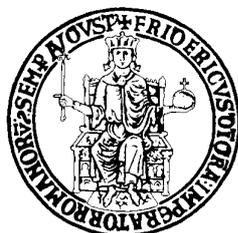


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II

FACOLTÀ DI INGEGNERIA



Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e della Produzione

Dottorato in Tecnologie e Sistemi di Produzione - XXI Ciclo

Tesi di Dottorato

# Manutenzione su condizione: modellazione e ottimizzazione

Coordinatore:  
Prof. Ing. Giuseppe Giorleo

Tutor:  
Prof. Ing. Tina Santillo

Dottorando:  
Ing. Pasquale Zoppoli

*Questo lavoro, per quanto di buono dovesse comprendere, deve la sua riuscita alla guida preziosa e tenace della prof.ssa Tina Santillo, allo spunto iniziale e al supporto generoso di Guido Guizzi, ai brillanti contributi di Alessandro Cioffi, Gennaro Bisesti, Gianluca D'Aniello, Pasquale Barbaro e Giuseppe Naviglio, giovanissimi ingegneri che ho avuto il piacere di accompagnare fuori dalle mura accademiche.*

*L'esperienza del dottorato non sarebbe stata così interessante e piacevole senza la verve di Teresa Murino, la vivacità intellettuale di Mosè Gallo, la franchezza di Elpidio Romano e la simpatia di Luigi Guerra.*

*Questo lavoro, traguardo importante del mio percorso formativo, deve la sua esistenza alla partecipe comprensione di Michela e all'insostituibile sostegno di papà.*

*Grazie a tutti.*

# INDICE

<b>INDICE</b>	<b>2</b>
<b>SINTESI DEL LAVORO</b>	<b>6</b>
Premessa	6
Scelte modellative	6
Il modello di simulazione	9
Ottimizzazione e analisi parametriche	10
Conclusioni	15
<b>1. LA MANUTENZIONE SU CONDIZIONE</b>	<b>17</b>
1.1 LA MANUTENZIONE INDUSTRIALE	17
1.1.1 Evoluzione della manutenzione	18
1.1.2 Storia delle politiche manutentive	21
1.2 APPROCCI MODERNI ALLA MANUTENZIONE	23
1.2.1 Total Productive Maintenance	24
1.2.2 Reliability Centered Maintenance	27
1.3 LE POLITICHE MANUTENTIVE	30
1.3.1 La Manutenzione Reattiva	30
1.3.2 La Manutenzione Preventiva	31
1.3.3 La Manutenzione Secondo Condizione	33
1.3.4 La Manutenzione Proattiva	34
1.4 ANALISI DEI COSTI DI MANUTENZIONE	35
1.4.1 Il Costo di Fermo Macchina	36
1.5 LA MANUTENZIONE SU CONDIZIONE	41
1.5.1 CBM: Le Ragioni dell'Introduzione	41
1.5.2 Contesto Teorico di Riferimento	43
1.5.3 La CBM in Italia	46
1.5.4 Vantaggi e svantaggi della CBM	49

<b>2.</b>	<b>STATO DELL'ARTE E SCELTE MODELLATIVE</b>	<b>51</b>
2.1	PREMESSA	51
2.1.1	Applicazione dei modelli matematici alla manutenzione	52
2.1.2	Quadro dei lavori analizzati	53
2.2	MODELLI MATEMATICI E SIMULATIVI	57
2.3	MODELLI DISCRETI E MODELLI CONTINUI PER LO STATO DELL'ASSET	58
2.3.1	I modelli discreti	59
2.3.2	Multi parametro o mono parametro	61
2.3.3	Parametro di usura o di resistenza	62
2.3.4	Incrementi statistici o deterministici	63
2.3.5	I processi gamma	65
2.4	INTERFACCIAMENTO CON LA PRODUZIONE	66
2.4.1	Aumento continuo dell'usura	67
2.5	LE ISPEZIONI	68
2.5.1	Ispezioni perfette o imperfette	69
2.5.2	Ispezioni su sistemi parzialmente conoscibili	70
2.6	LE SOGLIE E LA MANUTENZIONE OPPORTUNA	71
2.6.1	Le prossime ispezioni	72
2.6.2	La manutenzione opportuna	74
2.7	I GUASTI	76
2.7.1	I guasti in seguito ad ispezione	79
2.7.2	La probabilità di guasto	79
2.8	DISTINZIONE TRA MANUTENZIONE E ISPEZIONE	82
2.8.1	Il processo di sola ispezione	82
2.8.2	Il processo di manutenzione preventiva	84
2.8.3	Il processo di manutenzione correttiva	85
2.8.4	Ispezione e manutenzione: precisazioni	86
2.9	SISTEMI IN SERIE	87
2.10	IL BUFFER INTEROPERAZIONALE	88
<b>3.</b>	<b>IL MODELLO DI SIMULAZIONE</b>	<b>91</b>
3.1	PREMESSA	91
3.1.1	Arena e Siman	91
3.2	IL METAMODELLO	94
3.2.1	Difficoltà incontrate nel modellare la situazione	94
3.2.2	Il codice VBA	97

3.2.3	Due modelli in uno	100
3.2.4	La tripla identità degli oggetti della manutenzione	102
3.2.5	Il processo produttivo	103
3.2.6	La logica della manutenzione	104
<b>3.3</b>	<b>LA CREAZIONE DELLE ENTITÀ</b>	<b>106</b>
3.3.1	Il controllo del sistema	110
3.3.2	Fase di ispezione	119
3.3.3	Fase di manutenzione	121
3.3.4	Assegnazione della prossima ispezione	123
3.3.5	Contabilizzazione dei costi	124
3.3.6	Creazione diario	128
<b>3.4</b>	<b>LA LOGICA DELLA PRODUZIONE</b>	<b>129</b>
3.4.1	L'arrivo dei pezzi e l'uscita	129
3.4.2	La modularità	130
3.4.3	Lo schema di aumento dell'usura	133
3.4.4	I buffer	139
3.4.5	La risorsa fittizia	140
3.4.6	Possibili modifiche manuali al processo produttivo	141
<b>3.5</b>	<b>LA RACCOLTA DEI DATI</b>	<b>142</b>
3.5.1	Contatori	142
3.5.2	Statistiche	143
<b>4.</b>	<b>OTTIMIZZAZIONE E ANALISI PARAMETRICA</b>	<b>146</b>
<b>4.1</b>	<b>L'OTTIMIZZAZIONE CON ARENA</b>	<b>146</b>
4.1.1	Il metodo di ottimizzazione	147
4.1.2	Optquest	151
4.1.3	Tabu search	152
4.1.4	Gli algoritmi genetici	153
4.1.5	Scatter search	154
<b>4.2</b>	<b>PREPARAZIONE ALL'OTTIMIZZAZIONE</b>	<b>155</b>
4.2.1	Modifiche al modello	155
4.2.2	La configurazione base	157
4.2.3	I parametri	159
4.2.4	Tempi di ottimizzazione	164
<b>4.3</b>	<b>ANALISI PARAMETRICA</b>	<b>165</b>
4.3.1	Influenza del costo di ispezione	166
4.3.2	Influenza del costo di guasto	173
4.3.3	Influenza del costo di macchina libera	185
4.3.4	Influenza della velocità di deterioramento	193
4.3.5	Influenza del costo di mantenimento a buffer	201
4.3.6	Influenza del numero di macchine	207

<b>APPENDICE A: UN'APPLICAZIONE SU UNA LINEA SMT (SURFACE MOUNT TECHNOLOGY)</b>	<b>215</b>
Premessa	215
Stato dell'arte	217
L'approccio proposto	219
La simulazione	222
Risultati	228
<b>APPENDICE B: UNA PROPOSTA DI APPLICAZIONE PER LA MANUTENZIONE STRADALE</b>	<b>231</b>
<b>ELENCO ABBREVIAZIONI</b>	<b>234</b>
<b>INDICE DELLE FIGURE</b>	<b>235</b>
<b>INDICE DELLE TABELLE</b>	<b>239</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>241</b>

## **SINTESI DEL LAVORO**

### **Premessa**

La manutenzione su condizione rappresenta il presente e il futuro della manutenzione, in quanto mira alla profonda conoscenza tecnologica del processo e dei beni da mantenere al fine di promuovere le necessarie azioni di intervento manutentivo conseguendo il minimo costo globale. Questo è dato dalla somma dei costi propri di manutenzione (legati cioè alla realizzazione della manutenzione) e ai costi indotti (che sono invece dovuti all'indisponibilità del sistema).

La ricerca scientifica ha mostrato un grande interesse in questo campo e il dibattito in materia è fervente. Numerosi sono gli studi che propongono differenti approcci al problema tanto da stimolare analisi e classificazioni dei diversi approcci.

Caratteristica comune a tutti i modelli, sia nel caso di approccio matematico che simulativo, è la determinazione delle soglie di manutenzione che individuano a quale valore del parametro di usura scelto come riferimento debba essere effettuata una determinata azione (ispezione, manutenzione preventiva, ecc.).

Il presente lavoro affronta proprio il problema della modellazione di un sistema di manutenzione su condizione multisoglia (Multithreshold CBM: Condition Based Maintenance) con approccio simulativo.

### **Scelte modellative**

Realizzare un modello che riproduca il comportamento di un sistema produttivo complesso soggetto a manutenzione su condizione rappresenta una sfida che è stata raccolta e interpretata da molti autori in maniera diversa nel corso degli

ultimi venti anni. La complessità è legata alla presenza di parecchie variabili del problema tra loro collegate e dipendenti, quali ad esempio:

- parametri di usura dei componenti del sistema,
- leggi che regolano il deterioramento dei componenti, e quindi l'andamento dei predetti parametri nel tempo,
- numero e relazione di connessione fisica e logica tra i componenti,
- relazione tra l'usura e il guasto
- ecc.

A causa di questa complessità, ognuno degli studi proposti in questi anni si è basato su una serie di ipotesi restrittive che semplificassero il problema e ne consentissero la soluzione in maniera adeguata. Effettivamente, anche in modelli matematici abbastanza semplici da un punto di vista della capacità di rappresentare la realtà, si arriva a definire soluzioni in forma chiusa comunque difficilmente risolvibili

In questo lavoro, all'approccio matematico è stato preferito quello simulativo, che consente di sviluppare un modello di un sistema complesso con un comportamento quanto più prossimo è possibile alla realtà.

L'usura è identificata come parametro di invecchiamento caratterizzato da un andamento continuo e non decrescente nel tempo di processo del componente. Come quasi sempre proposto nella letteratura scientifica, si è deciso di modellare l'usura come un processo Gamma.

Nella maggioranza dei modelli esaminati un componente viene considerato guasto qualora il parametro di usura superi una certa soglia. Questa ipotesi appare notevolmente lontana dall'esperienza, visto che il guasto è un evento che può essere legato all'usura del componente ma il cui tempo di accadimento è una variabile casuale.

Pertanto, la probabilità di guasto è stata modellata mediante una distribuzione Weibull, legata non al tempo, come talvolta in letteratura scientifica accade di trovare, bensì al parametro d'usura, come appare più corretto dal punto di vista logico.

Il sistema produttivo oggetto di studio è caratterizzato da più macchine in serie con l'eventualità di un buffer interoperazionale, per le quali si distinguono tre soglie della manutenzione, in particolare:

- soglia di manutenzione preventiva
- soglia di manutenzione opportuna
- soglia d'allarme

Il raggiungimento della prima soglia da parte del parametro di usura impone al sistema di manutenzione di intervenire per evitare il guasto. Il raggiungimento della soglia di allarme indica la necessità di avvicinare la data della successiva ispezione per evitare che il guasto si verifichi prima di questa. La soglia opportuna è legata direttamente al fatto di avere a che fare con un sistema con più componenti in serie; infatti, in questo caso, ogni volta che il sistema viene fermato per il guasto o la manutenzione di un componente, 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 precocemente e i costi generali per la fermata del sistema che si andranno a risparmiare. Il problema può essere risolto attraverso una soglia opportuna, il cui raggiungimento indica appunto l'opportunità di effettuare la manutenzione sul componente, una volta che l'impianto si sia fermato per ripararne un altro.

Si parla qui e nel seguito di "macchine" in serie, ma si deve intendere un sistema in serie da un punto di vista "affidabilistico", cioè uno schema caratterizzato dalla seguente regola: il sistema funziona se tutti i suoi componenti funzionano oppure, in altre parole, il sistema va in guasto (non espleta più la sua funzione) se anche uno solo dei suoi componenti va in guasto (smette di funzionare).

Quindi il sistema studiato può rappresentare allo stesso modo una serie di macchine operanti su una linea produttiva (esempio: linea di montaggio continua) oppure un insieme di componenti appartenenti allo stesso sistema (impianto complesso composto da sub componenti di diverso genere: elettrici, idraulici, elettronici ecc.).

La scelta di studiare un sistema in serie è legata quindi alla necessità di rappresentare una realtà complessa con relazioni di dipendenza tra i vari componenti che compongono il sistema.

### **Il modello di simulazione**

L'approccio simulativo limita l'estensione dello studio ad un modello di  $n$  componenti, ma la semplicità del software utilizzato, Arena, permette di costruire un modello caratterizzato da interfacciamento tra produzione e manutenzione che può essere adattato a qualsiasi numero di macchine in serie. Sfruttando la semplicità con cui Arena si interfaccia con il Visual Basic, è proposta una maschera di facile comprensione che con l'inserimento di poche informazioni costruisce il modello da simulare.

All'interno del modello sono inserite due logiche distinte:

- logica della produzione;
- logica della manutenzione.

La prima affronta il vero e proprio processo produttivo che è responsabile del deterioramento delle macchine, quindi determinerà gli incrementi di usura e la probabilità che si verifichi l'evento guasto. La seconda rappresenta il processo di manutenzione caratterizzato dalle fasi di ispezione, per determinare lo stato delle macchine, e dai diversi processi di manutenzione.

Un elemento di novità del modello è rappresentato dalla contabilizzazione dei costi di macchina libera, ovvero dei costi che si generano per improduttività della macchina qualora non ricevesse materiale da lavorare. Questo consente di valutare direttamente i costi legati ai fermi macchina come costi di mancata produzione.

Il processo di produzione costruito con Arena è altamente modulare, ogni singola macchina è identificata da un sottomodulo che, ripetuto per la numerosità che si vuole dare alla serie, riproduce l'impianto di produzione.

Arena presenta un'interfaccia grafica molto semplice. Le entità, che sono i pezzi da lavorare, vengono create ad intervalli stabiliti, anche casuali, e mediante dei moduli si attribuiscono a questi le informazioni necessarie al processo produttivo. Nel modello viene lavorata una sola tipologia di pezzi. Oltre ad affrontare il reale processo di produzione, questi vengono utilizzati, in un percorso fittizio di

produzione, per determinare l'incremento di usura quando la macchina è in lavorazione e contemporaneamente la probabilità di accadimento di un guasto. L'usura è incrementata mediante un modulo "Assign" ad intervalli fissati di un minuto per accentuare la natura continua di questa e per permettere la rottura del componente anche durante una lavorazione.

L'evento guasto è deciso da un modulo "Decide" e qualora venisse determinato viene lanciato un segnale di guasto alla manutenzione.

Il modello del sistema produttivo è ulteriormente arricchito mediante l'inserimento opzionale di un buffer interoperazionale, per il quale vanno specificati costi di mantenimento e capacità di immagazzinamento.

Il processo di manutenzione è caratterizzato da ispezioni periodiche per determinare lo stato delle macchine andando a leggere il valore dell'usura determinato nella logica della produzione. Queste consentono di stabilire l'azione manutentiva, se necessaria, e la data di prossima ispezione confrontando il valore dell'usura con le soglie della manutenzione.

Ogni tipologia di intervento impegna risorse della manutenzione per un tempo stabilito dagli attributi  $t_{isp}$  e  $t_{man}$ , nel modello viene definita la disponibilità delle risorse della manutenzione, distinguendo ispettori e manutentori.

I due processi comunicano mediante scambio di informazioni e lancio/ricezione di opportuni segnali. La manutenzione deve conoscere lo stato di usura delle macchine e attraverso l'ispezione ricava questa informazione, inoltre deve accorgersi immediatamente di un guasto accidentale e intervenire prontamente.

Nel momento di effettuare un'ispezione programmata su una macchina o anche ad una fermata per guasto, tutte le macchine vengono ispezionate. Un programma scritto in Visual Basic controlla le macchine e gli attribuisce le informazioni necessarie per poter affrontare le fasi di ispezione e/o manutenzione.

### **Ottimizzazione e analisi parametriche**

Una corretta politica manutentiva dovrebbe tendere ad ottimizzare l'equilibrio tra i costi diretti e costi indiretti, in modo da minimizzare la risultante che rappresenta il costo reale di manutenzione.

In ogni realtà manutentiva si presentano nuove problematiche tecniche da risolvere. A fronte di questo tipo di problematiche l'uomo di manutenzione riesce a trovare e realizzare soluzioni più o meno rapidamente basandosi sulle proprie risorse. Non altrettanto può fare a fronte delle problematiche di tipo gestionale. Le ottimizzazioni del modello ci aiutano a comprendere quali sono i comportamenti che il sistema manutenzione deve adottare.

Sono state lanciate un gran numero di ottimizzazioni mediante Optquest per ricercare la migliore politica manutentiva per diverse configurazioni del modello. In particolare sono state fatte una serie di ipotesi semplificative sul modello riguardo il numero di macchine in serie i tempi di lavorazione e manutenzione e le voci di costi.

Il sistema sottoposto ad ottimizzazioni è caratterizzato da: una sola categoria di pezzi lavorati su quattro macchine identiche caratterizzate da stessi tempi di lavorazione e manutenzione, tutti deterministici, medesimi incrementi di usura e probabilità di guasto. inoltre la capacità del buffer è fissata nulla e la disponibilità di risorse della manutenzione illimitata.

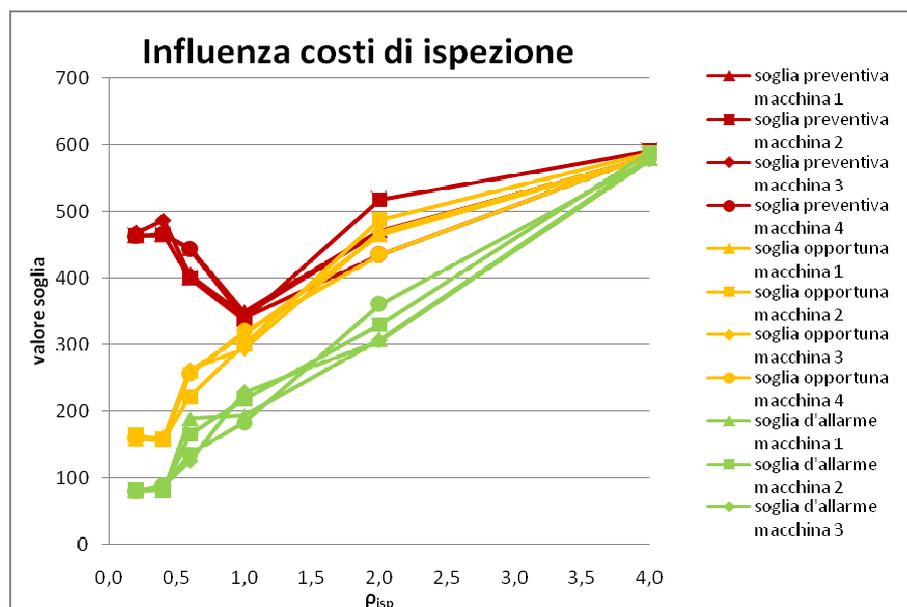
È stata fissata una configurazione base rispetto alla quale sono stati fatti variare, uno per volta, alcuni parametri del modello.

Tra questi sono stati scelti il costo di ispezione, il costo di manutenzione a guasto e il costo di macchina libera e sono stati fatti variare mediante la costruzione di un parametro adimensionale al cui denominatore viene posizionato il costo della manutenzione preventiva fissato nella configurazione base. Per ogni parametro è stata analizzato l'effetto delle variazioni di questi sulle soglie manutentive. Al termine delle ottimizzazioni sono state lanciate delle simulazioni, per alcune delle configurazioni analizzate, impostando per ogni soglia della manutenzione un valore identico per le quattro macchine, calcolato come valore medio di quelli ottenuti dalle ottimizzazioni.

L'ispezione è effettuata ad intervalli fissati, il superamento della soglia d'allarme avvicina la data di ispezione successiva.

Gli input sono stati scelti in un range che varia da un valore basso, escludendo il caso di monitoraggio continuo, ad un valore decisamente alto rappresentante una situazione di difficile monitoraggio.

Il grafico ottenuto variando i costi di ispezione mostra la convenienza a ridurre il numero di ispezioni all'aumentare di  $c_{isp}$ , questo comportamento determina un abbassamento si sicurezza della soglia di preventiva, quando il guasto, per valori elevati di  $c_{isp}$ , determina un danno economico minore le azioni per prevenirlo sono ridotte, si riducono sia gli interventi di manutenzione preventiva che quelli di opportuna.

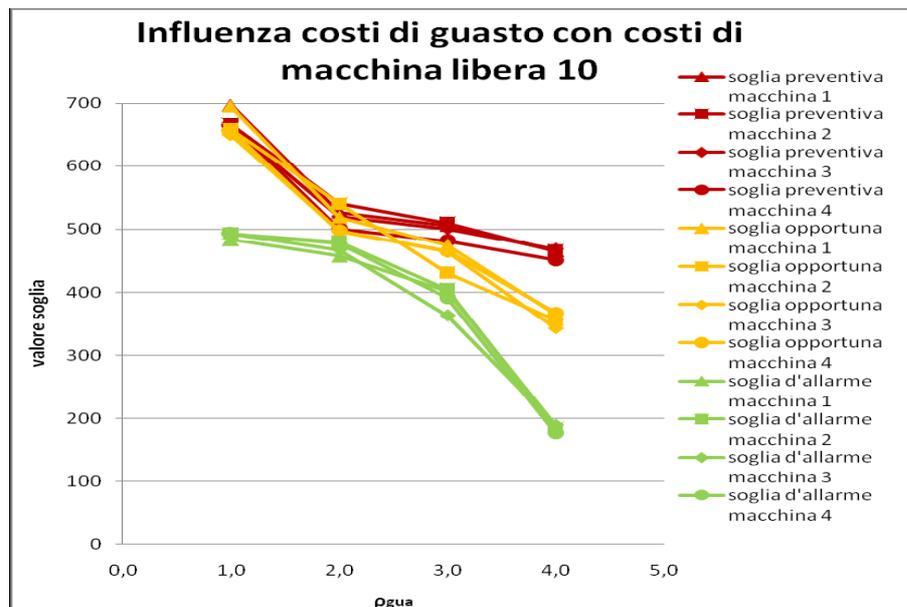


**Andamento delle soglie al variare di  $p_{isp}$**

La necessità di evitare il guasto è il motivo per cui si implementa un sistema di manutenzione su condizione.

Le ottimizzazioni non hanno restituite differenze significative sulle politiche CBM per diversi valori di  $p_{gua}$  provati, nonostante la scelta di lanciare ottimizzazioni con  $c_{gua} < c_{prev}$ . Il motivo di tale comportamento è stato attribuito all'incidenza dei costi di macchina libera sul totale dei costi di manutenzione. Impostando un valore inferiore di  $c_{mlib}$ , pari a 10 u.m., sono state lanciate altre ottimizzazioni con gli stessi dati di input escludendo il solo valore per cui il costo di guasto fosse minore del costo di manutenzione preventiva. I risultati mostrano che all'aumentare del costo di guasto vengono sfruttate in quantità maggiori le azioni della manutenzione preventiva.

Tutte e tre le soglie diminuiscono all'aumentare di  $c_{gua}$ , quando questo è pari a  $c_{prev}$  il numero di interventi è basso così come la frequenza di ispezioni.

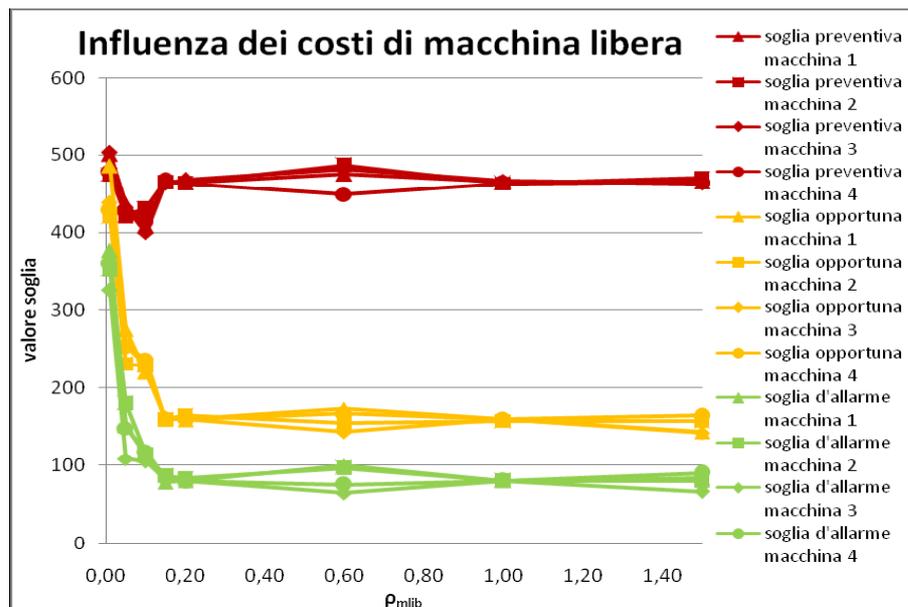


**Andamento delle soglie al variare di p\_gua con  $c_{mlib}=10$**

I costi di macchina libera si determinano quando una macchina rimane improduttiva per l'assenza di pezzi da lavorare. Le scelte fatte sul modello su tempi di lavorazione e intertempi di arrivo pezzi impongono a questo che la situazione appena descritta si verifica solo se una delle macchine della serie va in manutenzione.

Anche qui sono stati provati valori decisamente bassi, escludendo il caso di costo nullo, fino a valori quasi doppi rispetto a  $c_{prev}$ .

I costi di macchina libera aumentano il numero di manutenzioni opportune effettuate e abbassano la soglia di ispezione. Gli effetti più significativi si registrano per  $p_{mlib} < 0,2$ . La soglia di preventiva si abbassa per ridurre il numero di guasto, i costi di macchina libera incrementano anche il costo totale del singolo intervento di manutenzione preventiva per cui anche questi vengono ridotti per cercare di minimizzare i costi indotti. Oltre  $p_{mlib}=0,2$  le soglie si stabilizzano perché la minimizzazione dei costi coincide con la minore durata di fermo impianto.



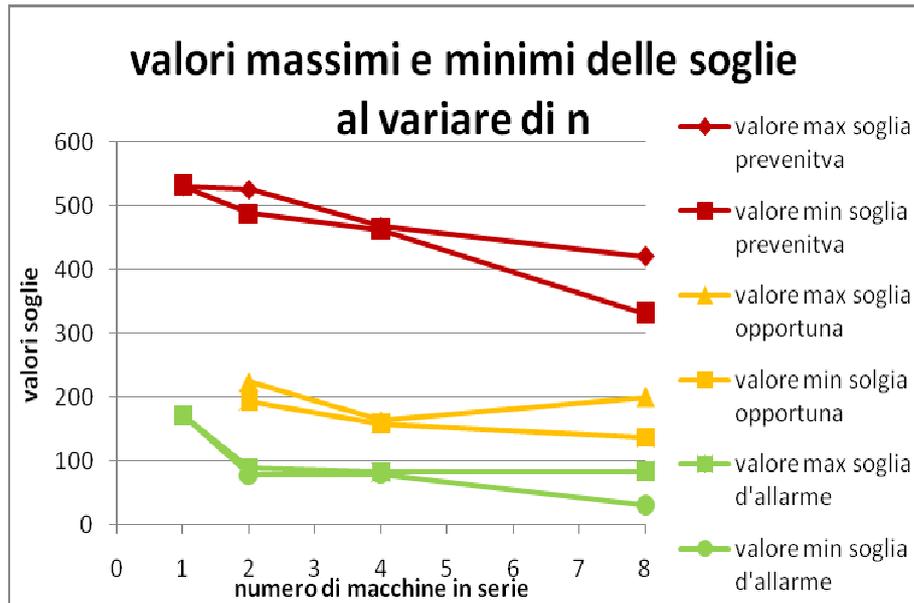
**Andamento delle soglie al variare di pmlib**

Al termine delle ottimizzazioni abbiamo ritenuto utile indagare anche sugli effetti del numero di macchine che compongono la serie. La scelta è stata limitata ad un numero massimo di macchine pari ad 8 per ovvi motivi di tempi di simulazione. La costruzione del modello con macchina singola è avvenuta a parte escludendo, ovviamente, in questo la soglia di manutenzione opportuna. Le altre configurazioni sono state facilmente ottenute mediante l'eliminazione o l'inserimento di moduli che simulano il comportamento della macchina nella logica di produzione, e di entità nella logica della manutenzione.

Le tre soglie hanno andamenti decrescenti.

Con configurazione pari a 2 macchine in serie è già evidente la necessità di intervenire opportunamente ad impianto fermo, infatti nelle precedenti analisi abbiamo già riscontrato come " $c_{mlib}=100$ " sia un valore abbastanza alto.

Per tutte le configurazioni è conveniente intervenire ad impianto fermo, in particolare nell'ultima,  $n=8$ , la soglia di manutenzione preventiva bassa previene il verificarsi di un guasto, ma questa tipologia di intervento è poco sfruttata a vantaggio di un elevato numero di interventi di manutenzione opportuna, che presenta un valore molto basso.



**Andamento dei valori max e min delle soglie al variare di  $n$**

L'analisi e la discussione dei grafici chiarisce il comportamento delle soglie e la migliore politica manutentiva da adottare. La costruzione di curve rappresentanti l'effetto dei costi della manutenzione e più in generale dei parametri del sistema diventano di estrema utilità ai soggetti coinvolti nelle decisioni strategiche aziendali.

### Conclusioni

La realizzazione del modello ha consentito di simulare al tempo stesso la funzionalità di un sistema produttivo, il comportamento rispetto al deterioramento nel tempo e la gestione di una politica di manutenzione su condizione multisoglia.

L'ottimizzazione del modello consente 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.

Il modello riesce a superare contemporaneamente quasi tutte le ipotesi restrittive poste nei vari studi presenti in letteratura e pertanto si candida ad essere utilizzato nelle più diverse applicazioni, essendo in grado di gestire in maniera flessibile moltissime variabili e condizioni, quali:

- parametri di produttività
- parametri di usura
- numero di componenti del sistema
- tempi di processo produttivo
- tempi di intervento manutentivo
- risorse limitate per la manutenzione
- buffer interoperazionali

Per quanto riguarda i possibili sviluppi del presente lavoro, va segnalata la possibilità di indagare il comportamento di un sistema con configurazione in parallelo. Infatti, se è vero che il sistema in serie comporta la massima interdipendenza dei componenti e del sistema, e quindi la massima complessità, è anche vero che un sistema in ridondanza parziale comporta una certa dipendenza del funzionamento del sistema da quello dei componenti, che meriterebbe uno studio specifico, pur partendo dalla costruzione del modello qui proposto.

Infine, l'estrema flessibilità e adattabilità del modello ne consentono l'applicazione in moltissimi campi per l'ottimizzazione delle politiche di manutenzione. In appendice vengono riportate un'applicazione su una linea produttiva con macchine in serie e una proposta di applicazione per la gestione della manutenzione stradale, quale esempio di utilizzo dei metodi scientifici sviluppati dall'ingegneria industriale a sistemi infrastrutturali (strade, acquedotti, edifici, ecc.).

# 1. LA MANUTENZIONE SU CONDIZIONE

## 1.1 LA MANUTENZIONE INDUSTRIALE

La manutenzione industriale è definita come l'insieme di azioni che permettono di mantenere o di ristabilire un bene in uno stato specificato o in modo di assicurare un servizio determinato.

La funzione di manutenzione costituisce quindi una necessità. E' una funzione necessaria per ogni tipo di processo produttivo, rivelandosi indispensabile per assicurare la disponibilità dei macchinari e la sicurezza di persone e beni. Inoltre una corretta ed efficiente gestione della manutenzione può rappresentare un mezzo per ridurre i costi ed incrementare la qualità dei prodotti e quindi la competitività dell'azienda. Per queste ragioni la manutenzione vive oggi una reale mutazione a livelli organizzativi sia di tipo umano che tecnologico, assumendo un'importanza sempre crescente all'interno delle funzioni aziendali, passando da semplice appendice della funzione produzione, generatrice di costi inevitabili, a strumento di competitività, considerata come centro di profitto a tutti gli effetti.

Un guasto è un fenomeno che, come riportato nella norma UNI 9910, consiste nella cessazione dell'attitudine di una entità a eseguire la funzione richiesta. [1]

La manutenzione delle macchina ha quindi due scopi principali

- Riparare i guasti
- Impedire la loro insorgenza

La *manutenzione preventiva* riguarda quest'ultimo aspetto, mentre la *manutenzione correttiva* provvede alla riparazione dei guasti già in atto. Per entrambe comunque l'obiettivo da perseguire è ridurre l'indisponibilità accidentale o sistematica che si manifesta quando gli apparati sono soggetti, durante la produzione, a usura, a fatica, a corrosione e in generale quando i meccanismi invecchiano e si degradano.

In questo lavoro si vuole mettere prima di tutto in evidenza l'importanza dell'efficienza e della buona organizzazione di un servizio manutentivo nel contesto produttivo, in particolare laddove la linea si satura (elevati volumi produttivi in rapporto alla capacità delle macchine), oppure sia richiesta un elevato livello qualitativo di prodotto e di processo.

Per raggiungere l'obiettivo è necessaria quindi una dettagliata documentazione storico-informativa che permetta una adeguata analisi dei dati riguardanti la disponibilità degli apparati, nonché i costi e l'efficienza del personale preposto a mantenere e migliorare le performance delle macchine. [2]

Appare quindi evidente come gli obiettivi della funzione manutenzione prendano forma dagli obiettivi generali, che nel caso di un'impresa, riguardano principalmente la redditività, la crescita, la sicurezza, gli obiettivi sociali. La redditività appare tuttavia come obiettivo prioritario, rappresentando la condizione imperativa che permette di raggiungere anche gli altri obiettivi in una visione a lungo termine.

La funzione manutenzione deve dunque contribuire, come del resto le altre funzioni, alla realizzazione di questo essenziale obiettivo, cioè la redditività e la competitività delle imprese. Bisogna poi sottolineare come la sicurezza delle persone e dei beni costituisce una componente prioritaria degli obiettivi della manutenzione, tale materia è inoltre regolata da numerose leggi. Tuttavia, data la rapidità dell'innovazione tecnologica, le attrezzature di nuovo tipo possono talvolta trovarsi momentaneamente in anticipo sulla regolamentazione, e sarà compito della funzione manutenzione insieme con i responsabili di sicurezza, stabilire le istruzioni interne eventualmente necessarie.

### **1.1.1 Evoluzione della manutenzione**

Analizzando la storia si può notare che i problemi relativi alla manutenzione in campo produttivo erano già presenti nelle vecchie botteghe artigiane. L'artigiano si trovava ad essere l'unico autore del prodotto, garantendone e controllandone qualità e conservazione, mantenendo inoltre tutto il know-how riguardante la realizzazione del prodotto stesso. Quell'artigiano compiva anche implicitamente il controllo di qualità e anche, tutte le azioni di manutenzione delle proprie attrezzature necessarie per il loro mantenimento in un buono stato.

All'epoca manifatturiera seguì la rivoluzione industriale, che portò a focalizzare l'attenzione della produzione sulla dimensione quantitativa. Si introdussero metodi di meccanizzazione e parcellizzazione del lavoro, che fu organizzato "scientificamente" secondo i criteri esposti da Taylor e applicati in maniera rigida ed esaustiva nelle fabbriche di Henry Ford.

Con la diffusione del "taylorismo-fordismo" andò sempre più scomparendo l'identità artigianale "prodotto = qualità", e con essa i conseguenti interventi manutentivi di carattere artigianale. Il ciclo produttivo portò alla nascita di nuove figure professionali, alcune totalmente nuove, come per esempio: i progettisti, i programmatori, gli addetti alle varie fasi specialistiche della produzione, i controllori dei tempi, dei metodi, della qualità, ecc... Per quanto riguarda l'utilizzo vero e proprio del prodotto e della sua conservazione nel tempo emergeva, ma questa volta in maniera esplicita, la figura professionale del manutentore.

Ecco dunque che l'esistenza della manutenzione in forma esplicita si intreccia, ancora e direttamente, a quella della qualità. Inizialmente il controllo qualità era eseguito solo sul prodotto finale, utilizzando spesso metodologie statistiche di tipo distruttivo allungando conseguentemente la catena tayloristica di produzione. Infatti, il controllo a posteriori basato sulle leggi probabilistiche dei grandi numeri era costoso perché richiedeva di scartare definitivamente i prodotti ritenuti qualitativamente non accettabili, e in ogni caso era poco utile quanto a possibili interventi di adeguamento mentre il ciclo produttivo era ancora in atto. Fu alla fine degli anni cinquanta che incominciò a cambiare la concezione dell'organizzazione produttiva, finalizzata al recupero dell'individualità dei collaboratori e con essa la loro motivazione, la loro attenzione, la loro professionalità. È in questo momento che nascono nuove tecniche, come quella del "Just in Time" e dell'informatizzazione e robotizzazione dei cicli di produzione attraverso le quali si sviluppò la "Lean Production" e una più ampia flessibilità produttiva.

Oggi il controllo di qualità anziché riguardare il prodotto in modo diretto si è spostato su tutto il processo e quindi tutte le fasi produttive, con una responsabilizzazione piena degli operatori addetti e quindi dell'individuo che diviene il protagonista assoluto del processo. Contemporaneamente si amplia anche il ciclo produttivo, che tende ad estendersi ai rapporti con i clienti

utilizzatori dei prodotti per consentire la migliore utilizzazione. Nel mercato si afferma sempre più la concezione che il prodotto è prima di tutto un servizio con l'obiettivo del mantenimento della qualità anche durante il vero e proprio uso.

A questo punto nasce l'esigenza, adesso in modo esplicito, di un processo manutentivo strettamente legato a quello produttivo e per questo strutturato con caratteristiche di vera e propria scienza. Oggi, infatti, nell'era dell'informatica e della conoscenza, la manutenzione diventa fenomeno organizzativo esplicito che è affrontato con le metodologie proprie del sapere scientifico.

Come tale si caratterizza attraverso quella conoscenza che proviene, dall'esperienza maturata operando sul campo e, quindi, come informazione da trasformare in formazione continua non soltanto per gli addetti ai lavori, ma anche per gli utenti utilizzatori dei beni da conservare. Le accresciute capacità di archiviare dati, e quindi di accumulare conoscenza, diventano anche la premessa per una migliore programmazione delle attività manutentive e per il conseguente controllo esecutivo in grado di assicurare qualità, sicurezza e perciò affidabilità, da conservare attraverso l'utilizzo costante di informazione e formazione.

La manutenzione è storicamente riuscita a rimanere fuori dai rigori di leggi scientifiche e dell'organizzazione. Oggi, con il ricorso a nuove tecnologie e in particolare grazie all'informatica distribuita, sta sempre più avviandosi verso un'organizzazione ben preparata, profonda delle abitudini e dei metodi. La nuova direzione della manutenzione è evidenziata dal fatto che non è più subita come male necessario e non è più legata essenzialmente ai guasti. Al contrario, la manutenzione è ora integrata nella progettazione fin dallo stadio della concezione, allo stesso titolo della qualità. L'evoluzione delle caratteristiche essenziali dei materiali è seguita durante tutta la vita delle apparecchiature. Qualità e manutenzione sono divenute due nozioni indissociabili e complementari, che poggiano, in parte, su basi comuni. Occorre quindi, prevedere i guasti in modo da poterne minimizzare le conseguenze. Bisogna dunque basare le operazioni di manutenzione sulle indicazioni di strumenti di misura che ci informano in anticipo sull'evoluzione del sistema e ci permettono di prevedere il momento in cui l'intervento diventa necessario.

Si passa così progressivamente, ma in modo irreversibile, dalla manutenzione correttiva, che interviene dopo il guasto, alla manutenzione preventiva che era

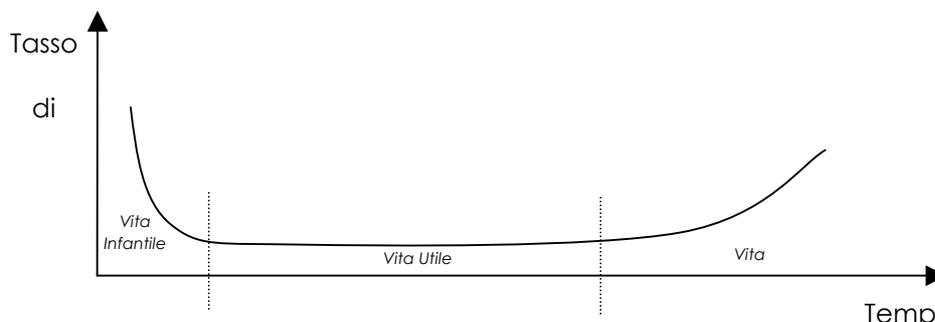
dapprima sistematica, cioè eseguita seguendo uno scadenziario e dunque cieca, e che ora è su condizione o predittiva e tiene conto delle informazioni fornite da strumenti sullo stato di certe caratteristiche o sull'evoluzione di certi sintomi di degrado. Infine si osserva lo sviluppo e l'affermazione di una vera e propria ingegneria della manutenzione che permette di riadattare gli apparecchi obsoleti completandone la strumentazione al fine di renderle affidabili grazie al controllo dell'evoluzione dei più caratteristici sintomi di degrado. Tali operazioni, vere cure di giovinezza, permettono, evitando nuovi investimenti, di diminuire i costi di fabbricazione.

### **1.1.2 Storia delle politiche manutentive**

In principio la manutenzione consisteva essenzialmente in ricerca guasti e riparazioni, che corrispondeva all'attuale manutenzione correttiva. Operazioni come ingrassaggio e lubrificazione rappresentavano l'inizio della manutenzione preventiva, che si sviluppò velocemente, soprattutto in realtà dove era in gioco la sicurezza delle persone, come per le imprese di trasporto, dove furono introdotti dei controlli sistematici rigorosi. Ad esempio per gli aerei da trasporto furono stabilite revisioni periodiche legate al numero di ore di volo effettuate.

La manutenzione preventiva, che consiste dunque in interventi periodici, rispondeva dunque al "meglio prevenire che guarire" , e si adattava bene ad attrezzature elettromeccaniche e meccaniche, in cui la maggior parte dei guasti erano dovuti all'usura, e quindi prevedibili. In seguito si cercò di ottimizzare anche in modo empirico la frequenza degli interventi sistematici, tenuto conto dello stato in cui si trovava l'attrezzatura al momento dello smontaggio, a differenza di quanto avveniva prima, con organizzazione e pianificazione degli interventi periodici fissati a priori. In seguito furono messi a punto mezzi rigorosi della sostituzione preventiva sistematica: Kelly fu un precursore, adattando la legge di avaria degli elementi a una legge logaritmica normale. Dei grafici indicavano le condizioni ottime di sostituzione preventiva sistematica, a partire dal rapporto  $P/p$  tra il costo totale  $P$  di un'avaria e il costo  $p$  di sostituzione preventiva. Tuttavia la legge di Weibull, il cui impiego si è in seguito sviluppato, si adatta meglio per rappresentare le leggi di avaria.

Con lo sviluppo dell'elettronica si è poi constatato che numerosi componenti presentavano un tasso di guasto  $\lambda(t)$  quasi costante nel tempo (detto vita utile), una volta passato il periodo degli eventuali difetti di giovinezza, come è visibile in Figura 1.1, dove è rappresentato l'andamento del tasso di guasto nel tempo.



**Figura 1.1: L'andamento del tasso di guasto nel tempo**

Al tempo stesso, lo smontaggio di alcune parti poteva essere controproducente, ad esempio lo smontaggio dell'attrezzatura idraulica degli aerei poteva costituire una causa di avaria, per l'introduzione di impurità nei circuiti. E' parso quindi preferibile, in alcuni casi, sorvegliare il buono stato degli elementi che potevano essere oggetto di guasti dannosi, per intervenire solo a ragion veduta, qualora si fosse prodotto un inizio di avaria. Questa politica costituisce la manutenzione secondo condizione, che è quindi una manutenzione preventiva subordinata però ad un tipo di avvenimento predeterminato, come un'autodiagnosi, informazioni da un rilevatore, misura di un consumo. Può infatti risultare molto vantaggioso rimpiazzare certi elementi il più tardi possibile, quando cominciano a subire un degrado progressivo, piuttosto che in maniera sistematica, dopo una durata di vita relativamente corta. In particolare per fenomeni di degrado lenti e progressivi, di cui si può seguire l'evoluzione, la manutenzione secondo condizione presenta anche un aspetto predittivo. Diventa infatti possibile prevedere la data fino a cui l'evoluzione del degrado constatato resta entro limiti accettabili, e così organizzare al meglio l'intervento manutentivo. E' proprio lo sviluppo di mezzi di controllo non distruttivi e di strumenti di misura di segnali deboli che ha permesso di sviluppare la manutenzione secondo condizione, fino

alla sua forma più evoluta, che fa ricorso all'elaboratore per registrare diagnosi, controlli e allarme.

Nell'attuale realtà industriale le politiche per effettuare manutenzione possono pertanto essere raggruppate in quattro categorie principali:

- Reattiva, o "a guasto";
- Preventiva;
- Predittiva (CBM – Condition Based Maintenance);
- Migliorativa – identificazione delle cause di guasto e riprogettazione per rimuoverle.

Se un programma di manutenzione ha successo o meno lo si può valutare in termini di quanto riesca a prevenire i guasti agli impianti, determinando così un incremento della disponibilità degli stessi, oltre che della sicurezza.

L'attività manutentiva, i suoi costi, la sua efficacia e la sua efficienza in ogni tipo d'impianto dipendono dalla corretta integrazione di queste quattro attività, a differenza di ciò che accadeva storicamente, e spesso purtroppo accade ancora oggi in molte realtà aziendali, dove l'unica politica adottata è quella reattiva (manutenzione a guasto). Nei paragrafi successivi le quattro politiche prima elencate saranno esaminate più in dettaglio.

## **1.2 APPROCCI MODERNI ALLA MANUTENZIONE**

I metodi evoluti di manutenzione sono ormai parte integrante della produttività, e costituiscono un mezzo per contribuire efficacemente al miglioramento dei risultati e della competitività delle imprese. Questi metodi vi contribuiscono permettendo non solo una riduzione dei costi diretti di manutenzione, ma anche un accrescimento dell'efficacia delle attrezzature. Questo accrescimento della produttività risulta da una ricerca sistematica di miglioramento della loro affidabilità, manutenibilità, e, più in generale, disponibilità.

Le linee evolutive che si vanno delineando nell'ingegneria della manutenzione, vedono sempre più affermarsi dei principi della Total Productive Maintenance (TPM) o Manutenzione Produttiva di origine giapponese e della Reliability Centered Maintenance (RCM) o Manutenzione Centrata sull'Affidabilità sviluppata invece negli Stati Uniti di America in ambito aeronautico-militare.

### **1.2.1 Total Productive Maintenance**

La TPM è un approccio moderno alla manutenzione, il cui obiettivo è di ottimizzare l'efficienza dei macchinari, eliminare i guasti, e favorire l'autonomia dei singoli operatori. In pratica essa combina il metodo americano della manutenzione preventiva con quello giapponese del controllo totale di qualità e il coinvolgimento degli operatori a qualsiasi livello aziendale. Il risultato è un sistema innovativo per la manutenzione delle macchine, che migliora la qualità e l'efficienza, elimina i guasti, e promuove gruppi autonomi di manutenzione, con attività giornaliere.

Là dove è stato adottato, questo sistema ha portato ad ottimi risultati: ha migliorato visibilmente il posto di lavoro, aumentato il livello di conoscenza e la professionalità degli operatori di linea e dei manutentori, ridotto la rottura della macchina, minimizzato i tempi morti e le piccole fermate, attenuato i difetti di qualità e i reclami dei clienti, aumentato la produttività, tagliato lavoro e costi, ridotto l'inventario delle parti di ricambio e gli incidenti sul lavoro.

Il TPM, secondo lo Japan Institute of Plant Maintenance, è caratterizzato da cinque punti fondamentali:

- Massimizzare l'efficacia complessiva degli impianti;
- Stabilire un accurato sistema di manutenzione preventiva per l'intera vita della macchina;
- Responsabilizzare tutte le funzioni della fabbrica;
- Coinvolgere tutto il personale;
- Promuovere la manutenzione produttiva attraverso una "gestione motivante", attività di piccoli gruppi autonomi;

La parola "totale" che contraddistingue la TPM è da intendersi secondo tre significati:

1. Efficienza totale: indica la ricerca di efficienza economica e finanziaria;
2. Sistema totale di manutenzione: include la manutenzione reattiva, quella correttiva, quella preventiva e quella proattiva;
3. Partecipazione di tutti i dipendenti: include la manutenzione autonoma, eseguita dagli operatori in piccoli gruppi.

La manutenzione produttiva mira alla semplificazione dei sistemi, sempre più complessi sia a livello tecnologico che per dimensioni. La stabilizzazione del

processo, la semplificazione delle procedure e la standardizzazione dei metodi di lavoro permettono la mobilità degli operatori su più macchine e su diverse postazioni della stessa linea e facilitano l'addestramento e la conseguente omogeneizzazione di una cultura manutentiva. Si creano così i presupposti per un'altra dimensione che caratterizza la manutenzione produttiva: il lavoro di team.

Come detto, è necessaria la diffusione della cultura manutentiva a tutti i livelli: dal conduttore della macchina al manager del processo, che diventa anche capo della manutenzione. Un ruolo chiave nella Manutenzione Produttiva è comunque ricoperto dall'operatore che diventa esecutore della Manutenzione Autonoma. Questa mira a trasferire le attività di manutenzione preventiva di primo livello o routinarie (ispezioni, pulizie, controlli, sostituzioni, smontaggi, piccole riparazioni ecc.) agli stessi addetti alla produzione. La verifica dello stato della Manutenzione Autonoma viene effettuata mediante check-list di controllo e confronto col modello della TPM.

Un altro punto cardine nella TPM è costituito dalla prevenzione dei guasti attraverso il monitoraggio, strumento indispensabile per la realizzazione di una manutenzione su condizione efficace ed efficiente. Esso consiste nella valutazione delle condizioni di un impianto o apparato, ottenuta mediante sensoristica sofisticata. Avendo sotto controllo in ogni istante e in tempo reale le condizioni dell'impianto è possibile prevenire i guasti ed effettuare un intervento manutentivo soltanto alla presenza di un'avaria potenziale e/o quando risulti compatibile e conveniente con la pianificazione della produzione.

I vantaggi derivanti dall'impiego di questi accorgimenti sono:

- miglioramento delle condizioni generali di sicurezza: la diagnostica è, infatti, spesso in grado di rilevare l'insorgere di un problema che potrebbe potenzialmente concretizzarsi in evento pericoloso prima che questo accada, mentre l'intero impianto rimane costantemente sotto controllo; in più, in caso di incidente, il sistema di diagnostica è in grado di fornire indicazioni utili alle squadre di intervento che verranno così facilitate nei loro compiti;

- miglioramento della disponibilità degli impianti: le squadre di manutenzione infatti non dovranno dilungarsi nella diagnosi e nella localizzazione di eventuali avarie risparmiando così tempo;
- prolungamento dei tempi di esercizio degli impianti;
- riduzione dei costi di diagnostica tradizionale;
- supporto alla manutenzione on condition;
- riduzione dei costi di manutenzione;
- ottimizzazione dell'impiego di parti di ricambio.

L'ingegneria della manutenzione ha quindi il compito di programmare l'unità di diagnostica e predeterminare i valori di set che in esercizio saranno confrontati con i parametri rilevati in continuo. Il sistema informativo per la gestione dei dati, acquisiti con la diagnostica (monitor) è spesso non interagente con l'altro sistema informativo per la gestione organizzativa delle attività manutentive, comunemente conosciuto come CMMS (Computerized Maintenance Management System).

Questo porta a non sfruttare appieno le possibilità della diagnostica per cui, recentemente, gli sforzi sono stati orientati ad integrare questi due sistemi in un unico sistema chiamato Integrated Maintenance System (SIM). Tale integrazione consentirà al monitor di interagire direttamente con il CMMS per poter schedulare autonomamente gli interventi manutentivi in maniera ottimizzata.

L'introduzione della TPM all'interno di una realtà aziendale significa sostituire una strategia manutentiva a rottura dove la soluzione e l'analisi del problema partono dopo un fermo macchina non pianificato che porta ad un incremento dei costi di manutenzione e ad una riduzione della disponibilità d'impianto, con un intervento di tipo preventivo o predittivo (es. ispezioni, condition monitoring, ecc...), che ha come conseguenza la diminuzione delle attività di manutenzione correttiva e del consumo di parti di ricambio oltre che dei tempi di fermo del processo produttivo. Applicare una strategia manutentiva preventiva, passando quindi da una cultura reattiva ad una proattiva permette di implementare e definire una "mappa" tecnica dell'impianto (piano di manutenzione), che è anche la base per una riuscita introduzione di metodologie TPM (Total Productive Maintenance).

### **1.2.2 Reliability Centered Maintenance**

Come il TPM, la RCM non è una politica di manutenzione, ma piuttosto una serie di comportamenti organizzativi, di regole, di metodi e di procedure per il progetto e la gestione economica della manutenzione. Essa è un approccio basato sull'affidabilità, che si è sviluppato in campo aeronautico negli Stati Uniti a partire dagli anni '60.

La RCM combina dunque l'intuizione e un approccio statistico molto rigoroso per applicare la migliore forma possibile di strategia manutentiva ai diversi campi di interesse. L'obiettivo finale di un approccio al TPM consiste nel mantenere gli strumenti operativi in condizioni tali da permettere il raggiungimento della missione aziendale senza spreco eccessivo delle risorse disponibili. I principi della RCM mirano a incrementare rapidamente e sostenere una crescita della disponibilità e della sicurezza degli impianti. Questi principi supportano anche la determinazione dei fabbisogni di manutenzione delle nuove apparecchiature in maniera da garantire affidabilità, velocità e precisione nell'analisi, e contribuiscono ad una significativa riduzione dei costi.

Con l'implementazione della RCM, secondo alcuni studi sull'argomento, si possono ottenere i seguenti benefici:

- Il consumo dei ricambi può ridursi fino al 50%
- La manutenzione ciclica diminuita del 50-70%
- Le relazioni fra manutenzione e produzione migliorano
- Le sostituzioni programmate sono eliminate completamente, quindi ogni componente viene sfruttato per la maggior parte della vita utile.

La RCM utilizza dunque la teoria dell'affidabilità come base, ossia un modello di analisi delle cause di guasto che consente al manutentore di definire i piani e le modalità di gestione degli interventi. Essa entra inoltre nel merito anche di problemi di gestione, occupandosi della polivalenza degli addetti, della terziarizzazione della manutenzione, riducendo i carichi di lavoro, per mezzo di una riduzione degli interventi manutentivi, controllando la gestione e i metodi.

Lo sviluppo della RCM avviene in tre fasi:

1. Uso delle tecniche RCM per valutare le conseguenze dei guasti. Alla fine di questo processo si deve arrivare con la documentazione necessaria a formulare i piani di manutenzione di tutte le

apparecchiature. Se già sono presenti dei piani di manutenzione esistenti, si potrà notare una netta riduzione del carico di lavoro dei nuovi rispetto ai precedenti.

2. Uso delle informazioni emerse dalla prima fase per rivedere le politiche di gestione dei lavori di manutenzione.
3. Progettazione o riprogettazione delle procedure e dei sistemi operativi e dei relativi fabbisogni informativi, che l'attuazione delle prime due fasi hanno certamente ridotto.

La RCM può essere vista come un approccio alla manutenzione che combina i metodi reattivi, predittivi, preventivi, proattivi e tutte le possibili strategie per massimizzare la vita di un componente, al fine di decidere come effettuare la manutenzione di un componente, sulla base di un approccio sia intuitivo che analiticamente rigoroso.

L'analisi RCM si basa sulle seguenti domande:

- Come lavora la macchina?
- Come si guasta la macchina?
- Quali sono le conseguenze del guasto?
- Cosa si può fare per prevenire il guasto?

I principi base della RCM sono:

1. mantenere la funzionalità del sistema: è bene chiedersi : "può il sistema continuare a funzionare se quel componente si guasta?". Se la risposta è sì, allora si può accettare di attendere che quel componente si guasta.
2. concentrarsi sulle responsabilità: non solo evitare che il guasto si verifichi, ma capire perché si verifica e come evitarlo.
3. capire i limiti dei progetti: diventa fondamentale per i team di manutenzione effettuare un feedback ai progettisti per evitare futuri errori di progettazione o per migliorare la progettazione stessa.
4. garantire sempre la sicurezza, poi l'economia.
5. definire il guasto come una condizione non conforme all'obiettivo aziendale: il guasto è definito come una perdita di produttività e di qualità.
6. ridurre il numero di guasti.

7. individuare i quattro diversi sistemi di manutenzione:
  - a. manutenzione reattiva;
  - b. manutenzione preventiva basata sul calendario;
  - c. manutenzione secondo condizione;
  - d. manutenzione proattiva.
8. la RCM è un processo continuo: continuamente bisogna fornire feedback dei risultati al fine di permettere sempre un miglioramento continuo.

L'adozione di un programma di manutenzione basato sui principi della RCM, offre i seguenti risultati:

**Resistenza:** l'obiettivo della RCM è migliorare la resistenza delle macchine e dei componenti. Questo risultato viene ottenuto tramite una costante rivalutazione del programma di manutenzione e la continua comunicazione fra il team di manutenzione, operatori, meccanici, progettisti e manager.

**Costi:** nel periodo immediatamente successivo all'adozione della RCM i costi di manutenzione aumentano a causa dell'acquisto di nuovi strumenti ed Accessori. Questo aumento è però seguito da una forte diminuzione non appena i guasti sono prevenuti e il componente sostituito prima che si deteriori raggiungendo il guasto.

**Programmazione:** il vantaggio della manutenzione sotto condizione è di prevenire il guasto e permettere di organizzare le operazioni, le parti di ricambio e le risorse con anticipo sul guasto.

**Sostituzione dei componenti:** il vantaggio della RCM è di utilizzare il più possibile un componente. Con la RCM la sostituzione del componente è basata solo sulle sue reali condizioni, non su un calendario, permettendo quindi un aumento della vita di un componente.

**Efficienza e produttività:** il primo obiettivo della RCM è, come detto prima, la sicurezza. Subito dopo vengono efficienza e produttività. La flessibilità della RCM permette di intervenire solo se necessario senza generare costi aggiuntivi né perdite di produzione.

### **1.3 LE POLITICHE MANUTENTIVE**

Passiamo ora ad analizzare più in dettaglio le quattro diverse politiche manutentive che rappresentano i tasselli fondamentali per l'implementazione di una qualsiasi "filosofia" superiore di un qualsiasi sistema di manutenzione:

1. manutenzione reattiva
2. manutenzione preventiva
3. manutenzione secondo condizione
4. manutenzione proattiva

#### **1.3.1 La Manutenzione Reattiva**

Con questo tipo di manutenzione si intende la manutenzione a rottura, le riparazioni e le strategie di sostituzione solo dopo il verificarsi del guasto (Run-to-Failure Maintenance). La manutenzione a rottura interviene nel momento in cui accade un guasto, o la parte perviene al completamento del suo ciclo di vita utile, in altre parole si permette ad una macchina di operare fino a che non si rompe senza fare nessun tipo di manutenzione preventiva. Tale sistema è usato se:

1. la possibile manutenzione da applicare è troppo costosa, perciò diventa più economico ripararla quando si rompe
2. il numero dei guasti che potrebbero occorrere è talmente basso che è preferibile stabilire altre priorità
3. il malfunzionamento non influisce significativamente sulla produzione o genera perdite finanziarie limitate esclusivamente ai bassi costi di riparazione

Il principale aspetto negativo di questo sistema è costituito dai guasti inaspettati, non previsti. Spesso infatti non sono disponibili in magazzino parti di ricambio ed i tempi di approvvigionamento sono molto lunghi per cui si è costretti a pagare un premio aggiuntivo. I materiali possono essere ordinati costantemente in stock maggiori, anche se il loro utilizzo non è previsto, con conseguenti maggiori costi ed un'inefficiente gestione del magazzino. Tuttavia esistono dei casi in cui l'utilizzo di tale sistema di manutenzione può essere ottimale, qualora ciò fosse evidenziato dai risultati dell'analisi di criticità tipica della RCM. [2]

### 1.3.2 La Manutenzione Preventiva

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 ). [1]

La politica preventiva si basa quindi sulla sostituzione programmata di un determinato componente della macchina ancora perfettamente funzionante, con uno nuovo, in modo tale da prevenirne il cedimento incontrollato. 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.

All'interno della manutenzione preventiva, in base alla determinazione degli intervalli di tempo predeterminati e alla definizione dei criteri prescritti, si possono distinguere almeno tre tecniche manutentive:

- la manutenzione programmata *statica*
- la manutenzione programmata *dinamica*
- la manutenzione su *condizione*

Per quanto riguarda la manutenzione su condizione questa è da considerarsi una particolare tipologia di manutenzione preventiva, in quanto il componente viene sostituito prima che termini la sua vita utile, in cui le sostituzioni non sono programmate bensì decise sulla base della rilevazione di alcuni parametri del componente o del macchinario. Date le particolari caratteristiche di questa tipologia di manutenzione e dati gli scopi di questa tesi, che si propone appunto di ottimizzare i parametri di questa politica manutentiva, maggiori dettagli saranno forniti nei prossimi paragrafi. Per quanto riguarda invece le altre due politiche manutentive di manutenzione preventiva si tratta in entrambi i casi di manutenzione preventiva- programmata, cioè decisa in base al tempo.

Nella programmazione statica gli intervalli e i criteri prescritti di intervento sono generalmente fissati per tutta la vita utile del componente o della macchina. Un esempio pratico può essere la sostituzione delle candele di un'automobile la cui cadenza chilometrica è specificata dal costruttore ed è da ritenersi valida per tutta la vita utile dell'automobile.

Nella manutenzione programmata dinamica gli intervalli sostitutivi sono determinati in genere in base alla storia della macchina stessa. La rilevazione dell'MTBF, tempo medio tra due guasti 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.

Appare quindi chiaro che la manutenzione preventiva-programmata, per quanto finora visto, è efficace sia in termini economici che di riduzione della indisponibilità della macchina quando il guasto presenta una certa regolarità di accadimento.

Tuttavia ad un guasto che sia difficile da prevedere non è conveniente applicare tecniche di manutenzione programmata in quanto si rischia.

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.

Nella manutenzione preventiva programma gli interventi manutentivi possono essere decisi sia sulla base di un calendario, o altrimenti in base alle ore effettive di lavoro o al numero di cicli di lavoro di un componente. Appare evidente come queste due metodologie applicative di questa politica manutentiva abbiano risolto in maniera opposta il trade-off tra

- Sfruttamento della vita utile del componente
- Organizzazione e pianificazione delle attività

Nel caso gli interventi siano decisi sulla base di un calendario appare evidente come sia possibile con largo anticipo programmare le attività manutentive, 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.

