout: "Il valore minimo diconvergenza tra le diverse simulazioni (se inferiore l'algorithmo si arresta). Valore compreso tra $0.001 \cdot 1E-3$ e $0.001 \cdot 1E-10$ ".
- Seed:** 100. Callout: "Il Seed consente di mantenere la stessa serie di numeri generati casualmente per tutti i run".

The dialog box also includes a 'General' section with a target icon and a description: "Powersim Studio embeds the Powersim Solver analysis tools. Use the evolutionary search based optimization algorithms of Solver to search for a policy that fulfills one or more objectives, or achieve your objectives while keeping risk within given thresholds." Buttons for '< Back', 'Next >', 'Finish', 'Cancel', and 'Help >>' are visible at the bottom.

Figura 131 Impostazioni *Optimize*

Optimize permette anche di monitorare costantemente il processo di ottimizzazione, seguendo l'andamento dei principali parametri impostati, Figura successiva, e di decidere se lanciare o meno una simulazione con i valori delle variabili decisionali ottenuti.

The screenshot shows the 'Optimize' dialog box with the 'Assumptions' tab selected. It displays a progress bar and the following status information:

| | | |
|------------------|------------|---------------------|
| Generation: | Offspring: | Simulations so far: |
| 7 of 10 | 3 of 15 | 5882 |
| Total deviation: | Status: | |
| 209.999.784,87 | Running | |

The dialog box also includes a target icon and a description: "Powersim Studio embeds the Powersim Solver analysis tools." An 'About Solver...' button is visible at the bottom.

Figura 132 Monitoraggio *progresso dell'ottimizzazione*

Analizziamo ora più nel dettaglio i valori, le modifiche e le ipotesi considerate per poter effettuare l'ottimizzazione del sistema integrato (produzione-manutenzione) simulato dal nostro modello.

6.2. Modifiche alle ipotesi ed al modello funzionali al processo di ottimizzazione

Per poter effettuare le procedure di ottimizzazione è stato necessario apportare delle modifiche ai parametri del modello riguardo il numero di macchine, la tipologia del sistema produttivo, i tempi di lavorazione e manutenzione. Infatti, come già accennato precedentemente, per la parte di ottimizzazione, abbiamo deciso di replicare le caratteristiche del sistema ipotizzato dall'Ing. Zoppoli [62] per poter disporre, al termine delle varie simulazioni, di parametri e risultati di confronto.

La natura e la flessibilità del nostro modello ha semplificato notevolmente le operazioni di modifica: è bastato, difatti, agire solo sui parametri interessati, ovvero sulle costanti, sui ranges e sui file Excel, per impostare i valori del sistema produttivo/manutentivo da ottimizzare, mantenendo intatti tutti i meccanismi di funzionamento del modello.

Nello specifico abbiamo deciso di simulare un impianto costituito da quattro macchine in serie, completamente identiche che lavorano la stessa tipologia di pezzi con gli stessi tempi di lavorazione. Di conseguenza anche i tempi e le modalità di intervento della manutenzione sulle macchine sono state ipotizzate uguali. I tempi sono stati fissati deterministici e per questo anche i costi registrati, somma di un'aliquota fissa e una variabile, risultano uguali per ogni tipologia di voce.

L'intervallo tra due arrivi successivi dei pezzi, all'ingresso del sistema produttivo, è stato fissato identico al tempo di lavorazione sulle macchine per evitare improduttività dovuta all'assenza di pezzi da lavorare.

Anche i valori della stessa soglia sulle quattro macchine sono stati supposti identici o, comunque, prossimi tra di loro, perché le macchine sono mantenute allo stesso modo.

Per le risorse della manutenzione non è stato imposto alcun vincolo circa la disponibilità di ispettori e manutentori. Di conseguenza, la richiesta di

ispezione o manutenzione sarà sempre soddisfatta evitando di generare attese, da parte delle macchine, per mancanza di personale (aspetto che potrebbe influire sul posizionamento delle soglie).

Riassumendo, abbiamo costruito un modello che simula il comportamento di un sistema caratterizzato da:

- 4 macchine in serie (sistema *Flow Shop*) con uguali tempi di lavorazione, deterministici;
- una sola categoria di pezzi in lavorazione;
- stessa probabilità di guasto e incremento dell'usura sulle quattro macchine;
- modalità di ispezione e manutenzione unica con tempi identici e deterministici;
- capacità illimitata di manutentori ed ispettori (uno per ogni macchina);
- identica struttura dei costi.

L'incremento di usura è stato calcolato sulla base di una funzione Gamma di parametri $\alpha=1.3$ e $\beta=3$ [62] ed è stato poi adattato all'unità di tempo considerata per l'ottimizzazione; ottenendo un valore di incremento pari a 0.288 in corrispondenza di ogni TIMESTEP.

Per poter impostare queste ipotesi all'interno del nostro modello abbiamo modificato il numero ed il significato degli elementi base, riportati in Tabella:

Tabella 23 *Tabella riepilogativa elementi base modello di simulazione ottimizzato*

| ELEMENTI BASE | Numero elementi considerati |
|-------------------------|------------------------------------|
| Stati | 22 |
| Token | 7 (3 Produzione + 4 Manutenzione) |
| Mode | 10 |
| Risorse | 12 |
| Route | 39 |
| Risorse Critiche | 2 per ogni route |

Analizziamoli nel dettaglio:

- **Stati**

Tabella 24 *Stati Modello Ottimizzazione*

| Stati | Descrizione |
|-------|-------------------------|
| 1 | Start |
| 2-8 | Produzione |
| 9-12 | Manutenzione |
| 13 | Fine manutenzione |
| 14 | Ispezione |
| 15 | Fine ispezione |
| 16-19 | Manutenzione Correttiva |
| 20 | Fine manut. Correttiva |
| 21 | End |
| 22 | Free |

Il sistema è caratterizzato sempre dai tre stati fittizi (*Start*, *End* e *Free*), ma il loro numero è aumentato per via della presenza di una macchina in più. La descrizione di ciascun stato è riportata nella precedente tabella.

- **Mode**

Questa volta è presente un solo ciclo di produzione rappresentato dal *mode* 1. Il mode dell'ispezione è sempre il 6, mentre per i diversi cicli di manutenzione abbiamo considerato un mode per ciascuna macchina, ovvero quattro per la manutenzione preventiva/opportuna (2-5) e quattro per la manutenzione correttiva (7-10). In realtà i cicli sono uguali, ciò che cambia è unicamente il manutentore, per via dell'ipotesi di risorse manutentive illimitate. Questa condizione, infatti, è stata tradotta in termini di risorse, come una risorsa per macchina sempre disponibile.

- **Risorse**

Le risorse sono state distinte in:

macchine → R1-R2-R3-R4; manutentori → R5-R6-R7-R8; ispettore → R9; operatori vari → R10-R11-R12

- **Routes**

I percorsi ipotizzati seguiti dagli oggetti (tokens) all'interno del sistema, a seconda dell'attività da svolgere, sono indicati nella successiva Tabella, dove sono state anche segnate in rosso le risorse considerate critiche per ciascuna route.

Tabella 25 Routes Modello Ottimizzazione

| Routes | 1-3 | 4-7 | 8-11 | 12-15 | 16-19 | 20-23 | 24-27 | 28-31 | 32-35 | 36-39 |
|-------------|----------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|-----------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Descrizione | Prod. | Manut. M1 | Manut. M2 | Manut. M3 | Manut. M4 | Ispezione | Manut. Corr. M1 | Manut. Corr. M2 | Manut. Corr. M3 | Manut. Corr. M4 |
| Risorse | R1 R2 R3 R4 | R1 R2 R3 R4 R5 | R1 R2 R3 R4 | R1 R2 R3 R4 R7 | R1 R2 R3 R4 R8 | R9 | R1 R2 R3 R4 R5 | R1 R2 R3 R4 R6 | R1- R2 R3- R4 R7 | R1- R2 R3- R4 R8 |

L'attività di ispezione, anche in questa configurazione del sistema, è effettuata online ed interessa tutte le macchine della linea produttiva (ovvero sono tutte monitorate attraverso il meccanismo da noi definito “*monitoring by inspection*”).