Nel secondo caso invece appare chiaro come la decisione di effettuare la sostituzione del componente sia intimamente legata alle lavorazioni da esso compiute e quindi si abbiano 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.

Per effettuare questo tipo di considerazione è necessario comunque conoscere il tasso di guasto di un componente, o il suo inverso MTTF (Mean time to failure): tuttavia questi dati spesso non sono disponibili o sono calcolati solo per pochi componenti. Più spesso invece sono disponibili dati sul MTBF (Mean time between failure) che vengono poi utilizzati come base iniziale per stabilire gli interventi manutentivi da compiere.[2]

Gli obiettivi degli interventi di manutenzione preventiva sono rappresentati dalla conoscenza della condizione delle macchine e dallo studio accurato dell'andamento dei guasti per predire lo stato di salute delle apparecchiature. Possono essere utilizzate varie tecniche, tra cui:

1. Anticipare il guasto utilizzando l'esperienza: per alcuni componenti o apparecchiature la storia dei guasti o l'esperienza del personale consente di poter prevedere il verificarsi del guasto, che quindi è legato al tempo. E' bene dunque prevedere almeno tre ispezioni prima del verificarsi del guasto, in modo da conoscere meglio l'apparecchiatura.
2. Utilizzare una distribuzione statistica dei guasti: utilizzando dei dati statistici, come la distribuzione di Weibull, si possono determinare la periodicità, distribuzione e probabilità che un guasto occorra.
3. Conservare le informazioni ottenute: la mancanza di informazioni sui componenti è spesso un problema, ma dopo aver programmato ed effettuato gli interventi previsti è bene conservare i dati ottenuti. Questi dati permetteranno di conoscere meglio le macchine e la loro storia, permettendo così una programmazione degli interventi futuri più facile ed efficiente.

### **1.3.3 La Manutenzione Secondo Condizione**

Mantenendo sempre il parallelo con il campo automobilistico fatto in precedenza per la manutenzione preventiva illustreremo in maniera semplice il concetto di manutenzione su condizione. Per quanto riguarda la sostituzione delle pastiglie

dei freni appare ovvio che una politica di sostituzione programmata non appare praticabile dal punto di vista della convenienza economica, si potrebbe decidere di sostituire un componente ancora in "salute" e dall'elevato valore economico. Tantomeno appare praticabile la strada della manutenzione correttiva aspettare il mancato funzionamento delle pastiglie stesse. La soluzione generalmente adottata è quella di constatarne le condizioni di usura e prendere la decisione se cambiarle o meno: si fa quindi una manutenzione su condizione.

I programmi manutentivi si traducono spesso in regolari interventi di smontaggio, sostituzione rimontaggio dei componenti. Revisioni non necessarie di macchine, intese a prevenire guasti futuri, possono talvolta provocare guasti indotti e un danno economico maggiore rispetto al permettere che la macchina funzioni fino a rottura.

La strategia di monitoraggio della condizione, effettuata mediante verifiche ispettive periodiche, tende quindi ad individuare lo stato di un componente che potenzialmente potrebbero provocare un guasto.

In un'ottica di manutenzione sempre più integrata e allo scopo di distanziare ulteriormente il periodo tra due grandi revisioni, il piano di ispezioni sullo stato di una macchina o di un suo determinato componente è spesso vantaggiosamente correlato ad un programma di manutenzione programmata dinamica, ma spesso necessita anche di un elevato grado di addestramento del personale esecutore nel riconoscimento dell'anomalia.

Una manutenzione basata sul monitoraggio può consentire quindi di:

- ridurre i costi di manutenzione
- aumentare la disponibilità operativa delle macchine
- migliorare la sicurezza
- ridurre la quantità e la gravità dei guasti di esercizio

#### **1.3.4 La Manutenzione Proattiva**

La manutenzione proattiva è caratteristica della RCM. E' il culmine degli altri sistemi di manutenzione esaminati. La manutenzione proattiva migliora in modo continuato lo stato manutentivo del sistema nel suo complesso; attraverso una migliore progettazione, migliori procedure, migliore organizzazione del lavoro,

ecc... Questi risultati sono raggiunti attraverso una continua collaborazione e comunicazione con il reparto progettazione, migliorando così le macchine e i sistemi ed eliminando gli errori fatti in passato, mediante una continua ed attenta analisi dei dati raccolti, prevenendo i guasti e limitando le attività di manutenzione, con un conseguente risparmio sui costi sostenuti.

Sarà pertanto proprio una corretta integrazione di queste quattro politiche, valutata in base a risultati e valutazioni scaturite dall'applicazione della RCM, a garantire il miglioramento della gestione della manutenzione, in termini di crescita di disponibilità, sicurezza degli impianti, e in termini di abbattimento di costi diretti e indiretti.

#### **1.4 ANALISI DEI COSTI DI MANUTENZIONE**

In molte realtà industriali è presente il problema di come controllare l'attività manutentiva degli impianti, non solo per controllare l'efficienza del personale, ma anche per individuare le zone a maggiore rischio di guasto e poterne gestire eventuali potenziamenti.

La produzione, composta in genere da più operazioni elementari eseguite sul manufatto, comporta dei costi legati in parte al momento produttivo e in parte alle strutture di supporto che ne permettono lo svolgimento. Sono quindi sempre presenti delle voci di spesa aggiuntive rispetto ai costi delle materie prime e della manodopera, che derivano in genere da impianti centralizzati, servizi commerciali e amministrativi, ammortamenti, logistica, ecc.

Possiamo quindi definire i:

1. costi diretti, legati alla pura fase di produzione del manufatto, suddivisi in
  - a. costo delle materie prime e dei componenti
  - b. costo della manodopera
  - c. costo energia
  - d. costo dei materiali ausiliari e di consumo
2. costi indiretti, derivanti dalle strutture non prettamente produttive dell'azienda, suddivisi in
  - a. costo della manodopera non direttamente coinvolta nella produzione

- b. costo dei servizi (amministrazione, commerciale, logistica ecc.)
  - c. costo di ammortamento
  - d. costo della manutenzione degli apparati direttamente coinvolti nella produzione
  - e. costo della manutenzione degli apparati non direttamente coinvolti nella produzione
3. costi non direttamente associabili a una delle due precedenti categorie, suddivisi in
- a. costo della regolazione delle macchine (set-up)
  - b. costo organizzativo del servizio manutenzione

Con riferimento ad un generico apparato produttivo possiamo definire i costi nell'unità di tempo di produzione (ad esempio il minuto) come:

costi di materia prima:  $C_{mp}$

costi diretti di consumo:  $C_{dc}$

costi di diretti di manodopera:  $C_{dm}$

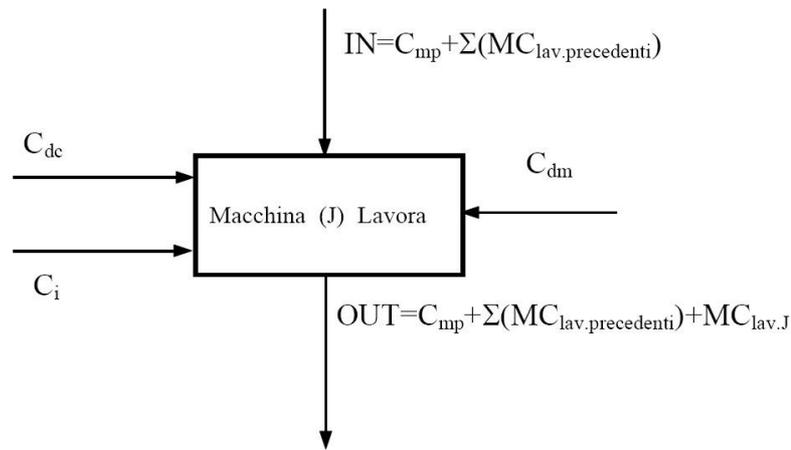
costi indiretti:  $C_i$

la cui somma  $C_t = C_{mp} + C_{dc} + C_{dm} + C_i$ , rappresenta il costo imputabile all'apparato nell'unità di tempo in cui è in produzione. [3]

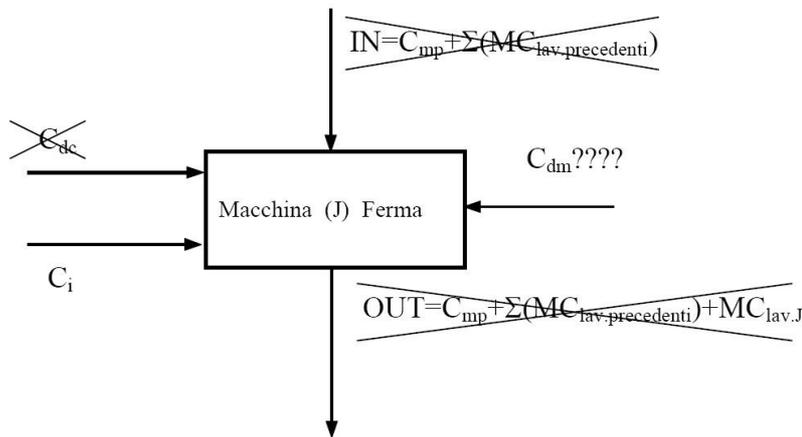
#### **1.4.1 Il Costo di Fermo Macchina**

Il costo della materia prima è generalmente noto e dipende tipicamente dalla tipologia del prodotto finito. Il costo finale dell'oggetto è rilevabile grazie alla distinta base, ai tempi standard delle operazioni necessarie per produrlo, ai costi delle materie prime, della manodopera, ecc. In genere si conoscono i costi diretti, indiretti e pieni per ogni fase della lavorazione ed è noto il margine di contribuzione (MC) lordo medio. [3]

I diagrammi in Figura 1.2 e in Figura 1.3 evidenziano i flussi di costo e di valore negli stati di macchina in moto e di macchina guasta:



**Figura 1.2: diagramma dei costi a macchina in moto**



**Figura 1.3: diagramma dei costi a macchina ferma**

Dove con  $MC_{lav,j}$  si intende il margine di contribuzione dovuto alla j-esima lavorazione. In caso di capacità produttiva esuberante rispetto alla richiesta del mercato, il fermo temporaneo della linea non causa perdite per mancanza: se utilizzando il sistema produttivo per un ridotto periodo tempo, ad esempio un mese, produco quanto basta al mercato per un periodo più lungo, ad esempio un anno, e nel restante periodo di tempo il sistema produttivo rimane inutilizzato, allora perdere una limitata quantità di prodotto a causa del fermo macchina per guasto non causa una perdita di guadagno per mancato produzione. Al contrario, in caso di capacità produttiva scarsa, ovvero inferiore alla capacità di assorbimento del mercato, la perdita di produzione, anche temporanea,

rappresenta un mancato guadagno e quindi un costo per l'azienda (perdita del margine di contribuzione). [3]

Con riferimento al caso di capacità produttiva scarsa si considera il caso di due ipotetiche macchine che lavorino in serie, di cui la prima (macchina A) abbia un ritmo produttivo superiore alla seconda (macchina B) che, in questo caso, rappresenta il collo di bottiglia. In fase produttiva si formerà, a monte della macchina B un certo quantitativo di materiale da smaltire già lavorato dalla macchina A. Una fermata di quest'ultima, il cui tempo complessivo non superi quello che impiega la macchina B a consumare tutto il semilavorato a monte, non produce alcun problema di fermo della linea, pertanto non sostiene alcun costo di mancata produzione (perdita di margine di contribuzione).

Al contrario, se la macchina A avesse un ritmo produttivo inferiore alla macchina B, cioè fosse il collo di bottiglia della linea, una sua fermata, anche breve, causerebbe una fermata della macchina B (ed eventualmente di quelle che la seguono) per mancanza di materiale; il prodotto perso, in questo caso, non potrebbe essere più successivamente recuperato e quindi nemmeno il suo margine di contribuzione che, in termini di mancato guadagno, diventerebbe un costo da sostenere, che chiameremo  $C_{mp}$ , costo di mancata produzione.

Si possono verificare situazioni in cui i costi diretti di manodopera dovuti al fermo macchina per guasto possono essere ridotti o eliminati.

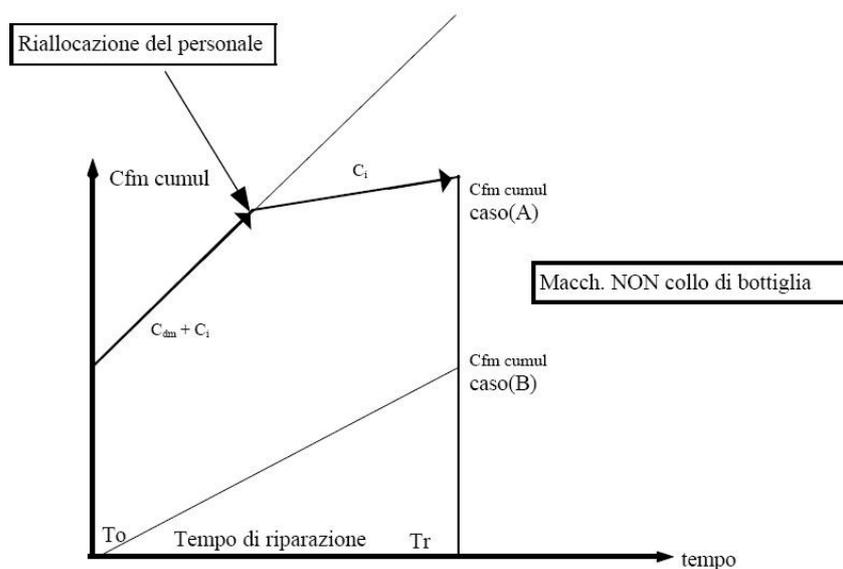
Lo spostamento su un'altra unità produttiva del personale in esubero per guasto macchina rappresenta in genere un aspetto rilevante per il contenimento dei costi di fermo in quanto elimina o comunque riduce la perdita dovuta alla momentanea dissaturazione del personale.

Non sempre però gli spostamenti di manodopera sono possibili e in questo senso si vedano quelle situazioni in cui un solo operatore è adibito all'utilizzo di due o più macchine (rapporto uomo/macchina minore di 1): in tal caso spostare l'operatore potrebbe significare un fermo di tutti gli apparati che egli sta gestendo.

In genere i costi cumulati nel tempo ( $C_{fm\ cumul}$ ) da sostenere a causa del fermo macchina per guasto possono essere visualizzati attraverso delle rette di pendenza variabile. Negli esempi in Figura 1.4 e in Figura 1.5 si distinguono le

due situazioni in cui la macchina non è un collo di bottiglia nel processo e in cui lo è.

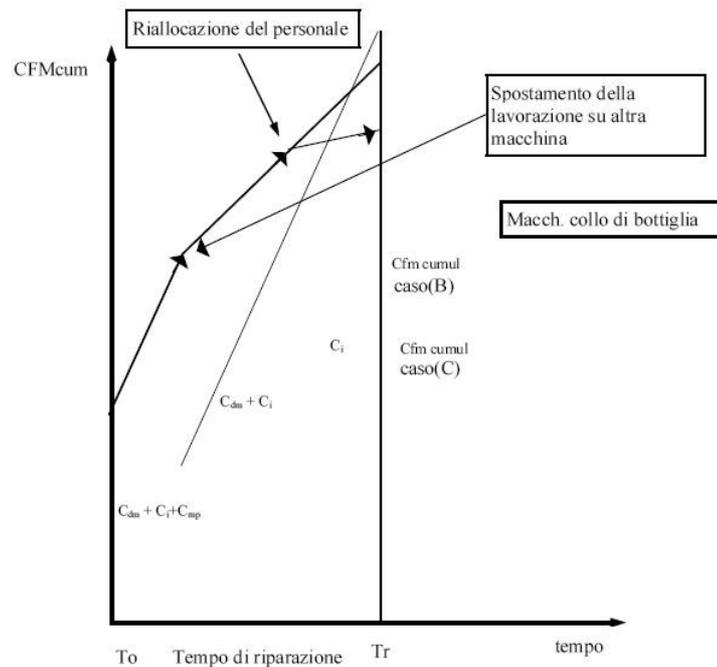
Nel primo, in cui la macchina non è quella collo di bottiglia mostrato in Figura 1.4, si identificano il caso (A) in cui durante la fermata il personale diretto rimane inattivo e il caso (B) in cui, constatata la presenza di un fermo macchina lungo, si rialloca il personale diretto. Come si può notare il costo causato dalla fermata è, nel secondo caso inferiore. [3]



**Figura 1.4: costi di fermo macchina cumulati (la risorsa non è collo di bottiglia )**

Nel secondo, in Figura 1.5, esempio il confronto viene fatto tra la situazione di fermo macchina senza interventi, caso (A), con spostamento della produzione su un'altra macchina disponibile, caso (B), e con riallocazione del personale, caso (C).

La pendenza della retta di costo cumulato cambia, diminuendo, qualora venga rimossa la causa del costo stesso (lo spostamento della lavorazione su un'altra macchina elimina la perdita di prodotto e quindi del relativo contributo mentre lo spostamento della manodopera durante la riparazione rimuove il costo del personale non operativo).



**Figura 1.5: costi di fermo macchina cumulati (la risorsa è collo di bottiglia)**

Le procedure per la valutazione dei costi consiste nel considerare:

- il tempo impiegato a produrre un pezzo  $T_p$
- il costo indiretto ( $C_i$ )
- il costo diretto della manodopera ( $C_{dm}$ )
- il margine di contribuzione del prodotto che verrà posto uguale al costo di mancata produzione

Ad esempio siano:

- $T_p = 0,5 \text{ min/pz}$
- $C_i = 0.50\text{€/min}$
- $C_{dm} = 0.60\text{€/min}$
- $C_{mp} = 2,50\text{€/pz}$

Allora ogni minuto di fermo si sosterranno, come evidenziato nell'equazione 1.1:

$$C_{\text{per minuto}} = 0.50 + 0.6 + 5 = 6.1\text{€/min} \quad \mathbf{1.1}$$

Se la lavorazione venisse spostata non si sosterrrebbe più il costo relativo alla perdita produttiva e quindi il nuovo costo al minuto diverrebbe pari a 1,1€/min.

Spostando il personale non operativo (a causa del guasto) tale costo si ridurrebbe a 0.50€/min, corrispondente al solo costo indiretto.

Se Tr-To è il tempo impiegato per la riparazione allora, a seconda se la macchina è o non è collo di bottiglia e a seconda della rapidità con cui sono spostati la lavorazione in corso e/o il personale di manodopera, i costi cumulati ( $C_{fm\ cumul}$ ) delle varie situazioni (casi (A),(B),(C)) variano in modo consistente.

Nei grafici precedenti non viene considerato il costo della riparazione, che comprende la spesa per tutti i materiali e le attrezzature utilizzate per il ripristino delle funzionalità e che va ad acuire ulteriormente la pendenza delle rette e quindi ad aumentare i costi cumulati, così come il costo del personale manutentivo che è quantificabile attraverso la durata del singolo intervento. Tale costo è invariante in tutte le situazioni e pertanto non interessante al fine della precedente analisi. [3]

Dall'analisi appena fatta risulta chiaro come parlando di manutenzione solo una piccolissima parte dei costi può essere computata leggendo la voce di bilancio "manutenzione", molti dei costi generati vengono ad essere costi indiretti o indotti a seconda della politica utilizzata e delle performance che si riescono ad ottenere.

## **1.5 LA MANUTENZIONE SU CONDIZIONE**

La manutenzione secondo condizione, Condition Based Maintenance (CBM), conosciuta anche come manutenzione predittiva, utilizza principalmente test non distruttivi, ispezioni visive e analisi dei dati per conoscere lo stato di salute delle macchine, permettendo così di predire il verificarsi dei guasti e aumentare la vita dei componenti, con i conseguenti vantaggi sui costi di manutenzione. La definizione completa di manutenzione sotto condizione è: *monitoraggio di macchine o caratteristiche di processo per determinare qualsiasi condizione che sta provocando un malfunzionamento della macchina.*

### **1.5.1 CBM: Le Ragioni dell'Introduzione**

La competizione industriale è oggi veramente globale con mercati frammentati e clienti che si aspettano di trovare il miglior prodotto al miglior

prezzo con disponibilità immediata. Il successo nel campo manifatturiero, e, quindi, la sopravvivenza sta diventando sempre più difficile da raggiungere e richiede continui miglioramenti e sviluppo sia del prodotto che, soprattutto, del processo produttivo. Soddisfare la domanda del consumatore richiede un alto grado di flessibilità, abilità nel produrre piccole quantità a basso costo e capacità di avere bassi tempi di consegna. Questa tipologia di domanda rende le performance del processo manifatturiero un'arma strategica per la competizione e il successo.

Un'arma importante per mettere al sicuro la produttività è quella di avere un processo di manutenzione ben funzionante. Il processo di manutenzione in un'industria ha probabilmente una delle funzioni più importanti, guardare oltre lo stato attuale delle cose e tenere traccia dei dati dei macchinari in modo da mettere al sicuro i livelli di produttività. Senza una efficiente organizzazione della manutenzione un'azienda può perdere molti soldi a causa della mancata produzione, mancanza di qualità, danni a cose o persone e ritardo nei tempi di consegna. Un miglioramento nella produttività può essere raggiunto attraverso un allargamento della finestra di disponibilità dei macchinari produttivi, questo ha fatto sì che il focus si dirigesse verso nuove e migliori strategie e politiche manutentive.

Attualmente, la maggioranza delle azioni di manutenzione sono dovute o ad un approccio correttivo o a quello preventivo programmato. L'approccio preventivo-predeterminato ha intervalli fissi di manutenzione per cercare di prevenire guasti di componenti, sottosistemi e sistemi e per impedire il loro degrado. La manutenzione correttiva è invece attuata quando un guasto o una rottura si sono verificati.

Entrambi gli approcci hanno mostrato di essere molto costosi in molte applicazioni a causa di

- Perdite di capacità produttiva
- Costo di inventario parti separate
- Mancanze di qualità

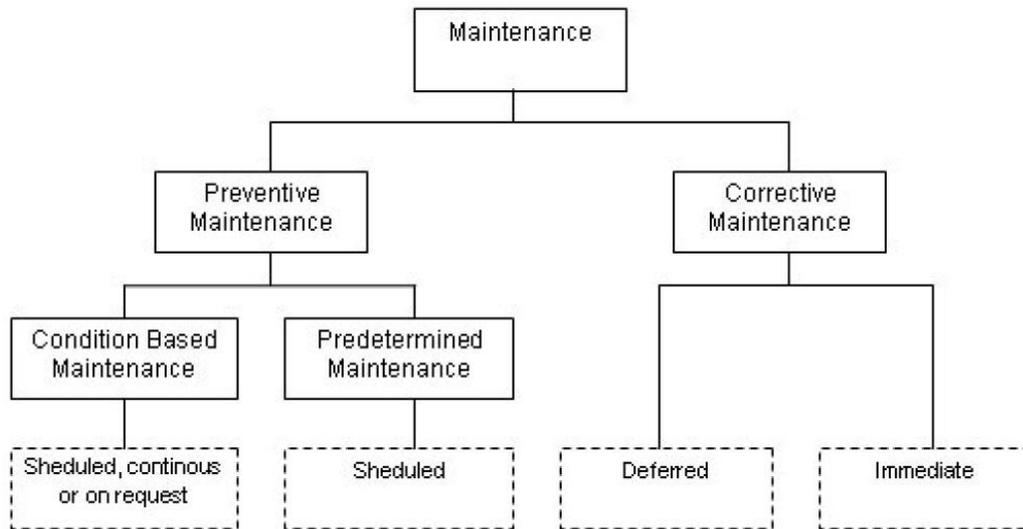
Da quando alcuni decenni fa alcune industrie hanno iniziato ad attuare la manutenzione in maniera predittiva, dove la condizione del bene è il parametro chiave per settare l'intervallo di manutenzione e gli opportuni processi di

manutenzione. La condizione può essere assegnata attraverso differenti livelli di automazione, dalla ispezione visuale da parte dell'operatore ai livelli vibrazionali. Nonostante la CBM porti con se una serie di miglioramenti se comparata con le altre tipologie manutentive, non è ancora comunemente utilizzata in ambito industriale, una ragione potrebbe anche risiedere nella ancora incompleta maturità tecnologica di questi sistemi. Un'altra potrebbe essere la paura di investire molti soldi senza sapere esattamente quantificare i benefici che porterà l'introduzione della CBM.

### **1.5.2 Contesto Teorico di Riferimento**

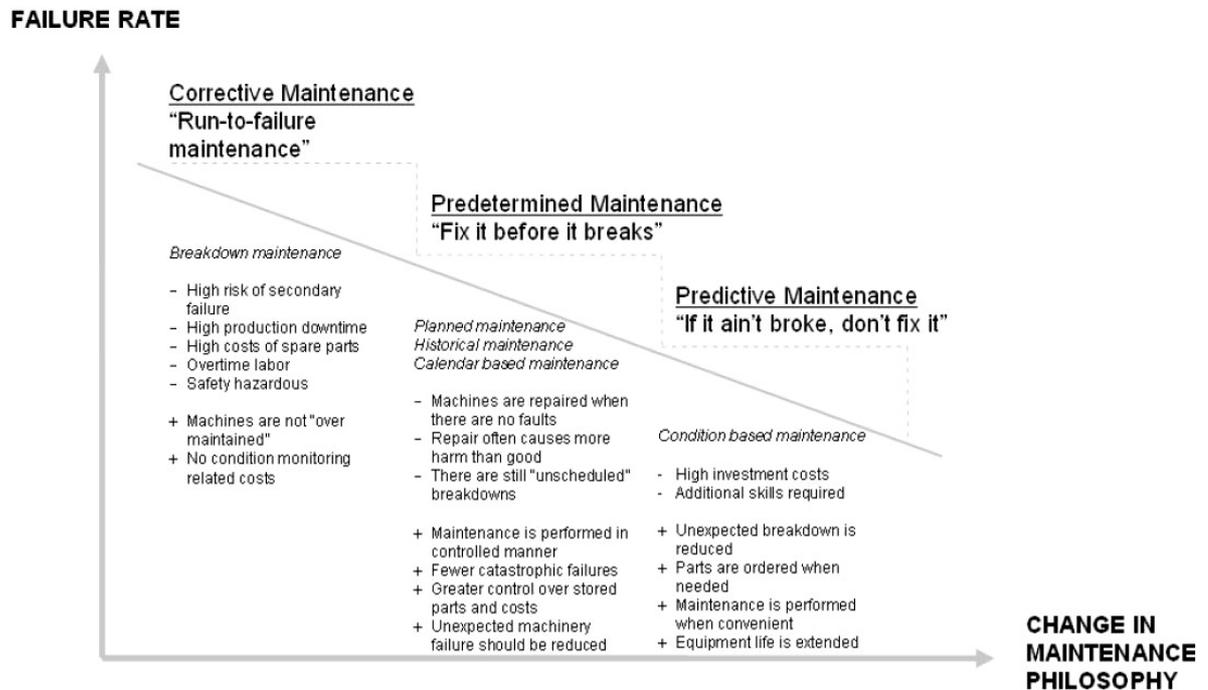
La manutenzione è stata sempre tradizionalmente effettuata sia sulla base di intervalli basati su un parametro temporale (talvolta un parametro di distanza come km o numero di giri) oppure la cosiddetta manutenzione correttiva. Con la politica di manutenzione preventiva la manutenzione è effettuata per prevenire la rottura delle attrezzature e lo faceva sostituendo i componenti oppure effettuando riparazioni raggiunto un determinato valore della vita utile espresso, appunto, secondo un parametro temporale o di numero di giri. Con l'approccio correttivo la manutenzione viene effettuata solo dopo un guasto o un malfunzionamento, per alcuni componenti la manutenzione va effettuata in maniera immediata pena l'impossibilità di proseguire il processo produttivo, per altri invece può essere ulteriormente dilazionata. Ovviamente l'appartenenza alla prima o alla seconda categoria dipenderà esclusivamente dalle funzioni del componente.

In genere si usa dividere la manutenzione preventiva in due ulteriori sottocategorie: "condition based maintenance" e "predetermined maintenance", mentre la manutenzione predeterminata avviene solo quando programmata, la manutenzione secondo condizione ha una certa dinamica che permette di aggiornare continuamente la vita utile attesa del componente e di conseguenza il momento di sostituzione del componente. Per questo motivi ci si riferisce spesso alla manutenzione secondo condizione come ad una tipologia di "manutenzione predittiva". In Figura 1.6 è riportato uno schema che esplicita le suddivisioni appena effettuate.



**Figura 1.6: le politiche manutentive**

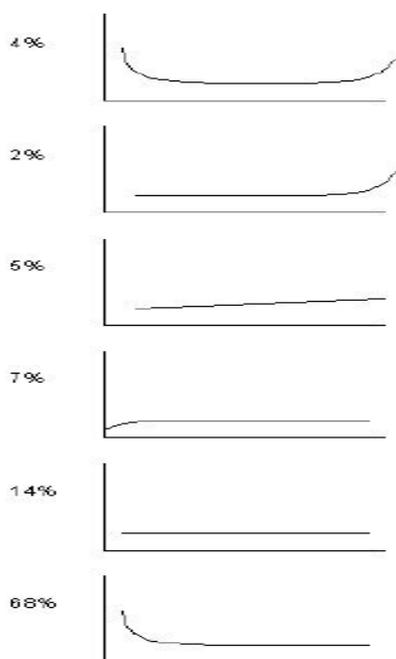
Per i benefici e gli svantaggi dell'una o dell'altra tipologia si può far riferimento al grafico riportato in Figura 1.7.



**Figura 1.7: caratteristiche delle politiche manutentive**

Vediamo adesso maggiormente nel dettaglio come si è arrivati alla manutenzione predittiva. Nel 1978, Nowlan e Heap presentarono uno studio sulle curve densità di rischio di guasto sui componenti della flotta della "United Airlines", lo studio evidenziò sei differenti andamenti tipici di suddetta curva (Figura 1.8) e solo il 4% dei componenti testati dimostrò di appartenere alla cosiddetta "curva a vasca da bagno" fino ad allora considerata l'unica adatta a descrivere la funzione di tasso di guasto in qualsiasi campo applicativo. Lo studio evidenziò inoltre una serie di risultati del tutto sconvolgenti per la concezione che all'epoca si aveva dell'invecchiamento, infatti solo il 6% dei componenti mostrò definire una vera e propria regione di invecchiamento in cui la probabilità di guasto sembrava aumentare significativamente, mentre solo un ulteriore 5% pur non mostrando una regione ben definita mostrava una relazione tra la probabilità di guasto e l'invecchiamento del componente.

Risulta quindi che ben l'89% dei componenti testati non mostrarono praticamente alcuna relazione tra invecchiamento e probabilità di guasto rendendo semplicemente inutile e superfluo l'introduzione di un limite di invecchiamento, infatti se il tasso di guasto del componente dopo 1000 ore di lavoro è lo stesso che dopo 10000 a quale scopo provvedere ad una sostituzione?



**Figura 1.8: possibili trend del tasso di guasto**

Nowlan e Heap conclusero quindi che la probabilità condizionata, rispetto al tempo di utilizzo, di guasto non può essere un parametro fondamentale nella programmazione della manutenzione; nonostante sia un buono strumento per avere più o meno un'idea di quali debbano essere gli intervalli di sostituzione esso non può dirci quando mettere esattamente in atto il processo di manutenzione.

Dopo gli studi di Nowlan e Heap sull'industria aeronautica si sono susseguite numerose ricerche simili, ne citiamo qui solo un'altra, quella che ha riguardato l'industria manifatturiera e che ha evidenziato come il 70% dei componenti non abbiano una ben definita regione di invecchiamento.

Evidentemente le caratteristiche di età del componente non sono il miglior approccio per decidere opportunamente i processi di manutenzione, introdurre invece una manutenzione basata sulla condizione è una soluzione al problema.

La Condition Based Maintenance è stata definita come "Azioni manutentive basate sulle attuali condizioni (prova evidente della necessità) ottenuta da misure in-situ, non invasive effettuate durante l'operatività della macchina". Durante l'arco del tempo numerosi studiosi si sono cimentati nella esatta definizione di cosa è la cbm, senza tuttavia discostarsi eccessivamente dalla definizione sopraccitata che evidenzia in maniera netta come lo scopo della manutenzione su condizione sia quello di evitare di fare azioni manutentive se non quando necessario.

### **1.5.3 La CBM in Italia**

Alla fine di questo capitolo è lecito chiedersi quanto in Italia venga poi applicata la CBM.

È stato pubblicato dall' A.I.MAN. ( Associazione Italiana Manutenzione) nel 2000 uno studio sulla tipologia di manutenzione applicata dalle piccole e medie imprese. L'indagine si è proposta di identificare fra tre politiche manutentive:

- manutenzione correttiva
- manutenzione preventiva programmata
- manutenzione su condizione

e ha diviso il campione secondo due dimensioni, la prima per numero di addetti individuando le seguenti tre categorie:

- aziende con meno di 15 dipendenti
- aziende con più di 15 dipendenti ma meno di 50
- aziende con più di 50 dipendenti

la seconda dividendo il campione in ragione delle settore:

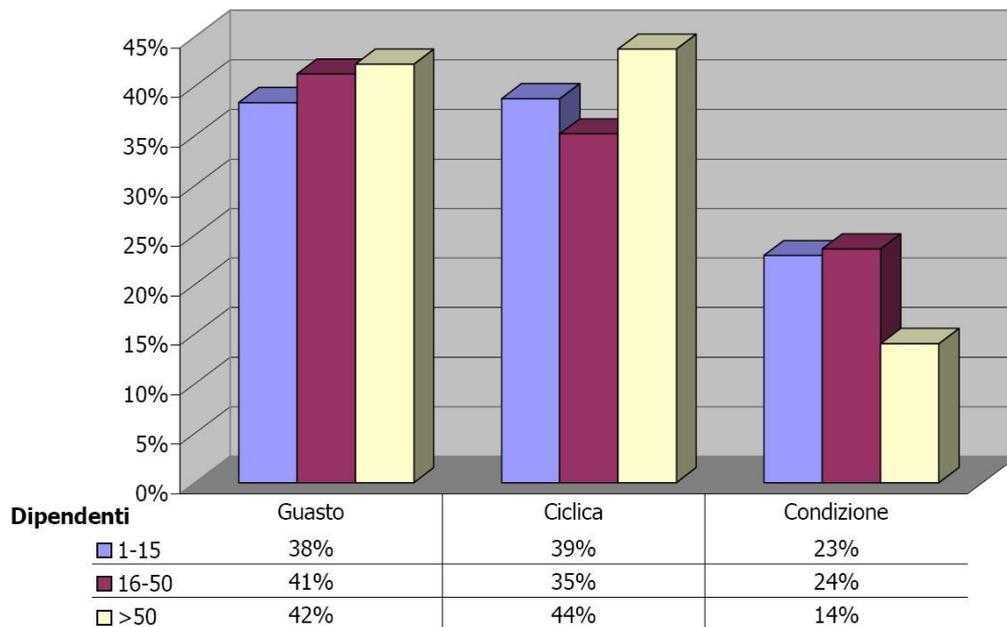
- fonderie ed acciaierie
- chimico e farmaceutico
- elettrico ed elettronico
- meccanico
- siderurgico

Particolarità di questo studio è stato quello di considerare che l'uso di una politica non escludesse le altre; in pratica nelle aziende è adottato un mix di politiche sopraindicate: la scelta trova i suoi limiti nelle specificità tecniche della tipologia impiantistica e nella convenienza economica. [10]

I dati del campione analizzato indicano che l'attività di manutenzione è mediamente così suddivisa:

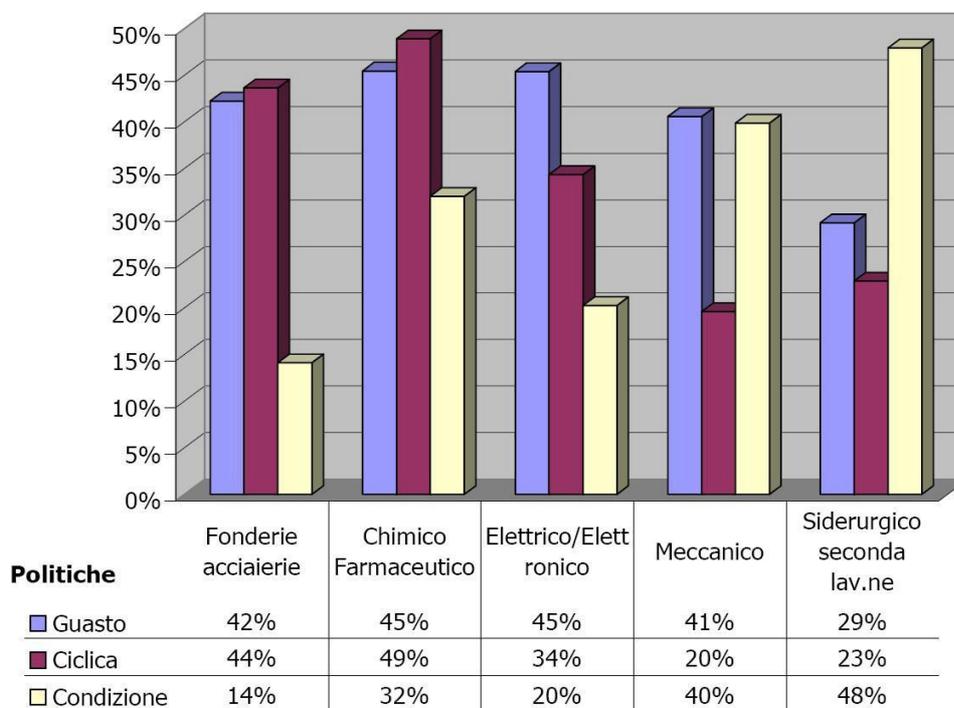
- manutenzione correttiva: 40%
- manutenzione preventiva programmata: 40%
- manutenzione su condizione: 20%

Il valore della manutenzione a guasto, anche se presenta un valore non di molto superiore a quello emerso da altre indagine in paesi europei ed extraeuropei, è da considerarsi comunque troppo elevato affinché la manutenzione aziendale possa offrire un significativo valore aggiunto al processo produttivo, secondo numerosi studiosi del settore il valore della manutenzione a guasto in un'azienda non dovrebbe superare il 20%. Tali dati sono riassunti nel grafico in Figura 1.9.



**Figura 1.9: la manutenzione in Italia nelle PMI (per numero di dipendenti)**

Analizzando invece i dati a seconda del settore delle imprese a seconda del settore di appartenenza otteniamo il grafico di Figura 1.10:



**Figura 1.10: la manutenzione in Italia nelle PMI (per settore)**

Si osserva parallelamente un valore troppo basso della manutenzione su condizione, specialmente per le aziende con più di 50 dipendenti. [10]

#### **1.5.4 Vantaggi e svantaggi della CBM**

I principali benefici che si ottengono dalla CBM sono di carattere finanziario, in quanto appare ormai chiaro come essa possa contribuire effettivamente ad un aumento del tempo di utilizzo dei componenti o dei macchinari e ad una diminuzione significativa dei costi di manutenzione.

Appare inoltre evidente come la quantità di dati raccolti e il coinvolgimento del personale di tutti i livelli gerarchici, coinvolto nella gestione di questa tipologia di manutenzione, portino ad un significativo aumento delle conoscenze sulle caratteristiche della propria componentistica e dei propri macchinari garantendo una base solida per permettere di rendere la funzione di manutenzione più efficiente. Questo avviene essenzialmente perché la CBM permette al team di manutenzione di concentrare efficacemente le energie sugli interventi alle macchine per garantirne il funzionamento secondo i criteri di progettazione. Tutto ciò porta quindi ad una serie di profitti "ombra" dovuti essenzialmente ad un aumento dell'efficienza generale nel lavoro e ad un contenimento del costo degli interventi di manutenzione che diventano sempre meno costosi. La CBM infatti contribuisce sia a minimizzare i costi diretti di riparazione che le rotture improvvise, le quali, alla luce di studi recenti [11], sono quelle che provocano i costi più alti e influenzano spesso anche la vita utile degli altri componenti.

Se ad esempio, con il monitoraggio delle vibrazioni, si individua un guasto ad un riduttore, si può subito procedere alla sostituzione evitando che le vibrazioni influenzino anche l'albero di trasmissione: questo porterebbe, infatti, ad un aumento dei costi di riparazione e ad una quasi sicura perdita di produzione, con un inevitabile incremento del tempo richiesto per l'intervento.

Tuttavia sono molti anche gli svantaggi di un'implementazione della CBM, ed è necessario valutare la possibilità di evitarli con una corretta organizzazione.

Possiamo identificarli in:

- Presenza di molti dati da gestire ed analizzare;
- Necessità di tecnici specializzati, capaci di interpretare i risultati delle analisi;

- La CBM deve essere una cultura aziendale ben assodata;
- La comunicazione tra i team deve essere sempre garantita;
- Il team di CBM deve sempre comunicare i risultati all'azienda.

Bisogna infine sottolineare come i risultati ottenuti, i dati analizzati, le cause e i modi di guasto, le frequenze, ecc., devono essere utilizzati, secondo un "closed loop" che permette di retroazionare gli output, in modo da garantire l'innescò di uno spin-off per il miglioramento continuo del sistema di gestione della manutenzione e un valido supporto alla progettazione. Pertanto la CBM è più di un semplice monitoraggio di parametri, in quanto fornisce informazioni utili per una sempre maggiore conoscenza delle apparecchiature, un continuo miglioramento dell'organizzazione e della sua efficienza.

## **2. STATO DELL'ARTE E SCELTE MODELLATIVE**

### **2.1 PREMESSA**

La necessità di attente e delicate politiche manutentive ha stimolato l'interesse teorico e in molti casi ha portato allo sviluppo di politiche che hanno rappresentato considerevoli novità teoriche e hanno riscontrato una importanza pratica.

La decisione di costruire un modello che descriva il comportamento di un sistema di manutenzione su condizione deriva essenzialmente d'elevato interesse generale mostrato dall'industria verso i progressi scientifico-tecnologici in questo ambito.

Definiamo i modelli di ottimizzazione della manutenzione come quei modelli, matematici o simulativi, il quale obiettivo è quello di ricercare il bilanciamento ottimo tra i costi e i benefici della manutenzione, tenendo conto dei diversi tipi di vincoli che intervengono.

Come si vedrà in seguito la produzione letteraria riguardo la manutenzione su condizione non è affatto esigua e soprattutto negli ultimi anni si è assistito al proliferare di studi, articoli e pubblicazioni sull'argomento. Il limite di molte delle pubblicazioni, anche tra quelle citate, è l'assenza di applicabilità dei modelli proposti alle realtà aziendali. Sicuramente hanno apportato significativi passi avanti dal punto di vista scientifico nella comprensione del modello, ma hanno tralasciato l'adattabilità di questi modelli alle molteplici realtà aziendali.

La nostra intenzione è stata, quindi, quella di ricercare qualcosa che potesse rappresentare in maniera diretta il processo di manutenzione su condizione che facilmente si adattasse e fosse applicabile alle situazioni reali in ambito industriale, dove utilizzare modelli complicati e rigidi è visto solitamente come un impegno gravoso e poco produttivo.

Il nostro interesse si concentra, adesso, nel mostrare quali sono state le principali scelte fatte per costruire questo modello effettuando di pari passo un confronto con la produzione letteraria esistente. Questo lavoro ci ha impegnati nella lettura di numerosi articoli che trattano il problema dell'ottimizzazione del sistema manutenzione, andando a volte anche oltre lo specifico tema della manutenzione su condizione. Tra i tanti sono stati selezionati i più significativi e quelli che meglio ci aiutassero nelle nostre scelte.

### **2.1.1 Applicazione dei modelli matematici alla manutenzione**

È sicuramente interessante essere coinvolti nello sviluppo di una materia in continua espansione e il tema della manutenzione negli ultimi tempi sicuramente lo è stato, il fatto che la modellazione matematica dei processi di manutenzione abbia seguito uno sviluppo tardivo è sicuramente fuor di dubbio, le ragioni di questo fatto sono svariate. Per esempio il fatto che la manutenzione sia rivolta alla produzione e non al prodotto e quindi che presenti dei benefici "vendibili" è stato sicuramente un fattore importante, la manutenzione in quest'ottica è sempre stata vista come un'attività marginale, altre ragioni risiedono sicuramente nella difficoltà di correlare efficacemente le spese di manutenzione con gli incrementi nelle performance produttiva, non che sia di per se chiaro come la manutenzione sia alla base dell'acquisizione di un determinato livello produttivo, ma è stato sempre difficile quantificarne inequivocabilmente i benefici. [17]

C'è comunque una sfida fondamentale da affrontare nell'affermare la modellazione matematica della manutenzione come soggetto di studio, il successo di un soggetto infatti, che è in questo caso essenzialmente una parte della matematica applicata (sia essa ricerca operativa o statistica a seconda dei vostri punti di vista), può essere misurato solo in termini del suo impatto sulla soluzione di problemi di manutenzione reali.

Negli ultimi anni novità sono apparse ad un tasso mai sperimentato prima, tuttavia molta poca attenzione è rivolta all'utilità del modello per risolvere problemi reali attraverso l'adattamento del modello stesso e la sua validazione. Come detto in precedenza dobbiamo assumere che la modellazione della manutenzione sia sicuramente una branca della matematica applicata, ma chi

guardasse le produzioni in termini di modelli crederebbe più di trovarsi di fronte a studi di matematica pura che applicata. [17]

Questa visione dello sviluppo di quest'area non è sicuramente nuova, parafrasando un'affermazione di Tukey, i cui studi nel campo della statistica sono stati considerati illuminanti e che hanno avuto impatti fondamentali per la modellazione matematico-statistica della manutenzione, datata addirittura 1962: "*pezzi di modellazione matematica sulla manutenzione che falliscono, o non sono per niente intesi, a contribuire, seppur solo attraverso una lunga e tortuosa catena, alla pratica manutentiva devono essere giudicati solo pezzi di pura matematica e criticati nella maniera più netta. Inoltre, parti individuali di modellazione matematica devono guardare direttamente alla loro stessa ragion d'essere*". [17]

Secondo A. Scarf del dipartimento di "Operational Research and Applied Statistic" dell'Università di Salford nel regno Unito coloro che si accingono ad approcciare un problema di modellazione matematica della manutenzione dovrebbero concentrare i propri sforzi sulla costruzione di *modelli semplici* che ricerchino soluzioni approssimate ai problemi di interesse dei decision-maker investire parallelamente maggiori sforzi lavorando con ingegneri e managers nella *raccolta di dati* riguardanti l'intero processo manutentivo.

### **2.1.2 Quadro dei lavori analizzati**

Come già detto, sull'argomento è stata fatta una vasta ricerca bibliografica, effettuata principalmente sulle pubblicazioni scientifiche, il risultato è costituito da 28 modelli matematici o simulativi riguardanti la manutenzione su condizione. Ognuno di questi modelli presenta alcune caratteristiche peculiari, tali caratteristiche sono state tutte attentamente studiate e valutate prima di costruire il modello oggetto di tale lavoro in modo da avere un quadro chiaro di cosa fosse necessario modellare e cosa trascurare.

Identificando una decina di caratteristiche chiave dei modelli trovati potremmo riassumere i lavori esistenti nel seguente quadro sinottico in Tabella 2.1, come vediamo per ogni articolo è indicato il riferimento bibliografico all'interno del lavoro, gli autori, il titolo e le principali caratteristiche del modello creato dagli autori.

Nell'ultima parte sono presenti pure dei lavori sul dimensionamento ottimale di un buffer interoperazionale e lavori di commento e di analisi sugli studi, in questi ultimi non si crea nessun modello bensì si commenta o si riassume la situazione attuale in materia.

**Tabella 2.1: Quadro sinottico della letteratura scientifica sul CBM**

Riferimento	AUTORI	TITOLO	matematico (m) simulativo (s)	discreto (d) continuo (c)	multiparametro (m) monoparametro (1)	usura (u) resistenza (r)	statistico (s) deterministico (d)	ispezioni perfette (si/no)	ispezioni parziali (si/no)	manutenzione opportuna (si/no)	multithreshold (si/no)	guasti	Serie (numero elementi/no)	periodo fisso di ispezione (si/no)
19	Grall, Berenguer Dieulle	a cbm policy for stochastically deteriorating systems	m	c	1	u	s	si	no	no	no	no	1	si
20	Castanier Grall Berenguer	a cbm policy with non periodic inspection for a two unit series system	m	c	1	u	s	si	no	si	si	no	2	no
21	Kececioglu Feng Bin Sun	a general discrete time dynamic programming model for the opportunistic replacement policy and its application to ball bearing systems	m	d	1	u	s	si	no	si	si	si	no	si
22	Barros Grall Berenguer	a maintenance policy optimized with imperfect or partial monitoring	m	c	1	x	x	no	si	no	no	si	2	si
23	Castanier Berenguer Grall	a sequential condition based repair replacement policy with non periodic inspections for a system subject to continuous wear	s	c	1	u	s	si	no	no	si	no	no	no
24	Christer Wang	a simple condition monitoring model for a direct monitoring process	m	c	1	u	s	si	no	no	no	si	no	no
25	Ohnishi Kawai Mine	an optimal inspection and replacement policy for a deteriorating system	m	d	x	x	s	si	no	no	no	no	no	si

26	Dieulle Berenguer Grall Roussignol	continous time predictive maintenance scheduling for a deteriorating system	m	c	1	u	s	si	no	no	no	no	no	no
27	Liao Elsayed Chan	Maintenance of continuously monitored degrading system	m	c	1	u	s	si	no	no	no	no	no	x
28	Van der Duyn Shouten Vanneste	Maintenance optimization system with buffer capacity	m	x	x	x	s	x	x	x	x	si	x	x
29	mcCall	maintenance policies for stochastically failing equipment	m	d	1	u	s	si	no	no		si	no	x
30	Barros Berenguer Grall	maintenance policy for a two components system with stochastic dependences and imperfect monitoring	s	c	1	u	s	no	x	no	no	no	2	si
31	Park	optimal continous wear limit replacement under periodic inspection	m	c	1	u	s	si	x	no	no	si	no	si
32	Park	optimal continous wear limit replacement with wear dependet failure	m	c	1	u	s	x	x	x	x	si	no	x
33	Newby Dagg	optimal inspection and maintenance for stochastically deteriorating systems	m	c	1	u	s	si	x	no	no	no	no	si
34	Chang Yuan	optimal maintenance policy for a markovian system under periodic inspection	m	d	1	u	s	si	x	no	si	no	no	si
35	Lam Yeh	optimal maintenance policy for deteriorating systems under various maintenance strategies	m	d	1	u	s	si	x	no	no	si	no	x
36	Dieulle Berenguer Grall Roussignol	sequential condition based maintenance scheduling for a deteriorating system	m	c	1	r	s	si	x	no	no	no	no	no
37	Barata Soares Marseguerra Zio	simulation modelling of repairable multicomponent deteriorating	s	c	1	u	s	si	x	no	no	si	n	si

		systems for on condition maintenance optimisation													
38	Van der Duyn Shouten Vanneste	2 simple control policies for a multicomponent maintenance system	m	c	1	u	s	si	x	si	no	no	s	si	
39	Guizzi Santillo Zoppoli	Condition Based Maintenance: Implementation and optimization of a two-unit serial system model with multi-threshold policy	s	d	1	u	s	si	x	si	si	no	2	no	
40	Amari Mclaughlin	Optimal design of a condition-based maintenance model	m	d	1	u	s	si	no	no	no	no	no	no	
41	Saassouh Dieulle Grall	Online maintenance policy for a deteriorating system with random change of mode	m	c	1	u	s	si	no	no	si	x	1	no	
42	Wu Makis	Economic and economic-statistical design of a chi-square chart for CBM	m	d	1	u	s	no	no	no	no	si	no	no	
43	Wang Zhang	An asset residual life prediction model based on expert judgments	s	c	1	r	s	no	no	no	si	no	no	si	
44	Montoro-Carloza Pérez-Ocon	a maintenance model with failures and inspection following Markovian arrival processes and two repair modes	m	d	1	u	s	si	no	no	si	si	no	x	
45	Kahle	Optimal maintenance policies in incomplete repair models	m	c	1	u	s	x	x	no	si	si	no	x	
46	Wang Chu Mao	A condition-based order-replacement policy for a single-unit system	m	c	1	u	s	si	no	no	si	si	no	si	

Guardando il quadro sinottico ci accorgiamo di come tra i principali studiosi dell'argomento sicuramente vanno citati A. Grall, C. Berenguer L. Dieulle, A. Barros del "Laboratorio di modellazione e sicurezza dei sistemi" dell'Università Tecnologica di Troyes in Francia. Questi autori insieme ad altri francesi, come B. Castanier dell'Università di Nantes o M. Roussinol dell'Università di Marnè La

Valleè, hanno dato vita ad una produzione scientifica impressionante negli ultimi 15 anni rivisitando e modernizzando i vecchi modelli nonché introducendo una serie di caratteristiche innovative negli stessi. Varie combinazioni degli autori sopraccitati hanno collaborato nel costruire ben 8 tra i modelli esaminati ([19][20][22][23][26][30][36][41]). Possiamo senza dubbio affermare quindi che la Francia rappresenti sicuramente la punta di diamante della ricerca nel settore.

Tali studiosi hanno sicuramente strappato la palma del maggior numero di pubblicazioni agli olandesi R. Dekker, R.E. Wildemann dell'Università di Rotterdam e F.A. van der Duyn Shouten dell'Università di Tillburg ([28][38][51][52]).

Tra le principali riviste su cui si è concentrata la ricerca vanno citate "Reliability engineering and system safety", "IEEE transaction on reliability", "Applied stochastic models in business and industry" e l'"European journal of operational research".

## **2.2 MODELLI MATEMATICI E SIMULATIVI**

Le uniche strade per modellare una situazione reale in maniera scientifica possono essere essenzialmente:

- la simulazione
- i modelli matematici

Scegliere la prima o la seconda strada sicuramente influenza tutta una serie di fattori che poi permettono il successo o l'insuccesso del modello.

Attualmente in ben 22 su 28 articoli è stato scelto l'approccio esclusivamente matematico al problema, [19][20][21][22][24][25][26][27][28][29][30][31][32][33][34][36][38][40][41][42][44][46], tuttavia questa soluzione ha scoraggiato l'applicazione in campo industriale di questi modelli essenzialmente a causa della rigidità delle ipotesi e della scarsa leggibilità, infatti nel momento in cui si costruisce un modello su determinate ipotesi, nel caso anche solo una di queste venisse a cadere tutti i risultati ne sarebbero inficiati, inoltre sarebbe impensabile maneggiare in ambito industriale modelli troppo complicati nella costruzione.

Solo in [37], [23] e [30] è stato seguito un approccio simulativo con il Metodo Montecarlo. Nel primo articolo, particolarmente interessante è stata la modellazione dei guasti, nel secondo è proposta un'innovativa politica di decisione della prossima ispezione. In [30] si riesce invece addirittura a studiare una configurazione in parallelo, in cui il guasto di un componente crea una situazione di extra-stress per l'altro. In [43] i diversi stati modellati per l'usura, in questo caso intesa come vita residua, rappresentano degli "expert judgments" per chi deve prendere le decisioni e la simulazione è utilizzata per determinare i dati attraverso i quali si stimano i parametri del modello. In [39], lavoro da cui questo ha tratto ispirazione, l'approccio seguito è stato quello della simulazione tramite un simulatore ad eventi.

Analizzando questo primo aspetto proposto dai diversi articoli, è stato preferito, in questo elaborato, il secondo approccio. Con l'approccio simulativo si vuole dare un contributo innovativo alla ricerca sull'argomento senza ricadere in sterili modifiche e aggiustamenti di modelli già esistenti, e maggiormente, si vuole privilegiare nettamente l'adattabilità del modello, la sua flessibilità nel rappresentare diverse situazioni possibili e la facilità di utilizzo da parte anche di un operatore non necessariamente esperto del settore. Nel complesso la simulazione riesce meglio a rappresentare in maniera aderente una realtà produttiva rispetto ad un modello matematico fatto da un set di equazioni.

### **2.3 MODELLI DISCRETI E MODELLI CONTINUI PER LO STATO DELL'ASSET**

Quando si parla di manutenzione su condizione risulta fondamentale definire cosa sia per noi lo stato di un sistema, essenzialmente possiamo distinguere due categorie di modelli:

- Discreti
- Continui

Nei primi abbiamo un certo numero, finito o infinito, di stati in cui il primo è uno stato di "sistema nuovo" e l'ultimo è lo stato di sistema guasto. C'è una certa probabilità nel tempo di passare da uno stato all'altro e secondo queste probabilità il sistema evolverà in maniera casuale.

Nel secondo caso invece lo stato di salute, o di invecchiamento, del sistema sarà descritto dal valore di un certo numero di variabili. Potremmo per esempio pensare di definire lo stato di invecchiamento con la tripletta temperatura, vibrazione e percentuale delle performance rispetto allo standard.

La natura continua e non discreta del processo di invecchiamento è giudicata evidente in questo lavoro e pertanto si è deciso di propendere per modellare l'invecchiamento come una variabile continua. In accordo con quanto affermato da A.Barros, C. Berenguer e A.Grall , per molti sistemi reali il processo di deterioramento a causa dell'usura è intrinsecamente continuo, per esempio sistemi soggetti all'erosione (come i componenti idraulici), corrosione (condutture), consumo (pneumatici, freni). Per questi sistemi la nozione di "stato discreto" talvolta usata nei modelli di manutenzione potrebbe essere irrilevante in quanto il livello di deterioramento ha un chiaro significato fisico per il decision maker della manutenzione. [23]

In accordo con questi, è evidente come l'obiettivo di questo lavoro è di complicare il meno possibile il modello e lasciare all'usura il suo chiaro significato fisico senza introdurre alcune quantità astratte in materia di stato.

Va detto come in questi modelli l'azione di ottimizzazione sia coincidente con quella di piazzare opportunamente una o più soglie che danno l'input per determinati processi manutentivi, come possono essere la manutenzione preventiva, opportuna o la decisione della prossima ispezione.

Tale scelta viene condivisa da tutti i modelli selezionati tranne 8, che sono [21] [25] [28] [34] [35] [40] [42] [44], in cui si è propeso per un modello a stati discreti, in molti casi finiti.

### **2.3.1 I modelli discreti**

Vogliamo qui accennare ad un esempio di modello discreto, quello di M. Ohnishi, H. Kawai, H. Mine descritto nel loro articolo "an optimal inspection and replacement policy for a deteriorating systems" sul "journal of applied probability" per dare un'idea del funzionamento dei sistemi discreti[25].

In questo lavoro il sistema investigato ha un numero finito di stati di deterioramento, il processo di invecchiamento è invece assunto essere espresso da una processo continuo di Markov che ha uno stato di assorbimento che è

quello di guasto. In particolare vengono indicati i possibili stati in  $0, 1, 2, \dots, i, \dots, N, N+1$ . Dove 0 è lo stato di sistema nuovo,  $N+1$  è lo stato di guasto e gli stati da 1 a  $N$  sono stati di usura intermedia.

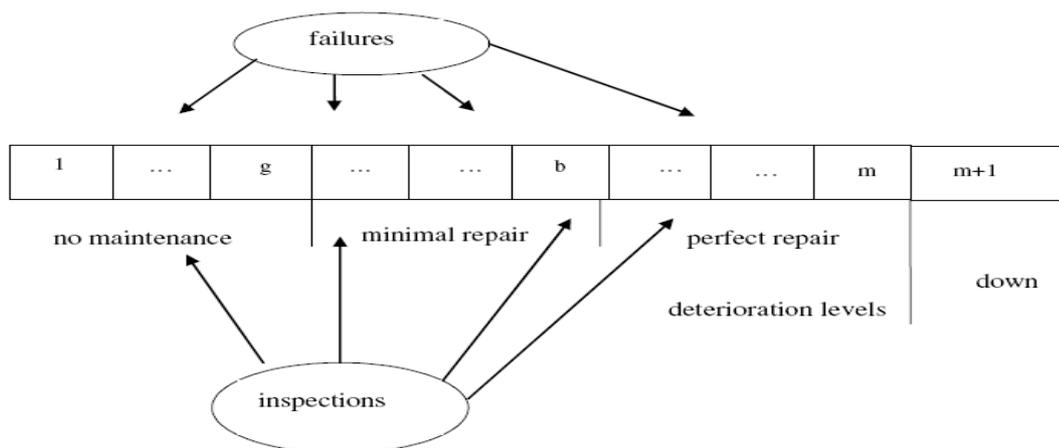
Un sistema che si trovi nello stato  $i$ -esimo può effettuare, sotto una certa probabilità, una transizione verso lo stato  $i+1$ -esimo oppure direttamente verso l' $N+1$ -esimo.

In questo particolare caso pur essendo caratterizzato da stati discreti il sistema evolverà in maniera continua e non ad intervalli discreti.

Scopo del modello è quello di determinare un certo numero di stati in prossimità di quello di guasto, per cui, se da un'ispezione rilevassimo che il sistema si ritrovi proprio in uno di questi, effettuiamo una sostituzione riportando il componente allo stato di nuovo evitando in questo modo i costi di guasto maggiori di quelli di manutenzione preventiva.

La maggior parte degli articoli analizzati che utilizzano il modello discreto propongono un processo basato su "Markov chain". Lo stato del sistema viene identificato attraverso il livello raggiunto, per il quale molti lavori propongono anche una diversificazione per il tipo di manutenzione preventiva da effettuare.

In [44] ci sono due tipi di riparazione, vengono identificati gli " $m+1$ " stati del sistema e tre "ben determinati" casi sono possibili, dall'articolo abbiamo selezionato la figura che sintetizza questa particolare scelta.



**Figura 2.1: diagramma di transizione del sistema in [44]**

Il lavoro propone la necessità di una riparazione minima e di una riparazione perfetta e questa scelta è utilizzata anche in altri studi. [43] [44] [45]

Particolare invece la trattazione che viene fatta da Kececioglu e Sun in [21], dove in realtà viene determinato un valore di tempo di funzionamento determinato a partire da una distribuzione casuale che interpreti il tempo di vita utile del sistema, una volta fatto questo vengono determinati un certo numero di stati dividendo la vita utile per un intervallo di tempo fissato. Così possono coesistere contemporaneamente componenti con 4,6 o 20 stati.

### **2.3.2 Multi parametro o mono parametro**

Nella quasi totalità dei sistemi reali complessi lo stato di invecchiamento del sistema viene ad essere funzione di numerosi parametri, se vogliamo descrivere per esempio lo stato di salute di un'auto dovremmo indicare una serie di parametri dalle emissioni, alle vibrazioni, l'usura del battistrada dei pneumatici, il livello dell'olio etc.etc. Solo conoscendo tutti questi parametri potremmo effettivamente decidere concretamente quando effettuare la prossima manutenzione sull'autovettura.

Ma se già consideriamo singolarmente ognuno dei componenti dell'autovettura in modo tale che ognuno di essi venga a formare un sistema omogeneo dal punto di vista tecnologico potremmo facilmente individuare un unico parametro per indicarne lo stato. Ad esempio per gli pneumatici potremmo usare lo spessore del battistrada, per il motore l'emissioni inquinanti, per la batteria la tensione ai morsetti etc etc.

Effettuando una scelta omogenea con tutti e 28 i modelli esaminati in letteratura sceglieremo di usare un unico parametro per giudicare lo stato di salute del sistema. Questa scelta appare l'unica praticabile dal punto di vista della modellazione.

Tale ipotesi comunque non lede in alcun modo la generalità del lavoro, perché nei casi pratici in cui ci si trova di fronte a macchinari complessi si utilizza comunque una indicazione sintetica di invecchiamento funzione di tutti i parametri che lo influenzano.

### **2.3.3 Parametro di usura o di resistenza**

Dal punto di vista teorico ci possono essere due sensi fisici che si possono dare al parametro di invecchiamento. Uno è quello di un parametro crescente detto di usura. L'altro è quello di un parametro di resistenza, di salute o di performance che invece diminuisce nel tempo.

La quasi totalità degli studi effettuati identifica il parametro di invecchiamento come un parametro di usura non decrescente. La differenza tra un parametro di usura o di resistenza potrebbe essere poco influente sul funzionamento o la fattibilità del modello, sia esso matematico o simulativo. Questa differenza si accentua se si cerca un particolare significato fisico del parametro.

Nel nostro caso abbiamo come oggetto macchinari, componenti o attrezzature che lavorino in un contesto produttivo e pertanto appare gergo comune dire che "un componente si sta usurando velocemente", oppure che "lo stato di usura di una macchina ne affligge il buon funzionamento". Avendo noi come obiettivo quello di fare un modello comprensibile per persone di qualsiasi livello coinvolte nel processo di manutenzione, abbiamo a maggior ragione scelto l'ipotesi di un parametro non decrescente.

In uno studio di Pandey, Van Noortwick e Kallen si trova il concetto di un parametro di resistenza che diminuisce progressivamente. Tale studio, non incluso nei 28 che siamo andati a considerare, effettua questa scelta perché aveva come oggetto esclusivamente l'affidabilità delle strutture, in tal caso può essere più facilmente comprensibile per chiunque come il tempo e l'usura in realtà facciano diminuire la resistenza e quindi la "salute" di una struttura. [55]

Abbiamo già accennato al lavoro dei cinesi W. Wang e W. Zhang, in [43] mediante un monitoraggio basato su condizione, al momento dell'ispezione si ottengono informazioni riguardo la vita residua del componente, se ne studia il legame con gli "expert judgment" fissati calcolando una probabilità condizionata e si ottiene l'informazione desiderata, cioè l'azione da intraprendere.

La difficoltà che avremmo incontrato nel modellare l'usura come un parametro decrescente sarebbe stata di natura convenzionale, avremmo dovuto fissare un valore di vita residua del macchinario decrementandolo nel tempo in maniera opportuna, da qui si capisce la maggiore facilità nel fissare "0" come valore

convenzionale di partenza, in alternativa ad un valore positivo del quale avremmo dovuto motivarne la scelta.

#### **2.3.4 Incrementi statistici o deterministici**

Abbiamo detto come il processo di usura sia essenzialmente codificato da un parametro sintetico non decrescente. Ci chiediamo ora come tale parametro può variare nel tempo.

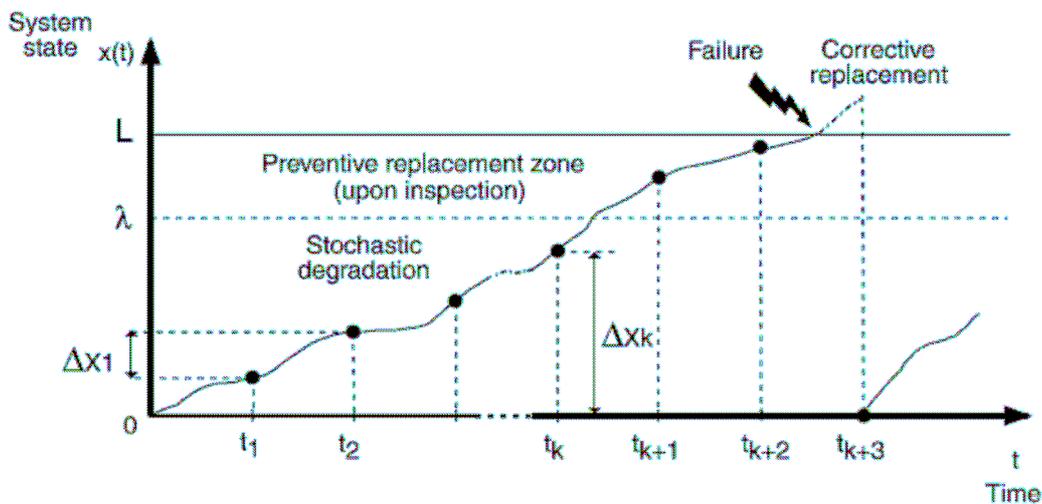
Le possibilità sono anche questa volta due, il parametro può aumentare in maniera deterministica in funzione del tempo oppure può avere incrementi casuali ad intervalli temporali discreti.

Nessuno dei lavori esaminati si fonda su un approccio di tipo deterministico, pensare infatti di conoscere una funzione dell'usura rispetto al tempo rende inutile qualsiasi politica ottimizzativa basata su condizione, basterebbe infatti trovare una soglia temporale che ci impedisse di avere guasti e sostituire preventivamente il componente appena sorpassi tale soglia, decretando così un ritorno alla politica di manutenzione preventiva programmata.

Anche nel nostro modello abbiamo effettuato una scelta di questo tipo, appare logico infatti che dopo ogni lavorazione o dopo un intervallo di tempo piccolo a piacere, l'usura si incrementi di una quantità non conoscibile a priori ma di cui possiamo ricavarne le distribuzioni statistiche che la descrivono.

In genere se indichiamo con  $x_k$  l'usura all'istante  $k$ -esimo il processo di usura viene così descritto nella maggior parte dei casi esaminati.

- lo stato iniziale corrisponde ad uno stato di perfetto funzionamento,  $x_0=0$
- quando  $x_k=0$ , qualsiasi sia  $k$ , significa che il sistema è stato ripristinato "as good as new"
- gli incrementi tra due intervalli di tempo sono non negativi, casuali, identicamente distribuiti e statisticamente indipendenti.
- $x_k - x_{k-1} =$  determinazione casuale da una certa pdf



**Figura 2.2: esempio di processo di usura [19]**

Alcuni lavori si basano su generici "gamma process" ([19], [23], [26], [27], [31], [32], [33] [41] ed altri), altri sono costretti, per la loro particolare strutture matematiche, determinate cdf, ad esempio l'esponenziale ([20]). Diverso ancora è il caso di [24] in cui non viene indicata nessuna particolare pdf di usura, ma semplicemente si fa dipendere l'usura successiva dai dati precedenti assunti come sicuri al 100%. Questo approccio è molto interessante perché facilmente applicabile in ambito industriale dove spesso può essere complicato determinare la distribuzione statistica degli incrementi dell'usura. È altrettanto interessante invece la tecnica di degradazione utilizzata in [37] da Barata, Guedes Soares, Marseguerra e Zio che prevede un aumento dell'usura dal tempo  $k$  a quello  $k+1$  dipendente dal livello di usura in  $k$ . Questa tecnica prende spunto da alcuni studi fatti sulla degradazione dell'acciaio e delle strutture di cemento.

Rappresentano un caso invece totalmente differente i modelli discreti di cui accennato sopra, che hanno la possibilità di definire la transizione da uno stato a quello successivo in maniera anche dipendente.

In altri casi addirittura non si propone proprio lo studio dell'incremento dell'usura in quanto lo stato interno del sistema è supposto non conoscibile ma solo osservabile se è guasto o funzionante. [22] [30]

Come si vede, la maggior parte dei modelli sono basati su distribuzioni della vita utile o su modelli di degradazione Markoviana. L. Dieulle, A. Grall and B. Saassouh hanno proposto una maniera innovativa di incremento di usura in un

recento lavoro,[41], il sistema di deterioramento è soggetto ad un improvviso cambio durante il suo processo. Il modello è sempre basato su un "processo gamma", ma dopo un tempo random il grado di deterioramento subisce un incremento, con un diverso processo gamma.

La necessità di un'applicabilità spinta alle situazioni reali ha indirizzato gli autori verso un modello più particolare. Noi abbiamo scelto di lasciare flessibilità al modello, senza perderne la semplicità e seppur convinti della novità introdotta in [41] riteniamo che questo particolare processo possa solo appesantire il lavoro da svolgere nell'elaborato, senza portare significative differenze rispetto ad un processo di deterioramento del sistema unico.

### 2.3.5 I processi gamma

Come la maggioranza degli studi in materia in questo lavoro si è deciso di modellare l'usura come un gamma process, a questo punto conviene dare alcuni piccoli input su cosa siano esattamente.

La distribuzione gamma è una particolare distribuzione statistica, definita per tutte le  $u$  positive che ha come pdf la funzione mostrata nell'equazione 2.1:

$$\frac{u^{\alpha-1} e^{-u}}{\Gamma(\alpha)}, u > 0 \quad \mathbf{2.1}$$

Dove  $\alpha$  è il parametro che caratterizza la distribuzione ed è sempre maggiore di 0. Una variabile aleatoria di una distribuzione gamma è detta variabile gamma.

Il classico esempio di gamma process  $(\gamma_t, t \geq 0)$  è un processo di incremento stocastico con incrementi indipendenti ed omogenei tali che ogni  $\gamma_t$  segue una distribuzione gamma con parametro  $t$  per ogni  $t > 0$ .

I processi gamma hanno una serie di proprietà, come quella di decomposizione, di indipendenza e di quasi invarianza che sono molti interessanti dal punto di vista matematico, ma che esulano dagli scopi di questo testo. [56]

## **2.4 INTERFACCIAMENTO CON LA PRODUZIONE**

Nessuno dei modelli esistenti, neanche quelli basati su approcci di tipo simulativi, hanno pensato di introdurre un concetto molto interessante: interfacciare un modello della manutenzione su condizione con un modello produttivo.

Pur non avendolo finora esplicitamente chiarito, risulta però chiaro e di per sé evidente, come l'incremento di usura e quindi l'invecchiamento delle macchine sia da mettersi sostanzialmente in relazione con lo svolgimento del loro ciclo produttivo, quando una macchina lavora si usura, a seconda del tipo di lavorazione si può usurare di più o di meno.

Grazie alle libertà di modellazione che l'approccio simulativo ci ha concesso abbiamo deciso di modellare questa situazione, facendo in modo tale che al passaggio di ogni intervallo di tempo fissato venga incrementato il parametro di usura solo per quelle macchine che hanno in quell'ora lavorato. Bisogna aggiungere però che tutti gli articoli prevedono un arresto dell'incremento di usura durante le azioni di manutenzione.

Tale scelta risulta molto interessante anche perché in questo modo macchine vicine in serie si influenzano una con l'altra, se una macchina va in manutenzione oltre al fermo macchina si verificherà anche una situazione di macchina libera, la macchina che non riceverà pezzi da lavorare si fermerà e di conseguenza non si usurerà.

Si è reputato questa scelta fondamentale perché la manutenzione non è un processo che di per sé crea valore aggiunto e che pertanto può essere visto come distaccato da altre funzioni aziendali, la manutenzione è un processo che crea valore aggiunto solo in maniera indiretta e pertanto deve essere evidenziato anche come essa possa permettere o meno un maggiore livello produttivo, gli altri modelli tendevano sicuramente a minimizzare i costi di manutenzione, ma se invece noi spendendo poche migliaia di euro in più riuscissimo a rendere disponibili le macchine per il doppio del tempo e quindi a raddoppiare la produzione, non sarebbe forse conveniente?

In particolare, visto l'ampio utilizzo che si fa in materia, si è deciso di utilizzare la distribuzione gamma come quella che ci dà gli incrementi statistici dell'usura.

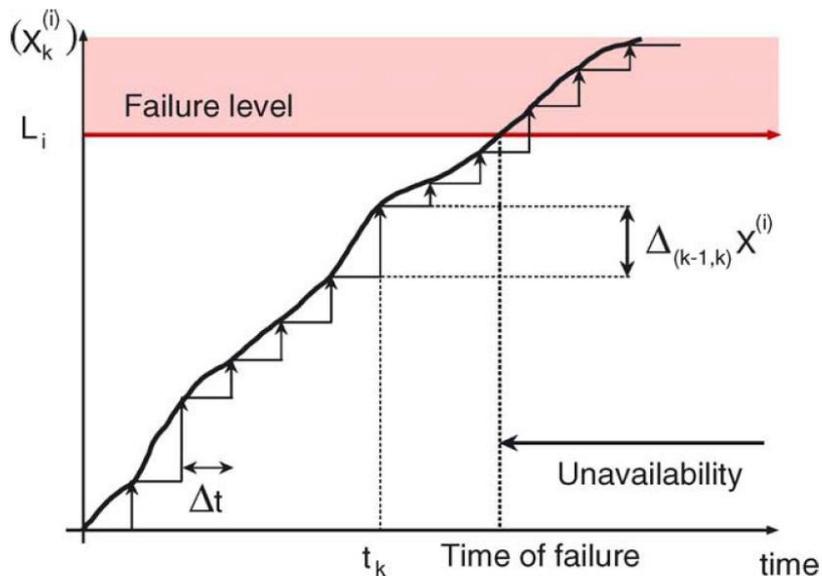
### 2.4.1 Aumento continuo dell'usura

Come già accennato in precedenza la totalità dei modelli esistenti prevede un aumento dell'usura continuo basato sul processo stocastico gamma.

Per esempio in [20], dove si sceglievano degli incrementi di tipo esponenziale (ricordiamo come la erlang e l'esponenziale siano casi particolari di distribuzione gamma), detto  $\Delta_{(k,k+1)}X^{(i)}$  l'incremento del parametro di usura tra il tempo  $k$  e quello  $k + 1$  della variabile di  $X^{(i)}$  che rappresenta il parametro di usura per l'i-simo componente di una serie, abbiamo che questo incremento è sempre presente tra ogni istante  $t$  e  $t+1$ , per qualunque  $t$  e quantificato come estrazione casuale dalla pdf esponenziale come mostrato dall'equazione 2.2 [20].

$$\Delta_{(k,k+1)}X^{(i)} = \alpha_i e^{-\alpha_i x}, \quad \forall \text{ componente } i \quad \mathbf{2.2}$$

L'andamento dell'usura potrebbe essere qualcosa del tipo mostrato in Figura 2.3: incremento usura con andamenti statistici indipendenti.

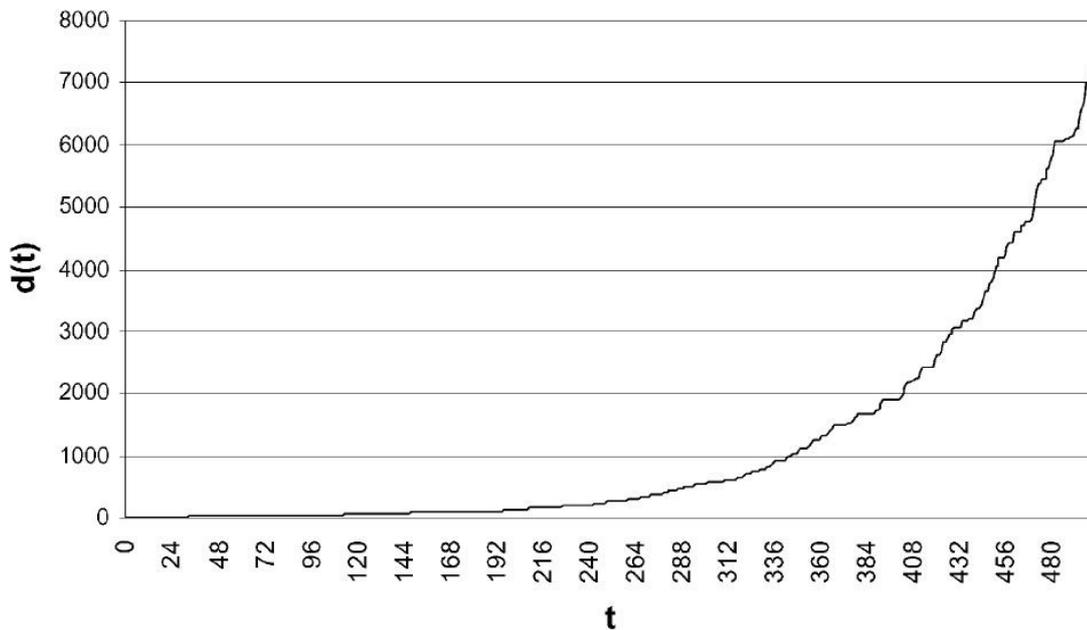


**Figura 2.3: incremento dell'usura con aumenti stocastici indipendenti**

Altri modelli simulativi comunque prevedono aumento continuo dell'usura, come in [37] dove viene indicato il livello di degradazione con  $d(t)$  e viene supposto essere incrementato ad ogni intervallo di una quantità proporzionale al valore assunto prima di tale intervallo, ovvero secondo la formula nell'equazione 2.3:

$$d(k) = (1 + \xi) \cdot d(k - 1) \quad \mathbf{2.3}$$

Dove  $\xi > 0$  è l'incremento percentuale casuale del livello di degradazione che assumerà quindi un andamento del tipo mostrato in Figura 1.1: incremento usura con degradazione percentuale.



**Figura 2.4: incremento dell'usura con degradazione percentuale**

A differenza degli esempi qui sopra fatti, nel nostro caso l'aumento di usura sarà indipendente ad ogni istante  $t$  da quanto successo negli istanti precedenti, ma avverrà solo se la macchina ha contemporaneamente lavorato.

## 2.5 LE ISPEZIONI

Le ispezioni sono una parte fondamentale di un processo di condition based maintenance e dalla loro corretta modellazione può dipendere o meno l'aderenza del modello fatto alle situazioni reali. Le ispezioni sono così importanti perché

danno il via al processo decisionale fornendo una misura dei parametri di condizione sulla base dei quali noi sceglieremo la sostituzione preventiva del componente, la sua riparazione oppure di lasciarlo continuare a lavorare fino ad un certo tempo in cui sarà programmata la prossima ispezione.

In tutti i modelli abbiamo visto come lo stato dell'asset sia espresso attraverso un unico parametro, in ogni modello matematico per la manutenzione su condizione abbiamo sempre che al termine del processo di ispezione noi abbiamo una stima(perfetta, imperfetta o parziale) di tale parametro.

Tale stima serve per determinare nei sistemi discreti se stiamo in uno degli stati in cui abbiamo trovato che è conveniente sostituire i componenti perché prossimi al guasto, invece nei modelli continui se ci troviamo al di sotto o al di sopra di qualcuna delle soglie previste dal modello che fanno scattare determinati processi manutentivi come la manutenzione, la riparazione oppure il buon funzionamento.

### **2.5.1 Ispezioni perfette o imperfette**

Nella realtà della produzione industriale, quando applichiamo una politica CBM abbiamo un determinato numero di punti di misura con delle strumentazioni che ci forniscono il valore di alcuni parametri che sono significativi per giudicare il buon funzionamento di una macchina.

Qualsiasi strumento di misura è caratterizzato da avere una certa accuratezza di misura, una certa ripetibilità ed altre caratteristiche ci fanno capire la precisione con cui lo strumento ci darà il valore del parametro da misurare. Sappiamo che questa precisione, per quanto spinta, non potrà mai essere assoluta e non potremmo mai essere certi di una misurazione se non oltre un certo numero di cifre significative.

Questa caratteristica è da considerare quando si usa un sistema CBM, in quanto dovremo tenere in conto come le misure strumentali che noi facciamo siano comunque affette da un certo margine di aleatorietà e che pertanto ci potrebbero condurre a errori nella decisione da intraprendere.

Purtroppo introdurre questa caratteristica all'interno di un modello può risultare molto complicato e appesantire notevolmente la sua risolvibilità, a tutt'ora sono stati pubblicati solo 2 studi da parte di Berenguer, Grall, Barros e Dieulle dove

questa caratteristica è stata modellata oltre al lavoro di Guizzi, Santillo e Zoppoli.[22][30][39]

Negli altri studi del nostro campione le ispezioni erano supposte essere ogni volta perfette.

Nel modello che ci accingiamo a costruire è stato deciso di introdurre invece una certa aleatorietà delle misure per meglio rispecchiare il processo reale. Sarà poi il progettista del modello o il suo utente a decidere che grado debba avere la precisione della misura in funzione del processo di misura reale che vogliono andare a modellare.

### **2.5.2 Ispezioni su sistemi parzialmente conoscibili**

Il caso ideale, ampiamente studiato in letteratura, è quando lo stato di salute dell'unità oggetto di studio è completo e perfetto, ovviamente se stiamo trattando più unità contemporaneamente conosceremmo lo stato di tutte le macchine.

Comunque in alcune situazioni reali il livello di informazioni sull'unità è imperfetto o solo parziale. Informazioni parziali sono ottenute quando per un'unità è impossibile o troppo costoso essere monitorata sia in continuo che ad intervalli regolari.

Nel nostro modello supporremo le unità oggetto dello studio come tutte perfettamente accessibili e monitorabili, sia dal punto di vista economico che fisico, anche se le informazioni possono essere imperfette a causa dell'accuracy degli strumenti. Questa scelta è stata fatta perché attualmente il progresso tecnologico e lo stato dell'arte in materia di CBM ci fa ben sperare affinché questa ipotesi sia verificata nella realtà.

Tuttavia non sono pochi i modelli che invece si riferiscono alla possibilità di non poter accedere ad informazioni sullo stato di una macchina, essendo questa opzione lontana da ciò che noi volevamo modellare solo uno dei modelli che prevedono questa possibilità è stato incluso nel campione dei 28 studi che abbiamo considerato, in particolare ci riferiamo a "a maintenance policy optimized with imperfect and/or partial monitoring" di A.Barros, A.Grall, C.Berenguer. In questo lavoro noi possiamo direttamente accedere solo all'informazione che il componente sia guasto o funzionante, nessuna

informazione sullo stato di deterioramento può essere ottenuta. In questa pubblicazione la politica ottimale viene decisa in base a statistiche su guasti e malfunzionamenti. [22]

La durata dell'ispezione è supposta finita e decisamente inferiore a quella relativa agli interventi di manutenzione. Gran parte dei lavori definisce tale azione istantanea, negli articoli non è affrontato il problema della disponibilità di ispettori. Introducendo la possibilità di un'attesa perché la macchina sia ispezionata è necessario prevedere una durata per l'attività di ispezione che impegni una o più risorse rendendole indisponibili per le altre macchine.

## **2.6 LE SOGLIE E LA MANUTENZIONE OPPORTUNA**

Ricapitolando le scelte finora fatte abbiamo scelto di rimodellare unità il cui stato di salute è esprimibile attraverso un unico parametro, non decrescente, soggetto ad incrementi statistici indipendenti da parte di una distribuzione gamma.

Nei casi reali ci sarà un tecnologo che ci dirà che giunto ad un certo valore  $L$  del parametro di usura, il componente è da considerarsi guasto perché non più capace di assolvere alle proprie funzioni, insomma le sue performance si azzerano, tale soglia verrà detta "di guasto". Altra eventualità è invece quella del guasto accidentale per cui, ad un qualsiasi livello di usura, può accadere che il componente si guasti e non sia capace di assolvere ulteriormente alle proprie funzioni.

Sulla base di questa soglia di guasto, scopo della CBM, è quella di individuare, secondo criteri solitamente economici, una posizione ottimale per la soglia di manutenzione preventiva. Cioè quella soglia per cui, se trovassimo da un'ispezione che il parametro di usura la abbia oltrepassata, effettueremo una manutenzione preventiva del componente in modo tale da impedire che esso si guasti e blocchi la produzione. Ovviamente se trovassimo l'usura sotto tale soglia considereremo il componente buono e lo lasceremo lavorare

Abbiamo quindi visto come la determinazione di una soglia e il suo posizionamento, corrispondono all'introduzione di un determinato processo decisionale nella manutenzione su condizione. L'introduzione di una soglia di manutenzione preventiva costituisce il minimo per l'introduzione di una politica di

CBM (altrimenti ricadremmo ovviamente in manutenzione correttiva correggendo solo i guasti).

Tuttavia il progresso nel campo della ricerca ha introdotto ulteriori soglie che corrispondono ad ulteriori processi e decisioni da intraprendere nel campo della manutenzione su condizione. Principalmente i processi attuati sono due:

1. una soglia di manutenzione opportuna
2. ulteriori soglie per decidere la data di prossima ispezione

In tali casi si parla di CBM multithreshold, che non significa altro che multisoglia. Tale metodologia, se opportunamente ottimizzata, consente un ulteriore abbassamento dei costi rispetto alla normale applicazione di CBM.

Un solo studio, di recente pubblicazione, costruisce un modello caratterizzato da una soglia ( $L_p$ ) per il lancio dell'ordine del componente. Nessuno degli articoli che approfondiscono lo studio dell'ottimizzazione di un sistema manutentivo basato su condizione discute il problema della disponibilità dei pezzi da sostituire, per tutti illimitati e istantaneamente disponibili.

L. Wang, J. Chu e W. Mao in [46] introducono un lead time di approvvigionamento del componente che influenza il posizionamento delle soglie. Nel modello che proponiamo è stata presa la decisione di analizzare un caso di CBM multithreshold per la motivazione sopra espressa, che permette un abbattimento ulteriore dei costi. Tra i 28 studi del campione considerato solo sei prevedono l'utilizzo di più soglie oltre quella di manutenzione preventiva. [20] [21] [23] [34] [38] [39] [41] [43] [44] [46] Il resto invece per semplicità escludono qualsiasi altro processo di manutenzione al di fuori della sostituzione preventiva.

### **2.6.1 Le prossime ispezioni**

In [19], [20] e [23] la scelta del periodo di prossima ispezione è fatto sulla base di un criterio appunto multisoglia, oltre a quella di manutenzione preventiva, infatti, ulteriori livelli ci permettevano di identificare il componente buono all'interno di diverse zone, che ci permettevano di decidere quando effettuare la prossima ispezione. In [19] e [23] vengono previste  $n$  generiche soglie, invece in [20] possiamo solo decidere tra ispezionare il componente tra 2 periodi e nel prossimo periodo.

Non tutti gli articoli prevedono una soglia di ispezione, ad esempio in [43] e [46] il sistema è ispezionato periodicamente ad istanti fissati  $T+k\Delta t$ , in [41] la complessità del modello, già introdotta nel paragrafo 2.3.4, impone un monitoraggio continuo. In [40] gli intervalli di tempo tra successive ispezioni sono modellati mediante una distribuzione esponenziale di cui si fissa il valore medio.

La nostra idea è stata inizialmente quella di scegliere una politica di questo tipo, e abbiamo scelto di adottare diverse possibilità: prossima manutenzione tra 1,2,3,4 o anche 5 giorni.

Ricordiamo che l'usura varia su base oraria, quindi è come se dicessimo prossima ispezione tra 24, 48, 72, 96 o 120 periodi. La possibilità di adottare solo un certo numero di possibilità tra i periodi in cui schedulare la prossima ispezione è considerata totalmente innovativa in materia e introdotta nel modello, come molte caratteristiche, gli permette di aderire quanto più possibile il modello alla realtà. È poco veritiero ritenere che l'ispezione sia possibile in qualsiasi istante, sicuramente più vicina alla realtà è la scelta di controllare le macchine ad inizio giornata lavorativa o anche ad inizio turno, ritenendo che gli ispettori preferirebbero fare un giro di ispezione delle macchine con cadenza giornaliera, magari di mattina così da iniziare di seguito la manutenzione. Detto questo, ci pare utile sottolineare, come l'approccio simulativo con simulatore ad eventi consente di specificare le particolarità dell'orizzonte temporale da esaminare, intendendo con queste la durata di un anno lavorativo, il numero di turni per giorno e la durata di quest'ultimi.

Merita una citazione per la particolarità dell'ipotesi fatta il lavoro [26] di Barros, Berenguer, Grall e Dieulle in cui non vengono ipotizzate delle soglie per decidere la prossima ispezione bensì una funzione continua del grado di deterioramento. In particolare in questo studio è considerata  $M$  la soglia di manutenzione preventiva,  $T_n$  invece sta ad indicare il momento in cui dovremmo fare la prossima ispezione e con  $X_t$  indichiamo il valore del parametro di usura al tempo  $t$ . La decisione di quando schedulare la prossima ispezione obbedirà alla legge indicata nell'equazione 2.4:

$$T_{n+1} = T_n + m(X_t) \quad \mathbf{2.4}$$

In particolare la funzione  $m()$  dovrà essere definita in  $[0, M[$  e assumerà valori decrescenti in  $\mathbb{R}^+$ . Nello studio è previsto anche che tale funzione si limitata inferiormente da un valore  $m_{\min}$  per impedire che la prossima ispezione sia schedulata troppo in prossimità di quella attuale.

### **2.6.2 La manutenzione opportuna**

Questo sicuramente rappresenta il concetto più innovativo introdotto negli ultimi anni in materia di manutenzione.

Solitamente eravamo abituati a politiche che, se pur considerate ottimali, vedevano tale ottimizzazione come singola per ogni macchina, trascurando le interazioni che si potessero verificare tra le macchine stesse. Quest'aspetto pur toglieva sicuramente una possibilità importante per sfruttare risonanze e rendere il sistema più armonico.

Il concetto di manutenzione opportuna, invece, introduce proprio una relazione tra macchine in serie della stessa linea produttiva. Sappiamo tutti come una fetta consistente dei costi, quando si parla di manutenzione, sia da attribuire ai cosiddetti costi indotti, cioè costi di setup, costi di fermo macchina etc etc. Nel caso si verifichi la necessità di fare manutenzione su una macchina o un guasto che impedisse alla linea di essere produttiva, non sarebbe opportuno cercare di sfruttare questo tempo per verificare se fosse, appunto, opportuno effettuare una manutenzione su altri componenti o macchinari in serie? Questa è appunto la definizione di manutenzione opportuna che potremmo in qualche modo definire 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 che sta alla base di questo processo è quello di cercare di spalmare i costi indiretti della manutenzione su più macchine.

Supponiamo di avere 2 macchine identiche A e B che lavorino in serie, tali macchine presentano un medesimo tempo, supponiamo in questo esempio deterministico  $t$  di manutenzione, e presentano un costo diretto  $c_d$  di manutenzione e quando sono in manutenzione generano una serie di costi indiretti  $c_i$  ogni volta che vanno in manutenzione a causa dello spegnimento e

riavviamento della linea produttiva, potremmo supporlo identico per tutte e due le macchine avendo specificato come il tempo di manutenzione possa essere lo stesso per entrambi i macchinari. Qualora la macchina A si fermasse per un guasto e non cogliessimo l'occasione di fare manutenzione sulla macchina B e questa si fermasse dopo poco avremmo che il costo totale  $C_{tot} = 2 * ( c_i + c_d )$ , se invece avessimo colto l'opportunità che ci fosse stata presentata dal fatto che la macchina B fosse comunque ferma e avessimo deciso di effettuare della manutenzione anche su quella i costi totali sarebbero stati:  $C_{tot} = 2 * c_d + c_i$ , risparmiando in totale  $c_i$ , che spesso può essere anche molto maggiore di  $c_d$  portando in prima approssimazione ad un risparmio anche del 50%.

Già nel 1993 questo concetto fece apparizione in uno studio di Vanneste e van der Duyn Schouten, [38], dove si studiava la possibilità di sostituire tutti gli M componenti di un sistema qualora uno di essi andasse in manutenzione e un certo numero K stesse in uno stato, chiamato dagli studiosi, di dubbio. Tale procedimento è stato subito ripreso da Kececioglu e Feng-Bin Sun, [21], che hanno proposto un modello in cui si avevano M+1 componenti, di cui M monitorabili ed uno no, essi per primi hanno introdotto il vero e proprio concetto di soglia di manutenzione opportuna come quella soglia che, qualora il componente non monitorato si fosse guastato obbligando la linea al fermo, potesse aiutare a decidere se fare o meno manutenzione sugli altri componenti. C'è stata poi una pausa nell'utilizzo di questa politica che è stata poi riproposta in uno studio dei più volte citati A. Grall, B. Castanier, C. Berenguer, [20], nel 2004. Da questo momento in poi sono comparsi altri modelli che introducevano la possibilità di manutenzione opportuna al loro interno.

In [20] è studiato un modello composto da due unità in serie sottoposte ad un graduale deterioramento, con soglie di manutenzione relative al guasto, alla manutenzione preventiva e all'ispezione. Oltre queste, introducono una soglia di opportuna che consente di ridurre i soli costi di set up.

Nel nostro modello abbiamo ovviamente deciso di introdurre la possibilità di effettuare manutenzione opportuna che potrebbe essere capace di abbattere significativamente i costi indiretti di manutenzione, stranamente l'altro lavoro simulativo completo in materia, quello di Barate e altri [37] non ha previsto questa possibilità. È stato invece qui ritenuto importante concentrare l'attenzione

su questo tipo di politica. L'ispezione avviene a livello di sistema nonostante sia definita una soglia di ispezione per ogni macchina, questa scelta consente una maggiore possibilità di intervenire in maniera opportuna. È stato ritenuto che non includere una politica di questo tipo nel proprio modello fosse semplicemente un passo indietro dal punto di vista scientifico.

## **2.7 I GUASTI**

La manutenzione è una funzione industriale con lo scopo di riparare o di prevenire l'insorgenza di guasti, non modellare correttamente questa possibilità significa trascurare l'oggetto stesso della manutenzione.

Ovviamente tutti i modelli tra quelli considerati prevedono in qualche modo che il componente possa essere considerato guasto. Storicamente la possibilità che un componente possa subire un guasto è stata sempre relazionata ad un parametro temporale, sono numerose le distribuzioni che ci dicono con che probabilità un componente subisca un guasto ad un determinato tempo  $t$  (pdf), oppure che si guasti entro un determinato tempo  $t$  (cdf).

Nel caso di manutenzione su condizione ovviamente questo concetto è stato superato e il guasto viene essenzialmente relazionata rispetto al parametro di usura o di resistenza.

Nella maggioranza dei modelli esaminati un componente viene considerato guasto qualora il parametro di usura superi una certa soglia, solitamente indicata con  $L$ . In poche parole fintantoché il componente mostra un valore di tale parametro al di sotto della soglia il componente viene considerato perfettamente funzionante e appena oltrepassata tale soglia il componente viene invece considerato guasto, scopo dei modelli di ottimizzazione è quello di settare una opportuna soglia di manutenzione preventiva, al di sotto di quella di guasto, affinché, qualora ispezionassimo il componente e ci accorgessimo che la soglia preventiva è stata oltrepassata, si provveda alla sostituzione del componente prima che questo vada in guasto. Tale approccio non prevede che un componente o macchinario si possa guastare qualora presenti valori di usura al di sotto della soglia di guasto.

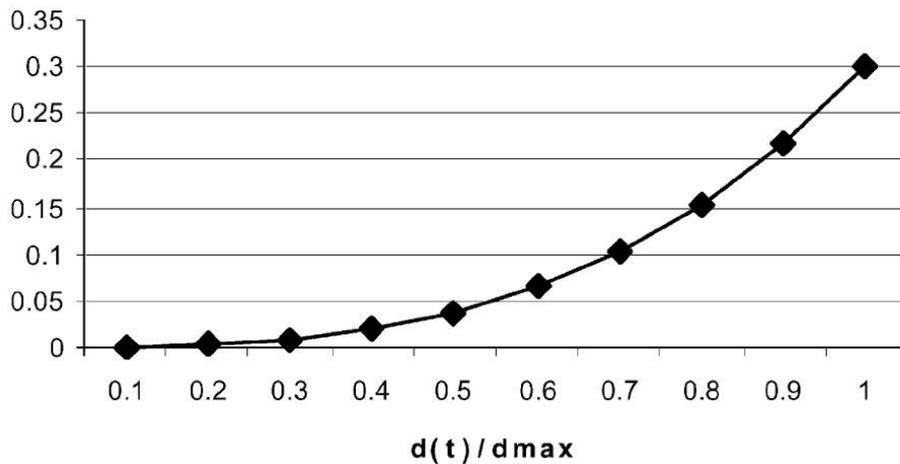
Pur essendo in linea con la concezione alla base della CBM questa considerazione appare notevolmente lontana dalla realtà sperimentata giornalmente in cui

possono accadere guasti anche non previsti ai macchinari e ai componenti su base essenzialmente accidentale.

La possibilità che un componente vada semplicemente in guasto senza prevederlo è modellata nei modelli [21] [22], dove però tale possibilità è essenzialmente legata al fatto che noi non possiamo conoscere con sicurezza lo stato del componente, per questo i modellatori sono stati costretti a prevedere l'insorgenza di guasti su base casuale.

Anche in [28] i guasti possono accedere casualmente, ma questo essenzialmente perché il modello guarda ad un'ottimizzazione esclusivamente economica e non effettua alcuna considerazione di tipo ingegneristico, per ottimizzare un livello di un buffer, per fare ciò ha bisogno di ipotizzare che uno dei due macchinari, a monte o a valle di tale buffer, si possa guastare sotto una certa probabilità. Discorso simile può essere fatto per [29] e [32] dove, pur potendo accadere un fenomeno di guasto su base probabilistica, questa probabilità non è modellata in maniera dettagliata, ma solamente usata in un modello più complesso di ottimizzazione economica.

Già maggiormente vicini alla realtà risultano gli approcci in [35] e [37] dove è prevista che un componente o macchinario possa andare in guasto a qualsiasi livello di usura tra 0 e quello di guasto. Tuttavia tale possibilità è legata esclusivamente al fatto che tra il tempo  $k$  e quello  $k+1$  si presenti in maniera casuale un aumento del parametro di usura tale da far andare a  $k+1$  il valore del parametro oltre la soglia di guasto. Su queste ipotesi, ad esempio in [20] è ricavata una curva di probabilità di guasto in funzione del rapporto tra il valore attuale del parametro di usura (nel modello indicato con  $d$ ) e quello considerato di guasto ( $d_{\max}$ ), tale curva viene mostrata in Figura 2.5: probabilità condizionata di guasto in [20].



**Figura 2.5: probabilità condizionata di guasto in [20]**

In tale modello questa eventualità può essere più o meno probabile al proseguire dell'aumento dell'usura perché anche gli aumenti tra 2 intervalli di tempo sono proporzionali al valore assunto dall'usura.

Nel nostro modello vogliamo far evolvere ulteriormente la concezione del guasto all'interno dei modelli in modo da farla aderire quanto più possibile alla realtà industriale, fiduciosi di come questo possa aiutare la nostra volontà di fare un modello applicabile. Specificheremo meglio come abbiamo fatto e le considerazioni su cui ci si è basati nei prossimi sottoparagrafi

Meno rilevante ma comunque utile è confrontare i diversi articoli sulla modellazione delle azioni di manutenzione, riferendoci in particolare alla capacità del modello costruito di accorgersi istantaneamente del guasto o, in alternativa, in seguito ad una ispezione e alla necessità di considerare la successiva azione correttiva trascurabile, in termini di tempo, o attribuirgli una durata che può essere deterministica o casuale.

Tutti gli articoli sono d'accordo nell'attribuire un diverso peso agli interventi di manutenzione correttiva o preventiva, come è dovuto pensare se si voglia adattare il modello alla realtà. Le differenze sono nel determinare tale peso attraverso la voce di costo o la durata dell'azione, in quest'ultimo caso è ovvio ritenere che la durata è legata ad un costo variabile di mancata produzione o del personale.

Molti degli articoli affrontano il problema dal punto di vista matematico e per questo non assegnano un tempo alla manutenzione così come all'ispezione.

Noi abbiamo puntato a rendere significativa la differenza tra la manutenzione correttiva e quella preventiva, potendo interpretare la prima come una necessità di sostituzione e la seconda come una riparazione o anche una sostituzione parziale. Questa differenza è marcata anche in termini di costo fisso. Le scelte riflettono le condizioni imposte, in un ambiente industriale, quando si vuole implementare un sistema di manutenzione basato su condizione, è abbastanza ovvio che il monitoraggio e l'intervento preventivo sono giustificati economicamente solo se il guasto rappresenta un evento da evitare. La natura di un intervento manutentivo è variabile entro limiti quanto mai ampi. L'intervento a rottura rappresenta una soluzione un pò più rudimentale, ed è fattibile quando può essere effettuato senza rallentamenti della produzione e quando si riferisce ad esigenze che non presentano particolari caratteristiche di urgenza. Nel modellare una determinata realtà abbiamo fatto nostre le ipotesi di guasti rilevanti sia sotto il profilo economico che sotto il profilo tecnico.

### **2.7.1 I guasti in seguito ad ispezione**

In alcuni modelli l'operazione di manutenzione correttiva viene performata solo qualora in seguito ad un ispezione determinassimo un valore dell'usura maggiore della soglia di guasto, tale modalità appare evidentemente irrealistica. Nella maggior parte delle realtà il guasto di un macchinario risulta immediatamente evidenziabile in quanto smette di assolvere alle funzioni previste.

In questi modelli, che sono quelli indicati nel quadro sinottico di Tabella 2.1 le ipotesi fatte fanno praticamente sì che il guasto sia snaturato, non più come una condizione di mancato funzionamento dell'apparecchiatura, bensì solo uno degli stati distinguibili in seguito ad un'ispezione.

### **2.7.2 La probabilità di guasto**

Mostriamo adesso come abbiamo modellato la probabilità che un componente si guasti all'interno del nostro modello. Prima di tutto mostriamo le considerazioni che abbiamo fatto nostre nella modellazione di questo processo:

- Il guasto deve essere possibile a qualsiasi soglia di usura

- Non ci deve essere nessun livello di usura oltrepassato il quale sicuramente la macchina è in guasto
- La probabilità di guasto deve dipendere esclusivamente dal parametro di usura considerato come riassuntivo delle condizioni della macchina
- Il guasto è di per se evidente, non può essere scoperto solo a seguito di un'ispezione

Per fare questo prima di tutto abbiamo bisogno di eliminare qualsiasi concetto di soglia di guasto, tale concetto infatti implica che l'accadimento di un guasto possa essere qualcosa di deterministico oltrepassate certe condizioni critiche in termini di usura, ma questo è difficilmente verificato nella realtà dei fatti. Non esiste che un componente si guasti appena il suo diametro si abbassi sotto un determinato livello, sicuramente invece il progressivo diminuire del diametro farà aumentare la probabilità di guasto finché, in maniera esclusivamente aleatoria, tale guasto si verifichi.

A questo punto risulta evidente come dovremmo costruire una funzione continua, in  $R^+$ , che ci dia la probabilità che, ad un dato livello di usura, l'asset si guasti.

In campo scientifico è oramai comunemente accettato come parametro delle distribuzioni di probabilità di guasto il tempo, cioè i tecnologi ci fanno spesso dire con che probabilità un determinato macchinario si guasterà al tempo  $t$ , oppure con quale probabilità un componente oltrepassi senza guastarsi un determinato tempo di vita utile.

Per la modellazione di questa situazione vengono utilizzate una distribuzione weibull o una combinazione di esse (capace di rendere ancora più flessibile la curva). Nel nostro modello abbiamo deciso di utilizzare, per semplicità, un'unica distribuzione weibull, ciò non toglie che, sempre per il principio dell'adattabilità del modello alle situazioni reali, qualcuno volesse modellare meglio questa probabilità potrebbe modificare solo leggermente il modello e inserire una combinazione di distribuzioni weibull o, in alternativa, una qualunque distribuzione che egli reputi maggiormente adatta.

L'ipotesi che qui è stata fatta è che, semplicemente, si possa determinare la stessa curva di probabilità di guasto utilizzando come parametro non più il tempo, bensì il valore dell'usura. Lo studioso che volesse fare tale studio

dovrebbe semplicemente misurare non più il tempo a cui il guasto si è verificato, piuttosto il valore dell'usura nel momento in cui il guasto si verifica.

Da questo approccio si potrebbe facilmente ricavare la probabilità che un guasto si verifichi ad un determinato livello di usura ovvero la pdf della probabilità di guasto. Integrando tale funzione, potremmo facilmente ottenere la cdf della probabilità di guasto e, di conseguenza, tutte le altre funzioni come la densità di rischio e la funzione di affidabilità.

Vorremmo in questo momento evidenziare un'interessante particolarità di questo approccio, quando come parametro noi avevamo il tempo riuscivamo a determinare un valore per l'MTBF, come il valore atteso di ricomparsa di un guasto in un macchinario o componente perfettamente riparabile. Per fare questo ci sono metodologie matematiche e geometriche. Con le stesse metodologie, applicate però a una curva di probabilità di guasto condizionata all'usura, determineremmo il valore atteso dell'usura a cui si verificherà il guasto. Con il nostro approccio il componente si potrà guastare una volta con un usura di valore 1 e un'altra di valore 1000, ma sapremo che, mediamente, ci attenderemo che il componente si guasterà quando raggiungerà un valore dell'usura di, solo ad esempio, 500.

Come le politiche di manutenzione preventiva programmata, siano esse statiche o dinamiche, vengono in realtà basate e ottimizzate in funzione del valore dell'MTBF ricavato a partire dalle curve di affidabilità e probabilità di guasto. Appare logico come le politiche di manutenzione su condizione debbano essere basate sul valore atteso di usura al momento del guasto e sulle distribuzioni che caratterizzano la probabilità di guasto in funzione dell'usura stessa.

Con l'ipotesi della probabilità di guasto basata sull'usura all'interno di questo modello sembra definitivamente compiuta, dal punto di vista modellativo, la rivoluzione che ha portato dalla manutenzione preventiva programmata a quella su condizione. Mentre la prima rappresentava un approccio cieco, che si basava solo su coordinate temporale, adesso la manutenzione è dotata di una sorta di "bussola" (il parametro di usura) che ci permette di orientarci all'interno del tempo di vita utile di questa macchina.

## 2.8 DISTINZIONE TRA MANUTENZIONE E ISPEZIONE

Nell'attimo in cui andiamo ad analizzare il processo di manutenzione abbiamo più volte evidenziato come buona parte dei costi da essa generati sono di tipo indiretto e legati al tempo di fermo macchina.

Avendo già ampiamente argomentato sulla nostra volontà di interfacciare, proprio per questo motivo, il modello simulativo di manutenzione con uno che simuli la produzione, ci troviamo adesso di fronte a dover decidere come modellare correttamente i costi diretti ed indiretti della manutenzione.

Mentre i primi sono facilmente noti e misurabili, in quanto intimamente legati al costo di sostituzione del pezzo, il costo della manodopera e altri di questa tipologia, i secondi sono sì più difficilmente misurabili, ma comunque scomponibili in due categorie, costi fissi e costi variabili in funzione del tempo di fermo dei macchinari.

Appare quindi necessario modellare anche correttamente i tempi di fermo dei macchinari in quanto sono questi che generano i costi indiretti.

Distinguiamo nel nostro modello tre distinti processi:

- Ispezione
- Manutenzione preventiva
- Manutenzione correttiva

Illustreremo qui di seguito come sono stati modellati

### 2.8.1 Il processo di sola ispezione

Il processo di ispezione ha luogo solo quando programmato, esso richiede l'utilizzo di personale specializzato e di macchinari ad hoc che possono avere un costo variabile con il tempo, tale costo sarà indicato con  $c_{v,isp}$ . Quindi invece che ci saranno dei costi che noi sosterranno per il solo fatto di aver fatto un'ispezione, i cosiddetti costi fissi, che indicheremo qui con  $c_{f,isp}$ .

Il costo di un'ispezione sarà quindi dato dall'equazione 2.5:

$$C_{isp} = C_{f,isp} + C_{v,isp} \cdot t_{isp} \quad \mathbf{2.5}$$

dove con  $t_{isp}$  si è indicato il tempo dell'ispezione.

A seguito di un'ispezione non si genereranno costi di tipo indiretti nella produzione, questo perché è supposto che il processo di ispezione possa essere condotto a macchine in moto, il cosiddetto *on-line monitoring*. Questa caratteristica del processo di ispezione è fondamentale affinché un processo di implementazione di CBM abbia successo, se infatti ogni qualvolta si decida di fare un'ispezione bisognerebbe per forza spegnere le macchine prima o poi si troverà conforto nel ritornare alla manutenzione preventiva programmata, cercando di minimizzare i costi infatti si cercherà sempre di fare in modo tale che ad un'ispezione possa coincidere una sostituzione del componente. Un processo di vera CBM invece può ottenere informazioni sullo stato dei macchinari in poco tempo e a basso costo.

Al termine del processo di ispezione si otterrà una misura dello stato del componente non perfetta, ma soggetto ad un errore di misura dovuto all'imprecisione intrinseca di qualsiasi misurazione. Tale errore è stato coerentemente modellato con una gaussiana di media zero e di deviazione standard dipendente dal tipo di ispezione che si sta facendo. Abbiamo quindi per semplicità escluso che lo strumento di misura possa avere un certo errore di bias, questo anche perché qualora fosse noto un errore di questo tipo il metrologo contribuirebbe subito a correggere lo strumento o la misura in maniera manuale.

La misura dello stato del componente potrà richiedere una sostituzione preventiva dello stesso, una sua sostituzione opportuna qualora fosse possibile oppure la decisione di lasciare il componente inalterato. Qualsiasi sia l'operazione che decideremo di effettuare sul componente o sul macchinario andremo anche a decidere, coerentemente con il suo stato, la data di prossima ispezione.

Ricordiamo come sia impossibile effettuare una manutenzione correttiva sul componente a seguito di un'ispezione, questo perché se abbiamo deciso di ispezionare il componente è perché questo è funzionante. Quindi al limite potremmo decidere di sostituirlo preventivamente perché giudichiamo troppo alte le probabilità che questo si guasti a breve.

### 2.8.2 Il processo di manutenzione preventiva

Il processo di manutenzione preventiva ha luogo qualora, a seguito di un processo di ispezione, determineremmo un valore del parametro di usura al di là della soglia di manutenzione preventiva. Avremo quindi manutenzione preventiva solo a seguito di un'ispezione i cui costi abbiamo già esplicitamente espresso sopra.

Il processo di manutenzione preventiva dovrà invece essere attuato necessariamente a macchine ferme facendo insorgere quindi dei costi indiretti. Tali costi indiretti potranno essere fissi, essenzialmente perché legati ai costi di setup dei macchinari, che chiameremo  $c_{f,ind}$ . Una quota dei costi indiretti sarà invece legata al tempo di fermo delle macchine e pertanto li indicheremo come  $c_{v,ind}$ . Ovviamente i costi indiretti variabili saranno dei costi orari.

In caso di manutenzione preventiva sarà comunque necessario sfruttare delle risorse in termini di attrezzature e manodopera, quindi avremo anche dei costi diretti. Tali costi saranno a loro volta scomponibili in fissi e variabili, quelli fissi saranno principalmente dovuti alla sostituzione del componente e all'utilizzo di materiale di consumo, qui li indicheremo con  $c_{f,man}$ . I costi variabili saranno invece ascrivibili in massima parte all'utilizzo di manodopera e di attrezzature non monouso, saranno qui indicati con  $c_{v,man}$ , come tutti i costi variabili anche questi saranno costi orari.

Se consideriamo quindi  $t_{man}$  il tempo di manutenzione sulla macchina, avremo che il costo di un determinato processo di manutenzione viene ad essere quello indicato nell'equazione 2.6:

$$\begin{aligned} C_{man} &= C_{isp} + C_{ind,man} + C_{dir,man} = & \mathbf{2.6} \\ &= (c_{f,isp} + c_{v,isp} \cdot t_{isp}) + (c_{f,ind} + c_{v,ind} \cdot t_{man}) + (c_{f,man} + c_{v,man} \cdot t_{man}) \end{aligned}$$

oltre ovviamente ai costi di ispezione citati nel paragrafo precedente e già contabilizzati essendo la manutenzione preventiva sempre susseguente un'operazione di ispezione.

Al termine del processo di manutenzione avremo che lo stato del componente sarà ripristinato "as good as new", e verrà contestualmente decisa la data di

prossima ispezione come il massimo tra i periodi previsti (essendo il componente nuovo), nel nostro caso scegliamo 3 giorni.

La manutenzione opportuna funzionerà esattamente come la manutenzione preventiva in quanto corrisponde ad un suo particolare caso. L'unica differenza sarà solo la condizione necessaria affinché tale azione sia performata, infatti sarà possibile fare manutenzione opportuna solo qualora un altro componente in serie con quello oggetto sia in manutenzione e il valore dell'usura sia maggiore della soglia di manutenzione opportuna.

### **2.8.3 Il processo di manutenzione correttiva**

Il processo di manutenzione correttiva è sostanzialmente differente da quello di manutenzione preventiva. Prima di tutto esso non necessita di un'ispezione avendo più volte specificato come il guasto di un macchinario sia "self announcing", cioè si auto-annunci al manutentore.

Nell'attimo in cui sarà necessario fare manutenzione correttiva si utilizzeranno una serie di risorse che quindi comporteranno dei costi diretti, ma si sarà costretti a fermare le macchina contribuendo quindi anche alla generazione di costi indiretti.

Essendo i costi indiretti legati esclusivamente alle opportunità produttive che non sono state colte a causa della manutenzione, tali costi saranno esattamente identici a quelli contabilizzati per la manutenzione preventiva, dove in questo caso  $t_{man}$  viene ad essere il tempo di manutenzione correttiva e non più preventiva.

Per quanto riguarda i costi diretti invece questi saranno specifici per la manutenzione correttiva, in quanto il guasto potrebbe richiedere delle operazioni molto differenti dalla semplice manutenzione con macchine ancora capaci di funzionare. In alcuni casi quando si verificano dei guasti ci sono anche dei danneggiamenti a parti del macchinario che in una semplice manutenzione preventiva non si troverebbe danneggiati. Inoltre anche i costi variabili possono in linea di principio essere diversi per qualsivoglia motivo, come differenti attrezzature richieste. Indicando, in maniera analoga a quanto fatto in precedenza, con  $c_{v,gua}$  i costi orari variabili diretti di guasto e con  $c_{f,gua}$  i costi fissi

diretti di guasto, otteniamo la seguente formula, riportata nell'equazione 2.7, per il costo della manutenzione correttiva o costo di guasto:

$$c_{gua} = c_{ind,gua} + c_{dir,gua} = (c_{f,ind} + c_{v,ind} \cdot t_{man}) + (c_{f,gua} + c_{v,gua} \cdot t_{man}) \quad \mathbf{2.7}$$

Come si può vedere la struttura dei costi tra manutenzione preventiva e correttiva è totalmente simile a meno dei costi di ispezione.

Anche dopo la manutenzione correttiva il componente sarà ripristinato in uno stato di "as good as new" e la data di prossima ispezione sarà rischedulata tra 3 giorni che è il massimo possibile previsto dal modello che costruiremo.

#### **2.8.4 Ispezione e manutenzione: precisazioni**

Quanto specificato nei precedenti paragrafi ha trovato applicazione nel modello dal punto di vista dei costi, ma per quanto riguarda invece l'aderenza della simulazione al processo reale?

Nel processo reale abbiamo una serie di risorse, che detiene la funzione di manutenzione, che sono essenzialmente limitate. Queste riguardano essenzialmente manodopera e attrezzature che non sono sempre disponibili nella quantità richiesta.

Nel nostro modello abbiamo creato due tipologie di risorse:

- Ispettori
- Manutentori

Queste risorse devono essere usate se si vuole effettuare una delle operazioni di cui sopra, se le risorse non sono disponibili l'operazione viene messa in coda e performata solo quando sarà resa disponibile la risorsa di cui necessita. In questo modo i tempi di fermo dei macchinati possono dilungarsi notevolmente in quanto se più macchine dovessero guastarsi a poca distanza una dall'altra non è detto che la seconda abbia subito disponibile dei manutentori capaci di ripristinarne il funzionamento immediatamente. Sarà anche molto diverso il caso di quando molte macchine andranno contemporaneamente in manutenzione o in ispezione, dovendo necessariamente aspettare la disponibilità delle risorse.

Nel modello quindi abbiamo creato una semplificazione della realtà in quanto lo scopo di questo modello è esclusivamente scientifico, probabilmente se avessimo  $n$  macchine probabilmente ognuna necessiterebbe di particolari risorse, Quindi, qualora fosse necessario adattare il modello ad una situazione reale, l'utente dovrebbe creare il numero di risorse apposite ed indicare in quale particolare operazione esse servono. Tale personalizzazione è abbastanza semplice da implementare in un contesto simulativo potrebbe essere altrettanto semplice richiedere che su determinate macchine si utilizzino determinate risorse in una certa quantità e su altre una quantità diversa, oppure su determinate macchine venga utilizzata una risorsa con determinate specializzazione, come in tutte le aziende dove convivono tecnologie diverse, da condizionatori, a computer, a motori elettrici, pompe, etc. difficilmente un'unica figura si occuperà di tutto. Per quanto riguarda i costi sono stati considerati come fissi e noti, questo perché è abbastanza facile determinarli e nella maggior parte dei casi sono calcolabili da qualsiasi responsabile della manutenzione. I tempi invece sono sempre aleatori, e per questo possono essere utilizzate distribuzioni statistiche di probabilità per modellare il tempo di ispezione, di manutenzione correttiva o preventiva. Ovviamente tali distribuzioni possono essere personali per ogni macchinario.

## **2.9 SISTEMI IN SERIE**

Tra i modelli del campione che abbiamo esaminato solo 4 prevedono la modellazione dell'interazione tra più componenti in serie: [20], [22], [30] e [37], in particolar modo i primi 3 la prevedono esclusivamente per una serie di 2 componenti mentre solo [22] generalizza per  $n$  componenti. Gli altri studi ovviamente considerano l'ottimizzazione di macchine prese singolarmente.

In questo modello abbiamo deciso di ottimizzare contemporaneamente più macchine in serie perché l'ottimizzazione di un sistema può differire notevolmente dall'ottimizzazione delle singole macchine che lo compongono, perché nel secondo caso si trascurerebbero le interazione tra gli elementi che lo compongono.

Perché considerare però solo la serie e non il parallelo? Nel caso si volesse studiare contemporaneamente 2 macchine in parallelo l'interazione tra di loro sarebbe minima, ci sarebbe solo la tendenza del modello a ricercare che almeno

una delle due funzioni per non fermare la produzione e incominciare a contabilizzare dei costi indiretti.

Nel caso invece di macchine in serie l'interazione è molto forte, il guasto di un componente della serie impedisce il corretto funzionamento di tutta la linea e, se non tenuto debitamente sotto controllo questo fattore, potrebbe condurre ad esiti disastrosi per la produzione.

In particolar modo, grazie alla flessibilità della simulazione, abbiamo deciso di costruire una serie generica di  $n$  macchine, lasciando poi all'utilizzatore di scegliere il numero di macchine che compongono il numero sistema reale.

Un altro fattore da considerare è come il parallelo, quando stiamo parlando di una configurazione di linea produttiva, possa assumere una molteplicità di significati differenti.

Per esempio potremmo avere 5 macchine ridondanti che lavorino in parallelo, ma il guasto di una sola affliggerebbe le prestazioni del sistema essendo queste, nel complesso, un collo di bottiglia. In altri casi invece potrebbe essere che il guasto anche di 2 o 3 macchine non comporti gravi problemi dal punto di vista produttivo essendo la capacità esuberante le necessità del sistema.

Va fatta comunque una precisazione, nel caso di macchine non ridondanti, ma che lavorano in un vero e proprio processo parallelo, come possono essere due pompe che alimentino due circuiti differenti, ma entrambi necessari al buon funzionamento di un processo continuo, questa sarebbe comunque da considerarsi una serie in quanto sarebbe impensabile che il sistema funzioni quando una delle due sia guasta.

## **2.10 IL BUFFER INTEROPERAZIONALE**

Nella produzione i fermi dovuti alla manutenzione delle macchine creano dei disequilibri all'interno del sistema. Ipotizziamo di avere una serie di  $n$  macchine, ipotizziamo che la  $i$ -esima si fermi. In tal caso la  $i+1$ -esima avrebbe la possibilità di continuare a lavorare solo fintantoché fossero disponibili delle scorte a bordo macchina, la  $i-1$  potrebbe continuare a lavorare solo qualora ci fosse la possibilità che la sua produzione possa essere perlomeno temporaneamente collocata a bordo macchina.

È quindi normale, per contenere i disequilibri del sistema dovuti ai fermi macchina della manutenzione, introdurre dei buffer.

Il dimensionamento dei buffer è una materia ampiamente trattata in letteratura, però è solo uno lo studio fatto esplicitamente considerando come input i tempi medi tra i guasti e quelli di manutenzione, tale studio è dovuto a F.A van der Duyn Schouten e S.G. Vanneste nel loro studio "Maintenance optimization of a production system with buffer capacity". [28] Questo studio è molto interessante dal punto di vista economico, perché pone di fronte ad una problematica di sicuro interesse per il responsabile di una linea produttiva.

A seguito della lettura di tale articolo abbiamo deciso di includere nel modello la possibilità che ci sia un buffer tra due elementi di una serie.

Essendo il nostro modello creato per puri scopi scientifici è stato previsto il posizionamento di un solo buffer all'interno della serie di  $n$  elementi. In tale modo la serie potrà considerarsi come spezzata in due tronconi, che chiameremo sub-serie, parzialmente disaccoppiati dal buffer.

I macchinari a monte e a valle del buffer funzioneranno invece in serie stretta, ovvero con buffer di capacità nulla. In questo modo qualora una macchina si fermasse dopo poco si fermerebbero tutte quelle del troncone di appartenenze, o perché il pezzo in lavorazione non potrebbe lasciare la macchina in quanto la successiva è occupata oppure non avrebbero pezzi da caricare nella macchina. Le macchine invece che non appartengono alla sub-serie della macchina andata in guasto o in manutenzione, potranno invece funzionare fintantoché il buffer sia capace di assorbire pezzi o cederne.

Tralasciando i criteri con cui si dimensiona un buffer, che dipendono essenzialmente dallo studio della capacità produttiva del sistema, la sua capacità è intesa come fortemente limitata. Cioè la sua dimensione non sarà capace di coprire qualsiasi intervento manutentivo o guasto, e nemmeno la maggior parte di essi. Tale buffer è essenzialmente "imperfetto" e rappresenterà una possibilità limitata di disaccoppiamento della produzione, ma non un'alternativa stabile.

Tale scelta è stata fatta perché qualora un ingegnere avesse dimensionato tale buffer in maniera perfetta, rendendo la sua capacità come adatta a coprire qualsiasi eventualità non avrebbe poi più senso studiare le 2 sub-serie insieme, bensì si potrebbe pensare di ottimizzarle separatamente.

Ovviamente trattandosi di un'ottimizzazione economica, non si è potuto trascurare come l'immagazzinamento dei pezzi in lavorazione sia fonte di costi per la produzione, in particolare è stato considerato come il costo orario generato da un componente immagazzinato nel buffer sia una aliquota costante del suo valore.

Tale scelta modellativa è stata effettuata per poter effettuare (come si vedrà successivamente) l'ottimizzazione del dimensionamento del buffer in funzione dei processi manutentivi.

Altri articoli, anche più recenti, hanno trattato il dimensionamento del buffer, ma nessuno dei quali attraverso un approccio simulativo; infatti per la ricerca della dimensione ottima utilizzano dei modelli matematici.

Particolarmente interessante è lo studio effettuato da Chelbi e Rezg: "Analysis of a production/inventory system with randomly failing production unit subjected to a minimum". Nel loro lavoro trovano il livello ottimale di un dato buffer e l'ottimo valore di soglia di manutenzione preventiva che minimizza il costo medio totale di un sistema soggetto a guasti casuali.