Tutte queste informazioni sono sempre contenute all'interno degli stessi file Excel visti in precedenza, che ora sono stati solo modificati per caratterizzare il nuovo sistema da ottimizzare.

Un'ulteriore modifica ha interessato, poi, i tempi stabiliti per ciascun tipo di attività. I tempi ipotizzati [62] sono riportati nella Tabella seguente considerando un tempo di lavorazione per macchina di un'ora:

Tabella 26 *Tempi modello di Ottimizzazione*

| Descrizione | Simbolo | Valore | Valore in sec | |
|--|-----------|-------------|---------------|----|
| | | | | |
| Lavorazione per macchina (interarrivo dei pezzi) | T_p | 5 min | 300 | 1 |
| Manutenzione Prev/Opp | t_{man} | 5 h | 18000 | 5 |
| Ispezione | t_{isp} | 1 h | 3600 | 1 |
| Intervallo tra due ispezioni | I_{isp} | 3 giorni | 259200 | 72 |
| Manutenzione per guasto | t_{gua} | 12 h | 43200 | 12 |

La tabella che segue riassume le singole voci di costo:

Tabella 27 *Voci di costo*

| Voce di costo | Simbolo | Valore [u.m.] | Tipologia |
|-------------------------|-------------|---------------|-----------|
| Ispezione | C_{isp} | 100 | fisso |
| Manutenzione Preventiva | C_{pre} | 500 | fisso |
| Manutenzione Opportuna | C_{opp} | 500 | fisso |
| Manutenzione per Guasto | C_{gua} | 1500 | fisso |
| Fermo macchina | C_{fermo} | 1200 | variabile |

Una volta apportate tutte le modifiche necessarie, in merito alla configurazione del sistema da simulare, abbiamo potuto specificare i parametri del modello di ottimizzazione.

6.3. Parametri dell'Ottimizzazione

Per poter ottimizzare una certa strategia o politica di un modello di simulazione sul Powersim bisogna specificare quali variabili possono essere modificate all'interno del modello per poter raggiungere uno o più obiettivi prestabiliti. In un generico problema di ottimizzazione queste rappresentano, appunto, le variabili decisionali (o di controllo); mentre i vincoli sono rappresentati, sul programma, dalle cosiddette *assumptions* in merito agli altri fattori che influenzano le performance del sistema in esame.

Pertanto, oltre alla funzione obiettivo, devono essere specificati i vincoli, se presenti, e le variabili di decisione. È, inoltre, necessario che entrambi questi elementi siano variabili "changeable", ovvero non costanti e non inizializzati. Questo è il motivo per cui abbiamo dovuto cambiare la natura e la struttura delle costanti relative alle soglie di manutenzione. Le variabili di decisione nel nostro caso, infatti, sono rappresentate dalle soglie di manutenzione che, nel modello di simulazione, sono riportate in tre costanti:

1. *Maintenance_Threshold* → soglie di manutenzione preventiva
2. *Mopp_Threshold* → soglie di manutenzione opportuna
3. *Alarm_Threshold* → soglie di allarme

Le soglie di guasto, al contrario, non rientrano nelle variabili di decisione perché costituiscono un'informazione esterna al sistema, ovvero un dato di input non modificabile e, quindi, non controllabile; come anche l'intervallo previsto tra due ispezioni, ipotizzato pari a tre giorni (*Initial Inspection Period*). In particolare, per quanto riguarda la soglia di guasto (unica perché uguale per tutte le macchine, sulla base delle ipotesi considerate), abbiamo deciso di attribuire un'alta probabilità di guasto ai macchinari che hanno lavorato per circa un mese, 24 ore al giorno.

Prima di tutto sono state modificate in variabili ausiliarie, non più costanti, e, poi, abbiamo creato tre variabili, Figura successiva, in grado di definire il valore delle soglie a partire dal valore delle soglie di guasto.

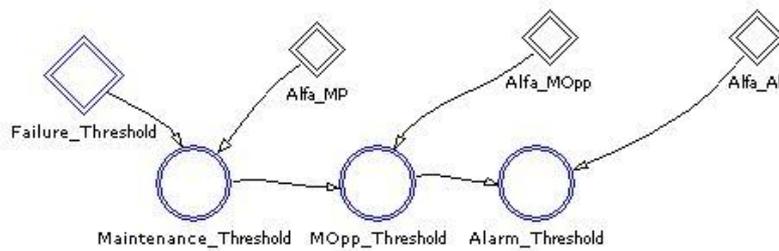


Figura 133 Variabili di decisione

$Alfa_MP$, $Alfa_MOpp$ e $Alfa_All$ sono tre vettori, di dimensione *resources*, i cui elementi possono assumere valori compresi tra 0 e 1, partono da un valore pari a 0.5 e rappresentano, di fatto, le nostre variabili di decisione. Infatti, sono tutti collegati alla rispettiva soglia che rappresentano, il cui valore si definisce secondo la seguente logica:

- **Soglia di manutenzione preventiva:** può essere al massimo pari alla soglia di guasto ed al minimo pari alla metà della stessa soglia di guasto (riferita ad una particolare macchina/risorsa), ovvero è data da

$$0,5*Failure_Threshold+0,5*Failure_Threshold*Alfa_MP$$

- **Soglia di manutenzione opportuna:** può essere al massimo pari alla soglia preventiva ed al minimo pari alla metà della stessa; infatti è data da

$$0,5*Maintenance_Threshold+0,5*Maintenance_Threshold*Alfa_MOp$$

p

- **Soglia di allarme:** può essere al massimo pari alla soglia opportuna ed al minimo pari alla metà di quella opportuna

$$MOpp_Threshold*0,5+0,5*MOpp_Threshold*Alfa_All$$

Attraverso queste variabili è possibile, dunque, definire i valori ottimali delle soglie.

I vincoli non risultano esplicitati perché già le variabili presentano delimitazioni nell'assunzione dei rispettivi valori. Inoltre, i valori di ciascuna voce di costo sono stati ipotizzati tenendo conto del seguente vincolo dimensionale: $C_{isp} < C_{prev} < C_{gua}$.

La **funzione obiettivo** è, invece, rappresentata dalla variabile *TOTAL MAINTENANCE COST*, Figura 85, che esegue la somma di tutte le voci di costo sostenute dal sistema in seguito alle attività di manutenzione effettuate. Nello specifico l'obiettivo da raggiungere è la **minimizzazione del costo globale di manutenzione**.

Infine, abbiamo stabilito come **orizzonte di simulazione** un intervallo di tempo pari a 4 mesi, ovvero 440 giorni lavorativi con giornate da 24 h che, in accordo con l'unità di tempo utilizzata dal modello, e a valle delle semplificazioni eseguite, equivalgono a 2880 sec.

Per poter avviare l'ottimizzazione, definiti tutti i parametri fin qui descritti, basta cliccare sul tasto **Optimize**, Figura successiva, ed il programma ricercherà i valori delle variabili di decisione che producono le soluzioni migliori nel dominio ammissibile; il tutto mentre è in corso la simulazione.