Da annoverare c'è anche un recentissimo lavoro (2007) realizzato da Zequir, Valdes e Berenguer dal titolo "Optimal buffer inventory and opportunistic preventive maintenance under production capacity availability". In questo lavoro viene determinato, attraverso una procedura matematica, oltre la politica ottimale di manutenzione delle unità produttive anche il livello ottimo del buffer necessario a soddisfare la domanda durante i periodi di interruzione della produzione dovuto alle azioni manutentive su un sistema soggetto a produzione imperfetta.

In entrambi i lavori la funzione di costo da minimizzare, a differenza del nostro modello, comprende come voci di costo oltre quella relativa al costo di manutenzione e del costo di mantenimento a buffer anche il costo di mancato utilizzo del buffer.

## **3. IL MODELLO DI SIMULAZIONE**

### **3.1 PREMESSA**

La soluzione analitica al problema che è stato definito sarebbe molto difficile da trovare, e non è neanche detto che sia possibile perseguire questa strada.

La metodologia risolutiva proposta qui è di rappresentare il modello in un simulatore "event driven". Con l'uso di questo particolare programma è possibile liberare l'utente dagli aspetti matematici della simulazione e, allo stesso tempo, aggiungere particolarità nel modello che non sarebbero mai potute essere aggiunte in maniera analitico/matematica a causa della loro complessità.

È stato deciso di utilizzare Arena perché si tratta di uno dei software migliore in questo ambito, con un interfaccia grafica particolarmente semplice da usare. Si tratta inoltre di un software che, pur essendo orientato allo sviluppo di problemi in ambito manifatturiero, risulta veramente molto flessibile nell'adattarsi a qualsiasi tipo di sistema, sono numerosi i casi noti di utenti che hanno simulato i sistemi più disparati con Arena come per esempio: call center, pronti soccorsi medici, industrie di processo, logistica militare etc etc

Una ulteriore motivazione che sta alla base di questa scelta è che, integrato con Arena, si trovano altri software come Input analyzer, Output analyzer, Process Analyzer e Optquest. In particolar modo, comunque, è stata la disponibilità di Optquest a far propendere per l'uso di Arena; infatti, questo programma, è capace di effettuare un ottimizzazione dei sistemi modellati con Arena mediante algoritmi metaeuristici secondo variabili, vincoli e obiettivi forniti dall'utente.

#### **3.1.1 Arena e Siman**

Arena Professional edition è un prodotto sviluppato dalla Rockwell Software, è un pacchetto software dalle grandi potenzialità, capace di simulare sistemi di

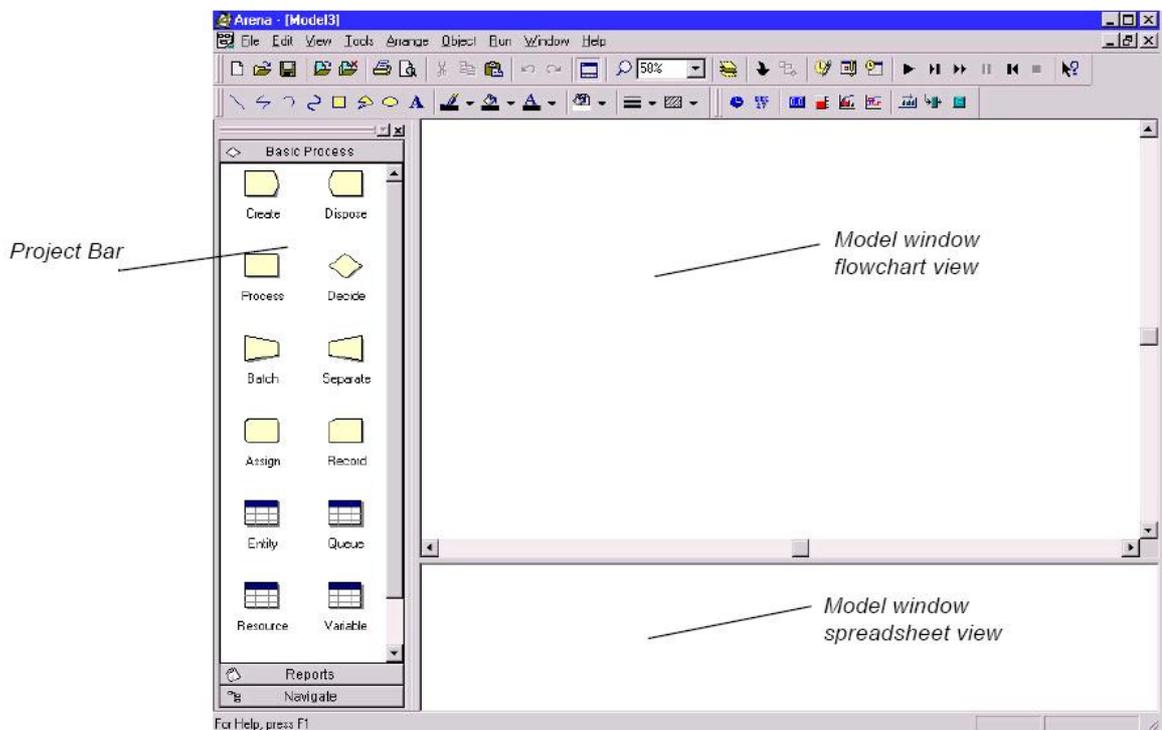
qualsiasi tipo, perfettamente integrato con sistemi operativi Windows ed in grado di dare una rappresentazione grafica animata del sistema da simulare.

Arena ha apparentemente un'impostazione completamente diversa dal suo predecessore, infatti, Siman, è un linguaggio di programmazione di tipo convenzionale basato su una serie di istruzioni da impostare caso per caso. Al contrario Arena, come già anticipato, è un linguaggio ad oggetti, in esso i comandi sono disponibili sottoforma di oggetti da disporre sul piano di lavoro, la cui impostazione viene effettuata tramite finestre di dialogo suddivise generalmente in tre campi:

*Model workspace*: è l'area che contiene i blocchi necessari per la costruzione del modello logico e tutto quello che c'è di grafico, come l'animazione, le scritte e i diagrammi

*Spreadsheet view*: si tratta dell'area destinata ai dati del modello contenuti nei relativi moduli utilizzati nella realizzazione del flowchart rappresentativo del sistema

*Project Bar*: contiene i template dei quali trasportare, all'interno del Model Workspace, i blocchi per la costruzione del diagramma di flusso.



**Figura 3.1: foglio di lavoro ARENA**

Oltre alla modellazione e alla simulazione del sistema reale, tale software consente il monitoraggio "In itinere" del processo produttivo con la visualizzazione delle operazioni correnti, nonché l'analisi finale dei risultati ottenuti e la valutazione di situazioni che, altrimenti, non potrebbero essere tenute sotto controllo.

L'insieme di queste caratteristiche conferisce ad Arena una grande flessibilità, la capacità di costruire modelli di uno stesso sistema con notevoli livelli di dettaglio e, quindi, la possibilità di essere utilizzato tanto da utenti alle prime armi quanto da esperti nel settore della modellazione di sistemi produttivi. È possibile inoltre anche l'interazione con altri software quali Autocad, Excel, Access, Visio e Visual Basic. [57]

Arena professional edition è un sistema avanzato di simulazione, esso è un pacchetto che lavora a supporto di Arena Standard Edition e fornisce un ambiente interattivo per costruire, animare graficamente, verificare e analizzare i modelli simulativi. Con la professional edition si possono disegnare template personalizzati di Arena che possono essere specifici per un particolare progetto, industria o compagnia.

Con Arena P.E. si possono creare moduli di simulazione completi. Tali moduli possono essere semplici, come un modulo che conta le entità in uscita dal sistema, o altamente complessi. Nei fatti la natura gerarchica di Arena incoraggia a decomporre il modello in studio nei suoi elementi critici e basilari, solo dopo combinarli in più complessi componenti e sottosistemi da essere simulati.

I moduli così creati con Arena P.E. sono raccolti in libreria, a cui solitamente ci si riferisce come templates. L'idea che sta alla base è di creare una metodologia che permetta di supportare in maniera efficace le future attività di simulazione e di poter condividere le proprie capacità simulate con altri utenti.

Incoraggiando questa metodologia gerarchica Arena offre l'opportunità di creare ambienti completamente personalizzati senza scrivere nessuna riga di codice di programma.

## **3.2 IL METAMODELLO**

Concentriamoci ora sulla costruzione del modello. Abbiamo già specificato in precedenza come la nostra intenzione fosse studiare un generico sistema formato dalla serie di  $N$  elementi, le ragioni di questo sono da ricercare essenzialmente nella ricerca di un risultato generalizzabile. Affinché a tale lavoro fosse riconosciuta dignità scientifica è necessario che fosse adattabile ad un numero generico di elementi.

### **3.2.1 Difficoltà incontrate nel modellare la situazione**

Non è facile tuttavia creare in Arena qualcosa che possa essere generalizzabile per  $N$  elementi. Questo perché Arena è un programma che sfrutta un'interfaccia grafica per scrivere un determinato numero di righe di codice di programma SIMAN che viene poi eseguito dalla macchina. È quindi fuori dalle possibilità di Arena creare un modello che fosse concettualmente uguale per ogni serie di elementi.

In poche parole non è possibile quindi effettuare una simulazione ed una conseguente ottimizzazione lasciando non fissato, ma generico, un numero  $N$  di elementi.

Abbiamo quindi deciso che la generalità fosse non tanto da ricercare nel programma scritto o nel modello presentato, bensì nella metodologia proposta.

È stato quindi deciso non di creare un programma che potesse risolvere il problema per un numero generico di unità in serie, bensì fare in modo tale che la metodologia da noi creata fosse universale al variare di  $N$  e, quindi, semplicemente impostando il reale numero di entità in serie che abbiamo intenzione di studiare nel nostro sistema potessimo compiere la simulazione.

C'è evidentemente in questo, però, più di un problema pratico. Affrontando il problema mediante simulatori ad eventi bisogna evidenziare come le macchine, componente indispensabile per avviare le operazioni sulle entità, siano una componente fissa del sistema. Quindi, seppur ancora non abbiamo introdotto la logica del modello, risulterebbe chiaro come sia in realtà impossibile creare un numero di macchine che sia generico e non impostabile a priori.

C'è un altro discorso da fare molto interessante, un modello simulativo precedente da cui questo lavoro ha tratto spunto [39] si premetteva di studiare

un numero determinato di componenti in serie: 2. In questo caso il precedente problema non si poneva perché conoscendo quante fossero le macchine in serie si poteva creare semplicemente il numero coerente di moduli necessari. Tuttavia per chi avesse avuto la possibilità di studiare quel modello, vedeva che si cercava di determinare lo stato dell'intero sistema e poi effettuare delle operazioni coerenti. In poche parole ad ogni periodo si esaminavano una di seguito all'altra le due macchine per determinare lo stato del sistema e poi si provvedeva eventualmente all'ispezione, alla manutenzione o a nessuna operazione sulla macchina.

Tale metodologia, seppur perfettamente efficientemente nel caso di sole due macchine, portava ad un'esplosione al numero di stati possibili del sistema che dovevano essere previsti nel caso ci fossero state più macchine e più stati possibili per ogni macchina.

In poche parole se avessimo avuto solo 4 stati possibili:

- Buono con prossima ispezione tra 2 periodi
- Buono con prossima ispezione tra 1 periodo
- Buono con possibilità di manutenzione opportuna
- In manutenzione preventiva

Con già 6 macchine avremmo avuto  $4^6 = 4096$  stati possibili del sistema! Una tale strada non era percorribile, in quanto troppo onerosa dal punto di vista modellativo. Ci voleva qualcosa che avesse un andamento della complessità almeno solo direttamente proporzionale al numero di elementi che compongono la serie e non esponenziale come nel modello citato.

Allora la ricerca si è subito indirizzata verso un'altra direzione: la modularità. Se io non posso creare nessun programma che in linea di principio possa essere valido per  $N$  elementi, posso almeno fare in modo da creare qualcosa che sia valido per ognun elemento della serie e poi replicato  $N$  volte per creare il sistema del numero di elementi desiderati. Rispettando in tal modo anche la necessità che la complicazione del modello vada al massimo di pari passo con la complessità del sistema in studio.

Avevamo anticipato da prima come nel nostro modello volessimo considerare insieme il processo produttivo e quello di manutenzione. Al momento ancora non

abbiamo introdotto come siano strutturati nessuno dei due quindi non possiamo specificare esattamente come ciò è stato perseguito, possiamo però dire cosa abbiamo fatto.

Come si rivedrà in seguito nella logica di manutenzione saranno presenti un numero di entità che rappresenteranno richieste di ispezione, manutenzione preventiva o correttiva. Evidentemente tali entità devono essere nello stesso numero delle macchine in serie che stiamo considerando, quindi al variare delle macchine dovrà variare il numero di entità che il modulo "create" di Arena immetterà in tale logica. Questo può essere fatto in maniera facile anche manualmente.

Il processo produttivo invece sfrutterà risorse e buffer andando quindi a richiedere tutta una serie di moduli specifici. Per esempio nel caso ci fossero 10 macchine in serie dovremmo modellare 10 moduli "process" che sfruttino 10 differenti risorse. Fare questo potrebbe essere molto difficoltoso se uno non fosse completamente addentrato nell'utilizzo dei simulatori e nella programmazione. Abbiamo creato quindi un insieme di moduli che modellavano in maniera coerente la macchina e il buffer che la segue e che possano essere validi indipendentemente dalla posizione ordinale del macchinario all'interno della serie. Si trattava quindi semplicemente di copiare e incollare questi pezzi omogenei nel numero desiderato.

Insieme con questi moduli era modellato anche esplicitamente una logica di collegamento tra la logica di manutenzione e quella produttiva, che quindi veniva moltiplicata coerentemente con la produzione in un numero  $N$  desiderato.

L'ultima cosa da fare rimaneva quindi aggiornare il dimensionamento di alcune tabelle e vettori che dovevano essere sempre coerenti con il numero di macchine in serie. Per esempio il vettore che ci indicava lo stato di usura delle macchine (denominato poi proprio *usura*) doveva avere un certo numero di elementi pari al numero delle macchine in serie.

In questo modo avevamo anche implicitamente evitato l'esplosione di dover modellare un numero esponenziale di stati del sistema, essendo la logica di collegamento tra la manutenzione e la produzione "embedded" in ogni macchina della serie il numero di moduli richiesti non diventava esponenziale.

Tale procedura richiedeva pochi minuti anche se avessimo voluto modellare un sistema di 10 macchine in serie, tuttavia tutta la manualità insita in questo processo faceva perdere la sensazione di come stessimo in effetti creando un metamodello vero e proprio e non una metodologia per studiare tramite simulazione una serie di  $N$  macchine.

Si è deciso quindi di implementare un codice VBA, il quale stiamo per illustrare, che automaticamente effettuasse tutte queste operazioni e evitasse all'utente di effettuare tediose operazioni che potevano essere anche fonte di errore.

### 3.2.2 Il codice VBA

VBA è un linguaggio di programmazione ad oggetti che quindi ben si sposa con Arena che è sviluppato secondo la stessa filosofia.

Tralasciando alcuni aspetti tecnici del VBA, a cui si può far riferimento per eventuali chiarimenti a [64] e [65], in questo caso ci limiteremo a spiegare come utilizzeremo questo linguaggio.

Con il VBA è possibile creare un determinato modulo, modificarne le proprietà e settarne gli operands agendo in maniera opportuna. Per esempio con le righe di codice presentate di seguito provvediamo alla creazione di un modulo "process" dal template "Basic Process" e chiamarlo "processo su risorsa 1".

```
Set createmod =  
ThisDocument.Model.Modules.Create("BasicProcess", _ "Process",  
6500, 1500)  
t = " processo su risorsa 1"  
createmod.Data("Name") = t  
createmod.Data("Action") = "Seize Delay"  
createmod.Data("Resource Type(1)") = "Resource"  
t = "Risorsa 1"  
createmod.Data("Resource Name(1)") = t  
createmod.Data("Quantity(1)") = "1"  
createmod.Data("DelayType") = "Expression"  
createmod.Data("Units") = "Hours"
```

```

createmod.Data("ValueAdded") = "Value Added"
createmod.Data("Expression") = "tempo"
t = "proc1"
createmod.shape.Tag = t
createmod.UpdateShapes

```

Per tale modulo definiamo che deve fare le operazione di allocazione risorsa all'entità e deve far trascorrere un certo tempo (*seize-delay*), provvediamo ad indicare come le quantità allocate di risorse deve essere 1 per la "risorsa 1" e a dare ulteriori indicazione come il tag "proc1" al modulo che ci faciliterà qualora volessimo ricercare il modulo. Con la dizione "UpdateShapes" finale facciamo sì che tutti i valori impostati siano aggiornati nella finestra del modello.

In maniera completamente analoga è possibile costruire tramite VBA tutti gli altri moduli che compongono il sistema, sia per quanto riguarda quelli disegnabili nella finestra del modello, i "flowchart modules", sia i "data modules"

Anche per le connessione si può fare qualcosa di simile, semplicemente si indica che si vuole costruire una nuova connessione con un opportuno comando e poi si indica tra parentesi da quale modulo a quale altro la si voglia creare, come esplicitamente fatto nelle righe di codice mostrate di seguito:

```

t = "coda1"
Set sourcemod = _
ThisDocument.Model.Modules(ThisDocument.Model.Modules_
.Find(smFindTag, t))
t = "proc1"
Set destmod =
ThisDocument.Model.Modules(ThisDocument.Model.Modules_
.Find(smFindTag, t))
Set newconn = _ ThisDocument.Model.Connections.Create _
(sourcemod, destmod)

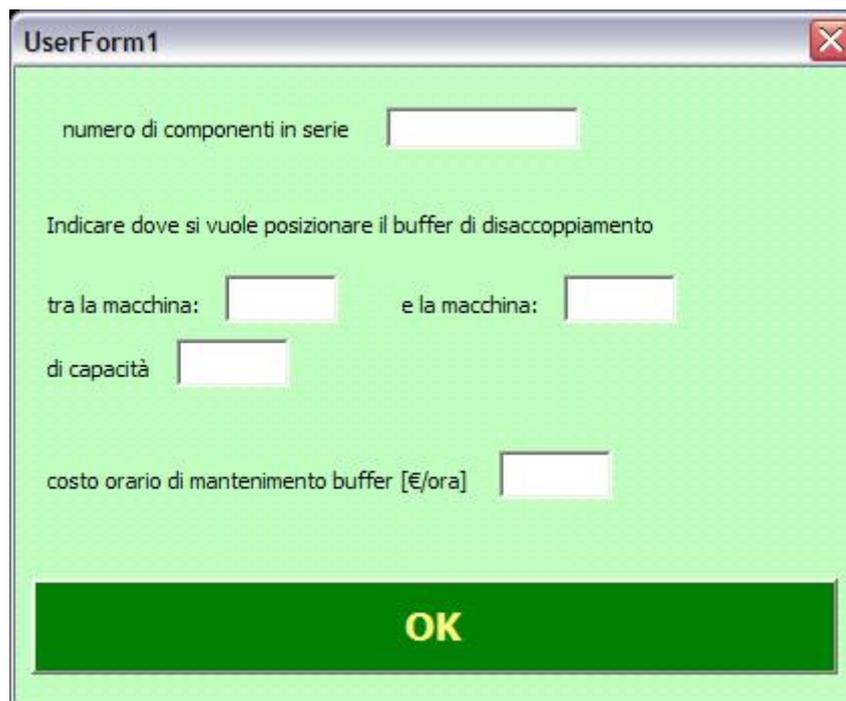
```

Dove vengono prima nominato come *sourcemod* e *destmod* i moduli con *tag* "coda1" e "proc1", dopodiché vengono collegati da una nuova connessione.

Abbiamo precedentemente detto come la struttura data al modello sia completamente modulare, quindi non abbiamo fatto che costruire il codice VBA per un solo modulo, dopodiché è stato fatto in modo tale che questo codice venisse eseguito  $N$  volte quanto fosse il numero dei componenti che volessimo considerare.

È stato fatto in modo tale che il codice creasse il buffer che abbiamo deciso di inserire come specificato nel paragrafo 2.10 e inserisse un'opportuna struttura per contabilizzarne i costi.

Tuttavia tale programma non può sapere quanti componenti in serie vogliamo analizzare, né dove vogliamo posizionare il buffer e neanche quale sia il costo orario di mantenimento nel buffer. A tutte queste informazioni risponderà l'utente a cui il codice VBA mostrerà la seguente finestra di dialogo mostrata in Figura 3.2.



**Figura 3.2: userform per il codice VBA**

Riempendo questi campi il programma VBA avrà tutte le informazioni necessarie e potrà essere eseguito senza problemi.

Ricordiamo come insieme con i moduli vengano aggiornate anche le dimensioni dei vettori di variabili e matrici. Vengano create le statistiche opportune per ogni

macchina creata e vengano aggiornate le formule di conteggio totale dei costi. Tutto avviene in maniera completamente automatica quando l'utente clicca OK! In questo modo abbiamo pensato che possano essere abbondantemente soddisfatti gli obiettivi di flessibilità e di facilità di utilizzo che ci eravamo inizialmente prefissati.

### **3.2.3 Due modelli in uno**

Il processo produttivo e quello di manutenzione, data la loro estrema differenza in termini logici, non è stato potuto modellare contemporaneamente. Le entità che fluiscono nel processo di manutenzione hanno il senso di essere richieste di manutenzione, ispezione o di riparazione di guasti. Quelle che si trovano nel processo produttivo hanno il senso di essere pezzi in lavorazione. È ovvio come queste entità non si mischieranno mai.

Avremo quindi due modelli separati, in uno ci sarà la logica della manutenzione e in un altro la logica della produzione. Questi modelli non saranno per nulla interconnessi e i moduli di uno e dell'altro non scambieranno mai entità tra di loro.

Tuttavia tali modelli dovranno comunicare per i seguenti motivi:

1. La manutenzione dovrà conoscere lo stato di usura delle macchine dopo un'ispezione
2. La manutenzione dovrà ripristinare i componenti "as good as new" dopo la manutenzione preventiva, correttiva o opportuna.
3. Alla manutenzione dovranno essere segnalati immediatamente i guasti delle macchine
4. La manutenzione dovrà essere capace di spegnere e accendere le macchine per mantenerle
5. La manutenzione dovrà essere capace di riavviare la produzione dopo un guasto

Per fare questo sono state introdotte delle variabile che sono accessibili da entrambi i sottomodelli e dei moduli *Signal* che mandano segnali ad opportuni moduli *Hold* dell'altro sottomodello.

Per lo stato di usura è stato predisposto un vettore riga di  $n$  componenti (chiamato fantasiosamente appunto *usura*), in ognuno ci sarà il valore del parametro di usura per ogni macchina oggetto di studio. Tale parametro sarà fatto aumentare da dei moduli nella logica di produzione, in quanto tale parametro dovrà aumentare solo quando la macchina lavora. La manutenzione potrà leggerlo, con un opportuna precisione della misura, quando ci sarà un'ispezione programmata e potrà azzerarlo al termine della manutenzione.

Per segnalare lo stato di funzionamento e di non funzionamento di una macchina, genericamente dovuto a manutenzione o a guasto, è stato utilizzato un vettore di  $N$  componenti denominato *on*, se il valore dell' $i$ -esimo componente del vettore sarà 1 la macchina funzionerà, altrimenti sarà impossibile farla funzionare. A mettere a zero tale valore può essere sia la manutenzione quando si appresta ad una manutenzione preventiva, anche opportuna, oppure una particolare logica qualora si determinasse il guasto casuale del componente. Si è potuto fare ciò perché le risorse che sfruttano i macchinari non sono state impostate a capacità fissa bensì variabile secondo uno scheduling. Tale scheduling viene aggiornato ogni minuto con il valore della variabile all'interno del vettore *on* competente per la specifica macchina. In questo modo sarà possibile "accendere" e "spegnere" i macchinari.

Abbiamo evidenziato come l'ispezione programmata possa avviare o fermare un macchinario per effettuare della manutenzione su di esso. Qualora invece si verificasse un guasto casuale un modulo *Signal* nella logica produttiva manderebbe l'informazione ad un modulo *Hold* della logica di manutenzione che rilascerebbe immediatamente l'entità rappresentante la richiesta di manutenzione per la macchina guasta. Contemporaneamente viene posto a zero il valore di *on* per simulare il malfunzionamento e la perdita di capacità produttiva del macchinario. Effettuata la riparazione si ripristina il valore zero del parametro di usura e si riaccende la macchina settando ad 1 il valore del componente del vettore *on* che rappresenti la macchina guasta.

Per evitare poi confusione tra i due sottomodelli, la maggior parte delle informazioni di cui avevano bisogno nella simulazione le due logiche, venivano fornite sottoforma di attributi alle entità che "giravano" al loro interno. Questo

per mantenere fede all'obiettivo di migliorare al massimo la facilità di utilizzo e della chiarezza delle informazioni gestite dal modello stesso.

### **3.2.4 La tripla identità degli oggetti della manutenzione**

Abbiamo spesso sottinteso che gli oggetti della manutenzione siano macchinari, tuttavia nulla toglie che si tratti di componenti meccanici o elettronici, sistemi di comunicazione o idraulici, etc etc.

In ogni caso, qualsiasi sia l'oggetto della manutenzione, questo viene ad avere, all'interno del nostro modello una tripla identità. Le ragioni di questo dovrebbero essere ormai chiare a chi avesse letto i precedenti paragrafi, ma ne diamo qui una spiegazione più dettagliata.

In effetti l'oggetto della manutenzione è modellato diversamente a seconda del contesto in cui è calato. Infatti nella logica della manutenzione l'oggetto della manutenzione viene ad essere un'entità, che in realtà si potrebbe dire rappresenti la richiesta di manutenzione per quell'oggetto. Questo perché tale richiesta di manutenzione viene rilasciata, processata di modulo in modulo, fino ad essere accantonata. Nella realtà nel processo di manutenzione le entità verranno invece "riciclate" perché ritenuto il modo più semplice di mantenerle costanti. Qualora una richiesta di manutenzione fosse esaudita verrebbe parcheggiata fin quando non servirà di nuovo.

All'interno del processo produttivo l'oggetto della manutenzione viene ad essere un modulo *Process* che sfrutta una risorsa, qualora la risorsa sia disponibile, tale risorsa viene allocata all'entità in coda al modulo. Se la risorsa non fosse disponibile semplicemente le unità aspetterebbero in tale coda fino alla sua disponibilità.

E la terza identità? Sicuramente non abbiamo dimenticato di come il processo sulle risorse sia in realtà costretto a far aumentare il valore di un parametro di usura, ed è qui che si colloca la terza identità della risorsa. In questo caso l'oggetto della manutenzione viene collocato come risorsa fittizia all'interno di un processo fittizio che dura al massimo un minuto e dopo ogni minuto fa aumentare il valore dell'usura. Qualora il tempo di processamento totale su un'entità non fosse esaurito una logica opportuna provvederebbe a reindirizzare l'entità verso il processo fittizio che lavorerebbe per un altro minuto facendo al

termine aumentare nuovamente il parametro di usura. Tale ciclo si ripeterebbe per la durata necessaria al completamento del processo sull'entità.

### **3.2.5 Il processo produttivo**

Quando abbiamo deciso di interfacciare la manutenzione con un processo produttivo ci siamo scontrati con il problema delle infinite configurazioni che questo può assumere. Dal punto di vista scientifico abbiamo deciso di studiare solo la serie, perché giudicata la più interessante dal punto di vista modellativo, in quanto quella in cui le macchine si influenzano maggiormente una con l'altra per i costi indiretti generati dalla manutenzione. Definita questa scelta abbiamo poi creato un programma in VBA per creare la configurazione minima necessaria quando si parla di macchine in serie.

Tuttavia, sempre in accordo con il principio di flessibilità che ha animato tutto questo lavoro, abbiamo voluto che fosse facile adattare il modello creato dal codice VBA a qualsiasi configurazione impiantistica. Infatti il modulo che noi abbiamo creato è l'unità minima di un processo su una macchina, composto dall'allocazione di una risorsa e dal passaggio di un determinato tempo variabile estratto da una distribuzione casuale.

Qualora un utente tra questi processi volesse inserire magazzini, convogliatori, ritardi per raffreddamento di pezzi o qualsiasi altro processo industriale sarebbe libero di farlo senza alterare la capacità del modello di minimizzare i costi totali di manutenzione per i moduli creati.

In linea di principio, ed è stato sperimentato, è possibile anche creare delle configurazioni in parallelo di ridondanza o di parallelo sincronizzato con un numero limitatissimo di modifiche che coinvolgono principalmente le connessioni tra i moduli stessi. In questi casi il modello funziona perfettamente, stima il costo totale di manutenzione annuo e provvede ad ottimizzarlo contestualmente. Tuttavia in questo lavoro tali configurazioni non sono state trattate perché era impossibile effettuare la seppur minima generalizzazione perdendo quindi la contestualizzazione del lavoro effettuato e perdendo interesse dal punto di vista scientifico.

Un altro punto forte della flessibilità del modello è che il processo produttivo viene ad essere un substrato che può contenere qualsiasi tipo di entità, pertanto,

introducendo ulteriori moduli "create" che introducono pezzi nel nostro modello produttivo è possibile far lavorare la produzione su, per esempio due prodotti: A e B. Ma anche su 3, 4 o qualsivoglia numero di tipologie differenti. Semplicemente introducendo un solo ulteriore modulo *Create* e uno di *Assign*, il primo per indicare le caratteristiche casuali di arrivo dei pezzi, il secondo per indicarne tutti gli attributi in termini di costi, tempi e caratteristiche necessari al modello simulativo della produzione per modellare correttamente il processo reale di riferimento.

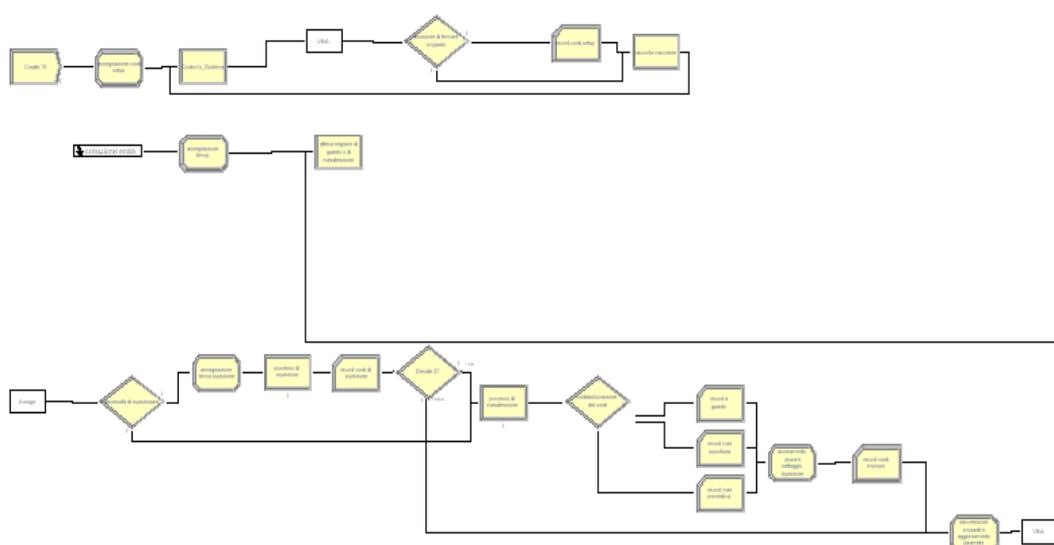
### **3.2.6 La logica della manutenzione**

Esaminiamo ora nel dettaglio in che modo è stata costruita la logica del sottomodulo della manutenzione. Sintetizziamo gli obiettivi che il sottomodulo deve perseguire:

- Deve essere in grado di ispezionare le macchine per poterne verificare lo stato, quindi leggere il grado di usura e stabilire se è necessario un intervento di manutenzione o lanciare un allarme che imponga di ispezionare con maggiore frequenza;
- Effettuare manutenzione preventiva al superamento della soglia stabilita, in modo da evitare la rottura della macchina;
- Riaccendere al termine del processo manutentivo ripristinando il componente come nuovo;
- Accorgersi immediatamente di un guasto e provvedere alla riparazione totale;
- Valutare la possibilità di effettuare manutenzione opportuna quando una macchina è in riparazione che consenta anch'essa di ripristinare le condizioni ottimali del componente.

Insieme a questo bisogna contabilizzare i costi relativi a ispezioni e manutenzioni, distinguendole a seconda della tipologia di intervento, e costi di fermo macchina. I costi di set up devono essere registrati solo alla riaccensione dell'insieme delle macchine in manutenzione e non della singola risorsa. Inoltre il modello deve interfacciarsi con il database Access per avere alcune informazioni e contemporaneamente scrivere il diario della manutenzione in Excel.

Tra le scelte modellative c'è la necessità di realizzare un "closed loop", cioè le entità che sono create e immesse rimarranno nel sottomodello per tutto il tempo simulato, affronteranno i processi di ispezione e manutenzione e ritorneranno nel punto iniziale del ciclo, aspettando qui un nuovo segnale che le liberi. Il numero di entità al suo interno rimarrà costante per tutto il tempo simulato e pari al numero di macchine in serie da esaminare.



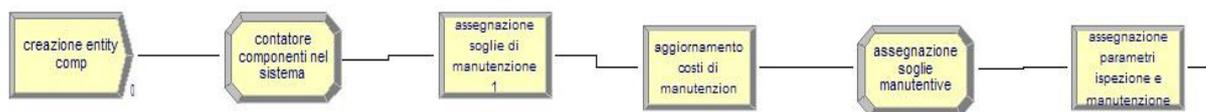
**Figura 3.3: overview della logica di manutenzione**

Dato che si tratta di una logica comunque abbastanza complessa verrà esposta passo per passo mettendo in evidenza le caratteristiche di determinate sezioni:

1. creazione delle entità
2. controllo sistema
3. cronometro giornaliero
4. fase di ispezione
5. fase di manutenzione
6. assegnazione della prossima ispezione
7. contabilizzazione dei costi
8. creazione diario

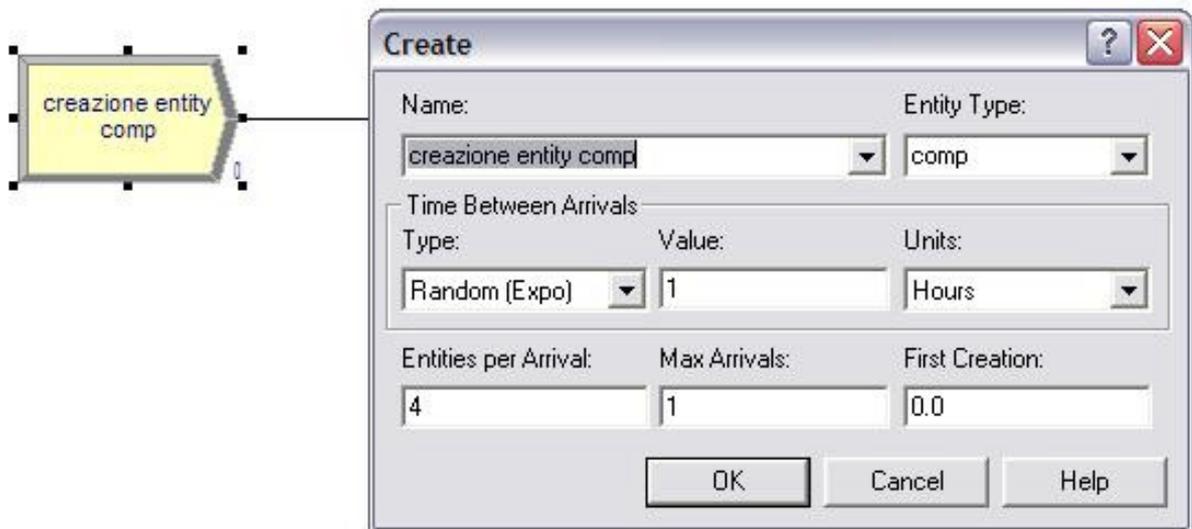
### 3.3 LA CREAZIONE DELLE ENTITÀ

La creazione delle entità è stata aggregata nel submodel "creazione entità", costruito in Arena come un sottomodello con una uscita e nessuna entrata. Il submodel ha il compito di creare il numero di entità coerenti con il sistema da studiare. Sottolineiamo che la singola entità coincide con una macchina dell'impianto, essa deve possedere le opportune caratteristiche necessarie per il corretto funzionamento del modello stesso. In Figura 3.4 sono evidenti le scelte modellative.



**Figura 3.4: sottomodello per la creazione dei componenti**

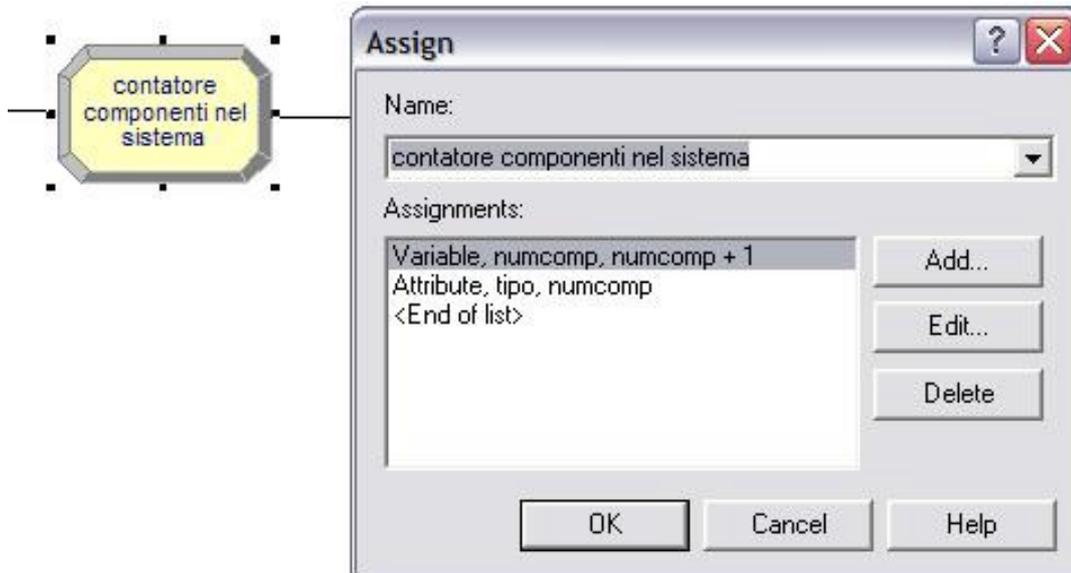
Il sottomodello è formato da 6 moduli in successione, il primo modulo sarà un "create" che provvederà a creare il numero di entità coerenti con il numero di macchine in serie. Come vediamo dalla figura seguente il massimo numero di arrivi di entità è 1. Il codice VBA, eseguito appena il documento viene aperto, provvederà a settare il numero contemporaneo di entità in arrivo pari al numero di macchine che compongono la serie, in questo esempio ne avremo 4, come mostrato dalla Figura 3.5.



**Figura 3.5: il modulo "creazione entità comp."**

Le entità in arrivo saranno tutte dello stesso tipo, che noi chiameremo "comp", vediamo come abbiamo settato il primo arrivo all'istante 0.0, in modo tale che la creazione delle entità sia la prima cosa che il modello effettuerà. Raggiungendo il massimo numero di arrivi al tempo 0.0 tale modulo non creerà nessuna altra entità durante tutto il tempo simulato. Questo significa che la scelta del tipo di distribuzione da indicare, relativa agli intertempi tra gli arrivi, non avrà nessun effetto sul modello, qualsiasi distribuzione si scelga il modulo non sfrutterà questa informazione.

Notiamo subito come le entità siano tutte identiche, ma noi abbiamo bisogno di distinguerle in funzione del macchinario che esse rappresentano. Tale distinzione viene subito effettuata dal modulo *Assign* che segue il modulo "creazione entità comp". Ne vediamo una rappresentazione corredata di finestra di dialogo in Figura 3.6.



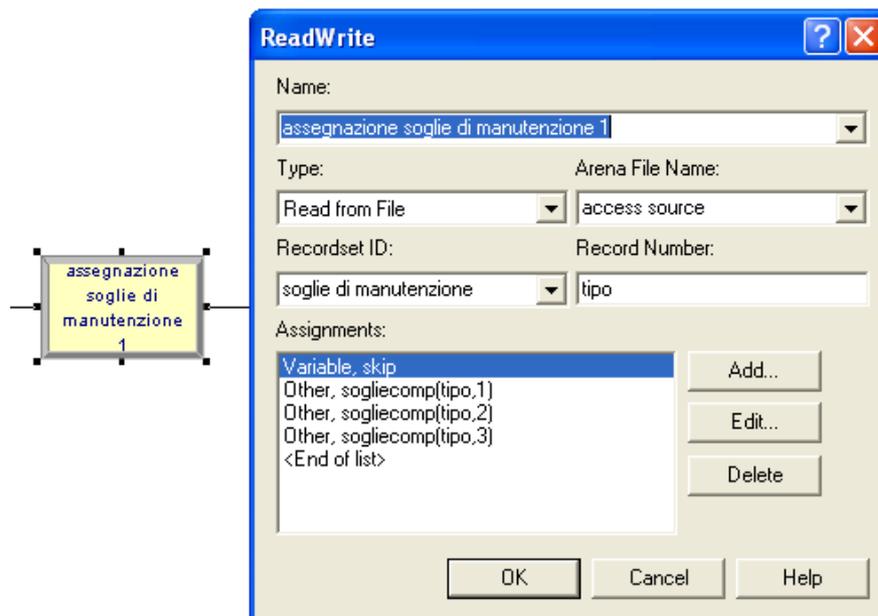
**Figura 3.6: il modulo "contatore componenti nel sistema"**

In questo modulo *Assign*, denominato "contatore componenti nel sistema", ogni volta che viene attraversato da un'entità, viene incrementato il contatore di componenti del sistema *numcomp*, che è una variabile inizialmente settata a 0, e viene di conseguenza trasferito il valore di questa variabile ad un attributo dell'entità denominato *tipo*. In questo modo la prima avrà valore 1 nell'attributo *tipo*, la seconda 2 etc etc. fino all'ennesima che avrà valore *N*. Alla fine del processo avremo anche che la variabile *numcomp* segnerà il numero totale di elementi nel sistema e la potremo sfruttare in altri ambiti.

Di seguito avremo un modulo *ReadWrite* per la lettura delle soglie manutentive nella tabella *Access*, avremmo potuto sfruttare tale modulo per la lettura di altri attributi quali i costi o anche parametri statistici per i tempi di ispezione e manutenzione, ovviamente dopo aver compilato un'opportuna tabella in *Access*. Utilizziamo per l'assegnazione dei costi un modulo *Assign* e per semplicità di lettura un ulteriore *Assign* denominato "assegnazione parametri ispezione e manutenzione" nel quale inseriamo il valore dello sporcamento "pspor" che influenzerà la lettura del parametro d'usura al momento di fare ispezione.

Solo nel caso delle soglie manutentive il processo di assegnazione degli attributi non è diretta, bensì passerà prima nel modulo che assegnerà i valori letti nella tabella *Access soglie* alla matrice di variabili di *Arena* denominata *sogliecomp*, come mostrato in Figura 3.7, e solo poi i valori di questa variabile verranno

assegnati alle entità come attributi. Essenzialmente questa metodologia è stata richiesta perché nella futura ottimizzazione del modello non è previsto di ottimizzare un attributo, bensì solo una variabile, in questo modo siamo riusciti ad aggirare tale limite.



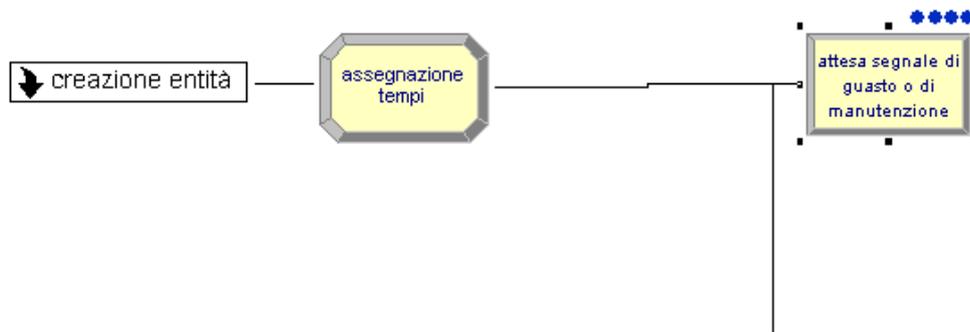
**Figura 3.7: modulo di assegnazione soglie di manutenzione 1**

Vediamo come adesso è evidente il modo in cui l'attributo *tipo* permetta di leggere il record corretto nella tabella, senza generare confusioni. Si può notare anche l'utilizzo della variabile *skip* per non leggere il primo valore della tabella che consiste nel numero ordinale che contraddistingue la macchina. Qualora si voglia aumentare il numero di soglie nel modello è necessario compilare opportunamente, quindi aggiungendo delle colonne, la tabella Access e immettere "Assignments" che consentono la lettura di tutte le soglie.

Insomma al termine di questo sottomodello avremo creato tante entità quanti sono gli elementi della serie che vorremo studiare e tali entità saranno fornite di tutti gli attributi relativi alla macchina di competenza. A questo punto le entità saranno immesse nel vero e proprio sistema, questa era solo un'inizializzazione.

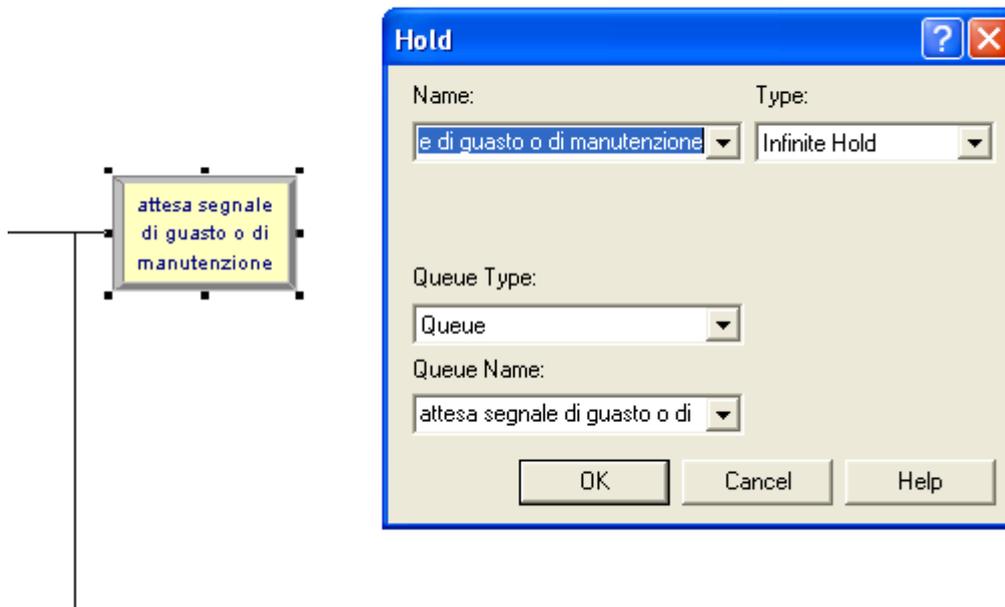
### 3.3.1 Il controllo del sistema

Le entità create vanno a finire tutte in una sorta di raccogliitore logico, qui aspetteranno finché non si verificherà una particolare condizione, che potrebbe essere una richiesta di ispezione programmata o di manutenzione correttiva.



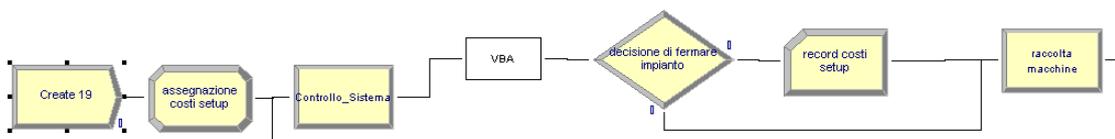
**Figura 3.8: entità in coda in attesa del segnale di manutenzione**

L'entità arriveranno in modulo *Hold* e si metteranno in coda, in Figura 3.8 ne sono rappresentate quattro. Il modulo è settato su "Infinity hold", quindi non aspetterà un segnale o una particolare condizione per rilasciare le entità, come si vede non c'è una connessione fisica tra questo modulo e quelli successivi della manutenzione, quindi sarà il programma scritto in VBA che provvederà a prelevare le entità dalla coda. Le scelte modellative permettono che al verificarsi di un evento, per cui una delle entità ha bisogno di essere o ispezionata o riparata, vengono liberate tutte quante, questo perché vogliamo che raggiunto l'istante di ispezione per una macchina, tutte affrontino la fase di ispezione. Stessa cosa succederà al verificarsi di un guasto, quindi al segnale di guasto il programma VBA preleverà tutte le entità dall'"Hold" e saranno successivamente controllate.



**Figura 3.9: modulo di "attesa segnale di guasto o di manutenzione"**

Questa scelta non impedisce di adattare il modello a delle esigenze diverse, in conseguenza a dei costi di ispezione elevati o a capacità limitata di ispettori e manutentori per cui si preferisce non ispezione le macchine a livello di intero sistema produttivo bensì alla necessità di controllo della singola macchina. Tramite semplici moduli *Decide* facilmente si realizzano queste modifiche. I moduli decide rimanderanno in coda le macchine non interessate all'ispezione.



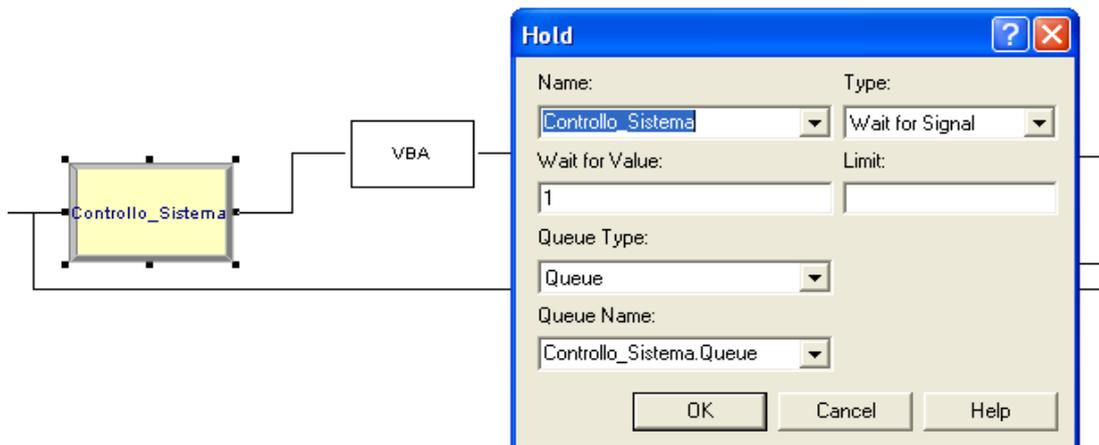
**Figura 3.10: sottomodulo del controllo di sistema**

Il Controllo Sistema è stato costruito in maniera un po' più complessa per la necessità di contabilizzare i costi di setup, dei quali parleremo in seguito. Sfruttando l'interazione con Visual Basic è stato semplice costruire un programma che con poche righe possa determinare le azioni da intraprendere assegnando gli attributi indispensabili per consentire la manutenzione e

determinare le ispezioni. In alternativa sarebbe stato necessario combinare moduli Hold con moduli Assign così da aggiungere alle entità gli attributi necessari per consentire le diverse azioni, in questo modo il modello ne risultava enormemente appesantito. Le difficoltà incontrate riguardavano essenzialmente la sequenzialità delle entità; le entità attraversano i vari moduli in ordine come sono state create, in questo modo le informazioni risultanti dalla terza o anche quarta entità non sarebbero state sfruttate per le prime. Col programma in Visual Basic si è superata questa difficoltà.

Il modulo "Create" genera una sola entità all'istante 0.0, questa entità non ha un nessun significato fisico, né è legata direttamente al processo di manutenzione, essa è di ausilio per consentire l'avviamento del programma VBA e la contabilizzazione dei costi di setup.

Subito dopo essere stata creata, l'entità, alla quale non abbiamo dato nessun nome per non confonderne il significato, si accoderà nell'hold "Controllo\_Sistema", compilato come mostrato in Figura 3.11.



**Figura 3.11: modulo di "controllo\_sistema"**

Il Controllo\_Sistema, settato su "Wait for Signal", attenderà il particolare valore 1, inviatogli da opportuni "Signal" posizionati nel modello come vedremo. Il segnale ricevuto libererà l'entità, la quale entrerà nel VBA Block.

È importante sottolineare cosa praticamente succede al modello al lancio dei segnali.

Il lancio del segnale implica o il raggiungimento dell'istante di ispezione per una o più macchine o l'accadimento di un guasto. Al verificarsi di uno degli eventi il programma in Visual Basic preleva le entità, rappresentanti le macchine, dall'Hold "Attesa segnale di guasto o manutenzione" e le controlla.

Mostriamo ora la costruzione del programma.

```
macchine = s.VariableArrayValue(30)
'Verifica se c'è una macchina guasta
c = 1
manutenzione_avviata = False
guasto = False
While c <= macchine
'controlla se la macchina c è guasta
If s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("guasto", c)) = 1 Then
manutenzione_avviata = True
guasto = True
Else
'controlla se la macchina c deve fare manut prev
id_entity = s.QueueEntityLocationAtRank(c, s.SymbolNumber("attesa segnale di guasto o di manutenzione.Queue"))
If s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("usura", c)) + sporcamento(c) >= s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("sogliecomp", c, 1)) Then
manutenzione_avviata = True

End If
End If
c = c + 1
Wend
```

Attraverso la prima riga il modello legge la variabile "30", che corrisponde a "numcomp" cioè il numero di macchine presenti nel modello definito in Arena. Va evidenziato il significato della variabile "c" che compare nel programma, esso è l'equivalente dell'attributo tipo nel modello Arena ed indica la posizione della macchina nella serie. Parte adesso il vero e proprio controllo delle entità. Come prima cosa il modello esegue un ciclo di controllo sull'intero sistema per verificare se è avvenuto un guasto o se c'è la necessità di effettuare manutenzione preventiva, attraverso il confronto delle variabili guasto e usura con i valori che determinano l'accadimento degli eventi sopracitati, questi valori sono 1 per il guasto e sogliecomp, in particolare riferito alla soglia 1, per l'usura. Nel caso in cui ci sia guasto il modello segna

```
manutenzione_avviata = True
guasto = True
```

alla necessità di manutenzione preventiva segna solo

```
manutenzione avviata = True
```

Queste variabili sono importanti per il modello in quanto permettono di capire se potrà essere effettuata manutenzione opportuna. Viene fatta una distinzione tra la fermata dell'impianto a causa di un guasto e per manutenzione preventiva proprio per il concetto di opportuna: a seguito di un guasto, concettualmente, qualsiasi intervento va catalogato come opportuna, invece una manutenzione preventiva è conseguenza di un'ispezione su tutte le macchine del sistema durante la quale viene si determina quale di queste va in manutenzione preventiva e solo dopo questa decisione si determina quale delle restanti va in manutenzione opportuna.

Va precisato che queste decisioni sono prese in maniera istantanea e che non determinano ancora l'effettiva decisione di manutenzione, servono esclusivamente al modello per conoscere cosa sta accadendo.

Se `manutenzione_avviata=True`, il modello si chiede quale tra i due eventi è avvenuto, per l'evento "guasto" viene definito il tempo di manutenzione, l'inizio di manutenzione il codice, dopodiché rimuove l'entità dalla coda "attesa di segnale guasto o manutenzione" e lo invia all'*Assign65*, a valle degli effettivi processi di manutenzione e ispezione. Precisiamo che "T\_MAN\_GUASTO" e "CODICE\_GUASTO" sono costanti definite ad inizio programma e sono i valori che saranno assegnati agli attributi  $t_{man}$  e "codice" del modello in Arena, 3 e 4 sono gli attributi "inizio man" e "inman" ai quali si assegnerà il tempo corrente simulato.

```

If manutenzione_avviata Then

While c >= 1
If s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("guasto", c)) = 1 Then
n = s.QueueNumberOfEntities(s.SymbolNumber("attesa segnale di guasto o di manutenzione.Queue"))
counter = 1
trovato = False
While counter <= n And Not trovato
id_entity = s.QueueEntityLocationAtRank(counter, s.SymbolNumber("attesa segnale di guasto o di manutenzione.Queue"))
If s.EntityAttribute(id_entity, 9) = c Then
'Assegna il tempo di manutenzione, l'inizio manut e il codice
s.EntityAttribute(id_entity, 10) = T_MAN_GUASTO
s.EntityAttribute(id_entity, 3) = s.RunCurrentTime
s.EntityAttribute(id_entity, 4) = s.RunCurrentTime
s.EntityAttribute(id_entity, 1) = CODICE_GUASTO
s.QueueRemoveEntity id_entity, s.SymbolNumber("attesa segnale di guasto o di manutenzione.Queue")
s.EntitySendToBlockLabel id_entity, 0, "assign65"

```

In modo analogo il programma assegna i valori agli attributi nel caso di manutenzione preventiva, inoltre imposta la variabile "on" sul valore -3 e, in maniera coerente con l'idea di manutenzione opportuna proposta, attribuisce a codice il valore di "CODICE\_OPP" se si è verificato un guasto altrimenti la classifica come manutenzione preventiva attraverso "CODICE\_PREV". Invia poi le entità all'*Aassign65*.

```

'id_entity = s.QueueEntityLocationAtRank(c, s.SymbolNumber("attesa segnale di guasto o di manutenzione.Queue"))
If s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("usura", c)) + sporcamento(c) >= s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("sogliecomp", c, 1)) Then
'Faccio preventiva
n = s.QueueNumberOfEntities(s.SymbolNumber("attesa segnale di guasto o di manutenzione.Queue"))
counter = 1
trovato = False
While counter <= n And Not trovato
id_entity = s.QueueEntityLocationAtRank(counter, s.SymbolNumber("attesa segnale di guasto o di manutenzione.Queue"))
If s.EntityAttribute(id_entity, 9) = c Then
'Assegna il tempo di manutenzione, l'inizio manut e il codice
s.EntityAttribute(id_entity, 10) = T_MAN_PREV
s.EntityAttribute(id_entity, 3) = s.RunCurrentTime
s.EntityAttribute(id_entity, 4) = s.RunCurrentTime
s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("on", c)) = -3
If guasto Then s.EntityAttribute(id_entity, 1) = CODICE_OPP Else s.EntityAttribute(id_entity, 1) = CODICE_PREV
s.QueueRemoveEntity id_entity, s.SymbolNumber("attesa segnale di guasto o di manutenzione.Queue")
s.EntitySendToBlockLabel id_entity, 0, "Assign65"

```

Il programma indaga sulle restanti entità per determinare la decisione di manutenzione opportuna o il riavvicinamento della data di prossima ispezione. Sequenzialmente vengono prima controllate per l'eventuale manutenzione opportuna, attraverso il confronto del valore dell'usura con la sogliecomp2.

```

Else
id_entity = s.QueueEntityLocationAtRank(c, s.SymbolNumber("attesa segnale di guasto o di manutenzione.Queue"))
If s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("usura", c)) + sporcamento(c) >= s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("sogliecomp", c, 2)) Then
'faccio opportuna

```

Altrimenti determina se è necessario un riavvicinamento della data di prossima ispezione, settata qui ad un giorno se l'usura supera la soglia d'allarme.

```

Else
'controllo soglie allarme
If s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("usura", c)) + sporcamento(c) >= s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("sogliecomp", c, 3)) Then
'assegna prossima ispezione
s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("isp", c)) = 24 * ((Int(s.RunCurrentTime) / 24) + 1) + 24 * 1
Else
'assegna prossima ispezione
s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("isp", c)) = 24 * ((Int(s.RunCurrentTime) / 24) + 1) + 24 * 3
End If

```

Infine si è tenuto conto dell'eventualità di ispezionare le macchine senza determinare la fermata dell'impianto per manutenzione, in questo caso si avrà "manutenzione\_avviata=false". Il controllo avviene sempre con il confronto dell'usura con un'opportuna soglia d'allarme, a seguito della quale si assegna la data di prossima ispezione e il valore degli attributi interessati.

```

'Verifica opportunità di ravvicinare le ispezioni
'controllo soglie allarme
If s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("usura", c)) + sporcamento(c) >= s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("sogliecomp", c, 3)) Then
'assegna prossima ispezione
s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("isp", c)) = 24 * ((Int(s.RunCurrentTime) / 24) + 1) + 24 * 1
Else
'assegna prossima ispezione
s.VariableArrayValue(s.SymbolNumber("isp", c)) = 24 * ((Int(s.RunCurrentTime) / 24) + 1) + 24 * 3
End If
id_entity = s.QueueEntityLocationAtRank(c, s.SymbolNumber("attesa segnale di guasto o di manutenzione.Queue"))
s.EntityAttribute(id_entity, 1) = CODICE_ISP
s.EntityAttribute(id_entity, 3) = s.RunCurrentTime
s.EntityAttribute(id_entity, 4) = s.RunCurrentTime
s.QueueRemoveEntity id_entity, s.SymbolNumber("attesa segnale di guasto o di manutenzione.Queue")
s.EntitySendToBlockLabel id_entity, 0, "assign66"

```

Nel nostro modello abbiamo inserito una sola soglia di ispezione, ma con l'aggiunta di qualche riga nel codice VBA è possibile creare un sistema di soglie d'allarme che renda l'ispezione sempre più frequente per controllare meglio le macchine.

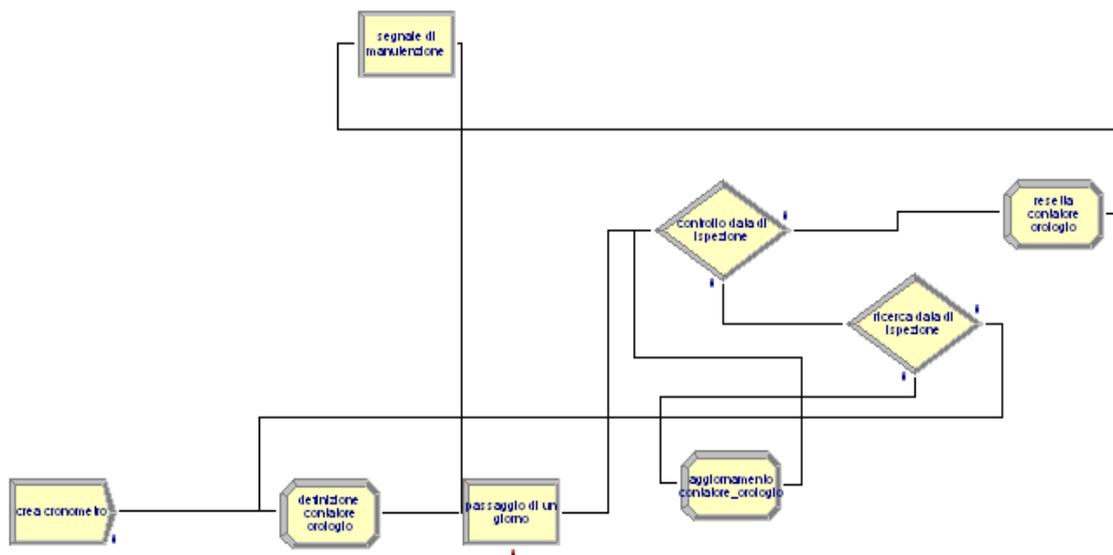
Infine un'opportuna riga è stata compilata al termine del programma perché anche il modello in Arena conoscesse la fermata dell'impianto; il valore della variabile "intman" ci consente di contabilizzare i costi di set up una sola volta ad ogni fermata di impianto.

```
If manutenzione_avviata Then s.EntityAttribute(s.ActiveEntity, 11) = 1 Else s.EntityAttribute(s.ActiveEntity, 11) = 0
```

Va puntualizzato che i valori dei tempi di ispezione e manutenzione possono essere impostati sia come valori deterministici sia attraverso idonee distribuzioni, questo per evidenziare l'elasticità del modello.

### 3.5.3 Il cronometro giornaliero

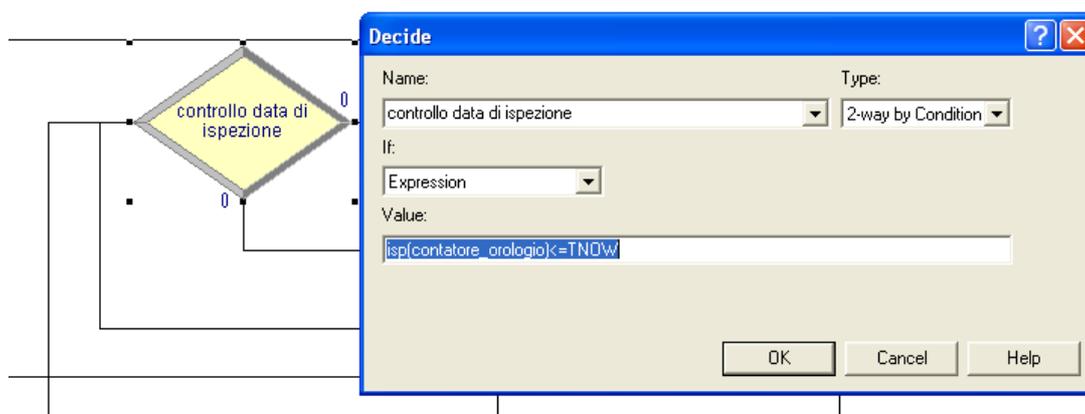
Il submodel "cronometro giornaliero", mostrato in Figura 3.12, è stato costruito in maniera un pò articolata. Come si vede non ha nessun ingresso ne uscite, esso ha la funzione di valutare, con cadenza giornaliera, quando è arrivato l'istante di ispezione programmata per una delle macchine dell'impianto e quindi generare il segnale di ispezione, necessario perché l'impianto possa essere controllato.



**Figura 3.12: sottomodulo cronometro giornaliero**

Limitandoci brevemente alla descrizione globale del sottomodulo, vediamo come questo crea una sola entità di una particolare tipologia detta *crono*, in modo da

non confonderla con altre, con il modulo "crea cronometro" . questa entità arriverà al modulo "passaggio di un giorno" dove semplicemente parteciperà ad un processo fittizio che richiederà il passaggio di 1 giorno. Prima di entrare nel processo "passaggio di un giorno" viene definita la variabile "cronometro\_giornaliero", che si renderà utile per conoscere quale delle macchine abbia raggiunto il momento di fare ispezione. Al termine del processo l'entità sarà interrogata attraverso il decide "controllo data di ispezione". La complessità del sottomodulo è conseguenza della necessità di dover interrogare tutte le macchine dell'impianto.



**Figura 3.13: modulo *decide* "controllo data di ispezione"**

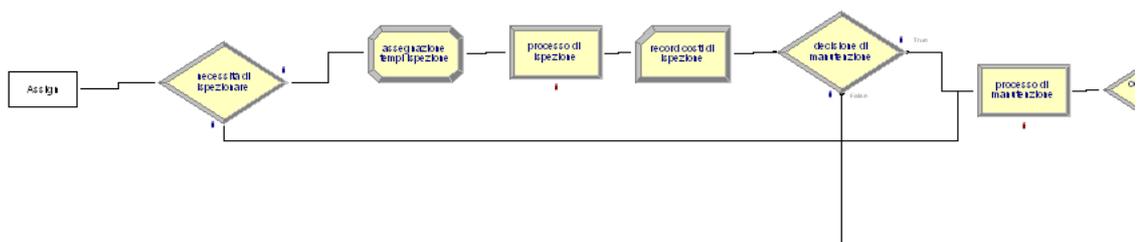
La variabile "contatore\_orologio" viene resettata al raggiungimento della data di ispezione e l'entità finisce nel modulo "segnale di manutenzione" che invierà il segnale al modulo "Controllo\_Sistema" visto precedentemente, che aspettava proprio il segnale di valore 1. Il modello indaga sull'intero parco macchine qualora non ne trovasse da ispezionare mediante l'aggiornamento della variabile "contatore\_orologio" e il ritorno dell'entità nel Decide "controlla data di ispezione". L'aggiornamento del contatore si resetta dopo aver interrogato l'ultima macchina dell'impianto e non si è verificata la necessità di ispezionare. Quindi ritorna all'ingresso del processo fittizio.

La scelta di effettuare le operazioni programmata con cadenza giornaliera deriva da scelte di modellazione effettuate a monte. Qui possiamo solo ricordare come se non avessimo cercato di ispezionare contemporaneamente le entità avremmo perso la capacità di effettuare una manutenzione opportuna.

### 3.3.2 Fase di ispezione

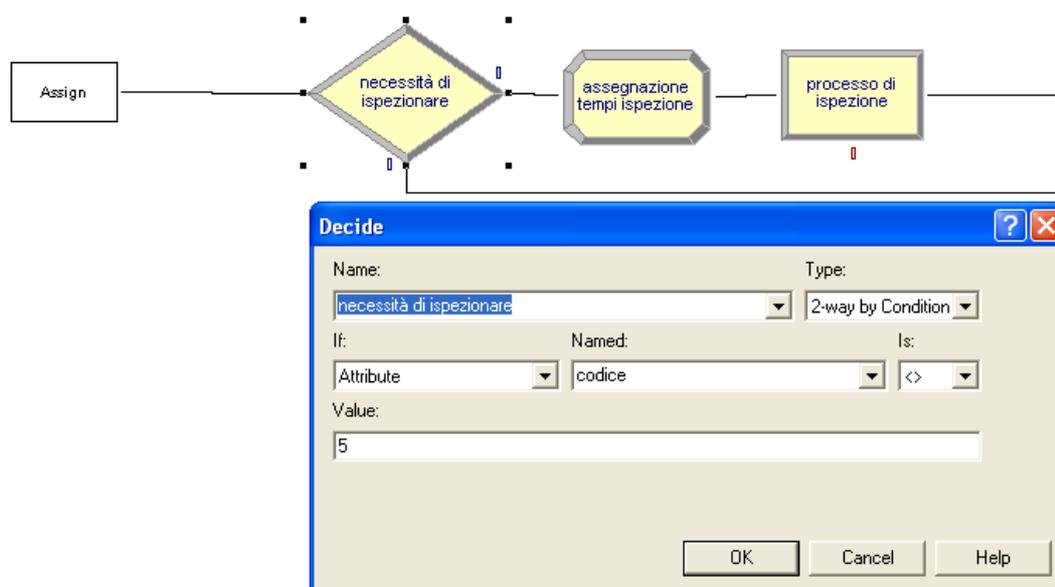
Per processo di ispezione intendiamo qui tutta la procedura che permette di leggere il parametro di usura con una certa precisione e il conferimento della possibilità, qualora si fosse verificata l'esigenza di fare manutenzione su una macchina della serie, di subire una manutenzione opportuna. Al termine del processo di ispezione potremmo decidere di consegnare l'entità o al processo di manutenzione preventiva o semplicemente ad un'altra sezione che provvederà a decidere la data della prossima ispezione.

Il processo di decisione e di settaggio dei parametri per l'ispezione sono già stati definiti nel programma VBA, quest'ultimo determina una condizione di manutenzione e una condizione di ispezione. Nei moduli mostrati in fig... ↓ avviene il vero e proprio processo di ispezione, in cui se troverà una tra le risorse *ispettori* libere procederà all'ispezione altrimenti verrà messa in coda. Nel nostro caso abbiamo scelto numero di ispettori illimitato. Il "process" è settato di modo che l'entità impegnerà un solo ispettore per una durata pari a  $t_{isp}$ , parametro definito nel VBA.



**Figura 3.14: logica di manutenzione relativa agli effettivi interventi**

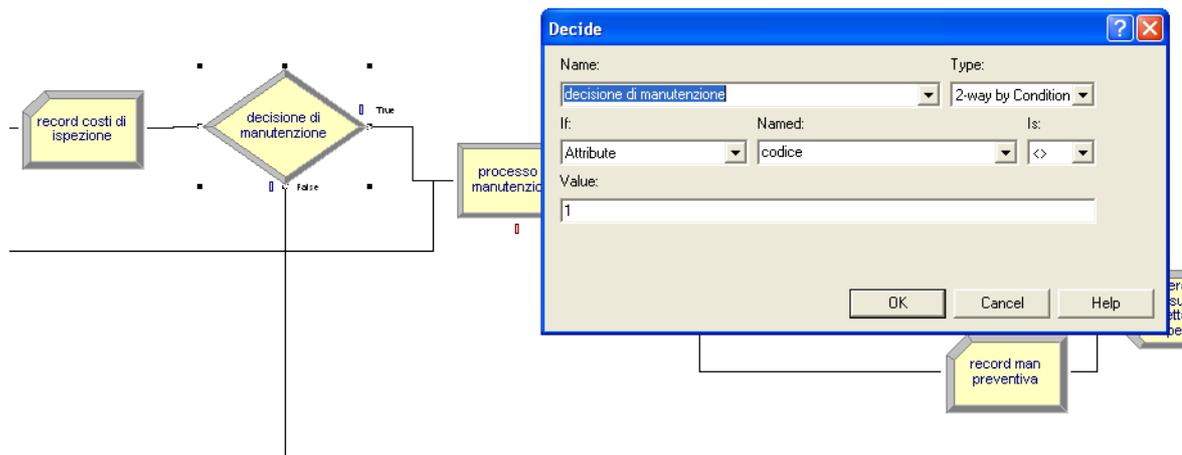
La Figura 3.14 mostra un by-pass sul processo di ispezione. Le entità vengono trasferite all' *Assign65* dal programma in Visual Basic, il modulo "decide" provvederà a distinguere le macchine su cui è avvenuto un guasto dalle altre.



**Figura 3.15: modulo *decide* "necessità di ispezionare"**

Attraversano il processo di ispezione le macchine che non sono andate in guasto. Il programma in VBA ha attribuito alle entità le informazioni necessarie per proseguire lungo la logica della manutenzione, quindi su quali interventi eseguire.

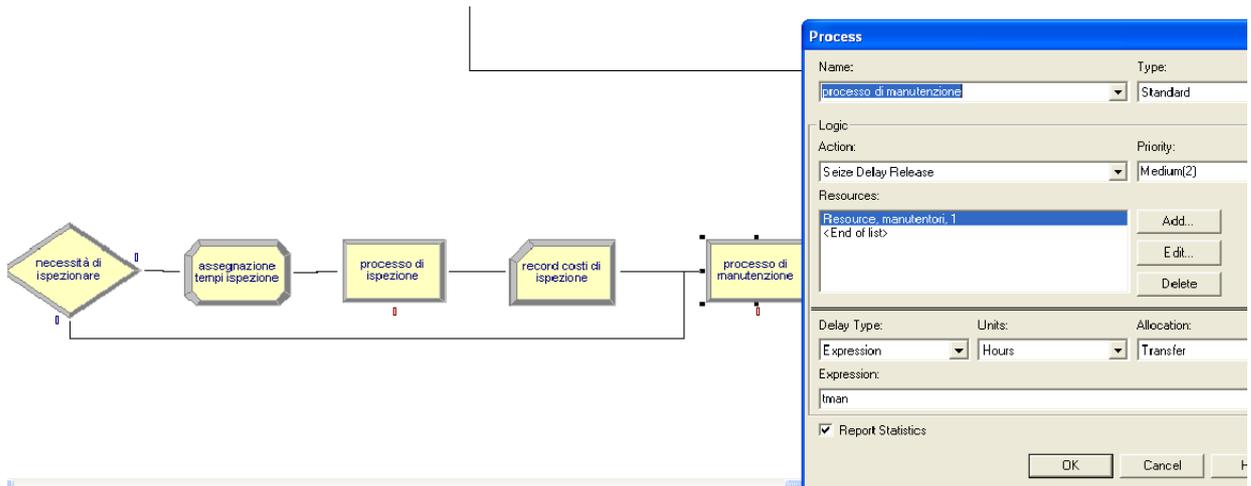
Il "decide" mostrato in Figura 3.16 seleziona le entità che necessitano di manutenzione dalle altre, rappresentate dalle macchine sulle quali viene affrontato il solo processo di ispezione. Il modulo si interroga sulla necessità di intervenire o meno mediante l'informazione assegnata all'attributo "codice", nel caso in cui questo fosse pari ad 1 la macchina non deve affrontare nessun processo di manutenzione.



**Figura 3.16: modulo *decide* "decisione di manutenzione"**

### 3.3.3 Fase di manutenzione

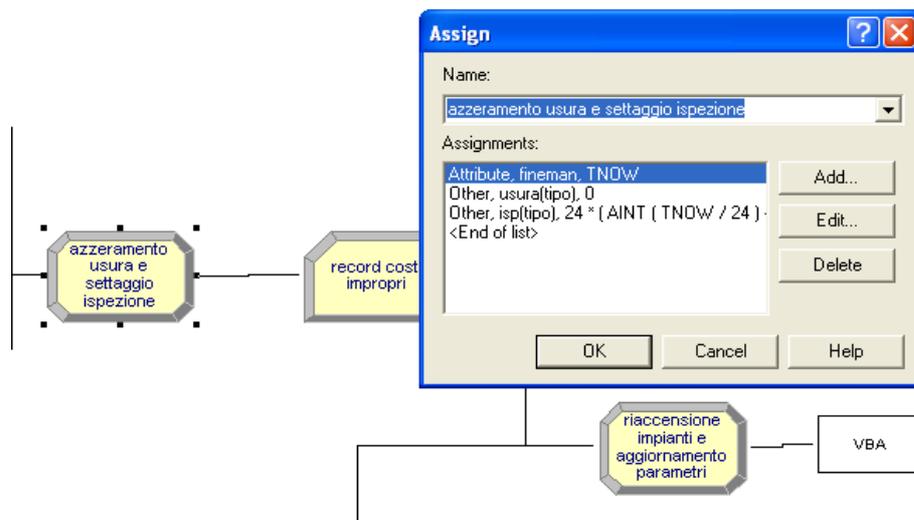
Nella Figura 3.17 è rappresentato lo schema del processo di manutenzione generale, senza distinzione tra preventiva, opportuna o correttiva. Dal punto di vista simulativo e per le scelte fatte in fase di modellazione, la differenza è essenzialmente da imputare ai costi e al tempo necessario per ripristinare il componente. Il processo inizia con il modulo Decide, del quale abbiamo già accennato il comportamento. Le entità raggiungono il process denominato "processo di manutenzione" portando con se le informazioni adeguate assegnategli nel programma Visual Basic. Il modulo di "processo di manutenzione" ha il compito di modellare correttamente la vera e propria azione manutentiva che richiede il tempo indicato dall'attributo  $t_{man}$  e che richiede l'uso di una risorsa denominata *manutentori*. Ulteriori indicazioni sul modulo sono fornite dalla Figura 3.17 in cui è mostrata la finestra di dialogo completa.



**Figura 3.17: modulo *process* "processo di manutenzione"**

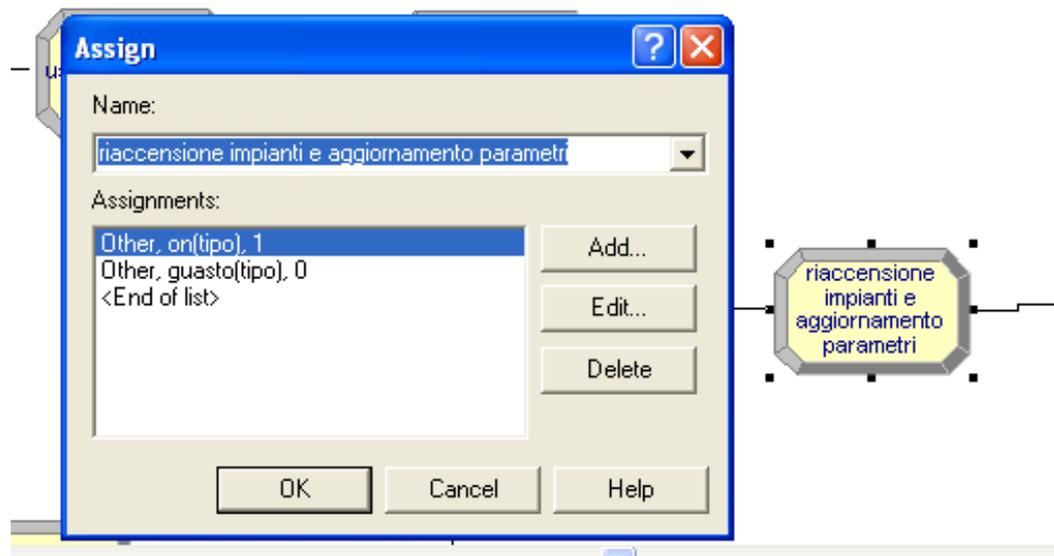
Le entità che non siano capaci di allocarsi una risorsa *manutentori* sosterranno in attesa generando dei costi indotti crescenti.

Quando un'entità è uscita dal "processo di manutenzione" si può considerare terminata qualsiasi operazione su di essa e si può considerare come nuova. Quindi un modulo *Assign* denominato "azzeramento usura e settaggio prossima ispezione" può provvedere a portare a zero il valore dell'usura, deciderà mediante l'appropriata formula a settare la prossima ispezione tra x giorni ed infine provvederà a memorizzare nell'attributo *fineman* l'istante di fine manutenzione. In Figura 3.18 è riportata la finestra di dialogo.



**Figura 3.18: modulo *assign* "azzeramento usura e settaggio ispezione"**

Al termine del processo abbiamo un ulteriore modulo di *Assign* denominato "riaccensione impianti e aggiornamento parametri". In questo modulo vengono azzerati i parametri del modello che riguardano la fermata dell'impianto, permettendo quindi il riavviamento. Siccome a questo punto potremo anche trovare entità provenienti dalla manutenzione correttiva viene riportato a zero il valore *tipo* del vettore *guasto* che ci segnalava che una data macchina era guasta e finalmente viene riacceso l'impianto riportando ad 1 il valore *tipo* del vettore *on* come mostrato in Figura 3.19.



**Figura 3.19: modulo *assign* "riaccensione impianto e aggiornamento parametri"**

### 3.3.4 Assegnazione della prossima ispezione

L'assegnazione della data di prossima ispezione è in realtà già stata effettuata dal VBA Block, che distingue i diversi tipi di manutenzione o verifica la necessità di riavvicinare le ispezioni. L'assegnazione della prossima ispezione avviene attraverso l'aggiornamento del vettore *isp* in corrispondenza del componente *tipo* con il valore dell'equazione 3.1:

$$24 * ( \text{AINT} ( \text{TNOW} / 24 ) + 1 ) + \text{DaysToBaseTime}(x)$$

**3.1**

Dove 'x' rappresenta il numero di giorni desiderato. Nella prima parte abbiamo una funzione che è capace di segnalare il numero di giorni trascorsi nel tempo simulato esprimendoli in ore più uno. La funzione *DaysToBaseTime* invece è una funzione di Arena che, se fornita con un valore intero, restituisce il numero di unità di tempo come contate dal simulatore che corrispondano al numero di giorni indicato. In questo modo scheduleremo, a partire dal giorno in corso, la prossima ispezione in modo che passi un numero di giorni senza che la macchina venga ispezionata pari esattamente al numero indicato.

L'aggiornamento di tale vettore avviene al termine del processo di manutenzione nel caso in cui questa sia stata effettuata, invece sarà sempre il programma in Visual Basic a determinarne il valore al termine del processo di sola ispezione.

L'utilizzo di ulteriori soglie per determinare la data di prossima ispezione è facilitato dalla semplicità dell'equazione 3.1 che mediante il valore 'x' fissa il numero di giorni da far trascorrere perché la macchina sia di nuovo ispezionata.

### **3.3.5 Contabilizzazione dei costi**

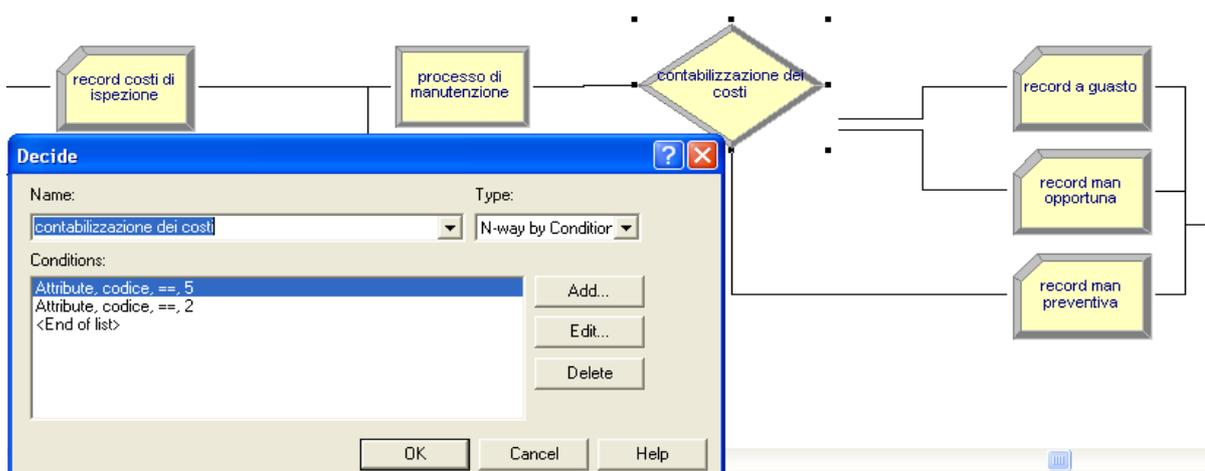
Al termine dei processi di ispezione e manutenzione avviene la registrazione dei relativi costi. L'utilizzo di *Record* compilati in maniera opportuna ha permesso di distinguere le diverse voci di costo per ogni macchina.

All'uscita del processo di ispezione l'entità entra nel *Record* denominato appunto "record costi di ispezione". In realtà questi moduli traducono una famiglia di contatori, in Arena sono detti *set*, e si andrà a contabilizzare il costo nell'i-esimo se l'attributo dell'entità tipo corrisponde ad 'i'. In questo modo possiamo in maniera semplice disaggregare i costi, in questo caso di ispezione, per ogni componente del sistema, oppure riunirli per sapere il costo totale relativo all'intero sistema.



**Figura 3.20: modulo *record* "record costi di ispezione"**

È evidente come la formula di conteggio dei costi di ispezione vede la somma dei costi fissi ( $c_{isp}$ ) e di quelli variabili moltiplicati per il tempo di ispezione ( $c_{per} * t_{isp}$ ). Vediamo come essendo tali costi espressi per attributi saranno tipici per ogni entità come assegnatagli in precedenza. Allo stesso modo sono costruiti i Record per la contabilizzazione dei costi di manutenzione, distinguendo il tipo di manutenzione con un modulo decide che provvede ad indirizzare le entità nel ramo appropriato.

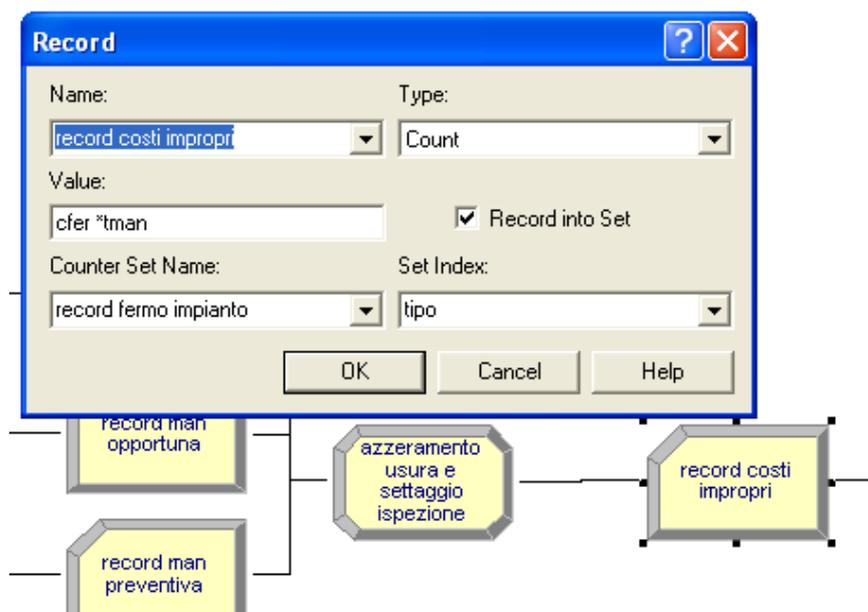


**Figura 3.21: modulo *decide* "contabilizzazione dei costi"**

All'uscita del processo di manutenzione le entità entrano nel modulo Decide "contabilizzazione dei costi". Esso è settato su "N-way by Condition" perché le alternative che si presentano sono, come visto, tre. L'attributo codice determina la tipologia di intervento, e il Decide interroga proprio quest'attributo per indirizzare le entità nei diversi rami.

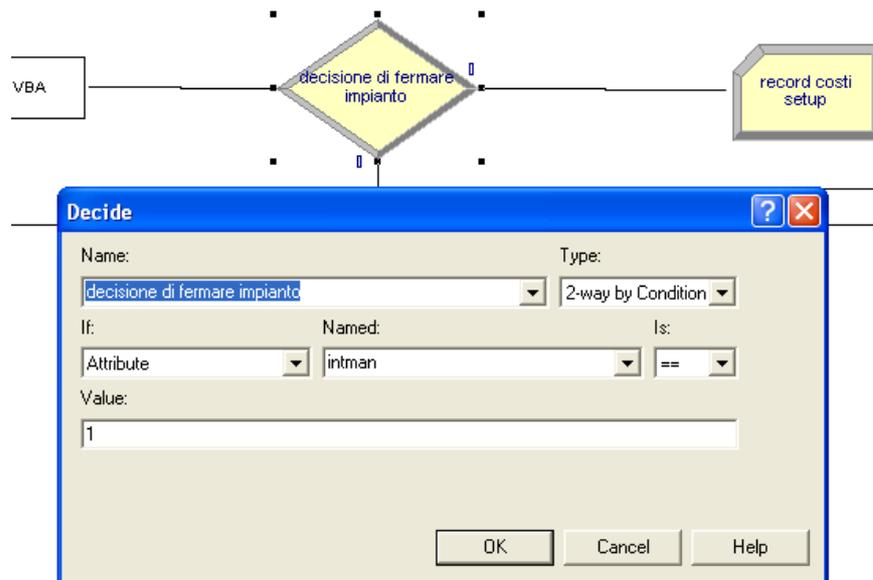
La compilazione dei Record mostrati in Figura 3.21 è analoga a quella fatta per i costi di ispezione, la formula di conteggio riporta un'aliquota di costi fissa più un'altra di costi variabili.

Di seguito vengono contabilizzate i costi indotti dal fatto che abbiamo dovuto fermare i macchinari e questi non sono stati capaci di produrre. Anche questo record è strutturato come *set* per avere informazioni disaggregate. Lasciamo alla lettura della finestra di dialogo in Figura 3.22 l'ottenimento per il lettore di tutte le informazioni relative al modulo.



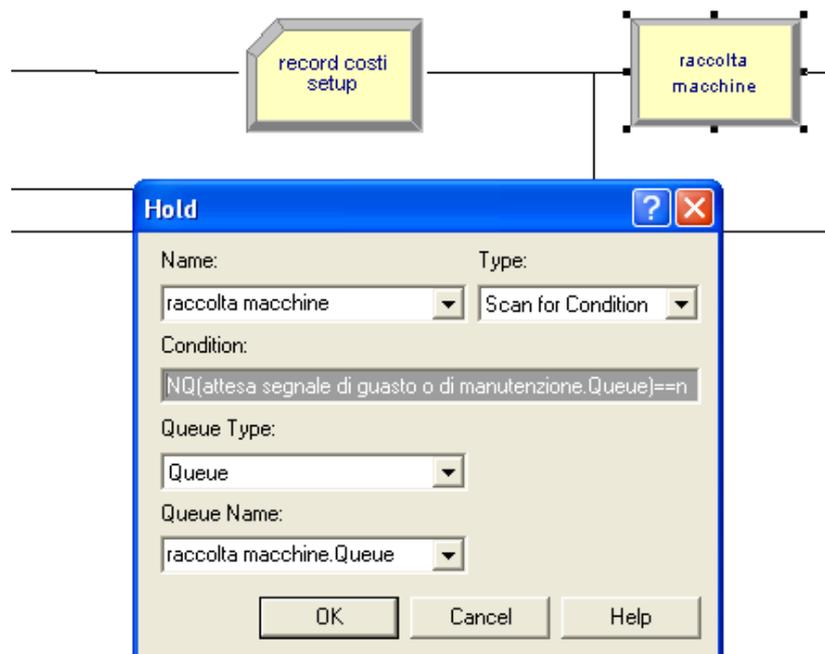
**Figura 3.22: modulo *record* "record costi impropri"**

Particolare attenzione va dedicata alla contabilizzazione dei costi di set up. Specifichiamo che è i costi di set up possono avere una diversa interpretazione a seconda della realtà di interesse, nel nostro caso vengono intesi come il costo sostenuto per la riaccensione dell'intero impianto.



**Figura 3.23: modulo *decide* "decisione di fermare impianto"**

Abbiamo visto come il programma VBA provveda a determinare il valore di intman e ad assegnargli valore unitario qualora fosse avviata la manutenzione. Il modulo Decide mostrato in Figura 3.23 è attraversato dall'entità in attesa nel "Controllo\_Sistema", lascia contabilizzare i costi di set up quando il valore di intman è pari a 1, nel caso contrario vuol dire che il sistema è andato in ispezione senza trovare valori di usura superiori alla soglia di preventiva.



**Figura 3.24: modulo *hold* "raccolta macchine"**

L'entità si acconda nell'Hold "raccolta macchine" e qui attenderà fino quando non è soddisfatta la condizione inserita nel modulo, questo per evitare che a manutenzione avviata vengano contabilizzati i costi di set up ulteriormente. La numerosità della coda "attesa segnale di manutenzione o di guasto" è indice del numero di macchine in manutenzione. Soddisfatta questa condizione, l'entità ritorna nell'Hold "Controllo\_Sistema" in attesa di un nuovo segnale

### **3.3.6 Creazione diario**

Terminato il processo globale di manutenzione le entità sono indirizzate verso un altro VBA Block che provvederà a riempire una riga del diario della manutenzione scritto in Excel pescando coerentemente alcune informazioni sull'entità:

*codice*, per sapere cosa è successo (ispezione, manutenzione, guasto)

*tipo*, per sapere a quale macchinario ci stiamo riferendo

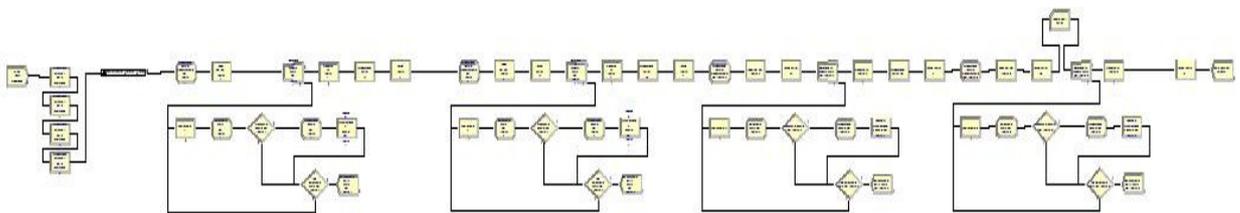
*inizioman*, per sapere quando è iniziato l'evento

*fineman*, per sapere quando è terminato

- varie informazioni sui costi e sui tempi netti di manutenzione e ispezione per effettuare una stima dei costi diretti dell'evento.

### 3.4 LA LOGICA DELLA PRODUZIONE

A differenza della manutenzione il sottomodulo della produzione è a ciclo aperto, i pezzi entrano nel modello e alla fine si allontanano dal sistema, prima però attraverseranno una serie di lavorazioni effettuate da macchine in serie. In Figura 3.25 . riportiamo un esempio nel caso di 4 macchine in serie.



**Figura 3.25: sottomodulo della produzione con 4 macchine in serie**

Lo scopo principale di questo sottomodulo è quello di simulare un processo produttivo in particolar modo:

- Le lavorazioni dei pezzi
- I buffer
- I guasti
- L'aumento dell'usura

Sarà la logica della manutenzione poi a provvedere al buon funzionamento delle macchine ripristinandone il buon funzionamento.

Esporrò qui di seguito le principali caratteristiche di questa parte del modello.

#### 3.4.1 L'arrivo dei pezzi e l'uscita

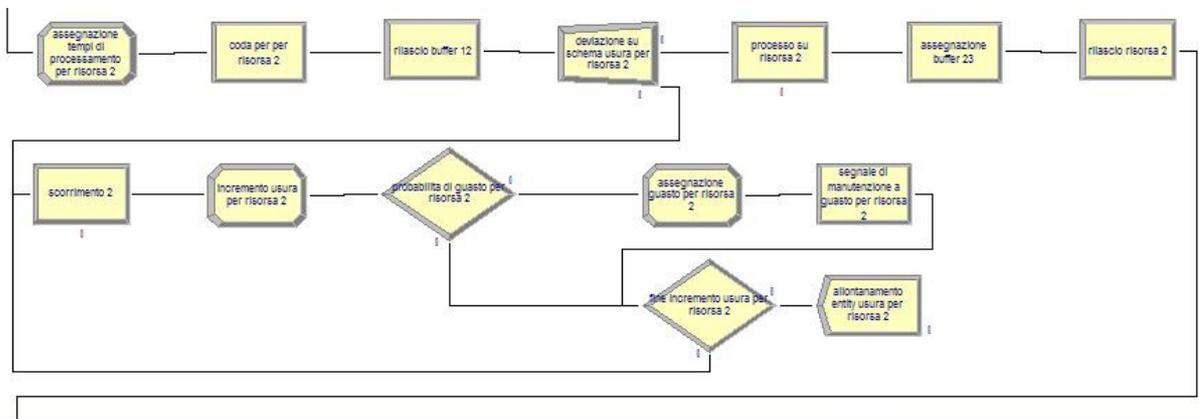
L'arrivo dei pezzi è simulato con un modulo *Create* denominato "arrivo pezzi produzioni". In tale modulo la distribuzione degli intertempi tra gli arrivi è assunta essere una particolare distribuzione, ovviamente nulla toglie che in particolari situazioni produttive tale distribuzione possa essere adattata. Ovviamente non è impostato a priori un numero massimo di pezzi che possono arrivare.

Appena uscito dal modulo *Create* il pezzo attraverso una serie di  $N$  elementi *ReadWrite*, uno per ogni macchina della serie. In ognuno di questi moduli vengono forniti all'entità, sottoforma di attributi, diversi parametri per ogni lavorazione, necessari per definire la forma della distribuzione. Come già evidenziato in precedenza non è detto che tutti i parametri che vengono letti dal modulo *ReadWrite* siano necessari per definire le distribuzioni dei tempi di processamento, se per esempio definissimo una gaussiana avremo bisogno di soli 2 parametri.

L'uscita dei pezzi dal sistema è effettuata tramite un modulo *Dispose* che provvede anche a raccogliere alcune statistiche sulle entità in uscita.

### 3.4.2 La modularità

La struttura del modello messa in evidenza in Figura 3.25 è altamente modulare. In questo modo si è facilitata la costruzione di un modello di qualsivoglia numero di elementi in serie tramite alcune righe di codice VBA. Mettiamo adesso in evidenza la struttura di un modulo come mostrato in Figura 3.26.

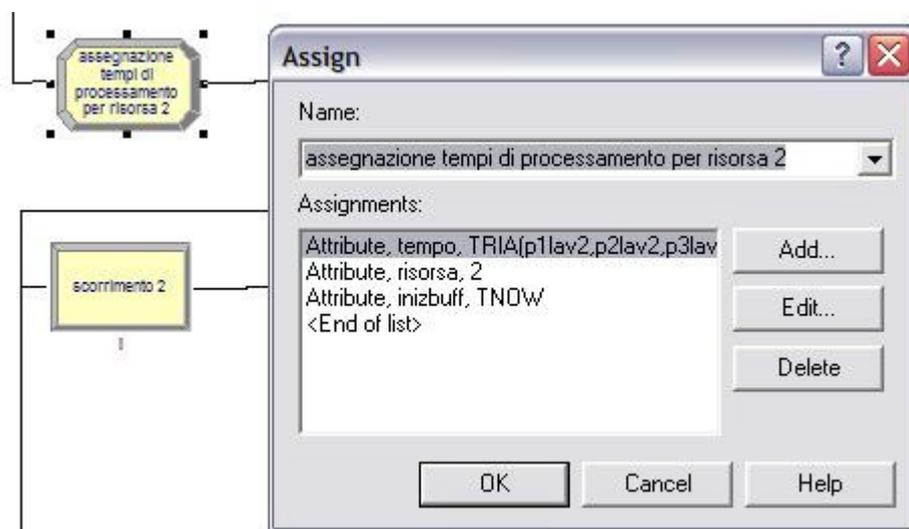


**Figura 3.26: un modulo del modello produttivo**

Come vediamo appena entra nel modulo l'entità è indirizzata verso un *Assign* denominato "assegnazione tempi di processamento per risorsa 2 ", dove ovviamente "2" è il numero ordinale dell'elemento della serie. Poco prima di entrare in questo modulo l'entità aveva rilasciato la risorsa precedente e aveva selezionato un elemento della risorsa *buffer 12* a monte del macchinario dove sta

per entrare, tali operazioni avvengono però tutte allo stesso identico tempo simulato.

All'entità viene quindi assegnato il tempo che dovrà trascorrere in lavorazione su ogni macchina (l'attributo *tempo*), viene registrato l'istante in cui ha allocato il buffer (l'attributo *inizbuff*) e gli viene aggiornato l'attributo *risorsa* coerentemente con la risorsa che sta per trovare sul suo cammino. Tutto ciò è riassunto in Figura 3.27 dove è evidenziato come, per questo particolare caso, la scelta della distribuzione dei tempi di processamento sia caduta sulla triangolare.



**Figura 3.27: modulo "assegnazione tempi di processo per risorsa 2"**

Appena lasciato il modulo di *Assign* l'entità si appresta verso un modulo *Hold* che la tratterrà, permettendo solo ad un'unità alla volta di proseguire. Le ragioni di questo saranno chiare tra poche righe quando spiegheremo il processo di aumento dell'usura.

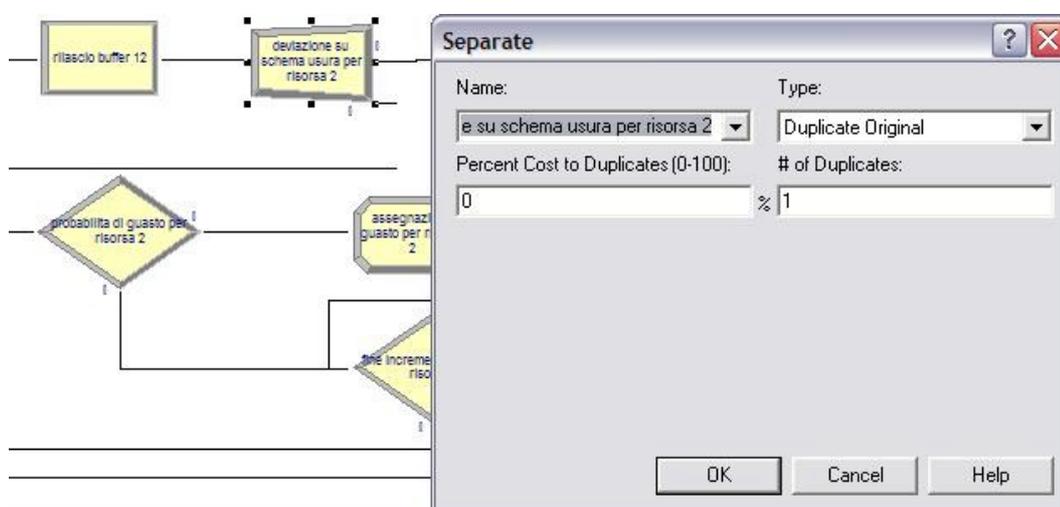
Il modulo *Hold* chiamato "coda per risorsa 2", è settato in modalità "Scan for condition" e la condizione che controlla è espressa nell'equazione 3.2.

$$\text{processo su risorsa 2.WIP} + NQ(\text{assegnazione buffer 23.queue}) == 0 \quad \mathbf{3.2}$$

In poche parole la condizione che si controlla è quella che non ci siano pezzi in lavorazione sul macchinario o che siano in attesa di selezionare una risorsa del buffer a valle del macchinario non potendo quindi lasciare libera la macchina.

Nel caso la condizione fosse verificata il pezzo lascerebbe la "coda per risorsa 2" e attraverserebbe un modulo dove rilascerebbe il *buffer 12* permettendo ad una nuova unità di selezionarlo.

A questo punto avviene una cosa importantissima: l'entità viene duplicata! L'originale prosegue verso il processo produttivo vero e proprio e passerà via via per tutti gli elementi della serie, mentre invece il duplicato, che sarà uno solo, sarà indirizzato verso un particolare processo che farà aumentare l'usura. Evidenziamo qui in Figura 3.28 il modulo "deviazione su schema usura per risorsa 2" che è un modulo *Separate* responsabile di tale duplicazione.

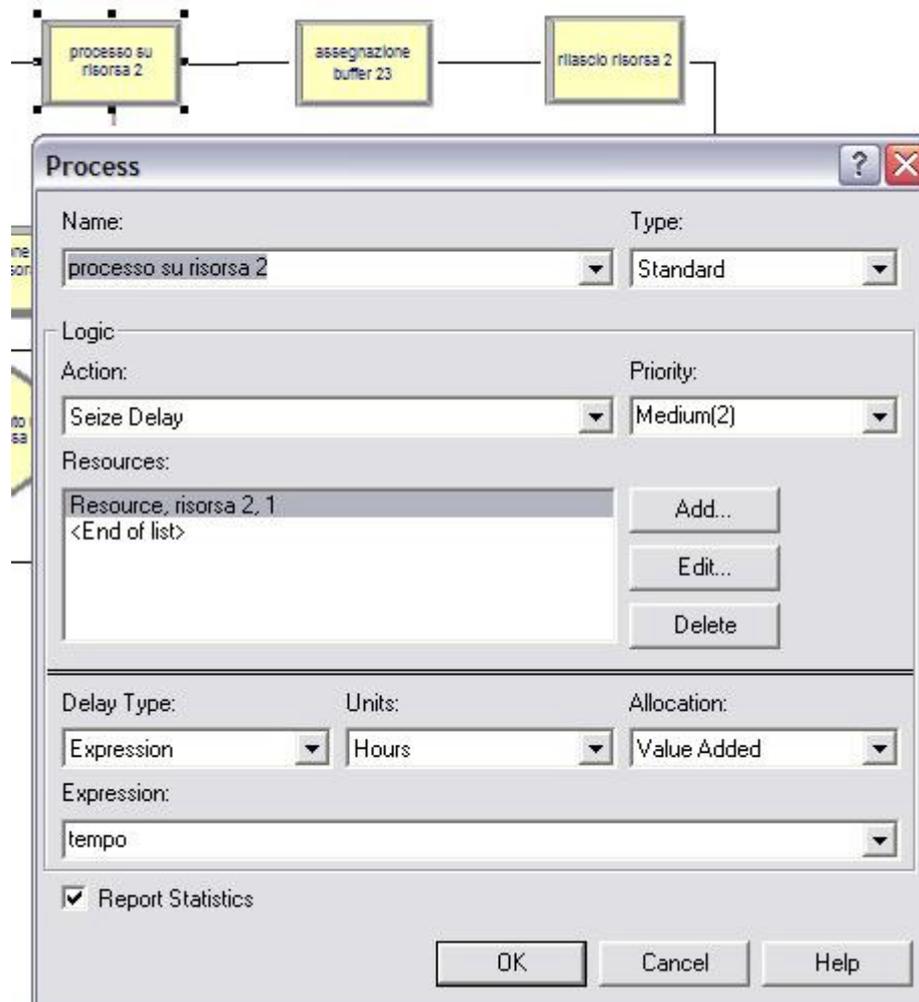


**Figura 3.28: modulo "deviazione su schema usura per risorsa 2"**

Come vediamo la percentuale dei costi associati al duplicato sarà zero, infatti la seconda entità ha il solo scopo di far incrementare il parametro di usura, dopodiché sarà allontanata dal sistema.

Vediamo prima il ramo direttamente produttivo, a questo punto l'entità si appresta a subire il processo produttivo vero e proprio ed entra in modulo process dove le viene allocata la *risorsa 2* e viene fatto trascorrere un tempo pari a quello registrato nel suo attributo. Guardando in Figura 3.29 facciamo attenzione come il modulo sia settato in modalità "Seize-Delay", la risorsa non viene rilasciata fin quando non sarà possibile selezionare una risorsa del buffer successivo, anche se il tempo di lavorazione è trascorso. La sequenza è quindi "seize-delay" della *risorsa 2*, assegnazione del *buffer 23* a valle e poi rilascio

della *risorsa 2*. In questo modo se il buffer è immediatamente disponibile tutte queste operazioni avverranno allo stesso tempo simulato, altrimenti l'entità sosterrà in coda nel modulo di "assegnazione buffer 23" fin quando questo non sarà disponibile.



**Figura 3.29: modulo "processo su risorsa 2"**

A questo punto l'entità potrà dirigersi verso altri elementi della serie.

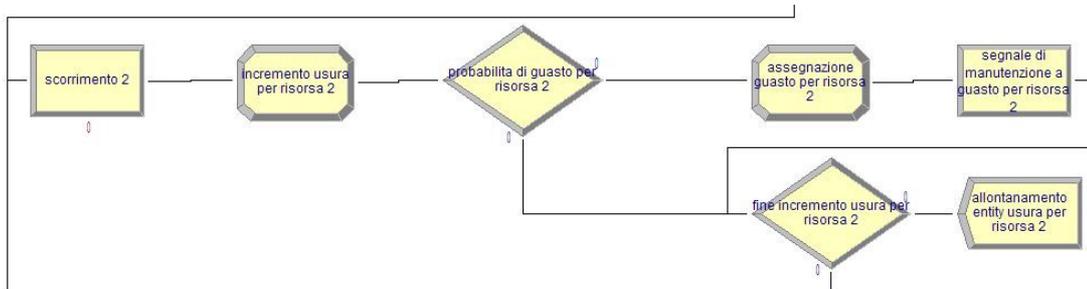
### **3.4.3 Lo schema di aumento dell'usura**

L'entità proveniente dalla duplicazione nello schema produttivo precedentemente visto entra in una particolare logica che sarà responsabile

1. dell'aumento del parametro di usura

## 2. dell'accadimento dei guasti casuali

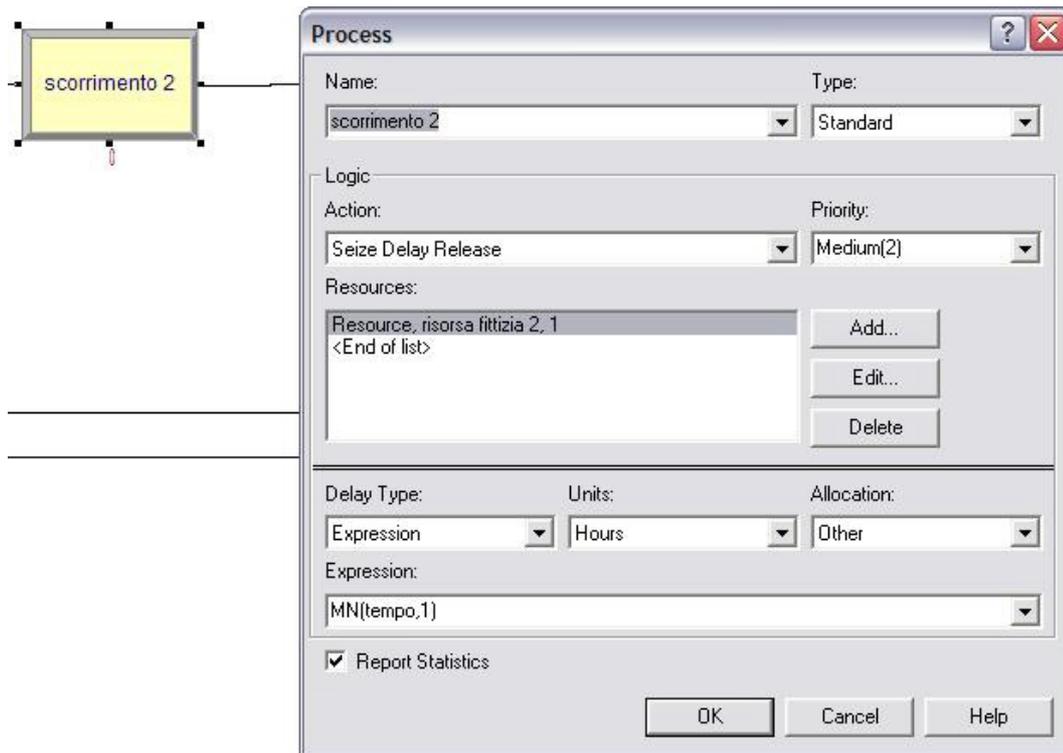
vediamo come ciò può accadere evidenziando dapprima lo schema preciso in Figura 3.30.



**Figura 3.30: schema usura e guasto per un modulo del processo**

Come vediamo si tratta di una logica che prevede l'entrata del pezzo, un certo numero di cicli e poi la dismissione dell'unità dal sistema con l'allontanamento tramite un modulo dispose. Vediamo cosa accade passo per passo.

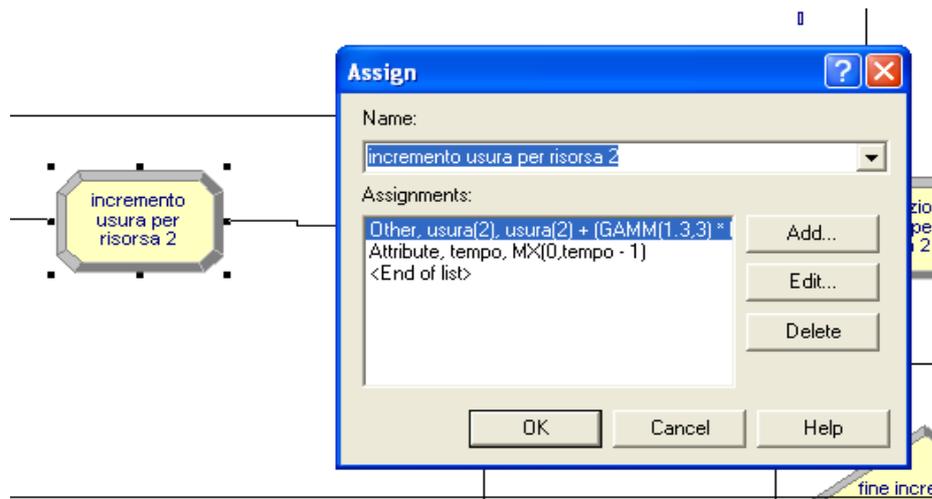
Il primo modulo in cui l'entità entra è "scorrimento 2" che è un modulo che replica esattamente "processo su risorsa 2" dove però la lavorazione può durare al massimo 1 ora e viene sfruttato un duplicato della *risorsa 2* chiamato *risorsa 2 fittizia*. Come evidenziato nell'espressione del *delay* in Figura 3.31 vediamo che il tempo trascorso sarà sempre il minimo tra il *tempo*, attributo dell'entità che indicava quanto dovesse passare in lavorazione un determinato macchinario, e 1 minuto. Per fare ciò si utilizza la funzione di Arena "MN" che ha come output il minimo tra i valori di input assegnategli.



**Figura 3.31: modulo "scorrimento 2"**

Comunque l'entità sarà lavorata, seppur in maniera fittizia, comunque per il tempo previsto. Sarà infatti rimandata indietro fintantoché questo non sarà esaurito.

A questo punto l'entità viene indirizzato verso un modulo di *Assign* dove si provvede a scalare il tempo residuo di lavorazione dall'attributo *tempo* di un minuto e ad incrementare coerentemente il parametro di usura come evidenziato in Figura 3.32.



**Figura 3.32: modulo "incremento usura per risorsa 2"**

Come vediamo quando si scala il tempo si usa l'equazione 3.4 dove si utilizza il massimo valore, dato dalla funzione "MX" di Arena, tra il valore dell'attributo *tempo* meno un minuto e il valore zero. Questo per impedire che venga attribuiti a tempo un valore negativo.

Nell'equazione 3.3 vediamo invece come aumenta l'usura. In questo caso stiamo incrementando il secondo componente del vettore usura in quanto stiamo considerando il secondo componente della serie. Tale valore viene incrementato considerando una distribuzione Gamma di parametri  $\alpha = 1.3$  e  $\beta = 3$ . Tale valore viene moltiplicato per il minimo tra il tempo residuo e 1 minuto, così se per esempio mancasse mezzo minuto di lavorazione verrebbe considerata solo metà dell'incremento casuale generato dalla gamma.

$$\text{usura}(2) = \text{usura}(2) + \text{GAMM}(1.3,4) * \text{MN}(\text{tempo},1) \quad \mathbf{3.3}$$

$$\text{tempo} = \text{MX}(0, \text{tempo} - 1) \quad \mathbf{3.4}$$

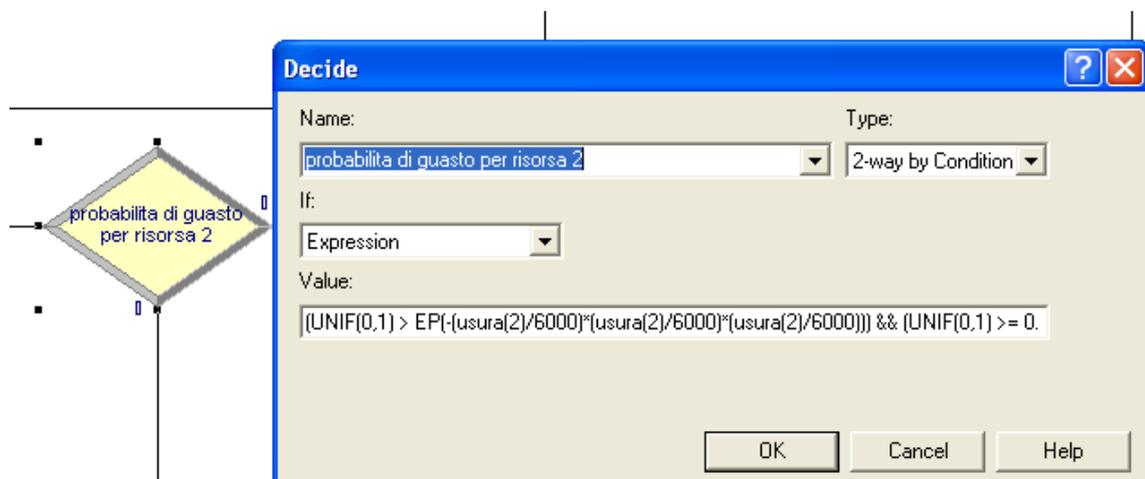
Adesso vedremo come tale modello assume all'altra sua importantissima funzione: modellare l'accadimento casuale di guasti.

Appena finito il processo di incremento dell'usura e l'aggiornamento del tempo residuo di lavorazione il modello si interrogherà sul se far accadere un guasto oppure no. Solitamente la probabilità che un componente o macchinario

sopravviva ad un tempo  $t$  viene modellata con la funzione di affidabilità di una weibull. Anche noi abbiamo voluto utilizzare una distribuzione di probabilità weibull per modellare i guasti, ma lo abbiamo fatto utilizzando come parametro non il tempo, bensì il parametro di usura.

Quindi abbiamo costruito una funzione di affidabilità della weibull di parametri  $\alpha = 6000$  e  $\beta = 3$ , dove il secondo parametro ci indica che il componente è soggetta a usura\_senile. Preso un determinato valore dell'usura noi possiamo conoscere la probabilità che esso sopravviva ad un determinato valore dell'usura. Calcolata questa probabilità facciamo un'estrazione casuale da una distribuzione uniforme tra 0 ed 1 e vediamo se tale valore è maggiore della probabilità di buon funzionamento data dalla  $R(t)$  allora il guasto è considerato come avvenuto, e l'entità si avvierà verso il ramo *true* del *Decide*, mentre nell'altro caso l'evento guasto non è considerato avvenuto.

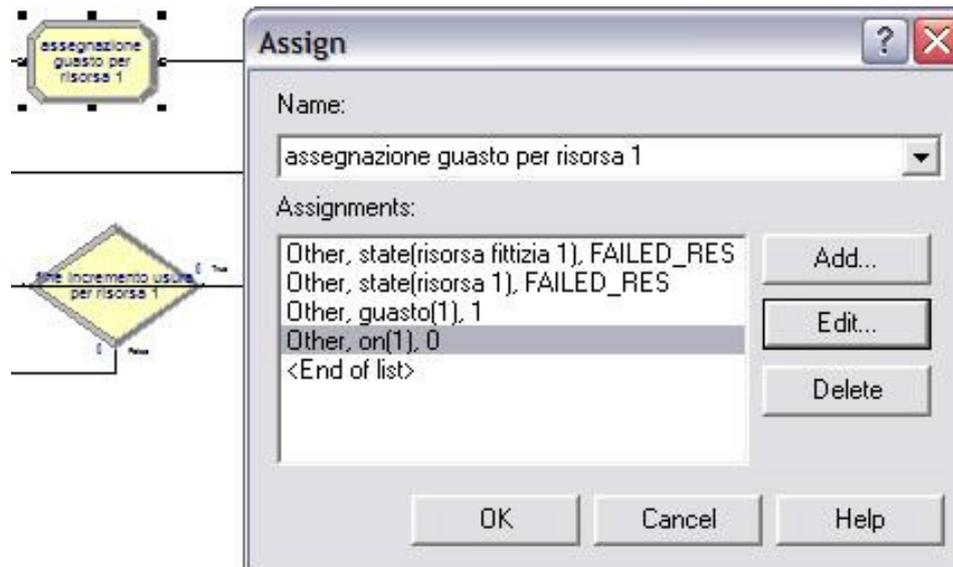
Tutto ciò è riassunto nel modulo "probabilità di guasto per risorsa 2" che è un *Decide*. Un riassunto di quanto detto è in Figura 3.33.



**Figura 3.33: modulo "probabilità di guasto per risorsa 2"**

Vediamo come nel nostro caso, per alcuni problemi con l'utilizzo della funzione di elevazione a potenza di Arena che sembrava dare qualche problema in termini di cifre significative, si è preferito moltiplicare per 3 volte lo stesso valore.

Nel caso l'entità vada per il ramo *True* passa per un modulo *Assign* che effettua una serie di assegnazioni coerenti con l'evento avvenuto riassunte in Figura 3.34.



**Figura 3.34: modulo "assegnazione guasto per risorsa 1"**

Come vediamo passa a 0 il valore del vettore *on* e ad 1 il valore del vettore *guasto* a cui è associata quel determinato elemento della serie, in questo caso il primo. Contemporaneamente vengono settati a guasto gli stati della *risorsa 1* e della *risorsa 1 fittizia*.

Dopo esser passato dal modulo di *Assign* l'entità passerà per un modulo *Signal* che manderà il segnale di valore '1' al modulo "attesa segnale di guasto o di manutenzione" mostrato nel sottoparagrafo 3.5.2. In questo modo si provocherà la liberazione di tutte le entità in attesa, ma solo quella a cui compete rappresentare l'elemento guasto sarà selezionata per la manutenzione correttiva dal modulo *Decide* mostrato in Figura 3.34.

A questo punto l'entità viene indirizzata verso un modulo *Decide* denominato "fine incremento usura per risorsa 2". A questo modulo sono state indirizzate direttamente anche le entità che avevano seguito il ramo *False* del modulo "probabilità di guasto per risorsa 2". In questo modulo decide se verificherà se è rimasto ancora del tempo residuo di lavorazione, in caso affermativo l'entità sarà rispedita al modulo "scorrimento 2" che opererà un'altra ora di processamento fittizio, in caso contrario l'entità sarà allontanata dal sistema mediante un modulo *Dispose*.

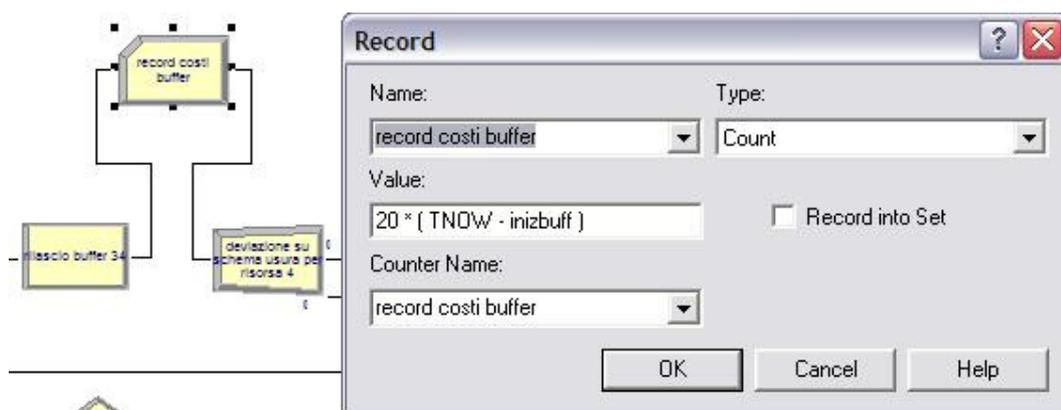
### 3.4.4 I buffer

Abbiamo notato come dei buffer sono predisposti tra ogni due risorse consecutive e abbiamo notato come per passare dalla  $i$ -esima risorsa alla  $i+1$ -esima sia necessario almeno una risorsa disponibile del buffer.

Quindi se impostiamo alla risorsa *buffer 23* la capacità 1 questa si comporterà come se tra la macchina 2 e la macchina 3 ci sia un buffer di capacità nulla che ammetterà solo il passaggio diretto tra le due risorse senza possibile di stoccare nessun semilavorato. Parallelamente un buffer di capacità, ad esempio 5, consentirà massimo a 4 semilavorati di rimanere a bordo macchina.

Bisognerà stare attenti a questa caratteristica quando si personalizzerà il modello.