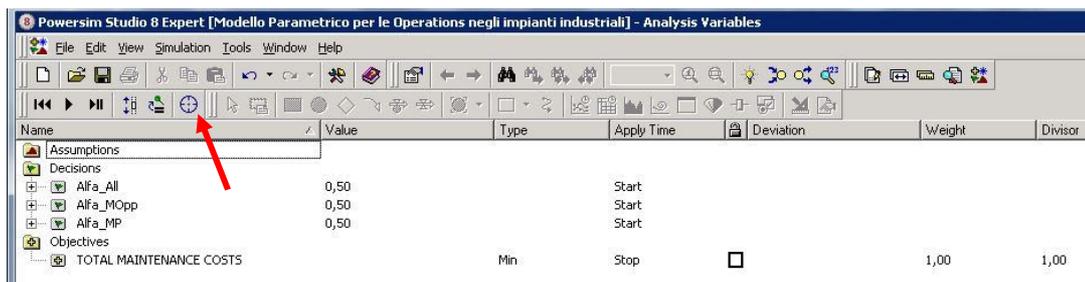


Figura 134 *Optimize*

Il processo di ottimizzazione confronterà i risultati simulati in relazione alla funzione obiettivo per poi, infine, indicare le decisioni che determinano un comportamento del sistema nella massima misura possibile soddisfacente per i nostri obiettivi.

6.4. Risultati dell'Ottimizzazione

Sulla base di una serie di ipotesi semplificative riguardo il numero di macchine, la tipologia del sistema produttivo, i tempi di lavorazione e manutenzione e le voci di costo è stato, quindi, impostato e lanciato un modello di ottimizzazione che ha permesso di definire la migliore politica manutentiva da adottare. Quest'ultima, come già accennato precedentemente, si traduce in un corretto dimensionamento delle soglie manutentive dal punto di vista dei costi totali di manutenzione.

Il risultato dell'ottimizzazione, dunque, è rappresentato da valori ottimali delle soglie manutentive, preventiva, opportuna e d'allarme, in relazione non solo ai costi fissi della manutenzione ed a quello variabile del fermo impianto ma, soprattutto, in relazione a particolari valori della soglia di guasto e dell'intervallo programmato previsto per l'attività di ispezione. Questi ultimi due dati, infatti, in questa prima versione del modello, sono stati considerati input esogeni stabiliti sulla base di considerazioni impiantistiche (dettate sicuramente dalla natura deterministica del sistema produttivo e dalla sua semplicità) e, dunque, non controllabili. Non è, però, esclusa, in una futura evoluzione del modello, la possibilità di simulare e, quindi, ottimizzare un ambiente del tutto aleatorio e un sistema più complesso (ad esempio con una configurazione di tipo Job Shop).

Una voce importante tra i costi della manutenzione è rappresentata dai costi di macchina libera che si determinano quando una macchina rimane improduttiva per l'assenza di pezzi da lavorare. Per le scelte fatte sul modello riguardo i tempi di lavorazione e di arrivo dei pezzi questa situazione appena descritta si verifica solo se una delle macchine della serie va in manutenzione. Questo elemento, dunque, ha permesso di creare anche dal punto di vista dei costi un ulteriore collegamento tra produzione e manutenzione: per giungere ad una corretta decisione strategica è

fondamentale, infatti, in un'azienda poter avere informazioni sull'impatto economico degli interventi di manutenzione. In un impianto in serie, ad esempio, elevati costi di macchina libera sicuramente aumenterebbero il numero di manutenzioni opportune abbassando le soglie di ispezione.

Sono state lanciate due ottimizzazioni per poter mettere a confronto due scenari manutentivi differenti dal punto di vista dei costi. In particolare:

1. nel primo scenario sono stati utilizzati i valori di costo riportati nelle precedenti tabelle. Considerando come parametro di riferimento il costo della manutenzione preventiva, questa realtà produttiva è caratterizzata da un costo di guasto (tre volte maggiore l'intervento preventivo) ed un costo di fermo impianto elevati. Pertanto, il guasto rappresenta un evento economicamente svantaggioso per l'azienda, che bisogna cercare di evitare attraverso un corretto monitoraggio.

I valori ottimali delle variabili decisionali e i corrispondenti valori di soglia ottenuti dall'ottimizzazione per ciascuna macchina della linea sono riportati nella seguente tabella:

Tabella 28 Risultati dell'ottimizzazione: primo scenario

| Soglia | Variabile decisionale | Macchina 1 | Macchina 2 | Macchina 3 | Macchina 4 |
|-------------------|------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Preventiva | <i>Alfa_MP</i> | 0.25 | 0.81 | 0.79 | 0.35 |
| | | 129.73 | 187.45 | 185.36 | 139.61 |
| Opportuna | <i>Alfa_MOpp</i> | 0.47 | 0.74 | 0.70 | 0.64 |
| | | 95.21 | 163.47 | 157.22 | 114.51 |
| Allarme | <i>Alfa_All</i> | 0.93 | 0.39 | 0.41 | 0.56 |
| | | 92.09 | 113.25 | 110.57 | 89.33 |

Al termine dell'ottimizzazione il software di simulazione ha lanciato in automatico un'ulteriore simulazione con i valori di soglia ottimali, dalla

quale si sono ottenuti i seguenti risultati, che rappresentano gli ordini totali manutentivi nell'arco di 4 mesi lavorativi simulati (Tabella successiva):

Tabella 29 *Totale ordini manutentivi : primo scenario*

| | |
|--|-------------|
| numero di guasti | 0 |
| numero di interventi preventivi | 4 |
| numero di interventi opportuni | 6 |
| numero di ispezioni | 39 |
| Costo TOTALE | 272900 u.m. |

Con un numero complessivo di prodotti realizzati pari a 523.

Il dimensionamento ottimale delle soglie suggerisce una gestione manutentiva dell'impianto volta a ridurre la probabilità di guasto. Infatti le soglie di manutenzione preventiva ed opportuna presentano valori molto bassi rispetto alla soglia di guasto.

Questo risultato si evince anche andando ad analizzare l'andamento dei costi sostenuti nell'arco della simulazione (Figura successiva): i costi di guasto sono nulli, al contrario dei costi di ispezione che evidenziano un'elevata attività di monitoraggio.

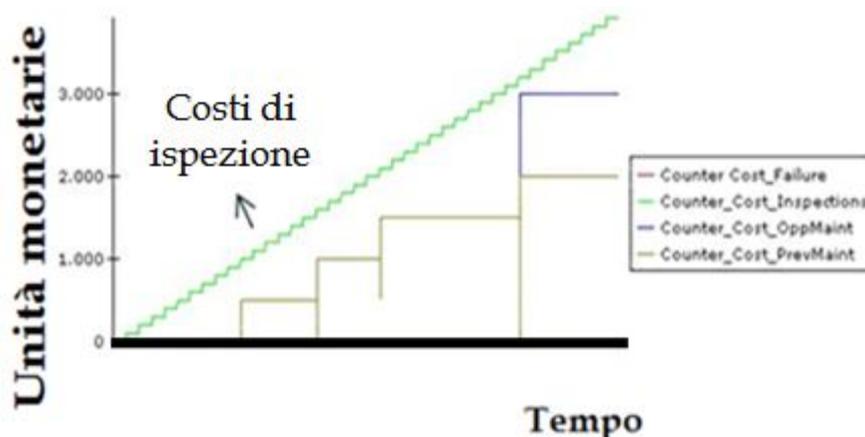


Figura 135 *Andamento dei Costi primo scenario*

L'andamento dei costi di fermo macchina nel tempo sono stati, invece, diagrammati nella Figura seguente:

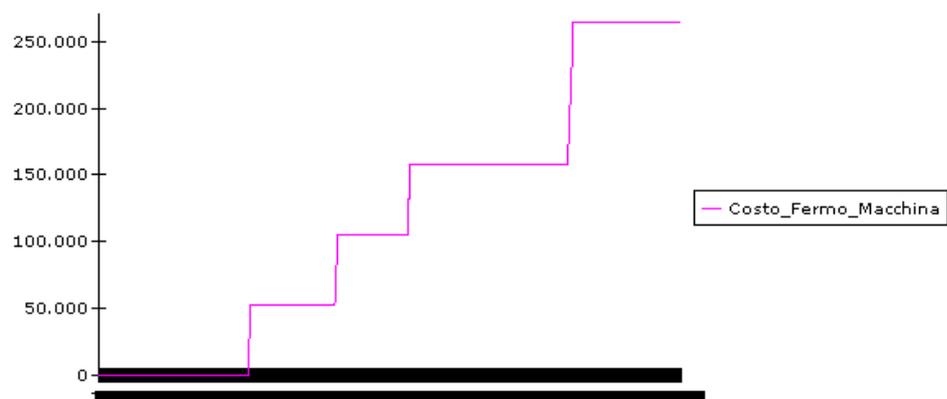


Figura 136 *Andamento costo di fermo macchina: primo scenario*

Nella figura successiva si riporta l'andamento dell'usura in funzione del tempo registrato nel corso della simulazione del primo scenario. Andamento crescente e proporzionale al tempo di utilizzo delle macchine.

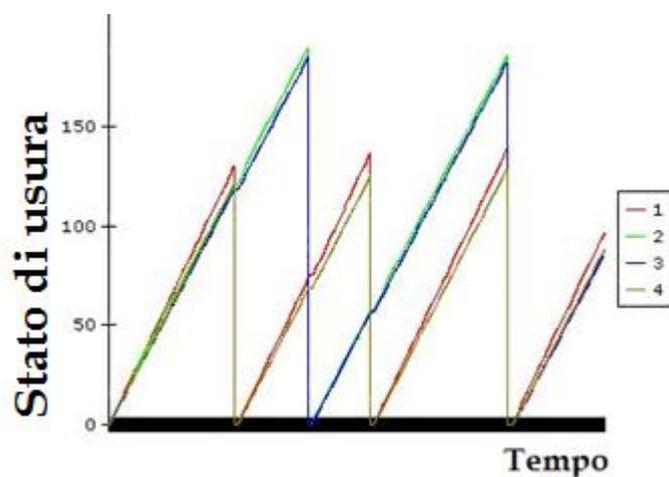


Figura 137 *Andamento dell'usura nel primo scenario*

2. Nel secondo scenario, invece, sono stati considerati, sempre in rapporto ai costi di manutenzione preventiva, dei valori di costo per l'intervento correttivo e per il fermo impianto più bassi, rispettivamente pari a:

$$C_{\text{gua}} \rightarrow 750$$

$$C_{\text{fermo}} \rightarrow 600$$

Lasciando inalterati tutti gli altri valori di costo.

I valori ottimali delle soglie ottenute dall'ottimizzazione in questo secondo scenario sono i seguenti:

Tabella 30 Risultati dell'ottimizzazione: secondo scenario

| Soglia | Variabile decisionale | Macchina 1 | Macchina 2 | Macchina 3 | Macchina 4 |
|-------------------|------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Preventiva | <i>Alfa_MP</i> | 0.5 | 0.95 | 0.9 | 0.8 |
| | | 155.25 | 201.82 | 196.65 | 186.3 |
| Opportuna | <i>Alfa_MOpp</i> | 0.85 | 0.93 | 0.95 | 0.96 |
| | | 143.61 | 194.76 | 191.73 | 182.57 |
| Allarme | <i>Alfa_All</i> | 0.93 | 0.39 | 0.41 | 0.56 |
| | | 92.09 | 113.25 | 110.57 | 89.33 |

Mentre gli ordini totali manutentivi nell'arco di 4 mesi lavorativi sono risultati essere:

Tabella 31 Totale ordini manutentivi: secondo scenario

| | |
|--|-------------|
| numero di guasti | 0 |
| numero di interventi preventivi | 8 |
| numero di interventi opportuni | 1 |
| numero di ispezioni | 39 |
| Costo TOTALE | 127200 u.m. |

Con un numero complessivo di prodotti realizzati pari a 525.

In questo secondo scenario i risultati evidenziano un valore delle soglie preventiva ed opportuna più alti e prossimi tra loro; infatti, il rapporto tra i costo di manutenzione a guasto rispetto a quello della manutenzione preventiva è minore. La soglia di manutenzione preventiva è aumentata rispetto al caso precedente e si è avvicinata alla soglia di manutenzione a

guasto ed, infatti, le ore di fermo macchina per manutenzione si sono ridotte come anche il numero degli interventi di manutenzione opportuna.

Per quanto riguarda le soglie di allarme, non avendo modificato la voce di costo dell'ispezione, sono rimaste inalterate.

Le due Figure successive riportano gli andamenti dei costi nel secondo scenario:

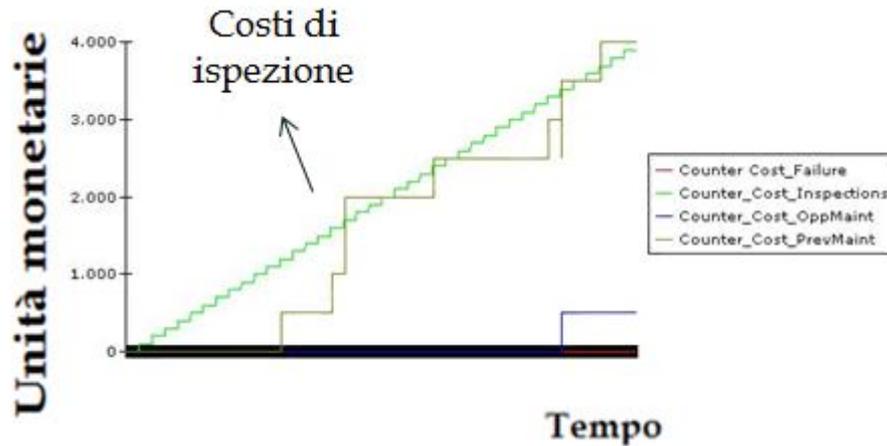


Figura 138 *Andamento dei Costi secondo scenario*

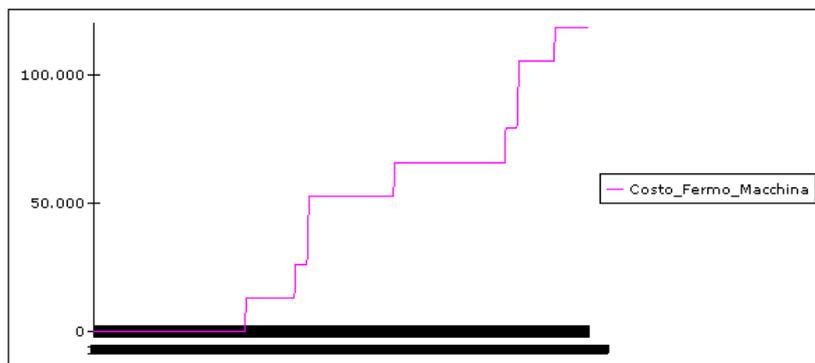


Figura 139 *Andamento costo di fermo macchina: secondo scenario*

Nella Figura seguente è raffigurato l'andamento di usura risultante:

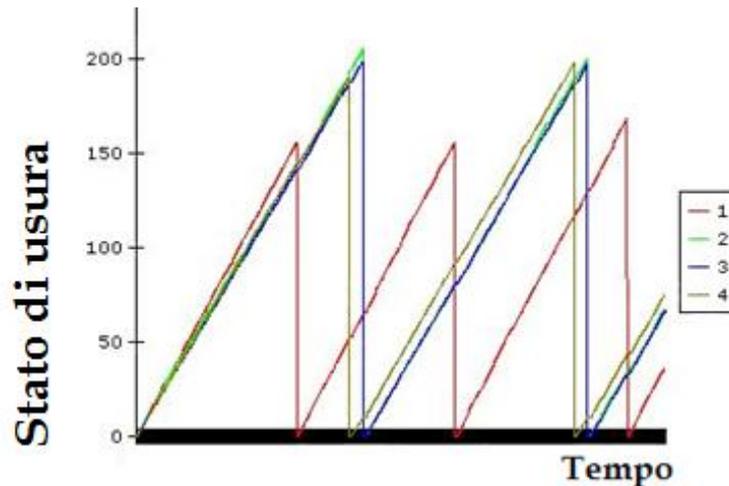


Figura 140 Andamento dell'usura nel secondo scenario

Il modello, quindi, fornisce dei risultati congruenti a quelli attesi, suggerendo un corretto dimensionamento delle soglie in funzione dei rapporti dei costi di manutenzione e di fermo macchina.

Tra gli sviluppi futuri del modello di ottimizzazione è stata presa in considerazione anche l'idea di studiare, in maniera più approfondita, l'influenza dei costi sulle soglie attraverso l'utilizzo di un parametro adimensionale, ottenuto confrontando l'ammontare di un determinato costo con uno di riferimento, scelto. L'analisi parametrica si baserebbe sulla variazione del parametro adimensionale, costruito di volta in volta tra il costo di cui si analizza l'influenza ed il costo di riferimento, a partire da una configurazione di base del modello, per capire e spiegare il motivo di particolari comportamenti delle soglie e le interazioni tra queste. Le simulazioni, poi, con i valori delle soglie ottenuti di volta in volta, consentirebbero anche di mettere a confronto le varie configurazioni in termini di numero e tipologie di interventi.

L'ottimizzazione del modello consente, dunque, di governare nella maniera più efficiente possibile il complesso sistema integrato produzione -

manutenzione perseguendo l'obiettivo di ridurre al minimo il costo globale di manutenzione, dato dalle spese di manutenzione vere e proprie e dai costi di indisponibilità.

Conclusioni e sviluppi futuri

Il modello di simulazione parametrico sviluppato è in grado di garantire un laboratorio virtuale dove eseguire esperimenti utili alla comprensione del comportamento non solo di un sistema produttivo generico, ma soprattutto delle attività manutentive ad esso collegate ed integrate. Tutto ciò dal punto di vista dei costi sostenuti e dei benefici ottenibili.

È nato in risposta all'esigenza del Facility Management verso l'integrazione e, quindi, l'ottimizzazione di più ambienti. Attraverso questa tipologia di modelli, combinati con opportuni database, infatti, è possibile rappresentare diverse realtà aziendali aggiornando e modificando le principali informazioni rappresentative del sistema in esame (come i tempi di lavorazione, il numero e la tipologia di risorse, le soglie, la tipologia di monitoraggio e di prodotti etc...). La simulazione guidata dai dati, quindi, costituisce una tecnica preziosa qualora, come nel caso analizzato, sia importante simulare due attività di lavoro diverse, ma complementari e dipendenti tra loro, il tutto per supportare e/o rafforzare le decisioni relative all'impianto analizzato.

Nonostante l'eterogeneità emersa dalle ricerche e dagli studi effettuati in ambito manutentivo è stato possibile, poi, trovare una componente comune in molti lavori: l'esigenza di ridurre i costi manutentivi attraverso problemi di ottimizzazione in grado di rappresentare non solo i costi diretti della manutenzione stessa, ma anche il forte legame tra questi ed i costi indotti a livello produttivo. Il costo di manutenzione negli impianti industriali è stato, infatti, stimato intorno al 15-40% (una media del 28%) dei costi totali di produzione e la quantità di denaro che le aziende spendono ogni anno per la manutenzione può essere paragonato al reddito netto guadagnato. [75] I tassi di utilizzo delle macchine nei sistemi di produzione moderni sono di gran lunga superiori a quelli dei sistemi tradizionali ed è, quindi, naturale che le prestazioni del sistema siano fortemente influenzate dallo stato dei macchinari e dalle azioni di manutenzione intraprese. Pertanto, è importante

capire le implicazioni di un dato piano di manutenzione su un sistema prima di una sua implementazione. Trovare, ad esempio, la sequenza migliore di operazioni di manutenzione per ciascun componente durante tutto l'orizzonte di pianificazione, sotto opportuni vincoli (di disponibilità, di affidabilità, di budget, etc) ed obiettivi, può aiutare a risolvere questo problema. È emerso, infine, anche l'interesse nella rilevazione e nella gestione delle informazioni ottenute in tempo reale relative allo stato di salute dei macchinari e questo grazie alle innovazioni in ambito tecnologico dei sensori di rilevamento. Di conseguenza si è spostata l'attenzione sulla politica manutentiva su condizione CBM, che a differenza di quella predittiva, è in grado di sfruttare i dati provenienti dal monitoraggio relativo allo stato di salute dei dispositivi per programmare le routine di manutenzione.

Il modello di simulazione parametrico proposto costituisce uno strumento attraverso il quale è facile trovare risposta a svariate esigenze: è possibile, infatti, rappresentare ed osservare le funzionalità di un sistema produttivo, il comportamento di un generico impianto rispetto al suo deterioramento nel tempo, l'interazione tra attività di diversa natura e la gestione di una politica di manutenzione su condizione multisoglia.

L'estrema flessibilità e adattabilità del modello ne consentono l'applicazione in moltissimi scenari aziendali differenti: una sua eventuale rimodulazione in virtù di quelle che sono le peculiarità tipiche di ciascun sistema produttivo e manutentivo di riferimento risulta semplice sia da definire che da gestire. Ad esempio, una possibile evoluzione del modello potrebbe essere la definizione di un sistema produttivo di tipo Job Shop, in cui gli elementi che attraversano la linea non seguono più la stessa sequenza rigida di operazioni, ma ciascuna tipologia di prodotto è definito da uno specifico ciclo produttivo. Di conseguenza, si potrebbe indagare, dal punto di vista delle attività manutentive, sulla configurazione di un sistema in parallelo.

Un'altra importante evoluzione prevista per il modello realizzato è, poi, una sua applicazione ad un caso reale aziendale. Ciò che è stato creato, infatti,

rappresenta uno strumento generico per il miglioramento delle performance aziendali che deve, quindi, essere customizzato, implementato ed integrato in uno specifico contesto aziendale per poter essere apprezzato e valorizzato.