L'osservatore attento avrà notato come i moduli non sono proprio perfettamente tutti uguali, finora non abbiamo infatti ancora accennato niente riguardo alla nostra intenzione di inserire un buffer tra due elementi della serie. L'inserimento del buffer è stato predisposto per tutti gli elementi della serie, ma solo uno non sarà di capacità nulla e quindi comporterà l'insorgere di alcuni costi di gestione per questa struttura. Vediamo come quindi nasce l'esigenza di introdurre un modulo *Record* denominato "record costi buffer" le cui caratteristiche sono evidenziate dalla Figura 3.35: record costi buffer



**Figura 3.35: record costi buffer**

Vediamo come il costo di buffer sia considerato solo variabile e dipendente dal numero di ore passate dal pezzo nel buffer. Il costo orario può essere determinato in vari modi, non è questa la sede ovviamente per approfondirli,

abbiamo in questa sede supposto semplicemente che sia 20€/h, tale valore potrebbe essere determinato sulla base di una percentuale del costo finale del prodotto o del valore del WIP. Notiamo come questo *Record*, a differenza degli altri finora visti, non è un *set* di contatori in quanto tale costo non può essere disaggregato in funzione di un particolare elemento della serie, ma riguarderà l'intero ciclo produttivo.

### 3.4.5 La risorsa fittizia

Abbiamo visto come parallelamente al processo produttivo avvengono dei processi fittizi che hanno il solo scopo di aumentare coerentemente il valore del parametro di usura e innescare dei possibili guasti.

Tali processi sono basati su delle risorse chiamate "fittizie". L'allineamento tra la risorsa originale e quella fittizia è assicurato dal fatto che entrambe vedono la propria capacità organizzata in base allo stesso *schedule* come si può notare in Figura 3.36.

Name	Type	Capacity	Schedule Name	Schedule Rule
risorsa 1	Based on Schedule	schedule 1	schedule 1	Preempt
risorsa fittizia 1	Based on Schedule	schedule 1	schedule 1	Preempt
risorsa 2	Based on Schedule	schedule 2	schedule 2	Preempt
risorsa fittizia 2	Based on Schedule	schedule 2	schedule 2	Preempt
risorsa 3	Based on Schedule	schedule 3	schedule 3	Preempt
risorsa fittizia 3	Based on Schedule	schedule 3	schedule 3	Preempt
risorsa 4	Based on Schedule	schedule 4	schedule 4	Preempt
risorsa fittizia 4	Based on Schedule	schedule 4	schedule 4	Preempt

**Figura 3.36: elenco risorse originali e fittizie**

Vediamo come la "*Schedule Rule*" sia impostata su *Preempt*", questa particolare legge implica che qualora si verificasse un azzeramento della capacità produttiva mentre è in corso una lavorazione, nel nostro modello può accadere a causa della manutenzione o di guasti, la lavorazione di tale pezzo viene sospesa e riinizierà quando tale capacità sarà nuovamente resa disponibile.

Altre possibili regole sono *Ignore* che ignorerà totalmente la diminuzione di l'intero scheduling in avanti in modo tale da completare la lavorazione in corso. Entrambe queste regole non sono usate nel nostro modello

### **3.4.6 Possibili modifiche manuali al processo produttivo**

Adesso che è stato chiarito come abbiamo strutturato il nostro processo produttivo appare chiaro come sia estremamente flessibile.

Prima di tutto aggiungendo ulteriori moduli *Create* prima del sottomodello chiamato "collettore pezzi in arrivo" è possibile inserire nel modello altre tipologie di pezzi. Non c'è limite in questo senso e possiamo facilmente modellare industrie che lavorano anche 100 differenti parti. Approfittiamo per spiegare come il sottomodello "collettore arrivo pezzi" sia un sottomodello totalmente vuoto e messo lì semplicemente per fare da milestone per il codice VBA che dovrà costruire il modello.

Abbiamo poi capito come l'entità minima per modellare la produzione, il modulo, sia organizzabile nei più disparati sistemi, basta mantenere intatta la sua struttura logica minima. Tra vari moduli possono essere modellati i processi più disparati per adattare al processo reale il processo simulato. Si possono introdurre magazzini di capacità limitata. Trasferimenti da zone all'altra dello stabilimento, trasferimenti con l'uso di carrelli AGV, introdurre tempi di raffreddamento o di riscaldamento.

Possono essere introdotte anche configurazioni impiantistiche diverse dalla serie, come il parallelo in ridondanza e il parallelo sincronizzato, semplicemente modificando il modo in cui sono collegati i moduli e dotandosi di poca logica per adattarsi alla situazione. Nel nostro modello ci siamo limitati allo studio di  $N$  elementi in serie perché questa è la configurazione che presenta maggiori opportunità di essere ottimizzata rispetto alle altre vista l'estrema dipendenza delle prestazioni del sistema da quelle di ogni singolo elemento.

### **3.5 LA RACCOLTA DEI DATI**

Una volta modellato a piacere il processo produttivo e la logica di manutenzione, prima di far partire la simulazione, è lecito chiedersi quali siano gli output che noi vogliamo dal modello.

Il fine di questo modello è quello di minimizzare i costi di lungo periodo per un sistema di manutenzione su condizione. Trattandosi di simulazione ci metteremo in un caso più semplice: minimizzare il costo annuale di manutenzione. Definendo in questo modo l'obiettivo facciamo in modo tale da evitare ambiguità e ci mettiamo nella condizione migliore per valutare due differenti alternative.

Le informazioni che dovremo raccogliere dal modello sono quindi essenzialmente economiche. Tali informazioni riguardano i costi accumulati dal modello e quindi sono ottenuti tramite dei contatori posti variamente nella logica della manutenzione più il costo del buffer che invece è inserito nella logica della produzione.

#### **3.5.1 Contatori**

Nel nostro modello avremo quindi:

1. record costi di ispezione
2. record costi manutenzione preventiva
3. record costi manutenzione opportuna
4. record costi di guasto
5. record costi impropri
6. record costi buffer

Per i primi 5 abbiamo delle informazioni disaggregate per singolo elemento della serie, mentre per il 6. abbiamo un'informazione unica che riguarderà l'intero ciclo produttivo. I costi per i primi 5, già discussi nella logica della manutenzione, saranno sempre ottenuti da un'aliquota fissa più una variabile mentre per il buffer, come solitamente si usa, si considerano solo dei costi variabili.

La struttura dei record è interamente creata in automatico dal codice VBA sulla base delle informazioni che noi gli forniamo nella finestra di dialogo che ci si presenta all'inizio del documento. Non è possibile quindi incappare in errori.

Qualora fossero necessarie informazioni più dettagliate relativamente a particolare aspetti come per esempio tempo di attraversamento del ciclo produttivo, il suo tempo ciclo, livello di saturazione delle risorse e così via, l'utente può sempre modificare a piacimento il modello per ottenere quelle informazioni.

### 3.5.2 Statistiche

Nelle statistiche di output vengono presentati:

1. informazioni sulla percentuale di tempo trascorso in ogni stato dalle risorse
2. vari livelli di aggregazione dei costi raccolti in maniera disaggregata dai record

Per il primo punto è stato necessario introdurre una statistica di frequenza all'interno del datamodulo *Statistics* del pannello *Advanced Process*. Come mostrato in Figura 3.37 per ognuno degli elementi della serie sono distinti i quattro stati possibili di una macchine nel nostro sistema:

- libera
- occupata
- in manutenzione
- guasta

11	Statistic 11	Frequency	Stat	State	risorsa 1	Statistiche Risorsa 1	4 rows
12	Statistic 12	Frequency	Stat	State	risorsa 2	Statistiche Risorsa 2	4 rows
13	Statistic 13	Frequency	Stat	State	risorsa 3	Statistiche Risorsa 3	4 rows
14	Statistic 14	Frequency	Stat	State	risorsa 4	Statistiche Risorsa 4	4 rows

Categories				
	Constant or Range	Value	Category Name	Category Option
1	Constant	-1	libera	Include
2	Constant	-2	occupata	Include
3	Constant	-3	manutenzione	Include
4	Constant	-4	guasta	Include

**Figura 3.37: inserimento statistiche di frequenza per le risorse**

Tale statistica di frequenza non viene presentata però in alcun report finale, quindi è stato necessario predisporre coerentemente le statistiche di output come mostrato dalla Figura 3.38, vediamo inoltre come è stata utilizzata la funzione di

Arena "FSTAND" che ci dice la percentuale di tempo spesa in ognuna delle categorie in cui è stata divisa una caratteristica di frequenza. Si è deciso inoltre di dare informazioni in termini percentuali ritenute più sintetiche e facilmente interpretabili.

15	Statistic	Output	FSTAND(Statistiche Risorsa 1,libera)	% libera risorsa 1	
16	Statistic	Output	FSTAND(Statistiche Risorsa 1,occupata)	% occupata risorsa 1	
17	Statistic	Output	FSTAND(Statistiche Risorsa 1,manutenzione)	% manutenzione risorsa 1	
18	Statistic	Output	FSTAND(Statistiche Risorsa 1,guasta)	% guasta risorsa 1	
19	Statistic	Output	FSTAND(Statistiche Risorsa 2,libera)	% libera risorsa 2	...
20	Statistic	Output	FSTAND(Statistiche Risorsa 2,occupata)	% occupata risorsa 2	
21	Statistic	Output	FSTAND(Statistiche Risorsa 2,manutenzione)	% manutenzione risorsa 2	
22	Statistic	Output	FSTAND(Statistiche Risorsa 2,guasta)	% guasta risorsa 2	
23	Statistic	Output	FSTAND(Statistiche Risorsa 3,libera)	% libera risorsa 3	
24	Statistic	Output	FSTAND(Statistiche Risorsa 3,occupata)	% occupata risorsa 3	
25	Statistic	Output	FSTAND(Statistiche Risorsa 3,manutenzione)	% manutenzione risorsa 3	
26	Statistic	Output	FSTAND(Statistiche Risorsa 3,guasta)	% guasta risorsa 3	
27	Statistic	Output	FSTAND(Statistiche Risorsa 4,libera)	% libera risorsa 4	
28	Statistic	Output	FSTAND(Statistiche Risorsa 4,occupata)	% occupata risorsa 4	
29	Statistic	Output	FSTAND(Statistiche Risorsa 4,manutenzione)	% manutenzione risorsa 4	
30	Statistic	Output	FSTAND(Statistiche Risorsa 4,guasta)	% guasta risorsa 4	

**Figura 3.38: percentuali di tempo speso in ogni stato**

Per quanto riguarda il secondo punto, ovvero l'aggregazione dei costi, sono state predisposte delle statistiche che aggregano i costi per elemento della serie (cfr. Figura 3.39), altre che invece isolano la tipologia di costo come correttiva o ispezioni (cfr. Figura 3.40) più la statistica finale che è il computo dei costi totali.

	Name	Type	Expression	Report Label
7	Statistic	Output	NC(costi di guasto 1) + NC(costi man preventiva 1) + NC(costi man opportuna 1) + NC(costi ispezioni 1) + NC(costi fermo risorsa 1)	costi totali componente 1
8	Statistic	Output	NC(costi di guasto 2) + NC(costi man preventiva 2) + NC(costi man opportuna 2) + NC(costi ispezioni 2) + NC(costi fermo risorsa 2)	costi totali componente 2
9	Statistic	Output	NC(costi di guasto 3) + NC(costi man preventiva 3) + NC(costi man opportuna 3) + NC(costi ispezioni 3) + NC(costi fermo risorsa 3)	costi totali componente 3
10	Statistic	Output	NC(costi di guasto 4) + NC(costi man preventiva 4) + NC(costi man opportuna 4) + NC(costi ispezioni 4) + NC(costi fermo risorsa 4)	costi totali componente 4

**Figura 3.39: costi aggregati per componente**

	Name	Type	Expression	Report Label
1	Statistic 1	Output	OVALUE(costi totali ispezione) + OVALUE(costi totali di guasto) + OVALUE(costi totali man opportuna) + OVALUE(costi totali man preventiva) + OVALUE(costi totali fermo macchinari) + NC(record costi buffer)	COSTI TOTALI
2	Statistic 2	Output	+ NC(costi fermo risorsa 1)+ NC(costi fermo risorsa 2)+ NC(costi fermo risorsa 3)+ NC(costi fermo risorsa 4)	costi totali fermo macchinari
3	Statistic 3	Output	+ NC(costi ispezioni 1)+ NC(costi ispezioni 2)+ NC(costi ispezioni 3)+ NC(costi ispezioni 4)	costi totali ispezione
4	Statistic 4	Output	+ NC(costi man opportuna 1)+ NC(costi man opportuna 2)+ NC(costi man opportuna 3)+ NC(costi man opportuna 4)	costi totali man opportuna
5	Statistic 5	Output	+ NC(costi man preventiva 1)+ NC(costi man preventiva 2)+ NC(costi man preventiva 3)+ NC(costi man preventiva 4)	costi totali man preventiva
6	Statistic 6	Output	+ NC(costi di guasto 1)+ NC(costi di guasto 2)+ NC(costi di guasto 3)+ NC(costi di guasto 4)	costi totali di guasto

**Figura 3.40: costi aggregati per tipologia più costi totali**

Va qui specificato come nel modello si presentasse una situazione di macchina libera, cioè capace a produrre ma senza la possibilità di ricevere pezzi in produzione perché non gli arrivino da monte, tale situazione sarebbe analoga completamente al costo di fermo macchina contabilizzato in precedenza e dovrebbe essere misurato in maniera coerente.

Mediante l'utilizzo delle statistiche è stato estremamente semplice contabilizzare i costi di macchina libera per ogni entità, infatti la funzione di Arena "FRQMT" restituisce il valore del tempo totale nel particolare stato da considerare, in questo caso lo stato di macchina libera. Questi costi sono stati sommati ai costi di fermo per manutenzione e ai costi di set up per ottenere la i costi totali indotti da inserire nella formula del costo totale.

## 4. OTTIMIZZAZIONE E ANALISI PARAMETRICA

### 4.1 L'OTTIMIZZAZIONE CON ARENA

Nel capitolo precedente abbiamo ampiamente definito la costruzione del modello, evidenziando una serie di caratteristiche che permettono di adattarlo in maniera più o meno complessa a situazioni reali.

Obiettivo finale di qualsiasi modello matematico non è quello di stimare esclusivamente i costi, bensì pervenire ad una loro ottimizzazione secondo alcuni criteri.

Parlare di ottimizzazione equivale alla definizione di un'opportuna funzione obiettivo e del criterio relativo, dobbiamo infatti decidere se tale obiettivo sia da minimizzare o da massimizzare. Nel nostro modello la definizione di tale funzione è lampante, infatti il parametro da ottimizzare sono i "Costi Totali" così come calcolati dal modello.

Il valore della funzione obiettivo muterà al variare degli input, il nostro interesse è quello di calcolare il valore della funzione per diversi input, appartenenti ad un dominio definito, e capire per quali valori di tali input troviamo il minimo della funzione obiettivo. Nel nostro modello sono presenti moltissime variabili, tuttavia non tutte hanno la stessa capacità di essere modificate nella realtà. Possiamo definire 5 classi di variabili che, in linea di principio, siamo in grado di modificare per ottimizzare la funzione obiettivo:

- i costi
- i tempi di manutenzione o ispezione
- i tempi di lavorazione
- le soglie
- la disponibilità delle risorse per la manutenzione (ispettori e manutentori)
- Le soglie di manutenzione possono essere modificate direttamente dalla funzione manutenzione, modificarle non costa niente e possono

significativamente abbassare i costi di manutenzione totali diminuendo il numero dei guasti e razionalizzando alcune spese come quelle di ispezione e di manutenzione.

- Quindi l'obiettivo è quello di minimizzare i costi totali annuali di manutenzione modificando opportunamente il valore delle soglie decisionali.

Il lavoro si è articolato in una serie di ottimizzazioni lanciate con Optquest, software che dialoga con Arena, per ottenere come risultato finale delle curve che sintetizzano la migliore politica manutentiva al variare dei parametri. La durata di ogni ottimizzazione varia dalle 18 alle 36 ore a seconda delle caratteristiche del calcolatore. Lanciare un gran numero di ottimizzazioni, come lo è stato nel nostro caso, comporta un onere in termini di tempo eccessivo. Questo giustifica determinate scelte per la semplificazione del modello, in ogni modo riteniamo che queste semplificazioni, di cui parleremo nel dettaglio, possano modificare di poco le soluzioni trovate, ma sicuramente non alterano l'andamento delle curve e la relazione tra le soglie. Quest'aspetto risulterà di certo chiaro dopo aver valutato i risultati del lavoro proposto.

#### **4.1.1 Il metodo di ottimizzazione**

Una volta scelto di ottimizzare dobbiamo anche decidere come farlo. L'ottimizzazione riguarda la capacità di trovare la migliore soluzione al problema descritto con una funzione obiettivo, da ottimizzare, e un set di vincoli per restringere il valore di determinate variabili, altrimenti dette controlli, in un determinato dominio ammissibile. Lo strumento di ottimizzazione maggiormente noto è la programmazione lineare, che richiede che si possa esprimere la funzione obiettivo e i vincoli utilizzando funzioni lineari. Le tecniche ottimizzative per risolvere questi problemi sono ben sviluppate in letteratura e ci sono anche numerosi pacchetti software in commercio capaci di risolvere questa categoria di problemi. Tali tecniche cercano la soluzione al problema senza valutare tutte le possibili alternative, modelli con miliardi di possibili alternative possono essere risolti in un accettabile tempo di computazione.

Sfortunatamente non tutti i problemi in tema industriale possono essere descritti con obiettivi lineari e vincoli, sia di disuguaglianza che di uguaglianza, a loro volta lineari. Molti sistemi complessi possono addirittura anche non avere una

rappresentazione matematica, sia essa lineare o non lineare. Per usare quindi tecniche di ottimizzazione lineare, o anche delle sue cosiddette cugine la programmazione non lineare o intera, bisogna assumere una serie di semplificazioni all'interno del modello per definire opportunamente il problema affliggendo spesso l'aderenza del modello alla realtà da modellare. Il vantaggio di usare queste tecniche tuttavia consiste nella loro capacità, una volta semplificato il modello, di trovare una soluzione realmente ottima al problema. In ogni caso ci sono problemi, ad esempio quelli di scheduling o di routing, a cui una soluzione deterministica appare impossibile da assegnare in ragione della natura combinatoriale del problema.

Diventando i problemi pratici e i sistemi che li rappresentano continuamente più complessi e vista la necessità pratica di trovare soluzione a questi problemi sono state sviluppate una serie di procedure dette "Metaeuristiche". Chiamiamo Euristiche una tecnica che fornisce una soluzione approssimata ad un problema complesso. Per esempio nel caso dei problemi di scheduling una procedura euristica è capace di fornire un indice di priorità al job da schedulare in modo da cercare di ottenere la minimizzazione del tempo di completamento di tutti i job. Le euristiche possono funzionare più o meno bene in dipendenza dal contesto, in alcuni casi comunque il risultato può essere veramente disastroso in termini di ottimizzazione.

Spesso quindi ci si trova di fronte alla scelta tra due alternative entrambe poco allettanti, la prima è quella di considerare un sistema estremamente semplificato ed ottimizzarlo, un'altra è quella di utilizzare un'euristica e sperare nella bontà della soluzione trovata.

Gli algoritmi Metaeuristici si innalzano al di là di questa scelta, l'aspirazione è quella di integrare una procedura intelligente con un'implementazione al computer capace di abbattere i tempi di calcolo per fornire soluzioni di alta qualità. [67]

Riassumendo il tutto quindi possiamo dire che, nell'ambito dei modelli matematici, la strada seguita è quella di un'ottimizzazione analitica in cui si trova l'ottimo globale di una funzione in un determinato dominio, limitato o infinito, secondo i criteri dell'analisi matematica.

Quando abbiamo invece a che fare con modelli in cui tale approccio risulta impossibile da applicare, in quanto il legame che si ha tra una variabile e la funzione obiettivo non sempre è formalizzabile in maniera esplicita. Non si riesce quindi a esprimere in maniera analitica la funzione  $y=f(x_1,x_2,\dots,x_n)$  e di conseguenza non si riesce a risolvere il problema espresso nell'equazione 4-1.

$$\begin{array}{ll}
 \text{Min! } y = f(x_1, \dots, x_n) & \mathbf{4.1} \\
 g_i(x_1, \dots, x_n) = 0 & \forall i = 1, l \\
 h_i(x_1, \dots, x_n) \leq 0 & \forall i = 1, m \\
 x_j \in X_j & \forall j = 1, n
 \end{array}$$

Oppure, nel momento in cui si riesce ad esplicitare un legame di questo tipo, non sempre un algoritmo di ricerca esatto riesce a trovare l'ottimo globale della funzione in un tempo compatibile con le nostre aspettative, in quanto dovrà, in qualche modo, valutare il valore della funzione nell'intero dominio.

A questo punto risulta ovvio ricorrere all'utilizzo di algoritmi di ricerca euristici. Mentre le tecniche esatte garantiscono il raggiungimento della soluzione ottima, i metodi euristici, o approssimati, ricercano una buona soluzione del problema, non necessariamente ottima.

All'interno degli algoritmi euristici abbiamo tre categorie:

1. algoritmi costruttivi
2. algoritmi migliorativi
3. algoritmi metaeuristici

Gli algoritmi costruttivi costruiscono, appunto, gradualmente la soluzione attraverso il passaggio di alcune soluzioni parziali.

Gli algoritmi migliorativi partono, invece, da una soluzione del problema e cercano di modificarla con l'obiettivo di ottenerne una migliore.

Gli algoritmi migliorativi, per come sono strutturati, convergono in corrispondenza del primo minimo locale individuato. Per superare questo limite si ricorre alle cosiddette tecniche metaeuristiche, perché guidano tecniche di ricerca locale allo scopo di superare la convergenza verso i minimi locali, cercando di esplorare quanto più possibile il dominio della funzione. Alcune tra le tecniche

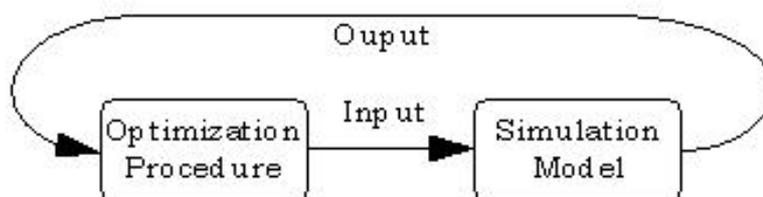
metaeuristiche maggiormente utilizzate sono la "Tabu Search", gli "Algoritmi Genetici" e la "Simulated Annealing". [66]

Nel nostro caso decidiamo di utilizzare un algoritmo della classe dei metaeuristici, i quali, pur richiedendo un maggiore sforzo computazionale, consentono di trovare una soluzione quanto più efficiente possibile.

Tuttavia l'applicazione con successo di questi algoritmi spesso richiede una progettazione orientata al particolare problema, adattando la valutazione delle soluzioni ad ogni caso particolare. Le tecniche metaeuristiche, pur basandosi su principi generali universalmente validi, devono spesso la loro efficienza alla conoscenza delle caratteristiche particolari di ogni situazione, in questo senso non c'è alcuna separazione tra il sistema da analizzare e la procedura ottimizzativa, in qualche modo possiamo vedere la procedura ottimizzativa come un modo di vedere il modello. [67]

Se tuttavia ciò può essere fatto, è meglio separare la soluzione del problema dal sistema da ottimizzare, in questo modo potremmo ottimizzare tutta una classe di sistemi senza sapere molto di quello che si sia la suo interno. Lo svantaggio è ovviamente che la procedura di ottimizzazione è generica e non conosce per niente le caratteristiche del modello.

Optquest è un ottimizzatore generico che separa efficientemente il metodo dal modello. In questo caso il sistema, rappresentato da un modello di simulazione, si trova all'esterno della procedura ottimizzativa. In questo caso saremo liberi di creare un modello del sistema che include tanti elementi quanti sono necessari per modellare il sistema reale e, mentre il modello cambia e si evolve includendo logiche quanto più sofisticate è possibile, la procedura ottimizzativa rimane sempre la stessa. La Figura 4.1 esplica in maniera grafica come funziona un ottimizzatore generico.



**Figura 4.1: funzionamento di un simulatore generico**

La procedura di ottimizzazione usa gli output dal modello di simulazione per valutare gli input da fornire al modello stesso.

#### **4.1.2 Optquest**

Abbiamo già citato in precedenza questo programma parlando di Arena. Optquest è infatti un tool opzionale acquistabile a parte e che permette l'ottimizzazione dei modelli simulativi costruiti con esso.

Decidiamo di utilizzare questo programma in quanto utilizza la metodologia che avevamo individuato, algoritmi metaeuristici, e soprattutto ci libera dal peso di dover effettuare le simulazioni in maniera manuale. Infatti Optquest è totalmente integrato con Arena ed è capace di controllarlo, pianifica quindi un piano degli esperimenti, ricava i risultati e cerca il minimo secondo dei criteri da impostati dall'utente.

Se avessimo deciso di ottimizzare il nostro modello, senza utilizzare Optquest, avremmo dovuto impostare i valori delle variabili per ogni strategia che avremmo considerato direttamente nel modello Arena, far partire la simulazione, analizzarne i risultati e poi introdurre di seguito ulteriori valori delle variabili, far ripartire la soluzione e così via fino ad individuare quella ottima. Inoltre bisognerebbe decidere come cambiare i valori delle variabili tra una simulazione e l'altra, con quale criterio. Tale procedura è tediosa e, se decidiamo di esplorare milioni di diverse alternative, impraticabile. Possiamo dire che Optquest migliora Arena consentendoci di automatizzare in maniera efficiente la ricerca di una strategia ottima.

Quando Optquest viene lanciato controlla il modello di Arena (effettua una procedura che lo stesso Arena effettua ogni volta prima di lanciare una simulazione) e carica dal modello stesso alcune informazioni. In particolare Optquest definisce, a partire dal modello di Arena, dei *Controls* e dei *Responses*.

I *Controls* sono le variabili all'interno del nostro modello, Optquest è capace di cambiarne il valore iniziale. I *Responses* sono invece gli output che noi abbiamo impostato nel modello, sottoforma di record o di statistiche.

In poche parole, per lanciare una simulazione con Optquest, è necessario prima di tutto selezionare un certo numero di controlli indicandone il valore massimo e

minimo raggiungibile, eventualmente se si tratta di valori continui o discreti e, nel secondo caso, il passo tra due valori.

Indicare poi se ci sono dei vincoli tra più controlli, per esempio due che sommati devono essere sempre un determinato valore. Il limite di Optquest in questo caso è quello di non essere capace di lavorare con vincoli non lineari.

Indicare poi di seguito l'obiettivo e se si tratta di un obiettivo da minimizzare, da massimizzare o un cosiddetto goal, cioè bisogna far sì che quell'output raggiunga un determinato valore. È possibile in questa fase anche impostare dei cosiddetti *requirements*, si tratta di output che noi vogliamo impostare all'interno di un determinato intervallo, ad esempio potremmo nel nostro caso richiedere di ottimizzare il costo totale di un servizio richiedendo che il tempo medio di attesa non superi un determinato valore. Nel nostro caso abbiamo deciso di non impostare nessun *requirements* in quanto tutte le opzioni da valutare (guasti, manutenzione, tempi) sono già valutati all'interno della funzione obiettivo e verranno calcolati contestualmente ad essa.

È possibile inoltre impostare determinate opzioni, come il numero di simulazioni da effettuare o il tempo massimo di ottimizzazione. È possibile impostare per esempio impostare anche che l'ottimizzazione si fermi dopo un certo numero di iterazioni non migliorative della funzione obiettivo. Un'opzione molto importante riguarda invece il numero di repliche da fare per ogni iterazione, si può impostare per esempio un valore fisso, oppure uno variabile finché non venga tenuto sotto un certo valore il rapporto tra la semiampiezza dell'intervallo di confidenza. [67]

#### **4.1.3 Tabu search**

Un algoritmo di ricerca locale trova un intorno del punto tramite una mossa e sceglie, in quell'intorno il punto che massimizza o minimizza la funzione obiettivo, se non c'è nessun punto nell'intorno che migliora la funzione obiettivo l'algoritmo si arresta. Con questa metodologia appare chiaro come l'algoritmo si blocchi in corrispondenza di un minimo locale.

Per evitare questa convergenza si può imporre all'algoritmo di scegliere il punto nell'intorno che ha il miglior valore della funzione obiettivo, indipendentemente se ha o no caratteristiche migliori rispetto al punto precedente. Tuttavia in questo modo l'algoritmo andrebbe in loop al primo minimo locale incontrato,

infatti una volta giunto nel minimo ne uscirebbe alla mossa successiva, vista che non effettua il confronto con esso, ma ci ritornerebbe immediatamente all'iterazione successiva in quanto nell'intorno ricomparirebbe il minimo locale.

Per evitare questo inconveniente è necessario avere memoria delle soluzioni visitate in modo da evitare di ripassare per soluzioni già esaminate.

Qualora la valutazione della funzione obiettivo è molto complicata si può introdurre una semplificazione della funzione stessa in modo da abbreviare i tempi di calcolo. La TS non presenta alcun meccanismo di convergenza, di conseguenza è necessario imporre l'interruzione dell'algoritmo attraverso un criterio di arresto. Possibili scelte in tal senso possono essere date da un numero massimo di iterazioni o da un tempo massimo di calcolo.

La memorizzazione della mossa tabu spesso non consiste nella memorizzazione di tutta la soluzione bensì di una sua particolare caratteristica o di un suo attributo. La struttura delle liste Tabù è di solito impostata come una coda limitata gestita da un criterio FIFO.

Il criterio di aspirazione consiste in una particolare valutazione che, se soddisfatta consente di eseguire comunque una mossa tabù, tale criterio consiste solitamente nel fatto che se una mossa tabù consente di trovare un minimo globale della funzione tale mossa può essere effettuata.

L'intensificazione è una strategia che dirige la ricerca nell'intorno di soluzioni buone già individuate nel corso dello sviluppo dell'algoritmo. La diversificazione consiste nello spostare la ricerca verso nuove regioni che non sono state ancora esplorate.

#### **4.1.4 Gli algoritmi genetici**

li algoritmi genetici si basano sull'analogia con i meccanismi di selezione naturale in campo genetico. 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.

Ogni soluzione è un elemento di questa popolazione caratterizzata da alleli (valori) di un determinato gene (variabile). In genere vengono casualmente individuati due genitori a partire dalla popolazione e, a partire da questi vengono generati uno, due o più figli che hanno alleli 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 può essere fatta su base probabilistica o deterministica secondo criteri opportuni per ogni istanza del problema.

Al passare del tempo vengono eliminate le soluzioni caratterizzate da valori peggiori della funzione obiettivo e rimangono solo valori buoni. L'algoritmo presenta caratteristiche di convergenza, pertanto sarà egli stesso ad arrestarsi in un determinato punto. Tuttavia si possono verificare casi di convergenza prematura, per questo si preferisce adottare opportune strategie di diversificazione della popolazione.

Un'ulteriore caratteristica degli algoritmi genetici è quella della mutazione, in cui vengono modificati ex abrupto alcuni valori di alcune variabili per introdurre ulteriore diversità alla popolazione.

#### **4.1.5 Scatter search**

Due delle più conosciute procedure metaeuristiche sono gli algoritmi genetici e la tabu search. Gli algoritmi genetici, spesso indicati con il loro acronimo in inglese "GA", sono stati sviluppati da John Holland all'inizio degli anni 70 all'università del Michigan. Parallelamente allo sviluppo dei GA, Fred Glover stabilì i principi e le regole per la tabu search, anch'essa spesso indicata con l'acronimo inglese "TS", e una metodologia collegata detta "Scatter search".

La Scatter Search, che è stata introdotta approssimativamente nello stesso periodo dei GA, ha molte cose interessanti in comune con essi pur mantenendo un numero consistente di diversità. Alcune di queste differenze sono state poi introdotte mano mano anche nelle procedure degli algoritmi genetici negli anni successivi in quanto considerato davvero molto efficiente, tuttavia ci sono ancora molte caratteristiche della scatter search che non sono state ancora esplorate nel contesto dei GA.

La scatter search opera su un set di punti, chiamati "reference points". L'approccio sistematicamente genera combinazioni lineari dei "reference points" per creare nuovi punti. La TS è dopo sovrimposta per controllare la composizione dei reference points ad ogni passo.

Le similitudini tra la Scatter search e i GA sono evidenti. Entrambi sono basati su una popolazione, entrambi provvedono a ricreare nuove soluzioni a partire da quelle precedentemente nella popolazione esistente.

Tuttavia le differenze sono ancora numerose, ad esempio nei GA i genitori sono scelti casualmente tra la popolazione per produrre la prole e sono stati introdotti numerosi contesti casuali per determinare come si dovessero combinare le caratteristiche dei genitori nei figli. La scatter search, invece, non segue questa impostazione probabilistica, basandosi come nella TS, sulla storia seguita dalla procedura.

## **4.2 PREPARAZIONE ALL'OTTIMIZZAZIONE**

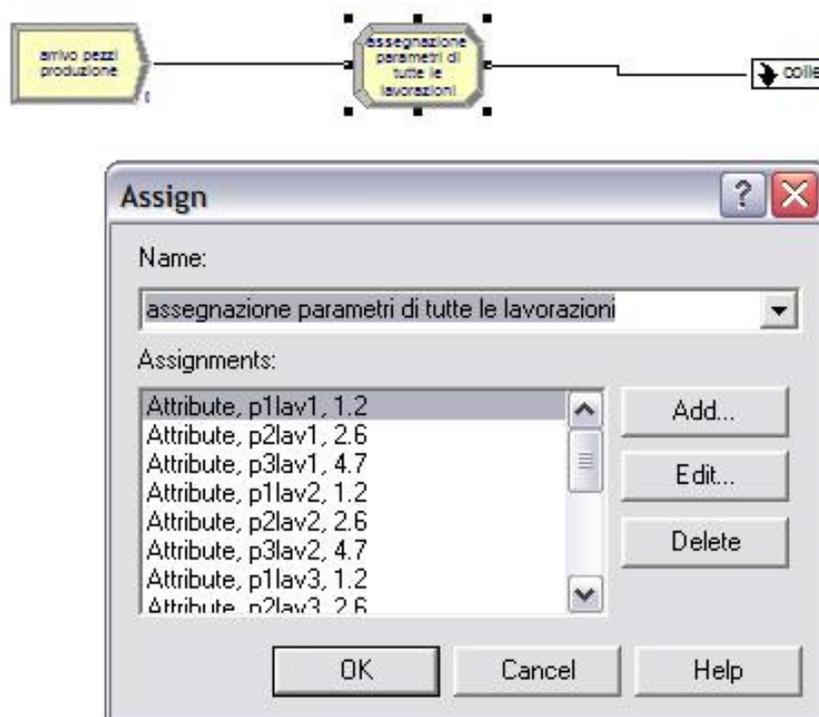
### **4.2.1 Modifiche al modello**

Per effettuare le procedure di ottimizzazione sono state introdotte leggerissime modifiche al modello sia per rendere possibile l'ottimizzazione, che per evitare l'insorgere di possibili problemi.

Prima di tutto è stata eliminata l'interfaccia con Excel che permetteva la costruzione di un diario della simulazione relativo agli eventi della manutenzione, la ragione di ciò è individuabile sia nell'inutilità di tali interfaccia ai fini dell'ottimizzazione, sia perché creava in effetti non pochi rallentamenti alla procedura e, visto che si tratta di fare più ottimizzazioni ognuna con simulazioni nell'ordine di decine di migliaia, qualsiasi decremento poteva essere utile.

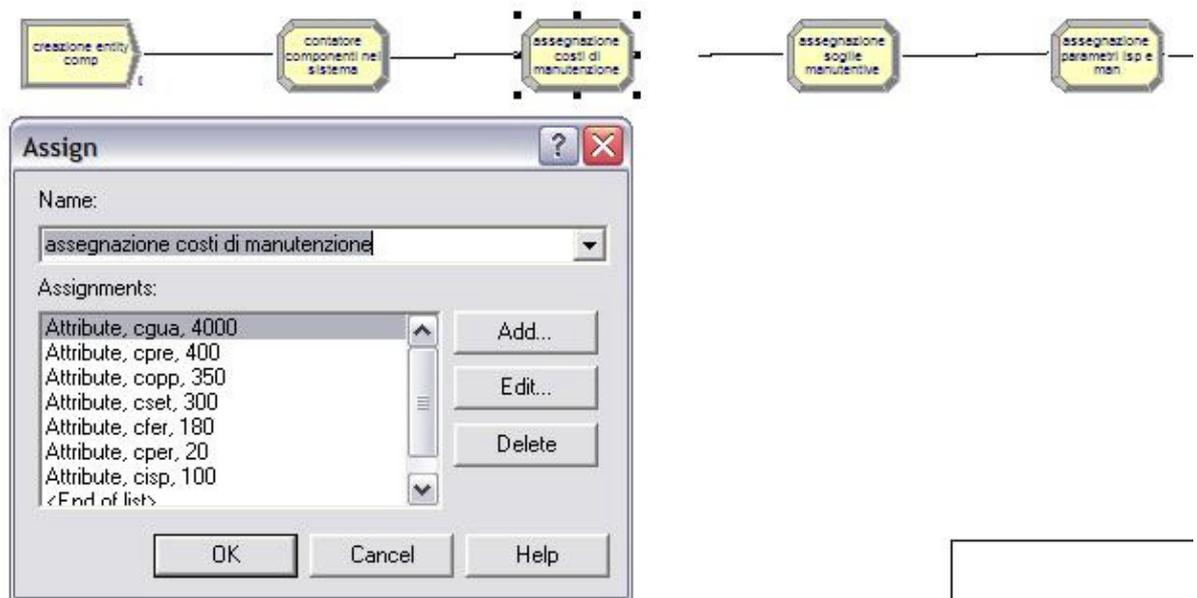
Sono state eliminate tutte le interfacce con database Access questo perché non è possibile ottimizzare valori in quelle tabelle, bensì Optquest è capace solo di modificare i valori di partenza delle variabili della simulazione. Va anche detto che, per alcuni parametri che non necessitavano di ottimizzazione come quelli delle distribuzione dei tempi di manutenzione e ispezione, è stata comunque eliminata l'interfaccia perché questa creava problemi con Optquest generando conflitti con la routine di ottimizzazione facendola spesso bloccare, il messaggio di errore in questi casi era "Out of memory", attraverso il manuale non è stato possibile chiarire la motivazione di tale errore.

Sono stati quindi eliminati i moduli *ReadWrite* e sostituiti da un unico modulo di *Assign* dove venivano assegnati contemporaneamente tutti gli attributi alle entità come mostrato in Figura 4.2.



**Figura 4.2: nuovo modulo per l'assegnazione dei parametri delle lavorazioni**

Un lavoro simile è stato effettuato all'interno del sottomodulo "creazione entità", che è stato disaggregato e sono stati eliminati tutti i moduli *ReadWrite* a favore di semplici moduli di *Assign* dove venivano direttamente assegnati gli attributi in maniera statica senza far riferimento alle tabelle Access. In Figura 4.3 è mostrato tale cambiamento, evidenziando in particolare l'assegnazione dei parametri di costo alle entità tramite attributi all'interno del modulo "assegnazione costi di manutenzione".



**Figura 4.3: modifiche al modello che creava le entità "comp"**

Abbiamo poi deciso di inserire il vincolo che la soglia d'allarme fosse comunque minore della soglia preventiva e che la soglia di manutenzione opportuna sia sempre inferiore a quella preventiva, ma senza essere necessariamente superiore alla soglia d'allarme. Queste decisioni hanno principalmente il senso di evitare di far fare prove inutili ad Optquest o di creare soluzioni senza un senso fisico appropriato.

#### **4.2.2 La configurazione base**

Costruito il modello abbiamo fatto una serie di scelte che lasciassero significatività al lavoro evitando, allo stesso tempo, di complicarne il funzionamento in termini di tempo. Oltretutto preferiamo ottenere risultati che siano di facile lettura e comprensione.

La prima domanda a cui rispondere è: "quante macchine?"

Abbiamo deciso di lavorare su un numero di macchine che rendesse i risultati veritieri. È stato già escluso utilizzare un modello caratterizzato da un numero di macchine basso, ad esempio due, nonostante questa configurazione richieda tempi di simulazione molto minori. Contrariamente con un numero di macchine elevato avremmo solo forzato il lavoro, per cui abbiamo scelto di simulare il comportamento di un impianto costituito da quattro macchine in serie.

Lo scopo puramente scientifico di questo lavoro e la necessità di ridurre i tempi di simulazione giustificano le scelte fatte.

Il nostro modello è caratterizzato da quattro macchine completamente identiche che lavorano la stessa tipologia di pezzi con i medesimi tempi. I tempi e le modalità di intervento della manutenzione sono gli stessi sulle quattro macchine. I tempi sono fissati deterministici con la conseguenza che i costi registrati, somma di un'aliquota fissa e una variabile, sono uguali per ogni tipologia di voce. Una scelta molto ragionata ha riguardato l'intervallo tra due successivi arrivi dei pezzi, all'ingresso del sistema produttivo, questo è stato fissato identico al tempo di lavorazione sulle macchine per evitare improduttività dovuta all'assenza di pezzi da lavorare.

Il buffer creato è stato dimensionato con capacità effettiva nulla, quindi pensato per non disaccoppiare le macchine a monte e a valle di esso. In questo modo eventi di manutenzione o di guasto limitano la capacità produttiva dell'intero sistema.

Per le ipotesi fatte ci aspettiamo che i valori della stessa soglia sulle quattro macchine siano prossimi tra di loro, per cui le macchine sono mantenute allo stesso modo.

Le risorse della manutenzione rappresentano una delle novità introdotte nel modello, nel nostro lavoro non imponiamo nessun vincolo alla 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 che possano influenzare il posizionamento delle soglie.

La disponibilità delle risorse della manutenzione può essere un valido oggetto di lavoro per sviluppi futuri.

Riassumendo, abbiamo costruito un modello che simula il comportamento di un sistema caratterizzato da:

- 4 macchine in serie con uguali tempi di lavorazione, deterministici;
- Una sola categoria di pezzi in lavorazione;
- Stessa probabilità di guasto e incremento dell'usura sulle quattro macchine;
- Assenza di buffer;

- Modalità di ispezione e manutenzione unica con tempi identici e deterministici;
- Capacità illimitata di manutentori ed ispettore;
- Struttura dei costi identica.

### 4.2.3 I parametri

Abbiamo a questo punto specificato il modello sottoposto alle ottimizzazioni, ne abbiamo definito i parametri attribuendogli valori scelti in base alla ragionevolezza e alla veridicità dei dati. L'attenzione non è stata posta nella voce di costo intesa in termini assoluti, per questo non abbiamo cercato, ad esempio, un costo di ispezione che fosse quello sostenuto nella realtà, bensì si è tenuto conto delle relazioni esistenti tra le spese sostenute per i diversi interventi. Quindi abbiamo inserito un costo di ispezione inferiore di quello della manutenzione preventiva e un costo di guasto decisamente superiore, senza verificare che l'ammontare di questi costi, nella realtà, fosse effettivamente 100, 500 o 1000 u.m.. Lo stesso ragionamento è alla base della scelta della durata delle azioni coinvolte nella logica della manutenzione.

Siamo riusciti a costruire un modello caratterizzato da una buona flessibilità, facilmente adattabile a qualsiasi industria voglia implementare un sistema di manutenzione basato su condizione. In questo lavoro è stato saltato il passo relativo alla raccolta dati, in alternativa avremmo dovuto analizzare i dati storici raccolti nell'azienda e compilare opportunamente il modello. Ma il nostro scopo è puramente di carattere scientifico, vogliamo, infatti, indagare sulle relazioni esistenti tra soglie di manutenzione e parametri del modello e questo ci esula dal presentare dati veri, bypassiamo la raccolta dati prestando particolare attenzione nella scelta di valori ritenuti reali, cioè veritieri, che rispettino i vincoli nell'equazione 4.2.

$$C_{isp} < C_{prev} < C_{gua}$$

$$T_{isp} < T_{pre} < T_{gua}$$

**4.2**

L'analisi delle influenze degli input sulle soglie del sistema manutenzione è estremamente semplificata mediante la rappresentazione di grafici output-input, sull'asse delle ascisse inseriamo il parametro in analisi e sull'asse delle ordinate i valori delle soglie ottime. L'utilità del grafico è nell'interpretazione dei dati. In Tabella 4.1 sono mostrati i parametri del modello ritenuti significativi:

**Tabella 4.1: parametri del modello**

DIMENSIONE SISTEMA	PARAMETRI USURA E GUSTO		COSTI		TEMPI DI MANUTENZIONE	TEMPI DEL MODELLO PRODUZIONE
			FISSI	VARIABILI		
n (numero di macchine)	$\alpha$ (Gamma)	$\alpha$ (Weibull)	Cisp	Cper	Tisp	Tlav
	$\beta$ (Gamma)	$\beta$ (weibull)	Cprev	Cfer	Tpre	Tint (intertempi)
			Copp	Cmlib	Topp	
			Cgua	Cbuff	Tgua	
			Csetup			

I parametri di usura e guasto influenzano la velocità con la quale le macchine invecchiano e la frequenza di accadimento dei guasti, usura e guasto sono stati modellati con particolari distribuzioni caratterizzate da un parametro di forma e uno di scala. Come già evidenziato nel paragrafo 2.7.3, sicuramente l'usura determina la frequenza di guasto. Il legame tra le due variabili, cioè un rapido incremento del primo parametro implica rotture più frequenti, ci ha spinti a considerare uno solo tra i due, e in particolare abbiamo ritenuto ragionevole puntare alla costruzione di un grafico che facesse variare la velocità di usura piuttosto che la frequenza dei guasti.

La distinzione più semplice da fare per i costi è quella di dividerli in costi variabili e costi fissi. La novità del lavoro è l'introduzione dei costi di macchina libera, per i quali è indubbio valutare la loro influenza sul posizionamento delle soglie.

I costi del personale sono l'altra voce di costo variabile, sono espressi in u.m. (unità monetaria) per ora di lavoro di un addetto. Le scelte fatte sul modello sottoposto alle ottimizzazioni riguardo i tempi deterministici delle azioni e la capacità illimitata delle risorse della manutenzione, rendono il costo del personale, per ogni tipologia di intervento, una quantità fissata e nota che si

somma alla parte fissa del costo totale di intervento. In questo modo si perde la natura di costo variabile per cui non vale la pena analizzarne l'influenza sulle decisioni della manutenzione. Relativamente a tutte le altre voci, esclusi i costi di set up, si ricercheranno i valori ottimi delle soglie che permettono la costruzione delle curve.

Lo studio dell'influenza dei costi sulle soglie è stato effettuato utilizzando un parametro adimensionale, in questo modo è possibile confrontare l'ammontare di un determinato costo con uno di riferimento scelto da noi.

Abbiamo scelto il costo della manutenzione preventiva come riferimento per pesare le altre voci di costo. L'analisi parametrica, in cui gli input delle ottimizzazioni sono i costi, si è basata sulla variazione del parametro adimensionale, costruito di volta in volta come rapporto tra il costo di cui analizziamo l'influenza e il costo della manutenzione preventiva. La scelta del parametro adimensionale è giustificata dalla bassa significatività di una cifra in termini assoluti, non è intuitivo capire quanto questa è più o meno grande rispetto ai costi del sistema, il parametro adimensionale è un modo per capire quanto, ad esempio, l'ispezione costi: attribuire all'ispezione un costo di 100 u.m. o 500 u.m. non ci aiuta nel considerare se effettivamente è una spesa eccessiva o meno, al contrario un'ispezione che costa quanto una manutenzione preventiva è certamente abbastanza onerosa.

**Tabella 4.2: costruzione del parametro adimensionale**

$\rho_{isp}$	$\rho_{gua}$	$\rho_{cmlib}$
$c_{isp}/c_{pre}$	$c_{gua}/c_{pre}$	$c_{gua}/c_{pre}$
con $c_{pre}=500$		

Trascuriamo la variazione dei tempi di lavorazione di manutenzione e la motivazione è la stessa data per i costi del personale.

Dati i numerosi sforzi fatti per costruire un modello che funzionasse per  $n$  macchine in serie è giusto ritenere anche questo un parametro identificativo del modello. I tempi di simulazione hanno forzato la costruzione di un modello a

quattro macchine, certamente il lavoro non ha perso di significatività, ma è interessante capire come le soglie si comportano variando questo parametro.

Anche l'analisi dei costi di buffer ci ha obbligati a cambiare la configurazione di partenza del modello: il numero di macchine in serie è ridotto a due e al buffer, prima assente, è stata attribuita una dimensione "k", che rientra nel gruppo di variabili da ottimizzare.

In generale, è stata scelta una ottimizzazione di riferimento, che abbiamo definito "base", da questa ottimizzazioni faremo variare il parametro in analisi. Per le analisi dell'influenza dei costi, al denominatore sarà posizionato il costo della manutenzione preventiva fissato nell'ottimizzazione base. Mostriamo in Tabella 4.3 una sintesi dei parametri del modello esplicitando i valori scelti per l'ottimizzazione di riferimento.

**Tabella 4.3: configurazione dell'"ottimizzazione base"**

DESCRIZIONE PARAMETRO	SI-MOBOLO	TIPO	VALORE BASE
Numero di macchine	n		4
Usura		Gamma( $\alpha,\beta$ )	(1,3,3)
Guasto		Weibull( $\alpha,\beta$ )	(3,6000)
Costo di ispezione	cisp	costo fisso	100 u.m.
Costo di preventiva	cpre	costo fisso	500 u.m.
Costo di opportuna	copp	costo fisso	500 u.m.
Costo di guasto	ogua	costo fisso	1500 u.m.
Costo del personale	cper	costo variabile	0 u.m.
Costo di set up	csetup	costo fisso	250 u.m.
Costo di fermo	cfer	costo variabile	100 u.m.
Costo di macchina libera	cm-lib	costo variabile	100 u.m.
Parametro adimensionale	$\rho$	variabile adimensionale	
Tempo di preventiva	tman	deterministico	5 h
Tempo di opportuna	tman	deterministico	5 h
Tempo di guasto	tman	deterministico	12 h
Intertempi arrivo pezzi		deterministico	5 min
Tempo di lavorazione	tlav	deterministico	5 min
Costo di buffer	cbuff	costo variabile	assente

Con l'ausilio di Excel è stato semplice costruire tabelle riassuntive dei valori assunti dalle soglie e grafici sintetici ed esplicativi del comportamento di queste. In ogni grafico evidenziamo con uno stesso colore la stessa soglia per tutte le macchine per facilitare la lettura e l'interpretazione. L'attenzione è stata focalizzata nel capire e spiegare il motivo di particolari comportamenti delle soglie e le interazioni tra queste.

Al termine della fase di ottimizzazione per ogni singolo parametro, si riprenderà la simulazione del modello. A conferma delle motivazioni date per i comportamenti assunti dalle soglie lanciamo alcune simulazioni con valori delle soglie ottime restituiti da Optquest.

Per le caratteristiche attribuite alle macchine, appare ragionevole attribuire alle soglie non i precisi valori ottenuti dalle ottimizzazioni bensì un unico valore per soglia, valido per l'intero sistema. In questo modo, avendo quattro macchine identiche, l'ispettore della manutenzione conoscerà un solo valore che utilizzerà per tutte le macchine. Dei quattro valori ottimi per soglia, calcoliamo il valore medio e lanciamo per alcune configurazioni delle simulazioni al termine delle quali Arena sintetizza delle statistiche che mostrano il comportamento del sistema, in particolare saremo interessati a conoscere il numero di guasti, di manutenzioni e ispezioni, ma anche costi totali e indotti o % di macchina occupata utili per confermare quanto detto dalle analisi dei grafici.

#### **4.2.4 Tempi di ottimizzazione**

È interessante mostrare in che misura le caratteristiche del modello influenzano i tempi delle simulazioni. Per ogni singola simulazione va specificato il numero di giorni da simulare ed è banale immaginare che al crescere dell'orizzonte di simulazione aumenta la durata della singola simulazione. Simuliamo un anno lavorativo della durata di 220 giorni con giornata di 24 ore.

Ogni ottimizzazione è caratterizzata da un numero di simulazioni da lanciare, tra le quali Optquest cerca il valore ottimo, rispettando i vincoli, e da un numero di replicazioni per ogni simulazione.

La complessità del modello si traduce in un maggior numero di variabili da controllare da parte di Optquest, il manuale consiglia dei valori indicativi del numero di simulazioni da lanciare in base alla numerosità delle variabili di controllo.

**Tabella 4.4: simulazioni consigliate funzione dei controlli**

Controls	Minimum Number of Simulations
Fewer than 10	100
Between 10 and 20	500
Between 20 and 50	2000
Between 50 and 100	5000

Con una sola macchina il modello è caratterizzato da due sole variabili, quindi il numero di simulazioni da lanciare, fedeli al manuale, è pari a 100. La durata dell'ottimizzazione è stata inferiore ad 1 h, accelerata anche dalla ridotta dimensione del sistema. Con due macchine le variabili di controllo diventano 6, il numero di simulazioni consigliato rimane 100 e la durata di ogni singola ottimizzazione è circa di 2 h, anche nel caso di buffer interoperazionale. Al crescere della dimensione della serie aumentano le variabili da ottimizzare, fino ad un massimo di 24 variabili con otto macchine in serie, per la quale il manuale consiglia 2000 ottimizzazioni. La maggior parte delle ottimizzazioni lanciate è caratterizzata da un modello con 4 macchine, quindi 12 variabili da controllare e 500 simulazioni, che comportano una durata di almeno 14 h. Va precisato che questi tempi variano a seconda delle caratteristiche del computer.

Il focus sui tempi di simulazione chiarisce quanto questi abbiano influenzato le nostre scelte e l'impegno necessario per ottenere i risultati.

### **4.3 ANALISI PARAMETRICA**

L'analisi parametrica inizia con i costi di ispezione, investighiamo sulle conseguenze del diverso peso di una ispezione sui parametri ottimali della politica manutentiva. L'ispezione avviene ad intervalli fissati e questo intervallo si riduce al superamento della soglia d'allarme, è effettuata a livello di sistema e al raggiungimento dell'istante di ispezione per una macchina vengono controllate tutte contemporaneamente.

### 4.3.1 Influenza del costo di ispezione

In letteratura sono proposti diversi lavori che analizzano l'influenza dei costi di ispezione sulla migliore politica manutentiva. Grall, Berenguer e Dieulle in [19] analizzano con estrema chiarezza come le soglie della manutenzione si posizionano, per diversi valori dei costi di ispezione. Il modello è caratterizzato da una sola macchina, quindi è assente una soglia di manutenzione opportuna, ma è interessante prendere questo studio come punto di riferimento per individuare quali input fornire per l'analisi dei costi di ispezione. Per chiarezza riportiamo il grafico costruito nel loro lavoro.

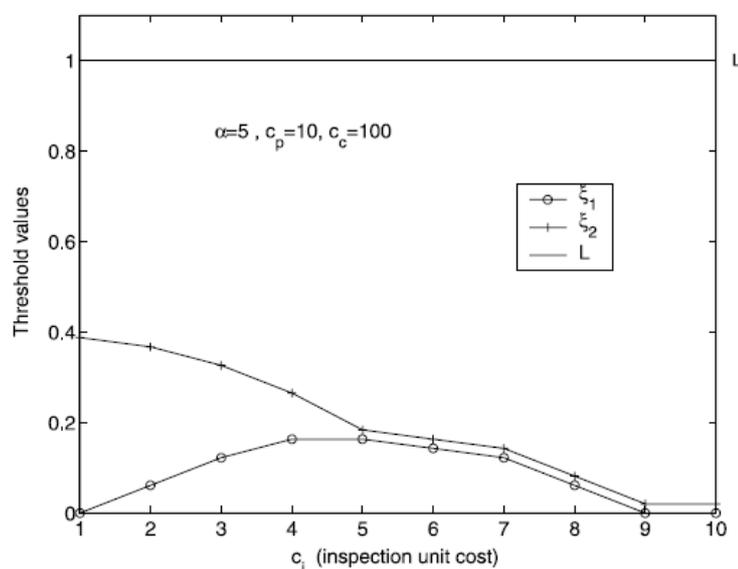


Figura 4.4: effetto della variazione del costo unitario di ispezione in [19]

Nel loro lavoro la struttura dei costi è caratterizzata da costi di ispezione, di manutenzione preventiva e correttiva, le soglie di manutenzione sono  $\xi_1$  e  $\xi_2$  ad ispezione e preventiva.

Il commento al grafico evidenzia come con costi di ispezione alti la distanza tra le soglie sia nulla. Con  $c_i \approx c_p$ , una significativa differenza tra costi unitari di manutenzione preventiva e correttiva induce questa evoluzione.[19]

La differenza tra questo lavoro e il loro è sostanziale, nel nostro caso proponiamo lo studio di un sistema composto da più macchine il loro modello è caratterizzato da una sola macchina, ma ricerchiamo nel nostro lavoro costi di ispezione tale che la soglia di manutenzione preventiva coincida con quella d'allarme.

La prima ottimizzazione lanciata è la "base", per la quale il costo di ispezione è pari ad 1/5 del costo di manutenzione. L'idea che un'ispezione senza costo si traduce nel monitoraggio continuo delle macchine ci ha indirizzati ad una'analisi per costi crescenti di ispezione.

L'analisi mediante esperimenti numerici proposta da Grall, Berenguer e Dieulle termina con  $c_i=c_p$ , punto in cui emerge la convenienza della manutenzione preventiva rispetto la correttiva, nel nostro modello noi ci siamo spinti ben oltre questa condizione. Ricercheremo, invece, la convenienza della manutenzione preventiva rispetto alla correttiva analizzando l'influenza del costo di guasto. Sono bastate sei ottimizzazioni per riuscire a definire l'andamento delle curve.

**Tabella 4.5: valori di  $p_{isp}$  fissati come input delle ottimizzazioni**

DESCRIZIONE PARAMETRO	SIMBOLO	TIPO	VALOREBASE	NUOVO VALORE(1)	NUOVO VALORE(2)	NUOVO VALORE(3)	NUOVO VALORE(4)	NUOVO VALORE(5)
Numero di macchine	n		4					
Usura		Gamma( $\alpha,\beta$ )	(1,3,3)					
Guasto		Weibull( $\alpha,\beta$ )	(3,6000)					
Costo di ispezione	cisp	costo fisso	100 u.m.	200	300	500	1000	2000
Parametro adimensionale	$p_{isp}$	variabile adimensionale	0,2	0,4	0,6	1	2	4
Costo di preventiva	cpre	costo fisso	500 u.m.					
Costo di opportuna	copp	costo fisso	500 u.m.					
Costo di guasto	cgua	costo fisso	1500 u.m.					
Costo del personale	cper	costo variabile	0 u.m.					
Costo di set up	csetup	costo fisso	250 u.m.					
Costo di fermo	cfer	costo variabile	100 u.m.					
Costo di macchina libera	omlib	costo variabile	100 u.m.					
Tempo di preventiva	tman	deterministico	5 h					
Tempo di opportuna	tman	deterministico	5 h					
Tempo di guasto	tman	deterministico	12 h					
Intertempi arrivo pezzi		deterministico	5 min					
Tempo di lavorazione	tlav	deterministico	5 min					
Costo di buffer	cbuff	costo variabile	assente					

Non indaghiamo per costi di ispezioni superiori a 2000 u.m., al quale corrisponde  $p_{isp}=4$ , cioè quattro volte il costo della manutenzione preventiva, perché è

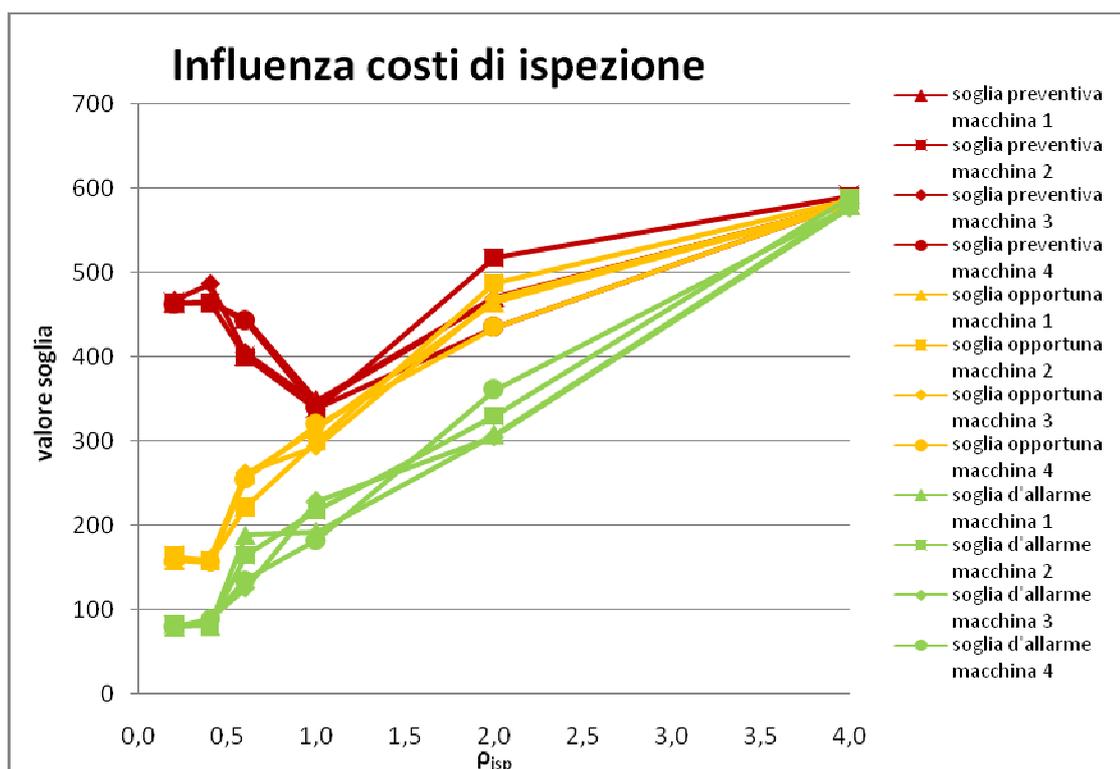
evidente quanto, in questa configurazione, sia stato superato il limite della convenienza del monitoraggio.

Analizziamo i risultati ottenuti dalle ottimizzazioni. In Tabella 4.6 riportiamo i valori delle soglie e il costo totale ottenuti al variare dei costi di ispezione.

**Tabella 4.6: risultati delle ottimizzazioni al variare di  $\rho_{isp}$**

$\rho_{isp}$	cisp	sc1,1	sc2,1	sc3,1	sc4,1	sc1,2	sc2,2	sc3,2	sc4,2	sc1,3	sc2,3	sc3,3	sc4,3	Costo totale
0,2	100	464	464	468	463	159	164	159	159	80	83	80	79	270108
0,4	200	465	465	487	465	161	158	159	156	81	81	89	88	303335
0,6	300	445	400	405	443	261	222	263	256	189	165	126	136	335830
1,0	500	349	338	345	340	315	300	294	320	193	218	229	183	388091
2,0	1000	471	518	469	435	465	488	469	435	308	330	306	361	464326
4,0	2000	580	591	582	584	580	587	582	584	580	589	577	579	565879

Sempre con Excel abbiamo costruito il grafico di sintesi, proposto in Figura 4.5.



**Figura 4.5: andamento delle soglie al variare di  $\rho_{isp}$**

Il grafico presentato in figura riporta sull'asse delle ordinate il valore delle soglie e sull'asse delle ascisse il parametro  $\rho_{isp}$ . Le prime aspettative sui risultati riguardano il posizionamento della stessa soglia per le quattro macchine, il

grafico conferma che i valori della stessa soglie sulle quattro macchine sono prossimi tra di loro.

L'analisi visiva del grafico consente di distinguere due diversi comportamenti delle curve: nel primo tratto la differenza tra la soglia di preventiva e le soglie di opportuna e di allarme è molto marcata, nel secondo tratto le soglie si avvicinano fino a coincidere nel punto limite, dove i costi di ispezione sono molto maggiori dei costi di manutenzione preventiva.

Capiamo quali sono le relazioni tra le variabili soglia definite dal costo di ispezione. Il costo di ispezione determina in maniera diretta il posizionamento della soglia d'allarme, il grafico mostra che al crescere di  $\rho_{isp}$  il minimo costo totale è ottenuto con valori crescenti della soglia. Fissato il valore di  $c_{isp}$ , i costi totali di ispezione sono tanto maggiori quanto più frequenti sono le ispezioni, d'altra parte, però, un controllo assiduo delle macchine consente un posizionamento corretto della soglia di manutenzione preventive. La costruzione del modello impone che se l'usura supera la soglia d'allarme le macchine vengono ispezionate con cadenza giornaliera fino all'intervento manutentivo, un valore basso di tale soglia permette di controllare meglio gli incrementi di usura. Se il valore della soglia d'allarme è alto le ispezioni sono meno frequenti, la manutenzione ha scarse informazioni e per riuscire ad evitare che si verifichi un guasto abbassa la soglia di preventiva. Puntualizziamo che questo discorso ha senso perchè l'obiettivo è la minimizzazione dei costi totali.

È già emerso che l'influenza diretta del costo di ispezione sulla soglia di allarme si trasmetta indirettamente alla soglia di preventiva.

Il grafico mostra che al crescere del peso dell'ispezione, in termini di costo, Optquest consiglia, nella ricerca del minimo, ispezioni delle macchine meno frequenti e di conseguenza la soglia di manutenzione preventiva si abbassa. Queste interazioni sono ritenute valide fin quando è conveniente il monitoraggio dei macchinari e anche questo aspetto è evidente nel grafico in Figura 4.5.

Trascuriamo in un primo momento l'andamento della soglia di manutenzione opportuna, andando ad analizzare e commentare nel dettaglio le altre soglie. Il valore della soglia d'allarme al crescere del parametro  $\rho_{isp}$  si sposta verso l'alto ed già è stato analizzata l'influenza del costo di ispezione sulla soglia d'allarme. Queste conclusioni sono certamente frutto di considerazioni personali, ma

troviamo nei risultati ottenuti dalle ottimizzazioni una conferma di quanto affermato.

La curva della soglia preventiva non ha un andamento monotono come quello della soglia d'allarme: decrescente nel primo tratto, incontra un minimo quando l'ispezione costa quanto una manutenzione preventiva e continua con andamento crescente. In termini di azioni pratiche, quando  $\rho_{isp} < 1$ , al crescere dei costi di ispezione Optquest consiglia di fare maggiore manutenzione preventiva per evitare il guasto. Oltre  $\rho_{isp} = 1$  al crescere dei costi in analisi la soglia di manutenzione preventiva si posiziona sempre più in alto, determinando azioni manutentive meno frequenti. La diminuzione delle azioni manutentive è giustificata dal minore peso del guasto.

Spieghiamo il motivo di questo comportamento facendo un semplice esempio: con  $\rho_{isp} = 4$ , una fermata per guasto determina un costo totale pari alla somma dell'intervento correttivo, 1500 u.m., sommato al costo di mancata produzione, che comprende il costo di fermo per una macchina e il costo di macchina libera per le altre 3, per un totale di  $(1500 + 4800)$  u.m.; la fermata per manutenzione preventiva è preceduta da un'ispezione su tutte le macchine del sistema, quindi al costo dell'intervento, 500 u.m., e della mancata produzione,  $4 \cdot 500$  u.m., sommo il costo delle ispezioni,  $4 \cdot 2000$  u.m.. È evidente la convenienza di un guasto rispetto alle azioni che ne evitano l'accadimento.

La soglia di opportuna ha un andamento crescente, ma non è di grande interesse valutarne il posizionamento senza alcun confronto con la soglia di manutenzione preventiva. Nel paragrafo 4.5 abbiamo fissato un costo di ispezione "sostenibile" minore del costo di manutenzione preventiva attraverso il vincolo

$$C_{isp} < C_{prev}$$

Dal grafico notiamo che per  $\rho_{isp} < 1$  Optquest restituisce politiche manutentive che possiamo definire "tipo", cioè una politica di manutenzione caratterizzata da soglie di ispezione, manutenzione preventiva e opportuna distinte che determinano le diverse tipologie di intervento senza comportamenti particolari. Valori crescenti di  $\rho_{isp}$  determinano una soglia di opportuna che si sposta verso l'alto, questo comportamento va relazionato alla soglia di preventiva, infatti in questo primo tratto al crescere dei costi di ispezione aumenta il numero degli interventi preventivi di conseguenza diminuisce la possibilità di fare

manutenzione opportuna. Al contrario, costi di ispezione elevati,  $\rho_{isp} > 1$ , rendono gli effetti del guasto meno dannosi per cui la ricerca del minor costo totale di manutenzione impone un minor numero di interventi che evitino rotture accidentali, questa politica si traduce in un innalzamento di tutte e tre le soglie e quindi anche di quella opportuna. Con costi di ispezione molto superiori al costo di manutenzione preventiva la funzione manutenzione interverrà, con la sostituzione del componente, solo dopo il verificarsi del guasto perché l'ispezione ha reso troppo costoso l'intervento di manutenzione preventiva.

L'ottimizzazione lanciata con  $\rho_{isp}=4$  restituisce valori che confermano ciò che abbiamo appena scritto, il valore della soglia preventiva è alto e il sistema non interviene per prevenire i guasti.

È utile lanciare delle simulazioni impostando alcuni dei valori assegnati dai parametri per ricercare nei risultati una conferma di ciò che mostrano le curve.

Abbiamo lanciato tre simulazioni: la base, il punto di minimo e un valore elevato di costo. I valori assegnati alle soglie sono identici sulle quattro macchine calcolati come media di quelli ottenuti dalle ottimizzazioni per i rispettivi valori di " $C_{isp}$ ".

**Tabella 4.7: valori ottimi delle soglie utilizzati per le simulazioni al variare di  $\rho_{isp}$**

<b>CSP</b>	<b>100</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>
soglia di preventiva	465	343	473
soglia di opportuna	160	307	464
soglia d'allarme	80	206	326

La simulazione lanciata con i risultati dell'ottimizzazione base determina un comportamento del sistema produttivo caratterizzato da 15 guasti, 104 interventi circa di manutenzione preventiva e 50 interventi di manutenzione opportuna, su tutto l'impianto un numero di fermi totali per manutenzione pari a 42, determinando una percentuale di macchina occupata (in lavorazione) pari al 94% del tempo totale.

I risultati ottenuti dai "Report" forniti da Arena mostrano che il numero di guasti totali è salito da 15 a circa 24, questo comportamento conferma quanto detto a riguardo dell'aumento delle soglie della manutenzione e la conseguenza di non

prevenire guasti. La dipendenza diretta dei costi di ispezione sulla soglia di allarme implica l'aumento del valore della soglia di allarme, il sistema manutenzione con le particolari configurazioni simulate effettua un numero di ispezioni sempre minore passando da 322 ispezioni con  $c_{isp}=100$  ad appena 150 ispezioni con  $c_{isp}=1000$ . Anche gli interventi per manutenzione opportuna si riducono, con  $c_{isp}=1000$ , la manutenzione interviene 20 volte, sul totale delle macchine, in maniera opportuna.

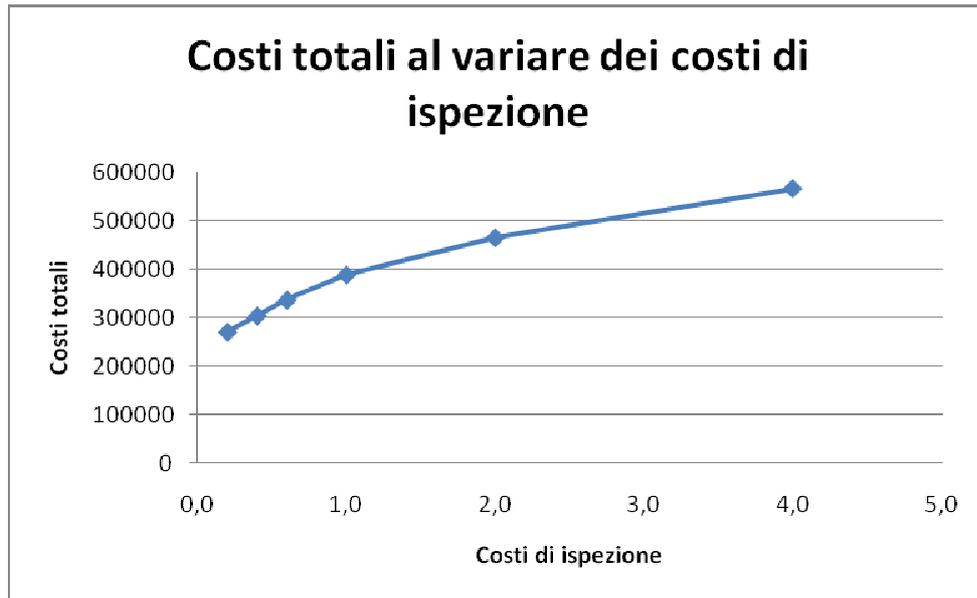
**Tabella 4.8: risultati ottenuti al variare di  $c_{isp}$**

<b>CSP</b>	<b>100</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>
<b>numero di guasti</b>	15	6,3	24,3
<b>numero di interventi preventivi</b>	104	182	103
<b>numero di interventi opportuni</b>	50	42	20,6
<b>numero di ispezioni</b>	322	234	151
<b>% macchina occupata</b>	94	92,8	89,7
<b>COSTI TOTALI</b>	265505	393125	490536

In una realtà aziendale dove si voglia implementare un sistema di manutenzione basato su condizione è importante poter monitorare la degradazione degli impianti e quindi conoscerne lo stato. I costi da sostenere per monitorare le macchine sono direttamente proporzionali alla facilità con cui queste informazioni sono ottenute. All'aumentare della complessità nell'ottenere informazioni gli strumenti di ispezioni diventano più sofisticati e costosi, per cui possiamo ritenere il costo di ispezione un parametro direttamente legato alla semplicità degli strumenti e alla facilità del loro utilizzo da parte del personale.

Sui costi totali, riportati in **Figura 4.6**, i risultati ottenuti confermano ciò che spontaneamente viene da pensare, aumentano all'aumentare del costo di ispezione.

Tale incremento dipende oltre che dal costo di ispezione anche da politiche differenti sulla manutenzione, rinunciando alle ispezioni si ha di conseguenza un aumento del numero dei guasti, quindi maggiori tempi di fermo macchina e costi indotti.



**Figura 4.6: andamento del minimo costo totale al variare di  $\rho_{isp}$**

### 4.3.2 Influenza del costo di guasto

Abbiamo già detto che ha senso implementare una politica di manutenzione basata su condizione se il guasto è un evento da evitare, non dobbiamo dimenticare che un imprevisto fermo di manutenzione ha un duplice costo:

- Il costo di manodopera e ricambi della manutenzione stessa (spesso particolarmente elevato perché la manutenzione a seguito di un guasto dovrà riparare non solo l'origine del guasto, ma anche le sue conseguenze)
- Il fermo macchina che blocca la produzione e costituisce un costo non produttivo per le risorse che dipendono dal funzionamento della macchina stessa (operai addetti alla macchina, risorse in cascata successiva alla macchina stessa, revisione della pianificazione della produzione).

In questo paragrafo focalizziamo l'attenzione sulla prima tipologia di costo, direttamente legata al guasto, da noi identificata con  $C_{gua}$ , e affrontiamo separatamente la trattazione dell'incidenza dei costi di macchina libera.

Un valore elevato della soglia preventiva determina una scarsa attività di prevenzione del guasto, la decisione della manutenzione di effettuare questo tipo di politica si traduce in soglie d'allarme e di opportuna anch'esse alte, che in termini di azioni si traducono in frequenza delle ispezioni e poca manutenzione preventiva. Questo è il caso in cui il guasto non arreca danni consistenti.

Per evitare che avvenga un guasto, invece, dovremo posizionare le soglie su valori decisamente inferiori, in particolar modo la soglia di preventiva.

Il costo di guasto può rappresentare l'effettiva spesa sostenuta per la riparazione o la sostituzione del componente ma anche il costo da sostenere per affidare a terzi la riparazione.

Prima di individuare i valori di  $\rho_{\text{gua}}$  input delle ottimizzazioni ci chiediamo quale può essere l'andamento, che ci aspettiamo, del valore delle soglie al variare di  $c_{\text{gua}}$ . Il nostro riferimento e punto di partenza per l'analisi è l'ottimizzazione definita "base".

Con costi di guasto bassi la rottura diventerebbe certamente meno dannoso, dal punto di vista economico, in questo modo la posizione ottima per le soglie di manutenzione preventiva coinciderebbe con valori piuttosto alti. Sfruttare il fermo impianto per intervenire anche sulle macchine che non necessitano ancora di manutenzione preventiva diventerebbe meno conveniente così come effettuare un monitoraggio attento per cui riteniamo che le soglie di opportuna e di allarme dovrebbero portarsi su valori anch'essi alti. Ricercare il punto, inteso come valore di costo, che rende il guasto economicamente sostenibile è estremamente interessante, al di sotto di questo valore diventa inconveniente basare l'attività manutentiva su una politica preventiva. Sicuramente all'aumentare dei costi di guasto diventa sempre più conveniente fare manutenzione preventiva, coerentemente ci aspettiamo un abbassamento dei valori ottimi delle soglie.

Abbiamo fatto quest'analisi per capire quali valori di  $\rho_{\text{gua}}$  fissare.

**Tabella 4.9: valori di  $p_{gua}$  fissati come input delle ottimizzazioni con  $c_{mlib}=100$**

DESCRIZIONE PARAMETRO	SIMBOLO	TIPO	VALORE BASE	NUOVO VALORE(1)	NUOVO VALORE(2)	NUOVO VALORE(3)	NUOVO VALORE(4)
Numero di macchine	n		4				
Usura		Gamma( $\alpha,\beta$ )	(1,3,3)				
Guasto		Weibull( $\alpha,\beta$ )	(3,6000)				
Costo di ispezione	cisp	costo fisso	100 u.m.				
Costo di preventiva	cpre	costo fisso	500 u.m.				
Costo di opportuna	copp	costo fisso	500 u.m.				
<b>Costo di guasto</b>	<b>ogua</b>	<b>costo fisso</b>	<b>1500 u.m.</b>	<b>100</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>
Parametro adimensionale	$p_{gua}$	variabile adimensionale	3	0,2	1	2	4
Costo del personale	cper	costo variabile	0 u.m.				
Costo di set up	csetup	costo fisso	250 u.m.				
Costo di fermo	cfer	costo variabile	100 u.m.				
Costo di macchina libera	cmlib	costo variabile	100 u.m.				
Tempo di ispezione	tisp	deterministico	1 h				
Tempo di preventiva	tman	deterministico	5 h				
Tempo di opportuna	tman	deterministico	5 h				
Tempo di guasto	tman	deterministico	12 h				
Intertempi arrivo pezzi		deterministico	5 min				
Tempo di lavorazione	tlav	deterministico	5 min				
Costo di buffer	cbuff	costo variabile	buffer assente				

Analizziamo l'andamento per costi di guasto crescenti, esplorando a destra e a sinistra della "base", e ci pare doveroso dover indagare per valori molto inferiori all'unità, anche scendendo al di sotto del costo di manutenzione preventiva, per capire dove non si renda più necessario attuare una politica CBM.

I risultati ottenuti, che analizzeremo nel paragrafo successivo, non hanno mostrato con chiarezza l'incidenza dei costi di guasto sul posizionamento delle soglie.

Per rendere significativa l'analisi sui costi di guasto abbiamo abbassato l'incidenza dei costi di macchina libera, si è reso necessario scegliere una struttura dei costi che rendesse le soglie meno sensibili alla mancata produzione permettendo di chiarire il comportamento del sistema alla variazione del costo di guasto. Decidiamo di provare le stesse ottimizzazioni, ma con costi di macchina

libera pari a 10, questa volta però escludiamo la situazione inverosimile in cui si presenta un guasto meno dannoso dell'azione preventiva

**Tabella 4.10: valori di  $\rho_{gua}$  fissati come input delle ottimizzazioni con  $c_{mlib}=10$**

DESCRIZIONE PARAMETRO	SIMBOLO	TIPO	VALORE BASE	NUOVO VALORE(1)	NUOVO VALORE(2)	NUOVO VALORE(3)	NUOVO VALORE(4)
Numero di macchine	n		4				
Usura		Gamma( $\alpha,\beta$ )	(1.3,3)				
Guasto		Weibull( $\alpha,\beta$ )	(3,6000)				
Costo di ispezione	cisp	costo fisso	100 u.m.				
Costo di preventiva	cpre	costo fisso	500 u.m.				
Costo di opportuna	copp	costo fisso	500 u.m.				
<b>Costo di guasto</b>	<b>cgua</b>	<b>costo fisso</b>	<b>1500 u.m.</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>2000</b>
Parametro adimensionale	$\rho_{gua}$	variabile adimensionale	3	1	2	4	4
Costo del personale	cper	costo variabile	0 u.m.				
Costo di set up	csetup	costo fisso	250 u.m.				
Costo di fermo	cfer	costo variabile	10 u.m.				
Costo di macchina libera	cmlib	costo variabile	10 u.m.				
Tempo di ispezione	tisp	deterministico	1 h				
Tempo di preventiva	tman	deterministico	5 h				
Tempo di opportuna	tman	deterministico	5 h				
Tempo di guasto	tman	deterministico	12 h				
Intertempi arrivo pezzi		deterministico	5 min				
Tempo di lavorazione	tlav	deterministico	5 min				
Costo di buffer	cbuff	costo variabile	buffer assente				

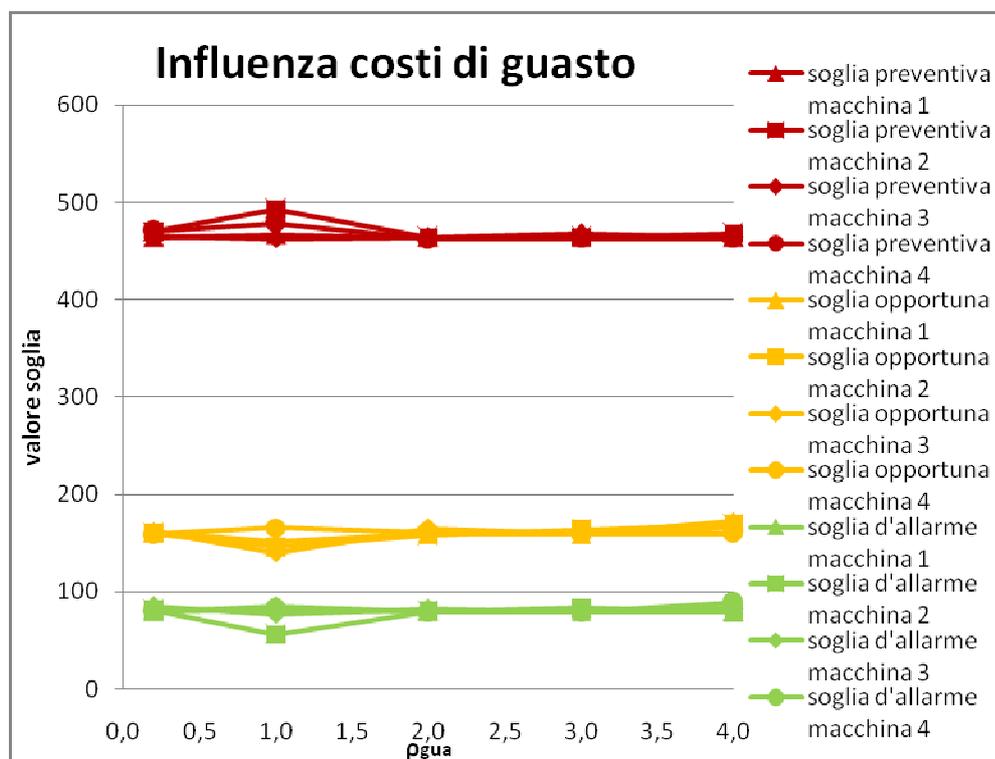
Abbiamo quindi effettuato le ottimizzazioni necessarie e abbiamo trovato i seguenti valori ottimi, specificati per ogni soglia, espressi nella Tabella 4.11.

Per ogni riga abbiamo la voce di costo di guasto, il peso in relazione col costo di manutenzione preventiva, gli ottimi e il minimo costo totale raggiunto dall'ottimizzazione.

**Tabella 4.11: risultati delle ottimizzazioni al variare di  $\rho_{gua}$  con  $c_{mlib}=100$**

$\rho_{gua}$	cgua	sc1,1	sc2,1	sc3,1	sc4,1	sc1,2	sc2,2	sc3,2	sc4,2	sc1,3	sc2,3	sc3,3	sc4,3	Costo totale
0,2	100	464	470	465	471	161	160	162	159	80	81	85	80	247358
1,0	500	467	493	463	479	151	146	140	166	85	56	77	82	253915
2,0	1000	464	464	464	462	160	158	165	161	80	80	82	79	261983
3,0	1500	464	464	468	463	159	164	159	159	80	83	80	79	270108
4,0	2000	464	468	464	463	172	169	166	160	79	80	83	89	278233

Riportando questi valori in un grafico otteniamo le curve mostrate in Figura 4.7.



**Figura 4.7: andamento delle soglie al variare di  $\rho_{gua}$  con  $c_{mlib}=100$**

Sull'asse delle ordinate sono riportati i valori delle soglie e sulle ascisse il valore di  $\rho_{gua}$ . Abbiamo lanciato quattro ottimizzazioni oltre la "base". Come risultato delle ottimizzazioni, così come ci appare dal grafico, abbiamo ottenuto una serie di curve tutte costanti, posizionate ad una certa distanza tra di loro, distinguendo con il rosso le soglie di preventiva, con il giallo quelle di opportuna e col verde le soglie d'allarme. Spostandoci da un minimo con  $\rho_{gua}=0,2$  ad un massimo di 4, non si sono registrati significativi cambiamenti nei risultati, le soglie sono risultate posizionate tutte sugli stessi valori ottenuti dall'"ottimizzazione base".

Per comprendere il motivo di questo comportamento abbiamo ritenuto opportuno indagare in una situazione limite, andando ad esplorare oltre gli estremi dell'intervallo considerato. Una possibilità era quella di aumentare il valore del costo di guasto, è facile però prevedere che un costo insostenibile del guasto avrebbe portato le soglie a scendere su valori inferiori per cui abbiamo ritenuto poco conveniente indagare per  $\rho_{\text{gua}} > 4$ . Ci siamo poi chiesti perché aspettarci questo andamento se i risultati già determinati attraverso l'incremento del costo di guasto non mostravano cambiamenti sulle soglie. In effetti questo andamento costante implica che le soglie hanno raggiunto una situazione di stabilità, per cui abbiamo ritenuto dover ricercare comportamenti più significativi all'estremo inferiore del costo di guasto.

Il punto in cui i costi di guasto uguagliano i costi di manutenzione preventiva è stato il primo tentativo nella ricerca della migliore politica con  $\rho_{\text{gua}} < 2$ , rappresenta certamente una situazione limite, ma comunque ritenuta veritiera perché è lecito pensare che possano esistere realtà aziendali dove si previene il guasto esclusivamente per evitare un'indisponibilità del personale di manutenzione che comporta interventi molto più lunghi in seguito ad attese.

Anche questa ottimizzazione però ha restituito valori delle soglie che rispettano l'andamento costante delle curve.

A questo punto ci poniamo una domanda: questi valori delle soglie che tipi di interventi determinano? La soglia d'allarme bassa stabilisce che il sistema deve essere ispezionato con frequenza maggiore, infatti una volta superata, la data di prossima ispezione è fissata al giorno successivo. Un attento monitoraggio del processo di usura determina, come conseguenza, il posizionamento della soglia di preventiva con maggiore precisione.

Il concetto appena espresso è la sintesi della relazione esistente tra monitoraggio e manutenzione preventiva e va chiarito. Nel caso in cui l'impianto fosse ispezionato con poca frequenza la necessità di evitare guasti accidentali si traduce in un abbassamento della soglia preventiva che tenga conto degli incrementi di usura che avvengono nell'intervallo tra due successive ispezioni, maggiore è la distanza tra le ispezioni più alta è la sicurezza da attribuire alla soglia di preventiva. La situazione ideale è un monitoraggio continuo al quale corrisponde un valore di preventiva che dipende esclusivamente dalla relazione

col guasto, la minore frequenza delle ispezioni determina questo abbassamento che può essere definito di "sicurezza".

La posizione della soglia di opportuna evidenzia una tendenza ad intervenire sulle macchine ferme. In generale il sistema in questa configurazione effettua molta manutenzione opportuna, ispeziona spesso le macchine e interviene in maniera preventiva per evitare rotture.

**Tabella 4.12: risultati della simulazione "base"**

Simulazione "base"		per singola macchina
numero di guasti	3,5	
numero di interventi preventivi	26	
numero di interventi opportuni	12,5	
numero di ispezioni	80,5	
% macchina occupata	94	
<b>COSTI TOTALI</b>	265505	
<b>COSTI INDOTTI</b>	133305	

È già stata lanciata una simulazione per la configurazione base del modello, di questa sappiamo che in un anno lavorativo avvengono meno di 4 guasti per macchina, quindi Optquest restituisce valori delle soglie che impediscono alle macchine di raggiungere lo stato di guasto con eccessiva frequenza. Il guasto è evitato sia da interventi di manutenzione preventiva (26 circa per macchina) che di manutenzione opportuna (12-13 per macchina) con un numero di fermi pari a 42. L'incidenza dei costi indotti sul costo totale è pari alla metà della spesa sostenuta dalla manutenzione, questo spiega la scarsa sensibilità del minimo alla variazione dei costi di guasto.

Come ultimo tentativo abbiamo immaginato una situazione paradossale in cui l'intervento di manutenzione correttiva fosse meno costoso di quello preventivo. In questa particolare configurazione è lecito pensare che, in assenza di costi di macchina libera, la politica più conveniente è quella di non intervenire se non a guasto avvenuto. Anche per questa ottimizzazione però Optquest ha restituito valori prossimi a quelli della base.

Cosa mostrano i risultati con queste cinque ottimizzazioni? I risultati mostrano che per differenti valori di guasto, valutati in rapporto al costo della

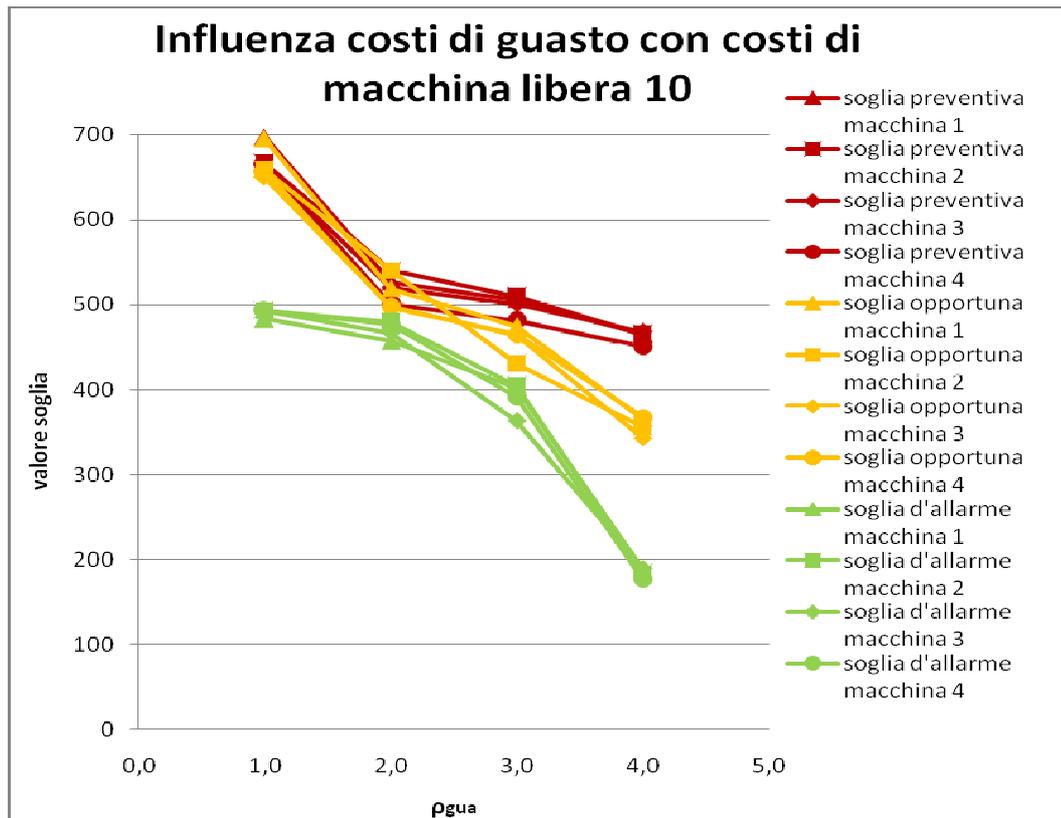
manutenzione preventiva, le ottimizzazioni posizionano le soglie sempre sugli stessi valori. Il motivo di questo comportamento è da ricercare nell'incidenza dei costi di macchina libera che si determinano durante un fermo impianto. La differenza di durata tra le due tipologie di intervento determina una sostanziale disuguaglianza tra le rispettive voci di costo, in un caso abbiamo 12 ore di fermo che equivalgono a  $12 \cdot 4 \cdot 100$  u.m. di costi di macchina libera, nel caso di preventiva la fermata è di solo 5 ore, e la differenza tra i due costi è di 2800 u.m.. Il confronto diretto di questi dati mostra come la diminuzione del costo di guasto, del quale consideriamo la sola parte fissa, determina comunque una enorme differenza tra il costo unitario totale (costo fisso sommato al costo variabile per ogni singolo intervento) della manutenzione correttiva e quello della manutenzione preventiva.

Imposto costi di macchina bassi, abbiamo lanciato il nuovo ciclo di ottimizzazioni che hanno generato, questa volta, risultati che permettono una semplice interpretazione delle curve. In Tabella 4.13 è riportata la sintesi dei risultati per ogni valore di  $\rho_{\text{gua}}$  e i relativi costi totali.

**Tabella 4.13: risultati delle ottimizzazioni al variare di  $\rho_{\text{gua}}$  con  $m_{\text{lib}}=10$**

$\rho_{\text{gua}}$	$c_{\text{gua}}$	sc1,1	sc2,1	sc3,1	sc4,1	sc1,2	sc2,2	sc3,2	sc4,2	sc1,3	sc2,3	sc3,3	sc4,3	Costo totale
1,0	500	697	667	663	666	695	659	650	657	483	493	493	493	113014
2,0	1000	527	540	520	501	519	540	498	497	457	480	467	477	134848
3,0	1500	506	510	501	481	475	431	464	465	402	405	363	391	153111
4,0	2000	465	466	468	451	366	356	343	368	189	184	190	177	161585

E ne riportiamo l'andamento nel grafico di Figura 4.8.



**Figura 4.8: andamento delle soglie al variare di  $\rho_{gua}$  con  $c_{mlib}=10$**

I risultati ottenuti abbassando i costi di macchina libera permettono di estrapolare qualche informazione per descrivere il comportamento delle soglie. Il punto di partenza è stata l'ottimizzazione base, differente da quella lanciata precedentemente per i soli costi di macchina libera, per cui il costo di guasto rimane tre volte quello di preventiva.

Dall'analisi visiva delle curve possiamo già fare delle prime considerazioni. Dal confronto dei risultati ottenuti con la prima analisi si può notare un avvicinamento, tra di loro, delle soglie, questo su tutte le quattro macchine. Il valore della preventiva è salito, seppur di poco, perché l'incidenza del costo di fermo è molto inferiore, per le altre soglie invece registriamo cambiamenti ben più evidenti. Con  $\rho_{gua}=3$ , la migliore politica è ispezionare meno spesso le macchine, puntare su manutenzione preventiva per evitare i guasti e trascurare la manutenzione opportuna.

Ancora dall'analisi del grafico notiamo che tutte e tre le soglie hanno andamenti decrescenti e che all'aumentare del valore di  $\rho_{gua}$  queste si spostano su posizioni tra loro più distanti. Queste tendenze manifestano una reale esigenza di sfruttare

maggiormente le azioni di manutenzione preventiva attraverso frequenti controlli sullo stato delle macchine, prudenza nell'evitare i guasti e attenzione sulla convenienza di effettuare manutenzione opportuna ad impianto fermo.

Con queste nuove ottimizzazioni abbiamo tenuto conto del vincolo strutturale, reale, sul modello, escludendo configurazioni in cui  $\rho_{\text{gua}}$  fosse inferiore all'unità. Già è stato detto che valori elevati di  $\rho_{\text{gua}}$ , maggiori dell'unità, le soglie di preventiva si posizionano in basso, diventa, infatti, economicamente conveniente monitorare meglio e sfruttare i fermi per intervenire su tutte le macchine.

Con  $\rho_{\text{gua}}=1$  le soglie di preventiva e opportuna coincidono, il che significa non fare interventi di manutenzione opportuna sul sistema, inoltre posizionandosi su valori estremamente alti si determina una elevata probabilità che avvenga un guasto. È evidente che il guasto non è più un evento economicamente del tutto inconveniente.

Fissiamo in tre punti le relazioni che intercorrono tra le soglie e il costi di guasto, considerandole singolarmente:

- La soglia di preventiva scende all'aumentare del peso del guasto e ne abbiamo già compreso il motivo;
- La soglia di opportuna ha lo stesso andamento della preventiva, ma in termini di azioni passa da una situazione di totale assenza di interventi che man mano diventano più convenienti per evitare fermate accidentali;
- Anche la soglia d'allarme ha un andamento decrescente, nel primo tratto meno ripido, poi la pendenza della curva aumenta e diventa necessario monitorare con maggiore frequenza.

Dovrebbero anche essere chiare le interazioni tra le soglie: la soglia di preventiva è posizionata di modo che l'impianto non sia soggetto a guasti dannosi. Il guasto influenza direttamente questa soglia e quella opportuna perché rappresentano i reali interventi programmati che impediscono fermi accidentali. In un primo tratto la soglia di preventiva scende con una pendenza elevata perché l'intervento preventivo eviti il guasto, al crescere del peso del guasto diventa economicamente vantaggioso fare opportuna per cui all'intervento preventivo si associa quello opportuno, di conseguenza la soglia di preventiva rallenta la discesa. Il monitoraggio, legato al posizionamento della soglia d'allarme, è un'attività indispensabile per evitare la rottura, ed è questo il motivo per cui la

soglia si spinge verso il basso. Nel primo tratto la discesa è meno marcata perché il sistema si adegua attraverso maggiore preventiva, poi all'aumentare di questa tipologia di interventi diventa importante controllare il sistema in maniera più intensa per evitare di fermare l'impianto con eccessiva frequenza, per cui è conveniente un monitoraggio quasi giornaliero che consenta le azioni preventive effettivamente indispensabili.

I risultati ottenuti dai "Report" di Arena per le configurazioni alle estremità dell'intervallo di analisi dei costi di guasto, confrontati con la struttura base delle voci di costo mostrano che all'aumentare del peso del guasto, la frequenza con cui accadono diventa sempre minore. Le configurazioni simulate sono:

- C<sub>gua</sub>=500;
- C<sub>gua</sub>=1500;
- C<sub>gua</sub>=2000.

Le simulazioni confermano l'aumento del numero di ispezioni al crescere dei costi di guasto, che comportano maggiori interventi sia di manutenzione preventiva (da 29 a 95 circa) sia di manutenzione opportuna (da 22 a 48). Queste politiche manutentive impediscono l'accadimento di guasti che si riducono a circa 19 sul totale delle macchine, in un anno di produzione.

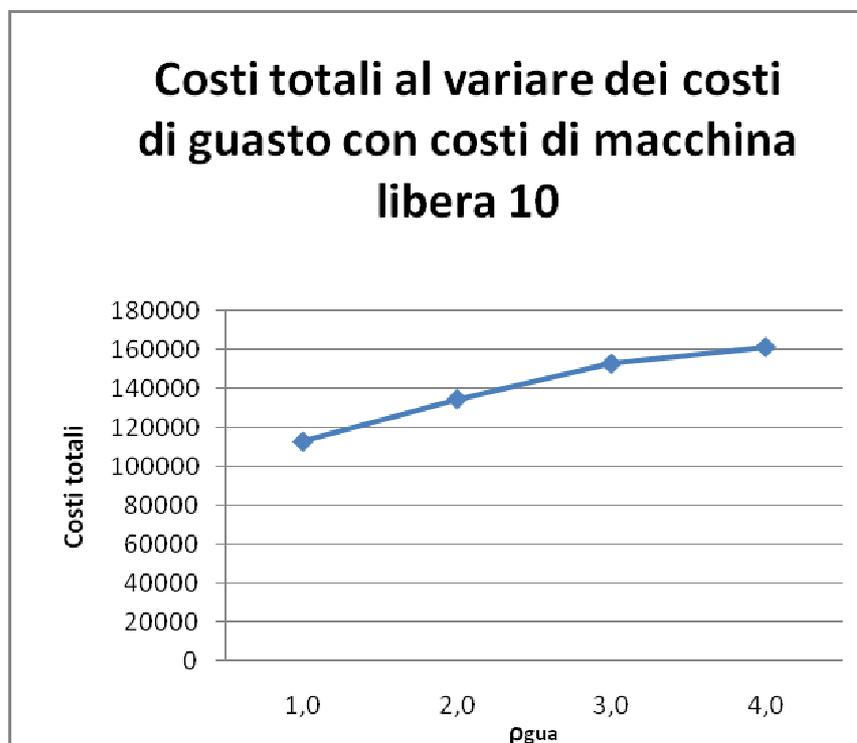
**Tabella 4.14: risultati ottenuti per valori di  $c_{gua}$  con  $c_{mlib}=10$**

<b>CGUA con <math>c_{mlib}=10</math></b>	<b>500</b>	<b>1500</b>	<b>2000</b>
<b>numero di guasti</b>	57,3	35	19
<b>numero di interventi preventivi</b>	29,3	55	95,3
<b>numero di interventi opportuni</b>	22,6	44	48,3
<b>numero di ispezioni</b>	88	150	265
<b>% macchina occupata</b>	86,12	89,8	92,45
<b>COSTI TOTALI</b>	114169	155570	165707

I costi totali in entrambi i casi assumono un andamento crescente, come è lecito aspettarsi. È evidente che nel primo caso l'influenza dei costi di macchina libera determina costi totali molto più elevati, e lo si può facilmente osservare dalla Figura 4.9 e dalla Figura 4.10 inserite di seguito.



**Figura 4.9:** andamento del minimo costo totale al variare di  $\rho_{gua}$  con  $c_{mlib}=100$



**Figura 4.10:** andamento del minimo costo totale al variare di  $\rho_{gua}$  con  $c_{mlib}=10$

La differenza tra le curve dei costi totali si manifesta nel diverso modo di crescere, nel primo caso crescono in maniera lineare nel secondo la curva ha un forma più concava. Ricordiamo infatti che nel caso di costi di macchina libera pari a 100, ovviamente espresso in unità monetarie, le politiche manutentive non sono variate al variare di  $\rho_{\text{gua}}$  per cui i costi totali sono cresciuti in maniera proporzionale al crescere dei costi di guasto, nel secondo caso le curve restituiscono differenti politiche manutentive al variare dei costi.

Quello che emerge in modo lampante è che i costi di macchina libera hanno un peso rilevante sui costi totali e sulle diverse modalità di intervento, e proprio questo aspetto ha molto influenzato le scelte in fase di definizione del modello decidendo di puntare su più macchine e di tener conto di un costo che inevitabilmente si sostiene.

#### **4.3.3 Influenza del costo di macchina libera**

La particolare configurazione del modello sul quale stiamo indagando fa sì che l'interruzione su una macchina genera costi indiretti di mancata produzione sulle restanti macchine. L'assenza del buffer attribuisce maggiore peso alle interazioni tra i componenti del sistema e infatti nei precedenti paragrafi, accennando ai costi di macchina libera abbiamo moltiplicato il costo unitario per il numero di macchine per la durata del fermo. In realtà le macchine libere sono quelle non in manutenzione, ma per coerenza il costo di macchina ferma per manutenzione è stato assegnato identico al costo di macchina libera, in entrambi i casi è stata prevista la sola situazione di mancata produzione.

Il costo di mancata produzione è certamente un costo variabile legato al tempo, nel nostro modello non si perde la natura di tale costo ma diviene, per le scelte fatte sul modello, una quantità fissa assegnata ad ogni tipologia di intervento. Nella realtà quantificare questo costo, anche in termini unitari, è estremamente complicato. Una maniera di conteggiare questa perdita è quella di considerare il mancato profitto per l'interruzione della produzione.

L'obiettivo principale della manutenzione è la riduzione del costo reale, minimizzare tale costo significa trovare il giusto equilibrio tra i costi diretti e i costi indiretti.

La mancata produzione si riduce lavorando su due aspetti: l'affidabilità (MTBF) e la durata delle interruzioni (MTTR). Nel nostro caso consideriamo la durata di ogni singola interruzione costante, la manutenzione invece deve intervenire sulla frequenza dei guasti che determina anche la durata totale di fermo impianto.

L'influenza dei costi di macchina libera è già emersa nel valutare la variazione dei costi di guasto, nel paragrafo 4.8.2. È stato necessario abbassare il valore di  $c_{mlib}$  per rendere significativa la variazione del peso del guasto. I grafici sui costi totali hanno mostrato l'incidenza della voce di costo ora oggetto di analisi.

Quali sono le indicazioni che mi aspetto dalle ottimizzazioni riguardo la politica manutentiva da intraprendere? L'idea stessa di manutenzione come un servizio che deve "rendere" e non solo come un servizio che "costa" lascia pensare ad una dipendenza diretta del posizionamento della soglia di opportuna dai costi di macchina libera, un aumento del peso di questi costi rende significativi interventi di manutenzione opportuna per la riduzione del costo totale di manutenzione. La situazione limite prevede che ad ogni fermata dell'impianto l'intero sistema sarà riportato nello stato "as good as new". Per contro costi di macchina libera nulli semplificano il ruolo della manutenzione assegnandole il compito di evitare unicamente che avvenga il guasto, ad esempio per motivi di sicurezza.

Al crescere dei costi di macchina libera prevediamo un andamento delle soglie decrescente, in particolare l'opportuna dovrebbe portarsi su valori bassi per poter sfruttare le fermate dell'impianto per intervenire anche sulle macchine non in manutenzione preventiva. Anche la soglia di allarme scende per monitorare con maggiore attenzione, con costi di macchina libera la spesa da sostenere per manutenzione preventiva diventa consistente per ispezioni più frequenti evitano un'eccessiva preventiva, riducendo il numero di fermate totali dell'impianto.

Abbiamo ragionato sugli ipotetici andamenti delle soglie, ora bisogna determinare gli input per il lancio delle ottimizzazioni.

Non è stato possibile scegliere i valori di  $c_{mlib}$  senza osservare i risultati delle prime ottimizzazioni. Sin dall'inizio l'idea è stata quella di indagare per valori sia maggiori che minori di  $p_{mlib}=1$ . Gli unici dati conosciuti, intesi come output, sono i valori ottimi ottenuti dall'ottimizzazione base, per la quale  $c_{mlib}$  è pari a 100. L'ottimizzazione restituisce valori di soglia opportuna e soglia d'allarme già bassi.

Abbiamo ricercato gli ottimi per valori crescenti di  $c_{m\text{lib}}$  fino ad analizzare costi oggettivamente alti per comprendere il comportamento all'estremo.

Dai risultati è stato chiaro che bisognava spostarsi su costi di macchina libera molto bassi escludendo, però, valori prossimi a "0". La mancata produzione va sempre considerata come un costo da sostenere e l'input limite considerato è  $c_{m\text{lib}}=5$  u.m.

In tabella 4-15 sono evidenziati gli input delle le ottimizzazioni ed emerge chiaramente che l'indagine ha riguardato maggiormente valori di  $\rho_{m\text{lib}} < 1$ .

**Tabella 4.15: valori di  $\rho_{m\text{lib}}$  fissati come input**

DESCRIZIONE PARAMETRO	SIMBOLO	TIPO	VALOREBASE	NUOVO VALORE(1)	NUOVO VALORE(2)	NUOVO VALORE(3)	NUOVO VALORE(4)	NUOVO VALORE(5)	NUOVO VALORE(6)	NUOVO VALORE(7)
Numero di macchine	n		4							
Usura		Gamma( $\alpha,\beta$ )	(1,3,3)							
Guasto		Weibull( $\alpha,\beta$ )	(3,6000)							
Costo di ispezione	cisp	costo fisso	100 u.m.							
Costo di preventiva	cpre	costo fisso	500 u.m.							
Costo di opportuna	copp	costo fisso	500 u.m.							
Costo di guasto	ogua	costo fisso	1500 u.m.							
Costo del personale	oper	costo variabile	0 u.m.							
Costo di set up	csetup	costo fisso	250 u.m.							
Costo di fermo	cfer	costo variabile	100 u.m.	5	25	50	75	300	500	750
Costo di macchina libera	cm\text{lib}	costo variabile	100 u.m.	5	25	50	75	300	500	750
Parametro adimensionale	$\rho_{m\text{lib}}$	variabile adimensionale	0,2	0,01	5	0,1	0,15	0,6	1	1,5
Tempo di preventiva	tman	deterministico	5 h							
Tempo di opportuna	tman	deterministico	5 h							
Tempo di guasto	tman	deterministico	12 h							
Intertempi arrivo pezzi		deterministico	5 min							
Tempo di lavorazione	tlav	deterministico	5 min							
Costo di buffer	cbuff	costo variabile	buffer assente							

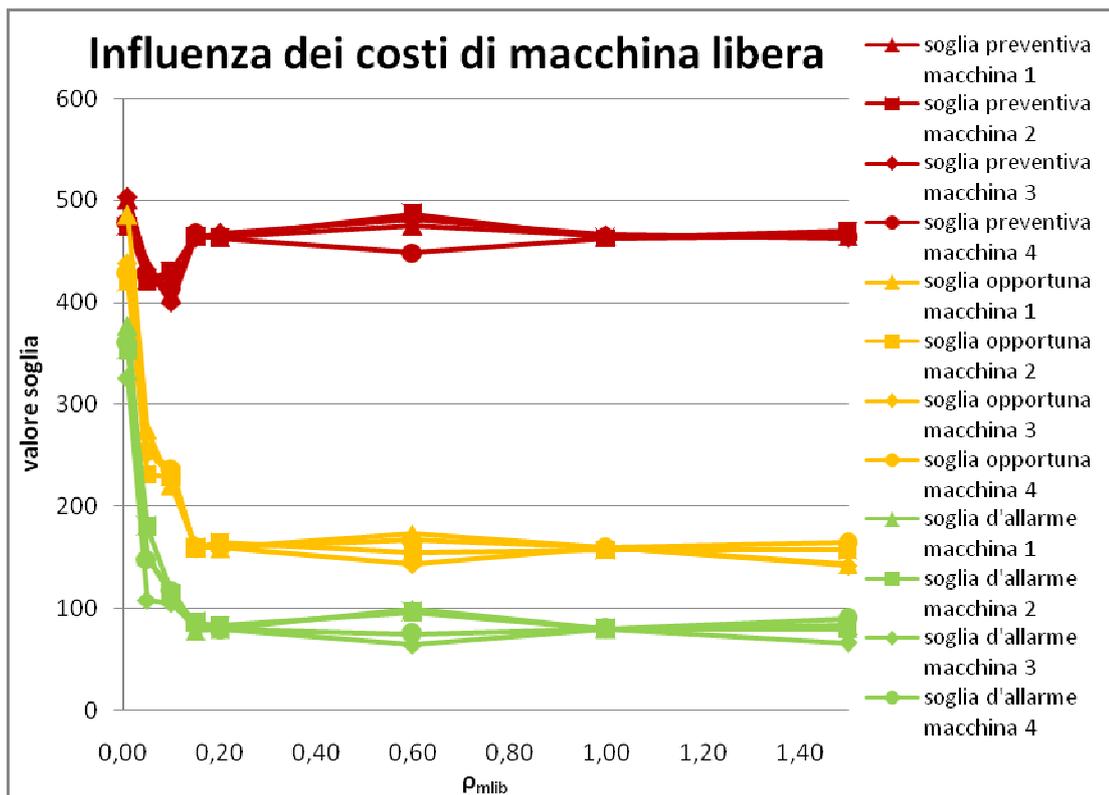
I risultati ottenuti dalle singole ottimizzazioni sono riassunti nella Tabella 4.16. Optquest ha restituito valori che non hanno disatteso le aspettative riguardanti la prossimità delle soglie sulle quattro macchine, distinte per tipologia.

**Tabella 4.16: risultati delle ottimizzazioni al variare di  $\rho_{mlib}$**

$\rho_{mlib}$	$c_{mlib}$	sc1,1	sc2,1	sc3,1	sc4,1	sc1,2	sc2,2	sc3,2	sc4,2	sc1,3	sc2,3	sc3,3	sc4,3	Costo totale
0,01	5	501	475	503	479	486	420	438	428	377	353	325	361	144268
0,05	25	437	421	432	427	275	231	255	253	151	180	108	148	175615
0,10	50	408	431	400	413	220	229	230	237	112	114	105	118	208535
0,15	75	465	465	463	467	162	159	159	159	78	86	82	82	238634
0,20	100	464	464	468	463	159	164	159	159	80	83	80	79	270108
0,60	300	475	487	481	449	173	155	143	167	99	96	64	75	522634
1,00	500	465	463	466	463	159	157	159	159	80	80	80	80	773692
1,50	750	465	470	463	465	143	157	142	164	83	80	66	90	1088400

Il confronto tra i risultati degli ottimi ai due estremi mostra che tutte e tre le soglie si sono spostate verso il basso, la preventiva in maniera meno accentuata, soglia di opportuna e di allarme con evidente distacco.

Costruiamo il grafico per sintetizzare l'andamento delle curve:



**Figura 4.11: andamento delle soglie al variare di  $\rho_{mlib}$**

All'analisi visiva il comportamento delle curve è abbastanza stabile per valori elevati di  $\rho_{mlib}$ , al contrario per  $\rho_{mlib} < 0,2$  l'andamento delle soglie va analizzato

con maggiore attenzione. Oltre questo valore la politica manutentiva sembra perdere la sensibilità alla variazione dei costi di macchina libera, infatti i valori delle soglie non riportano significative differenze dall'“ottimizzazione base”, stessi risultati erano stati ottenuti dalle ottimizzazioni lanciate con costi di guasto crescenti prima di abbassare il valore di  $c_{m\text{lib}}$ .

Già è stato scritto che i costi di macchina libera incrementano, oltre che il costo di guasto, anche il costo totale del singolo intervento di preventiva, di conseguenza la migliore politica impone di effettuare interventi di manutenzione preventiva evitando però di fermare spesso l'impianto. Per riuscire a ridurre i tempi di fermo impianto è necessario ispezionare ad intervalli di tempo ravvicinati, per ottenere informazioni migliore sullo stato delle macchine, ed effettuare manutenzione opportuna quando una delle macchine va in manutenzione.

Oltre un certo valore di  $c_{m\text{lib}}$  queste azioni determinano la minima durata totale di fermo impianto e giustificano il comportamento stabile rilevato. Infatti la percentuale di costi indotti sul totale diventa elevatissima per cui si riesce a minimizzare i costi totali solo minimizzando i costi indotti, questi ultimi sono proporzionali al tempo totale di fermo, in conclusione il problema di minimizzare il costo di manutenzione si traduce nella ricerca dei valori delle soglie che minimizzano il tempo di mancata produzione.

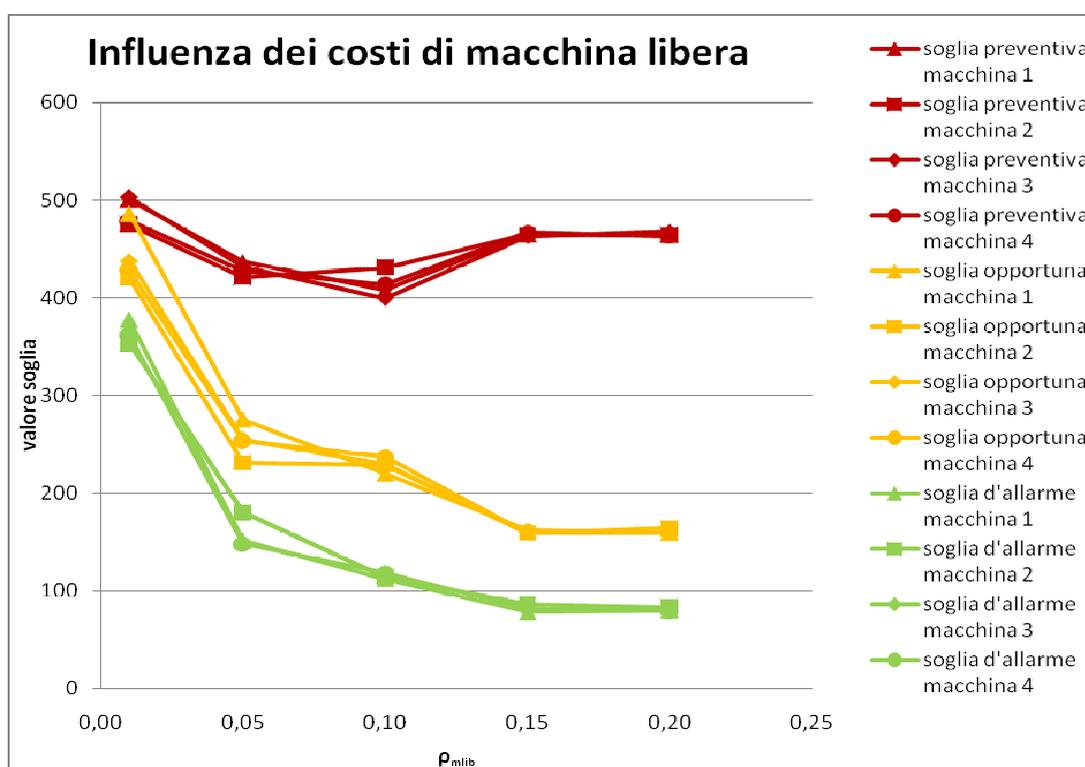
Ricordando le difficoltà incontrate nel paragrafo 4.8.2 riguardo l'influenza del costo di guasto, il chiarimento appena affrontato motiva la scelta obbligata di abbassare i costi di macchina libera per comprendere l'influenza del costo sulle soglie. La riduzione di  $c_{m\text{lib}}$  ha aumentato la sensibilità del costo di manutenzione all'aliquota determinata da  $c_{\text{gua}}$ , ed è stato possibile effettuare l'analisi, con  $c_{m\text{lib}}=100$  u.m. Optquest cerca già il tempo minimo di fermo, quindi significativi cambiamenti sarebbero stati rilevati con costi di guasto molto elevati.

Ritorniamo all'analisi del grafico in Figura 4.11, notiamo che sull'intero intervallo osservato, i risultati mostrano una lieve diminuzione del valore della soglia di preventiva, mentre le soglia di opportuna e di allarme scendono velocemente nel primo tratto ed arrestano la discesa al raggiungimento dei valori ottenuti con la “base”. La posizione della soglia di opportuna consente di ridurre i costi totali,

imponendo di intervenire sempre ad impianto fermo. Maggiore è il costo di macchina libera minore dovrà essere la durata totale delle fermate.

Chiariamo che se la soglia di opportuna coincide con la soglia di preventiva, la prima azione non sarà mai effettuata. Il confronto delle due soglie mostra in maniera molto chiara come l'assenza, o quasi, di costi di mancata produzione, annulla la possibilità di interventi opportuni e l'aumento di questi costi allontana le due soglie.

Nel primo tratto si ha una sensibile variazione dei valori assunti al variare di  $\rho_{mlib}$ , nel grafico in Figura 4.12 riportiamo il comportamento assunto dalle soglie.



**Figura 4.12: andamento delle soglie per  $\rho_{mlib} < 0,2$**

Agli estremi della curva la soglia di preventiva assume dei valori non molto distanti tra di loro; in questo tratto il costo di manutenzione è sensibile al costo di guasto e l'azione preventiva evita la rottura del componente. Al crescere dei costi di macchina libera la soglia scende aumentando il numero di interventi preventivi, con  $\rho_{mlib}=0,10$  incontra il suo punto di minimo per poi risalire, il motivo di questo comportamento è legato alle interazioni che si vengono a creare con le altre soglie.

Continuiamo con la lettura delle singole soglie. L'aumento dei costi di macchina libera rende conveniente intervenire con manutenzione opportuna e questa convenienza cresce col crescere di  $c_{m\text{lib}}$ . La riduzione dell'intervallo di ispezione si rende anch'essa indispensabile per impedire fermate non necessarie.

I motivi di questi comportamenti sono abbastanza evidenti, la ricerca dei legami tra i comportamenti delle soglie ci aiuta a capire le ragioni dell'andamento della soglia preventiva.

Con costi di macchina libera bassi,  $\rho_{m\text{lib}}=0,01$ , i valori delle tre soglie sono abbastanza alti e comportano ispezioni poco frequenti e manutenzione opportuna quasi assente. Crescono i costi e aumentano frequenza di ispezioni e numero di interventi opportuni. La manutenzione preventiva diventa più costosa, ma in misura maggiore aumenta il costo del guasto, infatti nel primo caso l'intervento ha una durata di 5 h nel secondo caso 12 h. per evitare il guasto, e quindi una fermata di 12 h, Optquest abbassa le soglie della manutenzione.

Le soglie di allarme e opportuna continuano a diminuire e il loro comportamento ha un'influenza diretta sul posizionamento della soglia di preventiva: ispezioni più frequenti tirano verso l'alto la soglia, per meccanismi già discussi, e interventi di manutenzione opportuna anticipano ed evitano quelli preventiva. L'andamento decrescente delle due soglie è opposto a quello dei costi di macchina libera. Questo spiega perché la soglia di preventiva inverte l'andamento e sale quando i costi di macchina libera determinano  $\rho_{m\text{lib}} > 0,1$ .

Intuitivamente i costi di macchina libera rendono conveniente effettuare opportuna, ma nel tratto discendente della soglia preventiva Optquest consiglia di minimizzare il costo totale di manutenzione evitando il guasto, al crescere della sensibilità della spesa totale rispetto ai costi indotti intervengono le azioni di manutenzione opportuna e ispezioni più frequenti. La riduzione del costo di manutenzione avviene, a questo punto, attraverso una riduzione del tempo di fermo totale che impone una soglia di preventiva più alta. Il minimo tempo di mancata produzione è raggiunto con valori delle soglie nel punto  $\rho_{m\text{lib}}=0,2$ . In questa configurazione il numero di interventi per evitare il guasto non è ridotto, precisamente alla fermata dell'impianto è preferito effettuare manutenzione sulle restanti macchine così da evitare una fermata a breve distanza per manutenzione preventiva.

Le voci di costo scelte per valutare la politica manutentiva consigliata da Optquest sono:

- $C_{mlib}=5$  u.m.;
- $C_{mlib}=50$  u.m.;
- $C_{mlib}=100$  u.m..

Sono i punti in cui avvengono dei cambiamenti di comportamento delle soglie.

**Tabella 4.17: valori ottime delle soglie utilizzati per le simulazioni al variare di**

$P_{isp}$

<b>CMUB</b>	<b>5</b>	<b>50</b>	<b>100</b>
soglia di preventiva	509	413	465
soglia di opportuna	434	229	160
soglia d'allarme	354	112	80

La variazione dei costi di macchina libera è direttamente legata al tempo di mancata produzione, come conseguenza diretta un incremento dei costi di mancata produzione deve determinare, attraverso il posizionamento delle soglie, un aumento del tempo effettivo di lavorazione per le macchine.

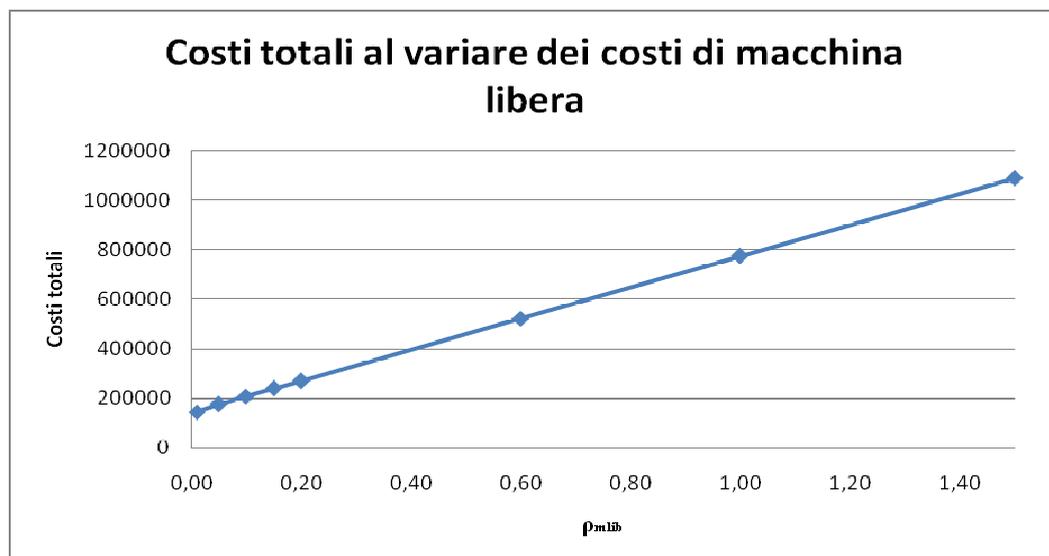
**Tabella 4.18: risultati ottenuti dai report di Arena per valori  $c_{mlib}$**

<b>CMUB</b>	<b>5</b>	<b>50</b>	<b>100</b>
numero di guasti	30,6	15,6	15
numero di interventi preventivi	63	115	104
numero di interventi opportuni	48	42,2	50
numero di ispezioni	176	309	322
% macchina occupata	90,5	93,7	94
<b>COSTI TOTALI</b>	145045	209328	265505

Con  $c_{mlib}=5$  u.m. il numero di fermi per interventi manutentivi, di qualsiasi tipologia, è pari a 59; in media le macchine, in un anno, si guastano 30 volte vengono mantenute con interventi preventivi 63 volte e con interventi opportuni 48. Questi risultati mostrano la scarsa convenienza a prevenire rotture accidentali, con conseguente tempo di macchina occupata, espresso in %, pari a 90.

Al crescere dei costi di guasto, il numero di ispezioni aumenta da 176 a 322, confermando ciò che era emerso dai grafici Output-Input. In generale, i valori

delle soglie determinano un aumento della % del tempo di macchina occupata, che è massimo quando i costi di macchina libera diventano troppo alti (94%). In Figura 4.13 è riportato il grafico dei costi totali al variare dei costi di macchina libera.



**Figura 4.13: andamento del minimo costo di manutenzione al variare di  $\rho_{mlib}$**

La curva dei costi totali ha un andamento crescente con una pendenza pressoché costante. Con  $\rho_{mlib} > 0,2$  la curva è evidentemente lineare, infatti la politica manutentiva, in termini di valore delle soglie, non varia, ciò che cambia sono i costi di macchina libera che influenzano i maniera proporzionale i costi totali. In effetti solo mediante l'analisi della curva dei costi totali abbiamo intuito quale fosse la motivazione della stabilità delle soglie oltre un certo valore di  $\rho_{mlib}$ , poi confermata dai risultati delle simulazioni.