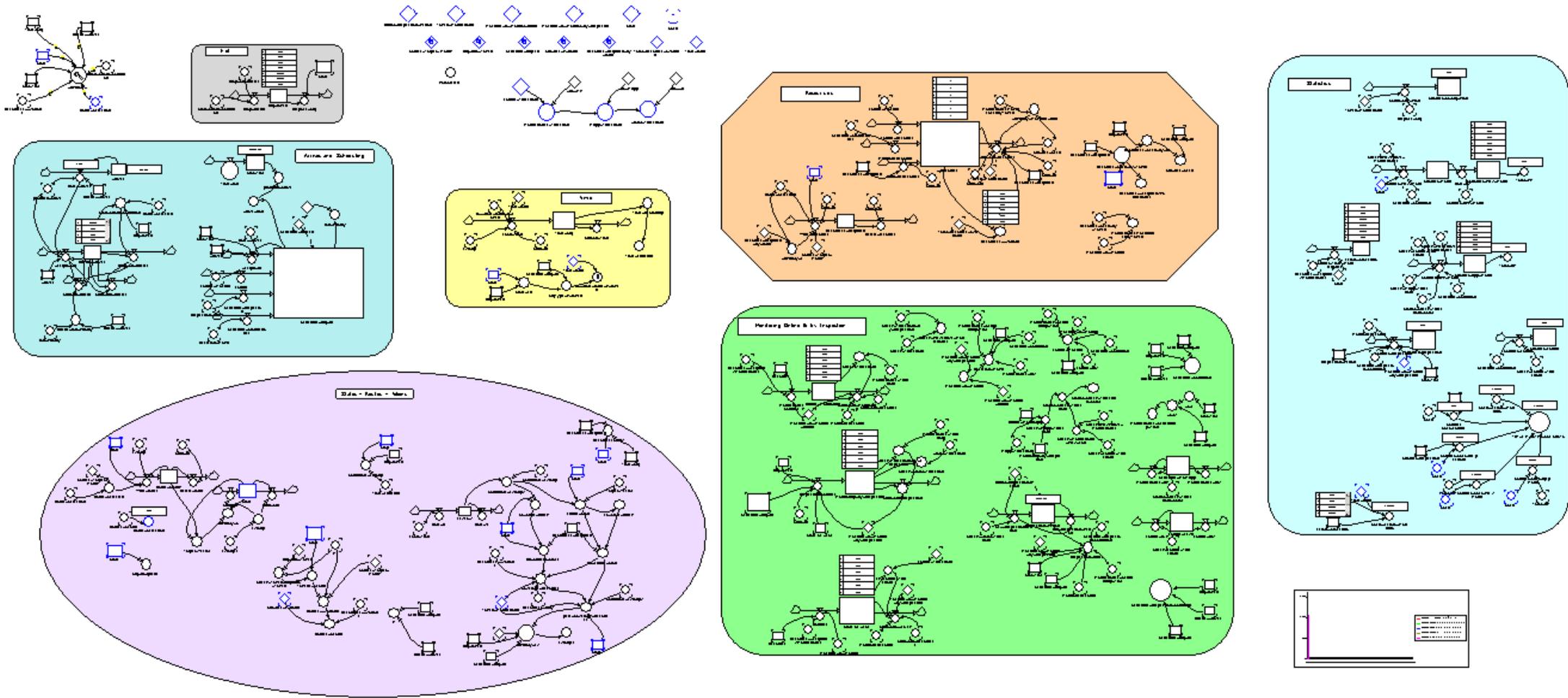
In questa prima versione del modello, inoltre, è stato preso in considerazione un ambiente dinamico deterministico sia dal punto di vista produttivo che manutentivo: i tempi sono fissi e noti a priori, è stata prevista una soglia di guasto e l'incremento di usura è stato ipotizzato fisso, costante e con un aumento lineare nel tempo. Per una versione futura è, certamente, da prendere in considerazione la simulazione di un ambiente aleatorio in cui, ad esempio, il guasto di una macchina è, sì, legato all'usura del componente ma il cui tempo di accadimento è una variabile casuale. In questo modo lo stesso concetto di soglia di guasto perderebbe di significato.

Ulteriori modifiche potrebbero riguardare le ipotesi di base del modello:

- la molteplicità delle risorse.
- la natura dei costi: non più fissi, ma anche variabili.
- le regole di schedulazione degli ordini di manutenzione e produzione (ad esempio potrebbe essere considerata, in accordo con le risorse disponibili, una possibile contemporaneità di particolari attività di manutenzione).

Infine, durante la realizzazione del modello, si è delineata un'altra possibile ed importante applicazione: abbinato ad un altro modello di ottimizzazione VRP (Vehicle Routing Problem), esistente e validato, fornirebbe soluzioni di pianificazione del miglior percorso degli interventi manutentivi su più siti. Per cui oltre ad avere informazioni di quando e quali risorse è necessario mantenere, si potrebbero ottenere, in questo modo, informazioni relative ai percorsi in grado di generare il minor costo logistico.

Modello di Simulazione Parametrico per le Operations negli Impianti Industriali



Bibliografia

- [1] Norma EN 15221-1:2007 "Facility Management-Terms and definitions"
- [2] Regterschote Becker, 1988. "Facilitymanagement in changing organizations", Proceedings of the International Symposium on Property Maintenance Management and Modernization, Vol.1.
- [3] Cotts D. and Lee M. (1992), The facility management handbook, American Management Association, New York.
- [4] Barret B. (1996), Facilities management: towards best practice, Blackwell Science Ltd., Oxford.
- [5] Alexander K. (1996), Facilities management: theory and practice, E&FN Spon, New York.
- [6] Danny Shiem-Shin Then, (1999) "An integrated resource management view of facilities management".
- [7] Barry Varcoe, (2000) "Implications for facility management of the changing business climate".
- [8] Curcio S. (2003), Lessico del facility management, Il Sole 24 Ore, Milano.
- [9] Chase R., Jacobs R., Aquilano N., Grando A. and Sianesi A. (2004), Operations Management nella produzione e nei servizi, McGraw-Hill, Milan.
- [10] Nellore R. and Soderquist K. (2000), "Strategic outsourcing through specifications", Omega.
- [11] Jennifer W. Keller, Chris Keller, Managerial perception of service innovation in facility management organizations 2012 Journal of Facilities Management VOL.3 N 2 PP 125 – 144
- [12] Sarich Chotipanich, Veerason Lertariyanun, (2011) "A study of facility management strategy: the case of commercial banks in Thailand", Journal of Facilities Management, Vol. 9 Iss: 4, pp.282 - 299

- [13] ,Bev Nutt, Linking FM practice and research, *Facilities* Volume 17 · Number 1/2 · January/February 2006 · pp. 11–17
- [14] Linda K.*et al.* ,The principles and practice of facilities maintenance in Botswana *Journal of Corporate Real Estate* Vol. 13 No. 1, 2011pp. 48-63
- [15] F. De Toni, Andrea Fornasier and Fabio Nonino, Organizational Models for Non-Core Processes Management: A Classification Framework
- [16] Christian Coenen, Daniel von Felten and Mirjam Schmid ,Managing effectiveness and efficiency through FM blueprinting *Facilities* Vol. 29 No. 9/10, 2011 pp. 422-436
- [17] Roberto Cigolini, Giovanni Miragliotta and Margherita Pero , A road-map for outsourcing facilities-related services in SMEs, , *Facilities* Vol. 29 No. 11/12, 2011, pp. 445-458
- [18] Yu Ma and Kecheng Liu , Impact Analysis of Facilities Management Outsourcing –through a Case Study of Cisco HQ Building, , World Congress on Intelligent Control and Automation July 6-9 2010, Jinan, China.
- [19] Steve Burdon, Ajay Bhalla, Outsourcing Engineering and Facilities Management,*European Management Journal* Vol. 23, No. 5, pp. 576–582, 2005 Elsevier..
- [20] Howard, D.L. (2002), “Management speak in facilities management”, *Critical Quarterly*, Vol. 44 No. 4, pp. 25-31.
- [21] Neil Usher ,Outsource or in-house facilities management: The pros and cons, , *Journal of Facility Management*,2004 , vol 2, pp. 351-359
- [22] Linda Tay, Facilities management: a “Jack of all trades”? 2001, *Facilities* volume 19(10): 7 emerald publishing- oct 1, 2001
- [23] Linda tay and Joseph T.L. Ooisi, Facilities management: lost, or regained?2012 *Facilities* Volume 19 . Number 10 . 2001 . pp. 357±362
- [24] Tomi Ventovuori, Tero Lehtonen, Anssi Salonen, Suvi Nenonen, (2007),"A review and classification of academic research in facilities management", *Facilities*, Vol. 25 Iss: 5 pp. 227 – 237 ,

- [25] Roberto Cigolini, Stefano Valentini, Angelo Nicola Villa; Facility management e global service integrato, MANUTENZIONE, Tecnica e Management - MARZO 2005
- [26] M. K. Kurdi, A.H. Abdul-Tharim *et al* ,Outsourcing in Facilities Management- A Literature Review. *Procedia Engineering* 20 (2011) 445 – 457, Elsevier
- [27] Cristina Machado Guimarães José Crespo de Carvalho , Outsourcing in Health Care Sector – A State of the Art Review, *RIRL 2010 - Bordeaux, Sept 30, Oct 1st 2010*
- [28] K Lennerts, J Abel, U Pfründer, V Sharma ,Step-by-step process analysis for hospital facility management - Facilities, 2005
- [29] CRESME (2012). Il mercato pubblico dei servizi di facility management: multi servizio e global service. Manuale Operativo
- [30] Lacity, M. and Hirschheim, R. (1993b) *Information systems outsourcing*. Wiley, New York.
- [31] McFarlan, F.W. and Nolan, R.L. (1995) How to manage an IT outsourcing alliance. *Sloan Management Review* Winter, 9–22.
- [32] Barthélemy, J. and Geyer, D. (2000) IT outsourcing: findings from an empirical survey in France and Germany. *European Management Journal* 19(2), 195–202.
- [33] Kakabadse, A. and Kakabadse, N. (2002) Trends in outsourcing. *European Management Journal* 20(2), 189–198.
- [34] Quinn, J. and Hilmer, F. (1994) Strategic outsourcing. *Sloan Management Review* Summer, 43–55.
- [35] Saunders, C.S., Gebelt, M. and Hu, Q. (1997) Achieving success in information systems outsourcing. *California Management Review* 39(2), 63–79.
- [36] Alexander, M. and Young, D. (1996b) Strategic outsourcing. *Long Range Planning* 29, 116–119.

- [37] Bettis, R., Bradley, S. and Hamel, G. (1992) Outsourcing and industrial decline. *Academy of Management Executive* 6(1), 7–22.
- [38] Khosrowpour, M., Subramanian, G. and Gunterman, J. (1995) Outsourcing organizational benefits and potential problems. In *Managing Information Technology Investments with Outsourcing*, ed. M. Khosrowpour, pp. 244–268. Idea Group Publishing.
- [39] Aubert, B.A., Patry, M. and Rivard, S. (1998) Assessing the risk of IT outsourcing, Working paper, 98s-16, May 1998, Cirano, Montréal.
- [40] Sven A. Teichmann (2008), “FM Market Size in Europe”
- [41] European outsourcing survey – Ernst & Young’s 2008.
- [42] M.Sciarelli .“Il Facility Management: nuovi modelli di gestione dei servizi generali”
- [43] IFMA (2012), “Caratteristiche e prospettive del mercato del FM in Italia”
- [44] Sandro Turci, “Il sistema informativo di manutenzione nel Facility Management”
- [45] Guido Guizzi, Daniela Miele, Elpidio Romano, “Integration between Facility Management and Service Supply Network Management: M-RFIDFM system”; Recent Advances in Automatic Control, Modelling and Simulation.
- [46] Oliviero Tronconi, “Il Mercato Italiano del Facility Management”, ISS Italia-Facility Management
- [47] A.Ancarani, G.Capaldo,T.Allegra. Il Facility Management nel settore sanitario: un approccio multicriteriale per la scelta dei fornitori.
- [48] Paolo Mariani, Giampiero Data; “Outsourcing per e con la sanità pubblica”.
- [49] Osservatorio Nazionale del Facility Management (2010), “Il boom del FM in Italia nel primo decennio del XXI secolo”.
- [50] F.A.R.E. (Federazione delle Associazioni Regionali Economi e Provveditori della Sanità), “Quaderni dell’economista- Il FM in sanità”

- [51] M. Fregonara Medici , “Analisi delle manutenzioni come elemento di HTA”,
- [52] Ilfryn Price, Business critical FM, Facilities, Volume 22 · Number 13/14 · 2004 · pp. 353–358
- [53] Tero Lehtonen, Collaborative relationships in facility services, Leadership & Organization Development Journal Vol. 27 No. 6, 2006 pp. 449-464
- [54] Sarich Chotipanich, Bev Nutt; Positioning and repositioning FM, Facilities Vol. 26 No. 9/10, 2008 pp. 374-388 Emerald Group
- [55] Zehra Waheed and Scott Fernie, Knowledge based facilities management; Facilities Vol. 27 No. 7/8, 2009 pp. 258-266
- [56] Sutapa Das, Kim Leng Poh And Michael Yit Lin Chew; Standardizing FM knowledge acquisition when information is inadequate; Facilities Vol. 27 No. 7/8, 2009 pp. 315-330
- [57] Anne Tolman, Tapio Matinmikko, Veli Möttönen, Kauko Tulla and Pentti Vähä; The benefits and obstacles of mobility technology in FM service procurement, Facilities Vol. 27 No. 11/12, 2009 pp. 445-456
- [58] Sarel Lavy, John A. Garcia, and Manish K. Dixit ; Establishment of KPIs for facility performance measurement: review of literature Facilities Vol. 28 No. 9/10, 2010 pp. 440-464
- [59] Igal M. Shohet, Key performance indicators for maintenance of health-care facilities, Facilities Vol 21 Number ½ 2003 pp. 5-12
- [60] Vittorio Cesarotti and Bruna Di Silvio, Quality management standards for facility services in the Italian health care sector, International Journal of Health Care Quality Assurance Vol. 19 No. 6, 2006 pp. 451-462.
- [61] Georgiadis P., Michaloudis Charalampos, 2011 “Real-time production planning e control system for a job-shop manufacturing: A system dynamics analysis” European Journal of Operational Research, Production, Manufacturing and Logistics, pp.94-104.
- [62] P. Zoppoli, G. Guizzi, M. Gallo, “Manutenzione su condizione: modellazione e ottimizzazione”, Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e

- della Produzione, Dottorato in Tecnologie e Sistemi di Produzione, Università Degli Studi Di Napoli Federico II , Facoltà Di Ingegneria.
- [63] Bruno G. 2005 “Operations Management Modelli e metodi per la logistica” Edizioni Scientifiche Italiane.
- [64] R. Sacco, “Costruzione di un modello di simulazione in SD per il controllo operativo di produzione”, Tesi Magistrale in Ingegneria Gestionale, Anno Accademico 2011/2012, Università degli studi di Napoli “Federico II”, Dipartimento di Ingegneria dei materiali e della produzione.
- [65] M. Padovani, “La manutenzione negli impianti industriali”, Tesi Triennale, Anno Accademico 2010/2011, Università Degli Studi Di Padova, Facoltà Di Ingegneria.
- [66] E. Malamura, T. Murata, “Simulation Based Plant Maintenance Planning with Multiple Maintenance Policy and Evaluation of Production Process Dependability”, Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2012 Vol II, IMECS 2012, March 14-16,2012, Hong Kong.
- [67] Q. Zhu, H. Peng, G. J. V. Houtum, “ A Condition-Based Maintenance Policy for Multi-Component Systems with a High Maintenance Setup Cost ”, Beta Workin Paper series 400, December 2012.
- [68] Z. Yang, D. Djurdjanovic, J. Ni, “Maintenance scheduling in manufacturing system based on predicted machine degradation”,J Intell Manuf. 2008.
- [69] K. A. Kaiser, N. Z. Gebraeel, “Predictive Maintenance Management Using Sensor-Based Degradation Models”, 2009.
- [70] Charles, A.S., Floru, I.R., Azzaro-Pantel, C., Pibouleau, L., Domenech, S.,“Optimization of preventive maintenance strategies in a multipurpose batch plant: application to semiconductor manufacturing”, Computers and Chemical Engineering, v 27, n 4, April 2003, p 449-467.

- [71] Sawhney, R., Martinis, P., Murthi, V., “Simulation based approach for determining maintenance strategies”, International Journal of COMADEM, v 7, n 3, July 2004, p 32-41.
- [72] Adzakpa, K.P., Adjallah, K.H., Yalaoui, F., “On-line maintenance job scheduling and assignment to resources in distributed systems by heuristic-based optimization”, Journal of Intelligent Manufacturing, v 15, n 2, April 2004, p 131- 140.
- [73] Ying, B., Dan, B., Zhang, H., “Optimization model by integrating preventive maintenance planning and production scheduling”, Chinese Journal of Mechanical Engineering, v 41, n 3, March 2005, p 226-228.
- [74] Li, W., Zuo, M.J., “Joint optimization of inventory control and maintenance policy”, 2007 Annual Reliability and Maintainability Symposium, 22-25 January 2007, Orlando, FL, USA.
- [75] M. Savasar, “Maintenance Management and Modeling in Modern Manufacturing System”, 2006.
- [76] Robert E. Shannon, 1998 “Introduction To The Art And Science Of Simulation”.
- [77] Kelton, W. D., D. A. Sadowski, and R.P. Sadowski, “Simulation with ARENA”, 1998, WCB/MaGraw-Hill.
- [78] M.G. Singh, L.T. Massuyes, “Decision Support Systems and Qualitative Reasoning Hardcover ”,1991.
- [79] S. Cho, “A distributed time-driven simulation method for enabling real time manufacturing shop floor control”, Computers & Industrial Engeneering (2005).
- [80] G. Guizzi, “Quick response nella pianificazione della produzione: applicazione del bootstrap nella simulazione event-driven”, Dottorato di Ricerca in Ingegneria Aerospaziale, Navale e della Qualità, XVIII Ciclo di Dottorato, Università Degli Studi Di Napoli “Federico II” , Facoltà Di Ingegneria.

- [81] J. Wya, S. Jeong, Byung-In Kim, J. Park, J. Shin, H. Yoon, S. Lee, “A data-driven generic simulation model for logistics-embedded assembly manufacturing lines”, *Computers & Industrial Engineering*, 2010.
- [82] S. Bergmann, S. Strassburger, “Challenges for Automatic Generation of Simulation Models for Production System”.
- [83] M. Pidd, “Guidelines for the design of data driven generic simulators for specific domains”, *Simulation* 59 (4) (1992) 237–243.
- [84] C. McLean, A. Jones, T. Lee, F. Riddick, “An architecture for a generic data driven machine shop simulator”, in: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, 2002, pp. 1108–1116.
- [85] J. Wang, Q. Chang, G. Xiao, N. Wang, S. Li, “Data driven production modeling and simulation of complex automobile general assembly plant”, *Computers Industry*, 2011.
- [86] K. Mertins, M. Rabe, P. Gocev, “Integration of factory planning and ERP/MES systems: adaptive simulation models”, in: *IFIP International Federation for Information Processing, Lean Business Systems and Beyond*, 2008, 185–193.
- [87] S. Lee, H. Cho, M. Jung, “A conceptual framework for the generation of simulation models from process plans and resource configuration”, *International Journal of Production Research* 38 (4) (2000) 811–828.
- [88] Y.J. Son, R.A. Wysk, “Automatic simulation model generation for simulation-based, real-time shop floor control”, *Computers in Industry* 45 (3) (2001) 291–308.
- [89] Y.J. Son, R.A. Wysk, A.T. Jones, “Simulation-based shop floor control: formal model, model generation and control interface”, 2002
- [90] Y.J. Son, R.A. Wysk, A.T. Jones, “Automatic generation of simulation models from neutral libraries:an example”, *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*.

- [91] B. Tjahjono, R. Ferná ndez, “Practical approach to experimentation in a simulation study, in: Proceedings of the Winter Simulation Conference”, 2008, pp. 1981–1988.
- [92] K. Musselman, J. O’Reilly, S. Duket, “The role of simulation in advanced planning and scheduling”, Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference, E. Yücesan, C.-H. Chen, J. L. Snowdown e M. Charnes, eds.
- [93] K. H. Concannon, K. I. Hunter e J. M. Tremble; “Simul8-Planner simulationbased planning and scheduling”, Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference S. Chick, P. J. Sánchez, D. Ferrin e D. J. morrice, eds.
- [94] J. H. Marvel, M. A. Schaub e G. Weckman; “Validating the capacity planning process and flowline product sequencing through simulation analysis”; Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference M. E. Kuhl, N. M. Steiger, F. B. Armstrong, and J. A. Joines, eds.
- [95] Appleton Company, “Integrated Information Support System: Information Modeling Manual, IDEF1-Extended (IDEF1X)”, Wright Patterson Air Force Base, Fairborn, OH, 1985
- [96] W. Kuehn, C. Draschba; “Simulation based job shop production analyser”; Proceedings 18th European Simulation Multiconference Graham Horton (c) SCS Europe, 2004
- [97] W. Kühn, “Digital Factory –Simulation enchancing the product and production engineering process ”; Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference.
- [98] B. Kádár, A. Pfeiffer, L. Monostori, “Discrete event simulation for supporting production planning and scheduling decisions in digital factories”.
- [99] Prof. M. Roma, “Simulazione”, Cap.2, Materiale didattico (Parte H), Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale, Corso di Sistemi di servizio e Simulazione, Anno Accademico 2012-2013.

- [100]Prof. Ing. E. Romano, “Modellazione e Simulazione dei Sistemi Complessi”, Corso di Dottorato: “L’uso della simulazione dinamica per la definizione di modelli di supporto alle decisioni”.
- [101]D. E. Mollona, “Modellazione, Simulazione e Apprendimento: l’approccio System Dynamics al Controllo della Strategia”
- [102]Greasley A., “A Comparison Of System Dynamics and Discrete Event Simulation”, Aston Business School, Aston University, Birmingham, United Kindom
- [103]A. Karlsson, T. Persson, “Powersim, A short introduction”, System Analysis Group, 1998, Uppsala University.
- [104]A. Sweetser, “A Comparison of System Dynamics (SD)and Discrete Event Simulation (DES) ”.

Ringraziamenti

Desidero innanzitutto ringraziare la professoressa L. C. Santillo, per i preziosi insegnamenti e per la grande disponibilità dedicatami. Un caro e profondo grazie al prof. R. De Carlini, per aver creduto in me e per aver ispirato il mio lavoro con le sue parole. Ringrazio, inoltre, il mio Tutor, il prof. G. Guizzi, che con il suo ingegno, la sua passione e la sua perspicacia mi ha guidato durante questi tre anni di dottorato. Ringrazio Daniela Montella, l'amica di sempre: altruista e presente, anche a distanza! Infine, desidero ringraziare con infinita gratitudine le persone che in questi anni hanno vissuto le mie ansie, le mie preoccupazioni e le mie difficoltà: mia madre Orietta, mio padre Gennaro, mia sorella Simona ed il mio Amore Roberto. E' grazie al vostro continuo e costante supporto che sono riuscita ad arrivare dove sono e quindi, è a voi che sento di dedicare, dal profondo del mio cuore, questo lavoro di Tesi.