#### **4.3.4 Influenza della velocità di deterioramento**

È sicuramente di notevole interesse indagare sull'influenza della velocità di usura, nel paragrafo 4.5 abbiamo già motivato la scelta di analizzare il comportamento del solo parametro  $\beta$  della distribuzione gamma.

Un valore crescente del fattore di scala determina incrementi di usura molto rapidi e di conseguenza un numero di guasti maggiore. Le scelte fatte per la

modellazione della probabilità di guasto impongono attenzione nello studiare l'usura congiuntamente alla frequenza di guasto.

Il lavoro di Grall, Berenguer e Dieulle in [19], già citato nel paragrafo 4.7.1, analizza anche l'influenza della velocità di deterioramento sulla politica CBM.

In [19] l'incremento di usura è assunto essere modellato con distribuzione esponenziale caratterizzata da un unico parametro  $\alpha$ , inverso della velocità di usura.

La scelta della distribuzione esponenziale è motivata da due ragioni:

1. È analiticamente trattabile, quindi conveniente per l'analisi delle performance della politica manutentiva;
2. Soddisfa i requisiti richiesti dal modello che si propongono. [19]

Inoltre aggiungono che la distribuzione Esponenziale è uno caso speciale di distribuzione Gamma.

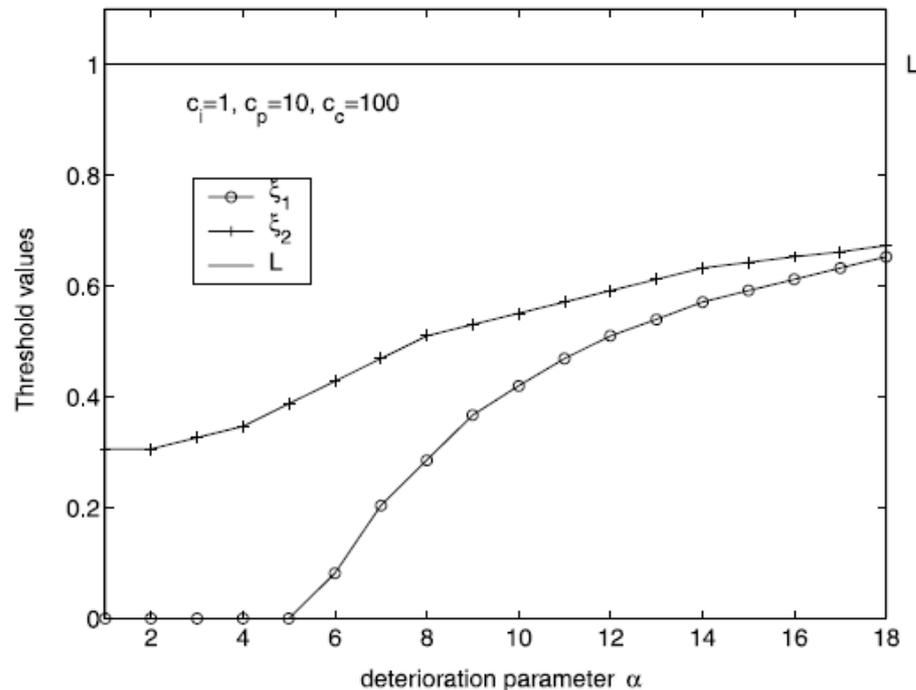
Questa precisazione è utile per marcare le differenze tra i due modelli. Ad ogni modo non riteniamo questa differenza sufficiente a modificare nella sostanza il comportamento delle soglie. Molto più significativa è la differenza riguardo i tempi di lavorazione e i tempi di ispezione. Nel nostro modello questi tempi hanno una durata finita e non nulla, a differenza del modello in [19] dove le azioni sono istantanee.

Ovviamente non conosciamo la proporzionalità tra i tempi, l'orizzonte di simulazione e il grado di usura, immaginiamo però che mantenendo questa proporzionalità l'effetto di un aumento della velocità di usura si traduce in un orizzonte di simulazione percepito più ampio. Fissate le soglie della manutenzione, le simulazioni lanciate con due diversi valori di " $\beta$ " restituiscono un numero di interventi totali differente, ma con lo stesso rapporto tra le diverse tipologie di intervento.

Nella nostra analisi i tempi rimangono identici a quelli fissati nell'ottimizzazione base perciò è interessante capire il comportamento delle soglie al variare della velocità di usura.

Dobbiamo, a questo punto, determinare gli input da attribuire al modello nella ricerca dei valori ottimi delle soglie. Il confronto con lo studio proposto in [19] è

certamente utile anche in questa fase. Riportiamo il grafico ottenuto in tale lavoro:



**Figura 4.14: effetto della velocità di deterioramento in [19]**

L'indagine ha riguardato un intervallo abbastanza ampio, da  $\alpha=0$  ad  $\alpha=18$ : nel primo caso un incremento di usura altissimo aumenta il numero di ispezioni, all'altro estremo un usura lenta la prossima ispezione è schedulata sempre dopo 2 periodi.

Proviamo anche noi a considerare un intervallo di controllo abbastanza ampio caratterizzato da più punti di analisi.

Il punto di partenza rimane l'ottimizzazione base caratterizzata da  $\beta$  pari a 3, e i risultati restituiti da Optquest sono già noti. Proseguiamo con l'analisi fissando come input valori non lontani da " $\beta=3$ " considerato subordinando ai risultati la scelta degli altri input.

Anche in questo caso la determinazione degli input è fortemente legata alla visione dei risultati ottenuti dalle ottimizzazioni. Il fenomeno più evidente è una sottile divergenza dei valori delle soglie ottime che mostreremo con l'analisi dei risultati.

Sono stati fissati 12 input in un range che va da " $\beta=1$ " a " $\beta=6$ " spesso provando valori vicini tra di loro.

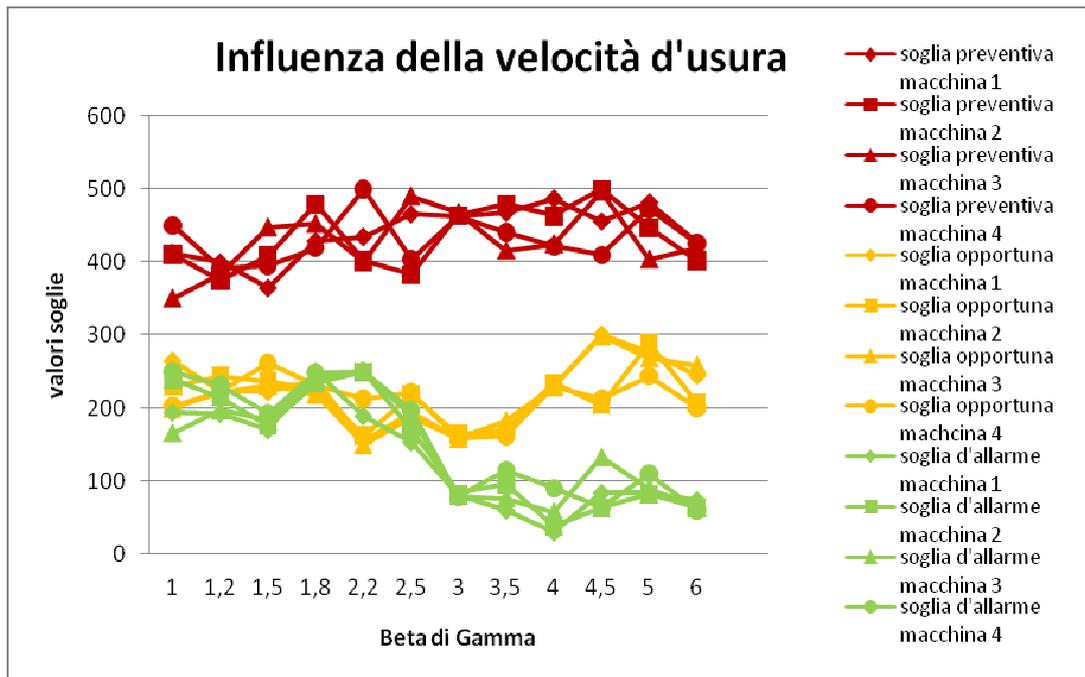
I risultati ottenuti dalle singole ottimizzazioni sono riassunti nella **Errore.**  
**L'origine riferimento non è stata trovata..**

**Tabella 4.19: risultati delle ottimizzazioni al variare di  $\beta$**

$\beta$	sc1,1	sc2,1	sc3,1	sc4,1	sc1,2	sc2,2	sc3,2	sc4,2	sc1,3	sc2,3	sc3,3	sc4,3	Costo totale
1	413	411	350	450	264	229	200	203	194	239	166	250	128221
1,2	400	375	384	391	222	244	221	223	192	215	197	232	153150
1,5	365	409	448	394	222	237	231	262	170	176	184	193	172220
1,8	429	479	453	419	238	227	219	232	250	234	241	249	193838
2,2	435	402	400	500	155	162	150	213	189	250	250	250	229337
2,5	466	383	491	403	194	218	187	222	153	171	189	197	245904
3	464	464	468	463	159	164	159	159	80	83	80	79	270108
3,5	468	479	416	440	170	170	183	162	60	96	77	115	301660
4	487	463	425	421	229	234	230	230	30	38	58	90	332629
4,5	456	499	497	409	300	204	299	213	84	64	133	63	353123
5	482	447	404	472	277	289	269	244	84	82	90	110	374569
6	427	402	419	425	244	207	259	201	74	64	64	60	427062

Le soglie non registrano, come è stato per le precedenti analisi, valori prossimi tra di loro. Non è semplice per noi motivare questo fenomeno, proveremo affrontando l'analisi, a proporre delle spiegazioni che possano essere condivise. Inoltre i risultati mostrano che variazioni significative sono presenti quasi esclusivamente per la soglia d'allarme.

La costruzione del grafico semplifica la lettura dei dati.



**Figura 4.15: influenza della velocità di usura sulle soglie**

Il comportamento delle soglie già notato dai risultati ottenuti in **Errore**. **L'origine riferimento non è stata trovata.** è chiaramente evidente osservando il grafico: le stesse soglie si discostano tra di loro, disattendendo le nostre aspettative. Numerosi tentativi, anche su valori già provati hanno restituito i medesimi valori, confermando l'affidabilità dell'ottimizzatore. Nonostante le divergenze, lievi, sono chiari gli andamenti delle soglie.

Il confronto con il grafico costruito da Grall, Berenguer e Dieulle evidenzia differenze nel posizionamento delle soglie. L'introduzione al loro studio ha già marcato quanto i lavori, e quindi i modelli, fossero diversi nella sostanza, non solo relativamente al numero di macchine del sistema e all'approccio di studio ma anche nelle caratteristiche date al modello costruito, come nel caso dei tempi.

Altre differenze sono da rilevare nella struttura dei costi, e soprattutto nella assenza di un interfacciamento con la produzione che responsabile dell'incremento d'usura.

Ai due estremi, soglia di preventiva e opportuna riportano valori non molto distanti tra di loro e i diversi punti di analisi, appartenenti all'intervallo di controllo, restituiscono la tendenza a non spostarsi da questi valori, tendenza

meno marcata per la soglia di opportuna. Contrariamente alle soglie sopra citate la soglia d'allarme ha un andamento visibilmente decrescente.

Analizziamo in dettaglio il comportamento di ogni singola soglia.

La soglia di preventiva riporta le maggiori differenze in termini di valori ottimi assunti per ogni ottimizzazione. Osservando con occhio attento il grafico alla ricerca di non molto evidenti trend possiamo distinguere un primo tratto leggermente crescente della soglia fino a valori di  $\beta$  pari a 2, oltre il quale continua in modo rettilineo fino a determinare con  $\beta=6$  una leggera discesa. Su tutto l'intervallo di controllo i valori delle soglie non si allontanano da un range che va da 400 a 500. Dovrebbe essere già chiaro il significato di questi valori: 400 e 500 non sono caratterizzati da unità di misura in quanto rappresentano il riferimento del valore d'usura, nel nostro lavoro non abbiamo dato un preciso significato fisico all'usura, attribuendole il solo significato di invecchiamento.

Alla luce di quanto detto sui valori assunti dalla soglia preventiva lungo l'intervallo di analisi, ci chiediamo se è corretto confermare l'esistenza di questi andamenti.

Nel paragrafo sottolineiamo che la scelta degli input è stata subordinata ai risultati delle ottimizzazioni, gli estremi del grafico sono stati non un punto di partenza, ma un punto di arrivo. Nel riportare punto per punto i valori ottenuti dalle soglie è emerso, come già detto, la divergenza dei valori, ma allo stesso tempo un intrecciamento di questi. Le curve delle soglie prese singolarmente mostrano un comportamento difficilmente spiegabile.

L'intrecciamento delle soglie è la spiegazione di un comportamento costante della curva: le soglie assumono valori appartenenti ad un intervallo limitato e si intrecciano ripetutamente tra di loro. In conclusione i valori delle soglie assumono sempre gli stessi valori, non identici, per cui possiamo ritenere che la soglia di preventiva ha un andamento pressoché costante. Il motivo di quest'andamento è da ricercare nella natura del parametro in analisi.

Confermiamo che l'aumento della velocità di usura si traduce in uno pseudo allungamento dell'orizzonte di riferimento, in effetti non è l'orizzonte di riferimento che cambia ma l'intervallo di tempo di riferimento della simulazione, col risultato che l'incremento ottenuto in un minuto con  $\beta$  basso si traduce nello stesso incremento ottenuto in un secondo ottenuto con  $\beta$  alto. La soglia di

preventiva che evita il guasto e la spesa relativa ai danni non può che rimanere la stessa.

Potremmo spiegare l'andamento della soglia opportuna in maniera analoga, ma questa ha un significato diverso da quella preventiva, si rende necessaria per evitare soprattutto i costi indotti di macchina libera. La curva della soglia di opportuna ha un andamento prima decrescente poi crescente. Su tutto l'intervallo mostra la convenienza a fare interventi di manutenzione opportuna tenendosi distante dalla soglia di preventiva, questi diminuiscono agli estremi.

Il comportamento che facilmente si intuisce è che gli interventi di manutenzione opportuna si riducono all'aumentare della velocità di usura, evidente nel tratto finale della curva.

La soglia di allarme presenta corrispondenze con la soglia di ispezione introdotta in [19], il nostro modello e quello proposto da Grall, Berenguer e Dieulle sono caratterizzati da una soglia che determina la data di prossima ispezione, questa data è fissata in termini di tempo, e cioè prossima ispezione tra  $x$  giorni.

L'andamento della soglia è decrescente, in un primo tratto meno inclinato per poi decrescere rapidamente. Il grafico in [19] mostra lo stesso comportamento con andamento inverso perché  $\alpha$  è l'inverso della velocità di degradamento. Il numero di ispezioni e la frequenza aumenta all'aumentare del grado di usura.

È stato proprio il comportamento della soglia di allarme a convincerci dell'idea che la velocità di usura è legata all'intervallo di tempo di riferimento; infatti con usura veloce gli incrementi di questa durante un'intera giornata sono di gran lunga superiori, per conoscere lo stato della macchina il sistema manutenzione deve ispezionare con maggiore frequenza.

Lanciamo le simulazioni per capire cosa effettivamente succede al modello con le politiche consigliate da Optquest, i valori ottimi delle soglie di manutenzione sono calcolati ancora come media dei risultati restituiti dalle ottimizzazioni.

le configurazioni scelte sono per:

- $\beta = 1,5$ : usura lenta;
- $\beta = 3$ : configurazione base;
- $\beta = 6$ : usura rapida.

In Tabella 4.20 riassumiamo i valori delle soglie attribuiti al modello per le tre configurazioni.

**Tabella 4.20: valori delle soglie utilizzati per le simulazioni al variare di  $\beta$**

<b>BETA</b>	<b>1,5</b>	<b>3</b>	<b>6</b>
soglia di preventiva	404	465	418
soglia di opportuna	238	160	228
soglia d'allarme	181	80	66

Le configurazioni sono distinte da diversi valori per singola soglia, rispettano però quanto detto in fase di analisi del grafico riguardo l'appartenenza ad un range, in particolare dal grafico si nota in " $\beta=3$ " un minimo, che corrisponde alla configurazione base di cui già conosciamo i risultati.

Al termine delle simulazioni i report di Arena hanno restituito i seguenti risultati:

**Tabella 4.21: risultati ottenuti al variare di  $\beta$**

<b>BETA</b>	<b>1,5</b>	<b>3</b>	<b>6</b>
<b>numero di guasti</b>	11	15	33,6
<b>numero di interventi preventivi</b>	62	104	140
<b>numero di interventi opportuni</b>	28,6	50	33
<b>numero di ispezioni</b>	296	322	240
<b>% macchina occupata</b>	95,9	94	89
<b>COSTI TOTALI</b>	182808	265505	432362

Il numero di fermi aumenta all'aumentare della rapidità d'usura, con  $\beta=1,5$  si registrano circa 28 fermi raggiungendo i quasi 70 fermi quando  $\beta$  è pari a 6.

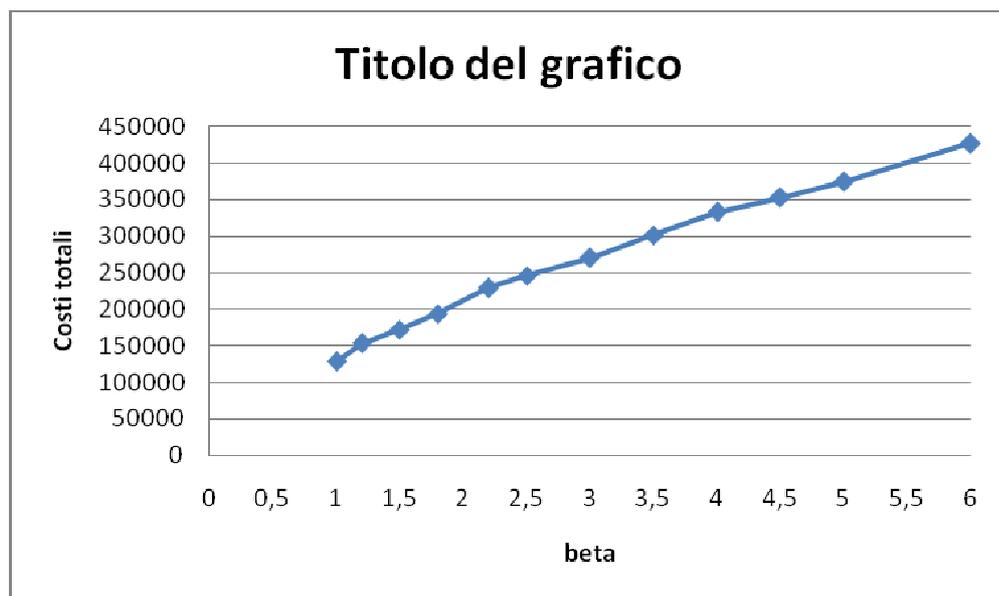
L'aumento del numero di fermi è indice di un numero totale di interventi che aumenta per la rapidità con cui si incrementa il grado d'usura.

Non solo i guasti, ma anche il numero di interventi preventivi e di opportuna aumentano al crescere di  $\beta$ . È di grande interesse notare come col diminuire del valore della soglia di preventiva aumenti il numero di interventi preventivi. Queste considerazioni, fatte sulla base dei risultati ottenuti dalle simulazioni, confermano indirettamente il legame che abbiamo ipotizzato esista tra usura e  $\Delta t$  di riferimento.

Il tempo di macchina occupata diminuisce a causa dell'aumento del numero totale di interventi.

Discorso singolare merita l'ispezione, dalla Tabella 4.21 si nota come questa cresca da  $\beta=1,5$  a  $\beta=3$ , ma nell'ultima configurazione si nota una diminuzione del numero di ispezioni. Il valore della soglia d'allarme è indiscutibilmente superiore alle altre due configurazioni provate, l'unica motivazione che riusciamo a dare per spiegare questo comportamento avvalora ancora di più l'idea dell'esistenza di una relazione tra usura e  $\Delta t$ : il sistema non riesce ad ispezionare con elevata frequenza per l'accadimento di un maggior numero di guasti e interventi di manutenzione preventiva, l'intervallo minimo tra due ispezioni pari ad un giorno assume una durata elevata per ottenere informazioni adeguate sullo stato delle macchine.

L'andamento dei costi totali è riportato nel grafico di Figura 4.16, questi aumentano all'aumentare della velocità di usura perché con essa aumentano in numero gli interventi di manutenzione preventiva e correttiva e la frequenza delle ispezioni del sistema.



**Figura 4.16: andamento del minimo costo totale di manutenzione al variare di  $\beta$**

#### **4.3.5 Influenza del costo di mantenimento a buffer**

La presenza di un buffer consente l'immagazzinamento di parti provenienti da una macchina in lavorazione quando le successive sono ferma o anche il prelievo da questo, se non vuoto, quando le macchine a monte sono in manutenzione.

Quindi il buffer ha la funzione di disaccoppiare l'impianto e comporta il vantaggio, bilanciato dal costo di mantenimento, di limitare il tempo di mancata produzione. Riteniamo che la voce di costo variabile per il mantenimento a buffer possa influenzare il posizionamento delle soglie della manutenzione per ottenere il minimo costo totale, quindi effettuiamo l'analisi dell'influenza di tale costo orario su:

- costi totali
- dimensione del buffer
- politiche di manutenzione.

La configurazione fin qui utilizzata complica enormemente l'interpretazione dei dati. Infatti posizionando il buffer tra la seconda e la terza macchina, si determina un sistema produttivo caratterizzato da disaccoppiamento delle macchine a valle e a monte del buffer con interazioni tra le macchine che si trovano nella stessa posizione rispetto al magazzino. Per evitare ciò abbiamo considerato un sistema composto da due macchine inframmezzate da un buffer; inoltre non avrebbe senso considerare una serie costituita da più componenti suddivisa da un buffer in quanto si potrebbe pensare di ottimizzare le due sub-serie separatamente; il nostro scopo è quello di trovare, attraverso Optquest, la dimensione ottima del buffer legata alla politica manutentiva.

In questo caso non è possibile la costruzione del parametro adimensionale, confrontale il costo di mantenimento a buffer con il costo di mancata produzione potrebbe rappresentare una forzatura, per cui il parametro che andiamo a modificare nelle diverse ottimizzazioni è  $c_{buff}$ . Poiché consideriamo costi orari per ciascun componente a buffer, tale parametro avrà dei valori molto piccoli come si vede nella Tabella 4.22.

Ottimizzazioni lanciate con  $c_{buff}$  elevati restituivano politiche di dimensionamento buffer che rendevano inconveniente sfruttarlo, il nostro obiettivo è dare significato all'analisi, quindi è nostro interesse capire quando il costo di buffet diventa insostenibile da consigliare il non utilizzo, ma rappresenta certamente un caso limite. Di conseguenza i valori di  $c_{buff}$  inseriti come input sono decisamente inferiori alle altre voci della struttura dei costi. Si sono utilizzati valori complessivamente 10 valori compresi tra 0 e 1,2.

I risultati ottenuti dalle singole ottimizzazioni sono riassunti nella Tabella 4.23.

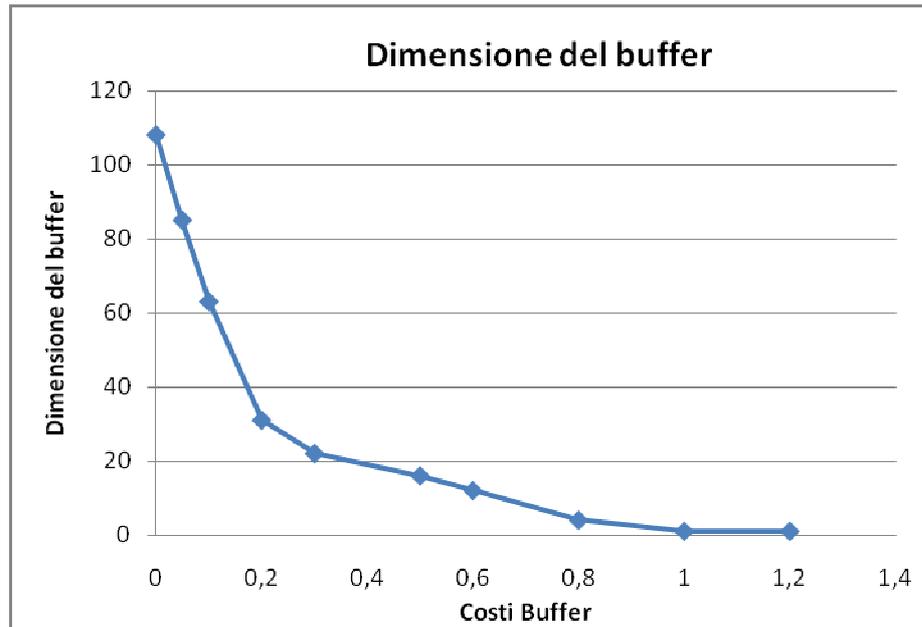
**Tabella 4.22: risultati ottimizzazione al variare di  $c_{buff}$**

costi buffer	sc1,1	sc2,1	sc1,2	sc2,2	sc1,3	sc2,3	dim. Buffer	COSTI TOTALI
<b>0</b>	424	423	236	227	263	234	108	124816
<b>0,05</b>	371	378	212	205	165	174	85	124550
<b>0,1</b>	370	397	214	238	161	162	63	125646
<b>0,2</b>	518	419	208	221	325	302	31	132347
<b>0,3</b>	484	498	258	303	356	248	22	131358
<b>0,5</b>	484	530	331	299	314	220	16	132187
<b>0,6</b>	476	529	338	311	273	201	12	131178
<b>0,8</b>	497	543	364	394	283	219	4	131751
<b>1</b>	471	485	212	229	122	256	1	131448
<b>1,2</b>	475	524	225	250	199	195	1	131379

Dalla tabella è evidente come dopo un certo valore di  $c_{buff}$  la dimensione ottima del buffer è nulla. Ricordiamo che dimensionamento del buffer pari ad 1, come è stato già spiegato in fase di costruzione del modello, corrisponde ad un buffer assente.

Come detto in precedenza, per prima cosa analizziamo l'influenza dei costi di buffer sulla dimensione del buffer stesso. I costi di buffer sono calcolati come prodotto tra un costo variabile e il tempo di permanenza nel buffer. Maggiore è la necessità di rendere indipendenti le macchine più conveniente è sfruttare il buffer, che però costerà tanto più in misura alla durata della permanenza del pezzo. Quindi si determinano due forze una legata ai costi di macchina libera, l'altra ai costi di mantenimento a buffer.

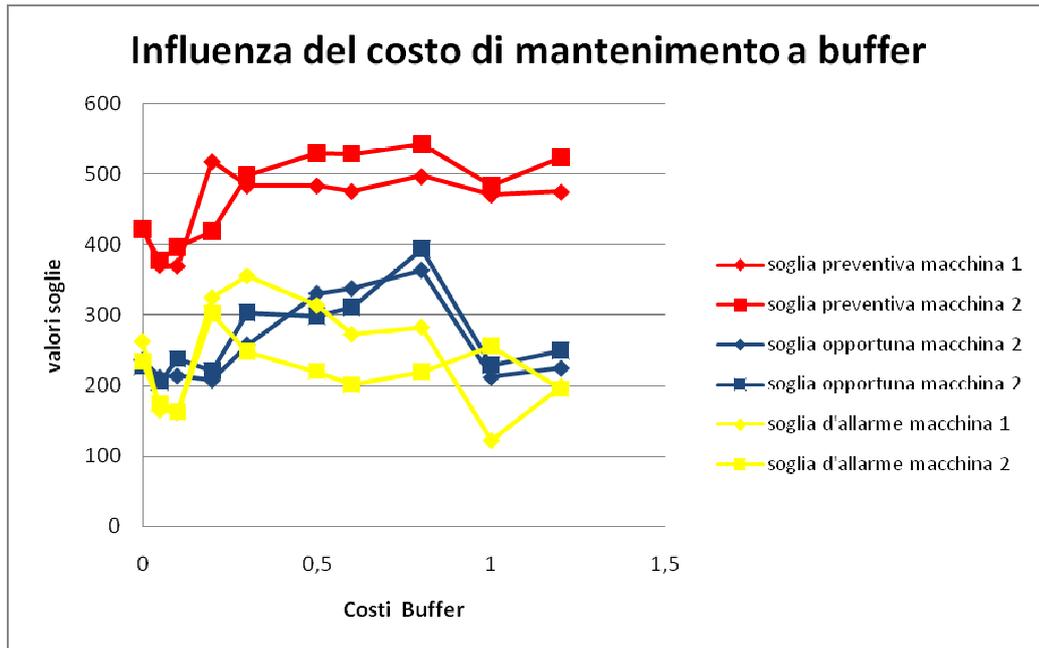
Nel grafico di Figura 4.17 si nota, come si poteva facilmente intuire, che all'aumentare di  $c_{buff}$  la dimensione di quest'ultimo decresce fino ad annullarsi in quanto si perde la convenienza a tenere un buffer interoperazionale.



**Figura 4.17: dimensione ottima del buffer al variare di  $c_{buff}$**

In tale grafico si nota che all'aumentare dei costi di buffer i costi totali dapprima rimangono pressoché costanti dopodiché si ha un "salto" dei costi totali (con  $c_{buff}=0,2$ ) e poi si mantengono più o meno costanti intorno a questo nuovo valore (più alto del precedente). Ciò può spiegarsi col fatto che, poiché il "salto" dei costi totali coincide con una drastica riduzione della dimensione del buffer, i costi di macchina libera aumentano facendo lievitare i costi totali.

Infine analizziamo l'influenza dei costi di buffer sulle soglie di allarme, di manutenzione opportuna e di manutenzione preventiva; il tutto è riportato nel grafico di Figura 4.18.



**Figura 4.18: andamento delle soglie al variare di  $c_{buff}$**

In primis si evidenzia che le diverse soglie hanno un andamento molto simile per le due macchine in particolare, dal grafico, si nota che l'andamento della soglia di allarme prima decresce poi, una volta raggiunto un minimo con costi di buffer pari a 0,1, cresce (in  $c_{buff}=0,2$ ) dopodiché rimane pressocché costante con una tendenza a decrescere. È da notare inoltre che la soglia di manutenzione preventiva presenta lo stesso andamento.

Per quanto concerne invece la soglia di manutenzione opportuna il grafico mostra che quando la dimensione del buffer è nulla, in corrispondenza di  $c_{buff}=1$  e 2, la differenza tra la soglia di manutenzione preventiva e quella di manutenzione opportuna è massima; ciò significa che si fa più opportuna. Questo perché, essendo in assenza di buffer, il sistema in serie è rigidamente connesso e perciò più sensibile ai fermo macchina.

Lanciamo le simulazione per riscontrare e valutare dai report, che Arena restituisce, quali sono gli interventi che avvengono sull'impianto. Riteniamo opportuno non impostare un unico valore per tipologia di soglia valido su entrambe le macchine, in questo modo potremmo annullare l'effetto del buffer di dividere la serie. Un ulteriore input da dare alla simulazione riguarda la dimensione del buffer.

**Tabella 4.23: valori delle soglie e della dimensione del buffer utilizzati per le simulazioni al variare di  $c_{buff}$**

CBUFF	0		0,5		1	
	1	2	1	2	1	2
macchina						
soglia di preventiva	424	423	484	530	471	485
soglia di opportuna	236	227	331	299	212	229
soglia d'allarme	263	234	314	220	122	256
buffer	108		16		1	

Sono state scelte oltre alle configurazioni ai limiti, cioè con buffer a costo nullo e buffer a capacità nulla, una configurazione intermedia.

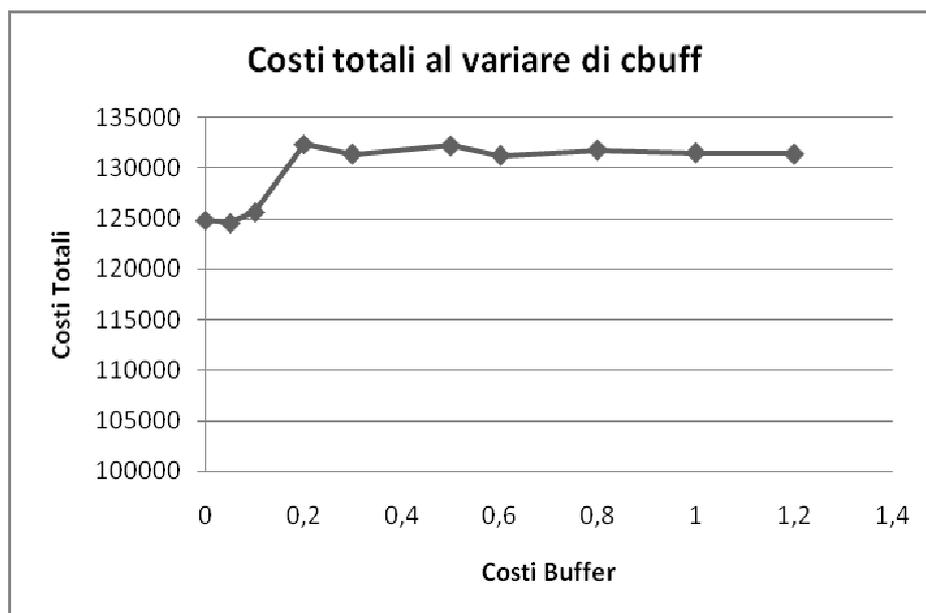
I report di Arena hanno restituito i dati sintetizzati in Tabella 4.24.

**Tabella 4.24: risultati ottenuti al variare di  $c_{buff}$**

CBUFF	0	0,5	1
numero di guasti	3/3	3/4	3/3
numero di interventi preventivi	34/34	28/32	32/32
numero di interventi opportuni	3/3	3/4	4/5
numero di ispezioni	77/76	76/74	78/78
%macchina occupata	95,4	95,2	95,1
<b>COSTI TOTALI</b>	116453	119794	119497

I dati relativi al numero di interventi sono espressi per la singola macchina. I risultati ottenuti mostrano un numero di guasti che rimane pressoché costante intorno al valore 3 nonostante la soglia di preventiva assuma valori decrescenti all'aumentare di  $c_{buff}$ . Il numero di guasti è tenuto basso mediante l'intervento sulle macchine con manutenzione opportuna. I costi totali rispettano l'andamento di quelli ottenuti con Optquest. Il dato più significativo riguarda il tempo di macchina occupata, quindi in lavorazione, espresso in percentuale. La presenza del buffer diminuisce l'indisponibilità delle macchine, la variazione, seppur minima, della percentuale mostra come la presenza del buffer permetta alle macchine di lavora sebbene l'altra sia ferma.

L'influenza dei costi di buffer sui costi totali si può vedere nel grafico di Figura 4.19.



**Figura 4.19: andamento del minimo costo di manutenzione al variare di  $C_{buff}$**

I costi totali aumentano all'aumentare del costo di buffer fin quando la dimensione di questo si annulla arrendendosi su un valore quasi costante

#### **4.3.6 Influenza del numero di macchine**

La procedura seguita per ricercare i valori ottimi da attribuire alle soglie che minimizzano il costo totale di manutenzione ha imposto di fissare il numero di macchine che compongono la serie, la dimensione del buffer, la struttura dei costi e i parametri delle lavorazioni. Individuati i parametri significativi, per tutte le ottimizzazioni abbiamo fissato il numero di macchine e sono stati fatti variare i parametri, uno per volta, per comprenderne l'influenza sulle soglie e avere una sintesi della migliore politica manutentiva per le diverse configurazioni del modello.

È interessante capire l'influenza del numero di macchine che caratterizzano il modello sul comportamento delle soglie.

È ragionevole pensare che il posizionamento delle soglie cambia all'aumentare del numero di macchine, questo perché con macchina singola non ho costi di macchina libera dovuti a manutenzione, al crescere di  $n$  aumentano invece i costi indotti. Più volte è emerso come i costi indotti influenzano le soglie: in maniera

diretta sulla soglia di opportuna, indirettamente su preventiva ed ispezione per evitare i guasti.

L'input delle ottimizzazioni è quindi  $n$ , per cui costruisco di volta in volta il modello col numero di macchine necessarie. Dal punto di vista costruttivo le modifiche da apportare sono significative, ma banali, infatti basta aggiungere o eliminare le parti che simulano il comportamento di una macchina per adeguare la logica della produzione, e nella logica della manutenzione modificare il numero di entità. La costruzione del modello con macchina singola, è avvenuta a parte, anch'essa senza troppe difficoltà. Certamente quest'analisi ha mostrato anche la semplicità di adattamento del modello a diverse configurazioni.

Dobbiamo determinare quali configurazioni dare al modello come input delle ottimizzazioni. La scelta degli input è obbligata dal tempo necessario per ogni ottimizzazione, maggiore è il numero di macchine in serie più ampio è il tempo per una singola simulazione. Al crescere di  $n$  aumentano il numero di variabili sotto controllo e quindi il numero di simulazioni necessarie perché l'ottimo trovato abbia significato.

Abbiamo scelto di simulare un numero massimo di macchine in serie pari ad "otto", l'ottimizzazione è stata caratterizzata da 24 variabili di controllo, alle quali il manuale di Optquest consiglia di associare un numero di simulazioni pari a 2000. Di conseguenza abbiamo escluso ottimizzazioni con  $n$  superiore ad "otto".

Gli altri input scelti sono stati:

$n=1$

$n=2$

$n=4$

Un sistema caratterizzato da una sola macchina da mantenere sceglierà tra le due sole tipologie di intervento correttivo o preventivo. Con macchina singola, la soglia di opportuna è fatta coincidere, per convenzione, con quella della preventiva. Non potevamo però rinunciare a capire cosa, con questa particolare configurazione, la manutenzione deve fare per impedire la rottura.

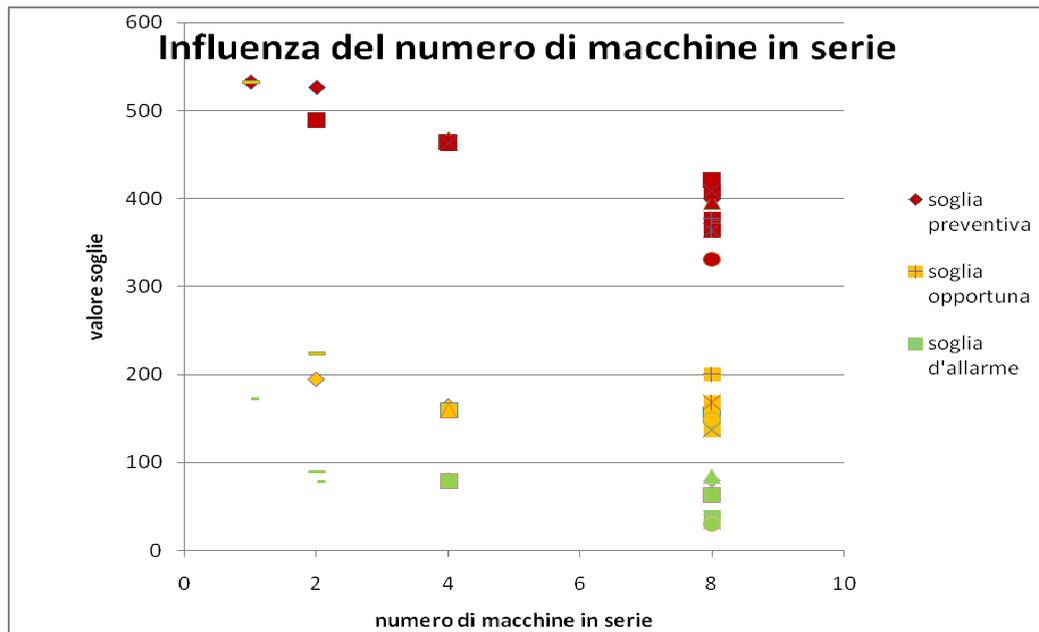
Ogni ottimizzazione ha restituito un numero di risultati dipendente dal numero di macchine in input. Ogni macchine è caratterizzata da tre sogli di manutenzione, per  $n=1$  abbiamo 2 sole soglie fino ad un numero massimo di soglie (24) nel caso in cui  $n=8$ . La tabella riassuntiva dei risultati è costruita in maniera diversa, per ogni riga sono compilate le opportune caselle, come mostrato in Tabella 4.25.

**Tabella 4.25: risultati delle ottimizzazioni al variare di  $n$**

1	sc1								sc2=sc1								sc3							
	532								532								172							
2	sc1,1				sc2,1				sc1,2				sc2,2				sc1,3				sc2,3			
	526				489				224				194				78				89			
4	sc1,1	sc2,1	sc3,1	sc4,1	sc1,2	sc2,2	sc3,2	sc4,2	sc1,3	sc2,3	sc3,3	sc4,4	sc1,1	sc2,1	sc3,1	sc4,1	sc1,2	sc2,2	sc3,2	sc4,2	sc1,3	sc2,3	sc3,3	sc4,4
	464	464	468	463	159	164	159	159	80	83	80	79	464	464	468	463	159	164	159	159	80	83	80	79
8	sc1,1	sc2,1	sc3,1	sc4,1	sc5,1	sc6,1	sc7,1	sc8,1	sc1,2	sc2,2	sc3,2	sc4,3	sc5,2	sc6,2	sc7,2	sc8,2	sc1,3	sc2,3	sc3,3	sc4,3	sc5,3	sc6,3	sc7,3	sc8,3
	399	421	396	408	364	331	377	373	148	160	154	149	137	168	149	200	67	59	79	63	84	32	37	30

La simulazione lanciata con numero di macchine pari ad otto è durata circa tre giorni, nel caso di macchina singola circa un'ora. Già dai risultati si notano differenti comportamenti delle soglie, quindi effettivamente il numero di macchine restituisce significative differenze di comportamento.

È evidente che in questo caso non è possibile costruire un grafico che riporti mediante delle curve il comportamento delle soglie. Nel primo caso abbiamo due sole variabili, nell'ultimo caso le variabili diventano ventotto. Riportiamo i punti in un grafico "a dispersione" fornitoci da Excel, distinguendo le tre tipologie di soglie con gli usuali colori rosso giallo e verde.



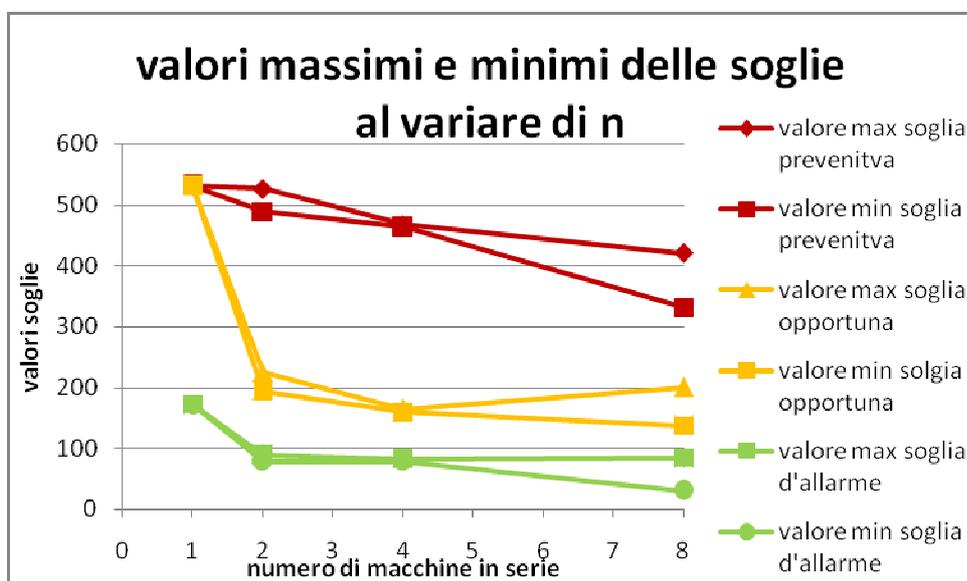
**Figura 4.20: andamento delle soglie al variare di  $n$**

La particolare struttura dei costi rende subito conveniente intervenire ad impianto fermo anche sulle macchine che non sono in manutenzione. Già con due macchine la distanza tra le soglie di preventiva e le soglie di opportuna è considerevole, e il sistema effettua anche manutenzione opportuna. Dall'analisi dei costi di macchina libera è emerso che  $c_{m\text{lib}}=100$  u.m. è un costo abbastanza alto per la mancata produzione, all'aumentare del numero di macchine aumenta l'incidenza dei tempi di fermo per cui è sempre più conveniente effettuare manutenzione preventiva. Dal grafico, questo comportamento è scarsamente evidente quando  $n=8$ .

Diversamente dalla soglia opportuna le soglie di preventiva e di allarme si spingono verso il basso. L'ispezione diventa più frequente per conoscere meglio lo stato delle macchine, gli interventi preventivi occorrono al raggiungimento di una condizione sempre più bassa per evitare fermate troppo lunghe.

Sul comportamento della soglia preventiva intervengono anche le interazioni che si creano con le altre soglie. Interventi di manutenzione opportuna e maggior numero di ispezioni tendono ad alzare il posizionamento della soglia preventiva, per motivi già ampiamente discussi. L'aumento del numero di macchine, d'altra parte, aumenta la sensibilità dei costi alla mancata produzione, quindi l'azione preventiva è sfruttata in misura maggiore.

Per rendere più chiaro il comportamento delle soglie mediante le curve costruiamo un grafico che riporti gli andamenti dei valori massimi e dei minimo in funzione del numero di macchine.

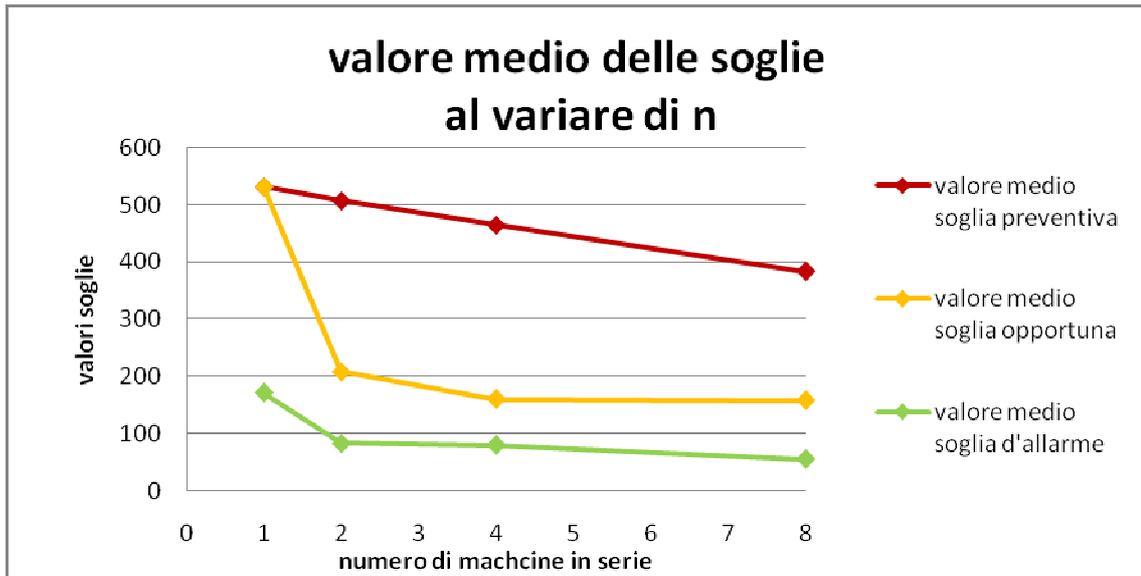


**Figura 4.21: andamento dei valori max e min delle soglie al variare di n**

Le curve hanno tutte andamento decrescenti, ad eccezione del valore massimo della soglia opportuna. La discesa è molto evidente col passaggio da una macchina a due. Con la costruzione della serie si generano situazioni di macchina libera che il sistema di manutenzione vuole evitare.

Le soglie rappresentano i range di appartenenza dei risultati per cui è conveniente farne un'analisi per range di appartenenza. L'analisi dell'andamento dei valori delle soglie, massimi e minimi, confermano quanto scritto. Con otto macchine in serie, però, le soglie di opportuna e di allarme mostrano una tendenza ad arrestarsi, in particolare i valori minimi si abbassano ulteriormente mentre i valori massimi non confermano questa tendenza.

L'analisi dei massimi e dei minimi valori assunti dalle soglie può non rimanere influenzata da punti singoli, infatti su un numero di macchine elevato aumenta la possibilità che si presentino minime divergenze. L'analisi dei valori medi ci aiuta ad indagare meglio sulle tendenze delle curve



**Figura 4.22: andamento del valore delle soglie al variare di  $n$**

Le curve dei valori medi delle soglie confermano la tendenza a scendere della soglia d'allarme e non mostrano una visibile differenza nei valori assunti dalla soglia di opportuna. Nella Tabella 4.26 sono riportati gli effettivi valori medi delle soglie, distinti per le diverse configurazioni del modello.

**Tabella 4.26: valori medie delle soglie**

numero di macchine	smpre	smopp	Small
1	532	532	172
2	507,5	209	83,5
4	464,75	160,25	80,5
8	383,625	158,125	56,375

Dalla tabella è evidente che anche la soglia di opportuna ha una tendenza a scendere, ma la discesa è pressoché nulla.

Le simulazioni chiariscono quali tipi di intervento e in che misura occorrono all'impianto per determinare il minimo costo di manutenzione, riportiamo in Tabella 4.27 il numero di interventi per singola macchina per facilitare il confronto dei dati.

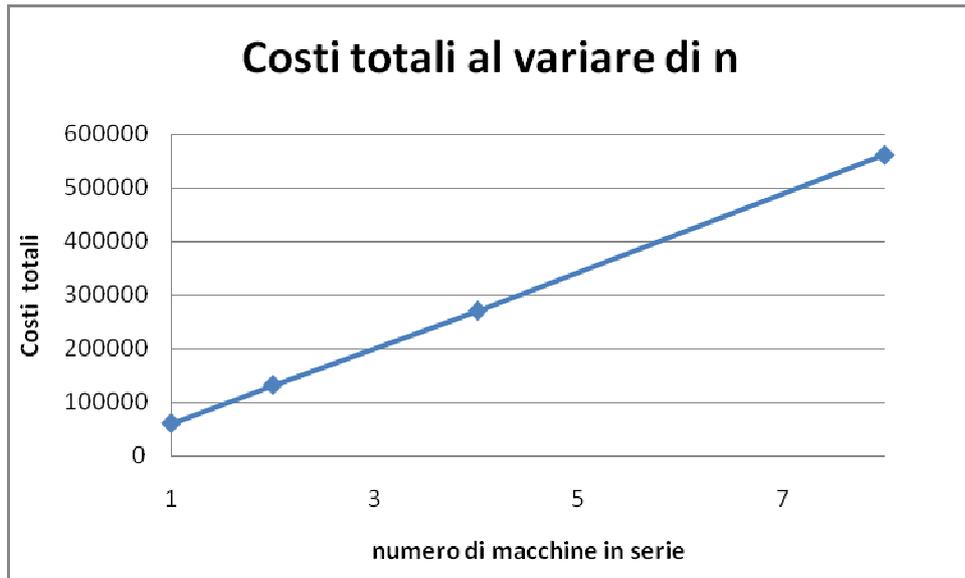
**Tabella 4.27: risultati ottenuti al variare di  $n$** 

NUMERO DI MACCHINE	1	2	4	8
numero di guasti	6,66	6,8	3,75	2,8
numero di interventi preventivi	32	26,3	26	19
numero di interventi opportuni	0	7	12,5	20
numero di ispezioni	38	78	80,5	76,7
%macchina occupata	95,8	94,3	94	92
<b>COSTI TOTALI</b>	63916	137667	265505	548651

Le simulazioni mostrano che all'aumentare del numero di macchine che compongono la serie le soglie ottime riducono il numero di guasti per macchina e, come ci aspettavamo, aumenta il numero di ispezioni. Con  $n=1$  la soglia opportuna è assente e questo giustifica il numero di interventi preventivi maggiori. Gli interventi di manutenzione opportuna crescono all'aumentare di  $n$ , assumendo maggior peso con  $n=8$ . Un dato importante che emerge dalle simulazioni riguarda gli interventi preventivi, infatti, seppur la soglia di preventiva mostra un andamento decrescente, questi si riducono al crescere di  $n$ . Ciò che emerge con chiarezza è che al crescere di  $n$  aumenta il peso dei costi di macchina libera per cui si determinano soglie che tendono a ridurre il numero di guasti.

Con  $n=8$  in media vengono effettuati circa 20 interventi opportuni per macchina, valore quasi doppio rispetto al numero di interventi con  $n=4$ , al contrario il numero di interventi preventivi diminuisce nonostante la soglia si alzi, con  $n=8$  il sistema manutenzione effettua meno preventiva rispetto all'opportuna. Ci chiediamo allora perché la soglia di preventiva è così bassa? In effetti questa va analizzata in relazione a quella opportuna: la soglia di preventiva evita l'evento guasto e per riuscire deve posizionarsi su un valore basso, la soglia di opportuna molto bassa determina azioni di manutenzione opportuna alla fermata dell'impianto, quindi con la soglia di preventiva bassa si evita il guasto con quella opportuna anch'essa bassa si evita la manutenzione in momenti diversi.

Inseriamo il grafico dell'andamento del costo totale per i diversi valori di ottimo, è ovvio che questo costo sia crescente al crescere di  $n$ .



**Figura 4.23: andamento del minimo costo totale al variare di  $n$**

Il grafico mostra che il costo totale è direttamente proporzionale alla numerosità della serie, consultando la Tabella 4.28 è evidente che non è proprio questa la tendenza e il motivo è legato ai costi di macchina libera.

**Tabella 4.28: minimo costo totale di manutenzione al variare di  $n$**

numero di macchine	costo totale
1	61205
2	132269
4	270108
8	561264

## **APPENDICE A: UN'APPLICAZIONE SU UNA LINEA SMT (SURFACE MOUNT TECHNOLOGY)**

### **Premessa**

Lo scopo del lavoro è il miglioramento della resa produttiva di una linea di macchine Pick and Place (P&P) caratterizzate da un elevato valore dei componenti base da montare e quindi dalla necessità di rilavorare gli eventuali scarti per difettosità di montaggio, con conseguenti elevati costi di rework. In letteratura scientifica esistono modelli di calcolo delle rese basati sulla probabilità di vari fattori di incidere sulla resa stessa. I vari studi sperimentali condotti in tal senso hanno avuto esiti non positivi, non essendo stato individuato un parametro tecnico ricavabile che illustri in modo affidabile lo stato attuale delle macchine, che risulti quindi correlato con la difettosità rilevabile a valle della linea. In questo lavoro, quindi, si propone un modello simulativo di manutenzione su condizione, che consenta di stabilire quando è conveniente economicamente intervenire per effettuare la manutenzione preventiva sulla linea in funzione dell'andamento degli scarti nel tempo. Il modello è del tipo multithreshold, nel senso che tiene conto anche della possibilità, una volta arrestato l'impianto, di effettuare manutenzione opportuna anche su altre macchine oltre quella che ha raggiunto il limite di manutenzione preventiva. Il modello proposto ha dimostrato di poter migliorare l'efficienza della linea sia rispetto all'attuale gestione basata sull'esperienza sia rispetto ad un modello di gestione basato sull'ottimizzazione delle rese diffuso in letteratura scientifica.

La linea studiata è costituita da cinque macchine Pick & Place (P&P): le prime tre hanno uguale configurazione, montano tutte due teste a revolver da dodici segmenti. La quarta, invece, anch'essa una S25, monta una testa a dodici segmenti come le precedenti, ed una testa da sei segmenti. Infine abbiamo la F5,

che porta un testa da sei segmenti ed una testa IC, che effettua un solo montaggio per ogni ciclo di prelievo e posizionamento, adatta ai componenti di maggiori dimensioni. Ognuna di queste macchine ha due portali, in ognuno dei quali sono montati i feeder che forniscono i componenti: questi sono riuniti in banchi, che vengono sostituiti in caso di cambio prodotto.

Come solitamente accade in questo tipo di lavorazioni, una quota significativa dei costi è rappresentata dal costo delle rilavorazione, dato l'alto numero di componenti montati ed il fatto che anche uno solo di essi che risulti mancante o mal posizionato possa pregiudicare il funzionamento del prodotto: le saldature mancanti, rilevate alla stazione X-Ray o nei successivi controlli, l'In Circuit Test od i successivi controlli funzionali, devono essere realizzate a mano da un operatore, cosa che richiede un tempo molto maggiore di quello occorrente per le saldature effettuate correttamente sulla linea. Se un componente risulta disallineato, è necessario prima dissaldarlo e poi risaldarlo correttamente.

Per questi motivi è fondamentale contenere il tasso di difettosità delle P&P: Lo scopo che ci si è prefissati è di introdurre ed ottimizzare una politica manutentiva secondo condizione sulla serie di P&P della linea.

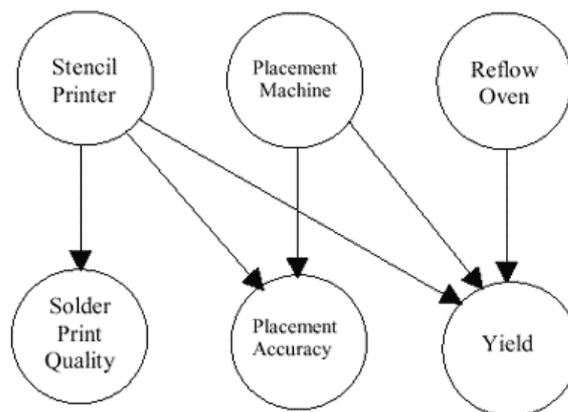
Attualmente, questa dovrebbe essere mantenuta, secondo le prescrizioni del produttore dei macchinari, su base temporale. Le basse rese della linea inducono però frequenti interventi non programmati: tali interventi, in mancanza di rilevazioni e criteri prefissati, si affidano unicamente ad una valutazione del personale in base all'esperienza e all'analisi di campioni di dati limitati e raccolti in modo estemporaneo, allorquando una resa particolarmente bassa pone in allarme. La resa però è funzione di molte variabili, dell'intera linea, non essendo presenti al momento test intermedi. Ciò dà luogo ad interventi non sempre correttamente mirati, e quindi ci si è posti l'obiettivo di individuare dei parametri, monitorando i quali sia possibile valutare l'opportunità o meno dell'intervento. Essendo le macchine P&P strumenti altamente complessi e sofisticati, essi forniscono una notevole quantità degli output più diversi; non è però problema di semplice soluzione il trarre da questa gran quantità di informazioni un dato realmente significativo. Individuati i parametri, naturalmente, sarà anche necessario valutare per ognuno di essi la soglia oltre cui è opportuno intervenire: questa sarà naturalmente espressione di un trade off, un compromesso fra il

sostenere i costi derivanti dall'intervento, sia diretti che di mancata produzione, e il sopportare i costi legati alla difettosità, essenzialmente il costo delle necessarie operazioni di rilavorazione.

### **Stato dell'arte**

Il tema della resa di una produzione SMT e il costo delle conseguenti rilavorazioni è molto rilevante in termini economici, e come tale ampiamente analizzato: in particolare, confacenti ai nostri scopi risultano essere le ricerche effettuate da Kamen, Goldstein ed altri [7] e [9]. Il loro scopo è in un caso analizzare le relazioni intercorrenti fra le variabili di un processo SMT ed il suo yield, nell'altro più specificatamente l'analisi dei fattori che causano errori di piazzamento in un processo SMT.

Tale approccio si basa sul concetto di una rete probabilistica che definisca le relazioni di causa ed effetto fra lo stato dei macchinari e misure quantitative come la qualità della deposizione della pasta saldante, la precisione nel piazzamento dei componenti, e lo yield. La forma generale di questa rete probabilistica è mostrata in figura.



**Rete probabilistica dello yield**

I nodi superiori rappresentano lo stato dei macchinari, quelli inferiori quantità che possono essere misurate; le frecce rappresentano relazioni di causa ed effetto. Per tale rete, l'obiettivo è dedurre lo stato dei macchinari sulla base di misurazioni relative alle tre grandezze indicate. Per ottenere ciò, è necessario che

siano determinate a priori varie probabilità condizionate: in particolare, è necessario sapere che effetto hanno i vari stati di guasto dei macchinari sulla qualità della serigrafia, sul piazzamento e sulla resa. Per ottenere ciò, si effettuano misurazioni mentre le macchine operano nei vari possibili stati di guasto. Tali prove sperimentali sono state effettuate per l'appunto su macchine Siplace analoghe a quelle a nostra disposizione. Fino ad ora, sono stati analizzati:

- Offset intenzionale imposto sulle P&P, corrispondente ad un errore di calibrazione
- Altezza e volume dei pads
- Valore del vuoto nel nozzle nell'intervallo di funzionamento

Posti in relazione con l'accuratezza nel piazzamento dei componenti, solo il primo di questi ha evidenziato una significativa correlazione. È significativo invece notare come non risulti correlazione fra la qualità della serigrafia, che come visto si valuta misurando il volume o l'altezza della pasta deposita sulla scheda attraverso sistemi di ispezione ottica, ed il posizionamento dei componenti sulla scheda: tale aspetto infatti ci consente di imputare unicamente alla prestazione delle P&P la qualità del piazzamento dei componenti, trascurando ovviamente cause accidentali come il distacco di un componente causa manipolazione, di scarsa rilevanza.

Le Siplace forniscono una serie di parametri relativi al loro funzionamento: in particolare, registrano le differenze di pressione in presenza ed in assenza del componente sul nozzle (la pipetta che va montata sul segmento a seconda del componente da montare); in caso tale differenza risulti troppo bassa tre volte di seguito, la macchina si arresta: comunque, tipicamente, la macchina viene riavviata dall'operatore senza alcun intervento. In ogni modo, problemi di questo tipo sembrano principalmente correlati a problematiche connesse con gli stessi nozzle, che vanno sostituiti ad ogni cambio prodotto e vengono puliti ad ogni cambio turno. Un altro dato raccolto è quello degli scarti componente, che è rappresentato dagli scarti effettuati dalla macchina quando un componente prelevato non è riconosciuto, e quindi viene depositato nell'apposita vaschetta. Questo problema, che pur rappresenta una fonte di costo rilevante, è già stato analizzato dall'azienda, ed appare collegato non già ad errori delle siplace ma

piuttosto dei feeder che le alimentano, che difatti vengono monitorati e sostituiti qualora nel turno la loro percentuale di scarto superi l'uno per cento. Un fattore che appare invece significativamente correlato con gli errori di posizionamento delle P&P, dallo studio di Goldstein, Kamen, Asarangchai illustrato in precedenza, ed effettuato sperimentalmente su macchine appunto Siplace serie S, è quello del segment offset: è parso naturale quindi cercare di monitorare il suo valore, per trarne informazioni circa lo stato di funzionamento della macchina. Purtroppo ciò non è stato possibile: i valori dei segment offset di ogni macchina sono accessibili in modalità manutentori attraverso il software Sitest delle siplace[10]; il valore del segment offset è però misurato in seguito alla calibrazione di una testa, o di un singolo segmento, che viene effettuata dopo che questa sia stata smontata e pulita. Qualora questo parametro risulti al di fuori di un range prefissato, la calibrazione viene ripetuta. Appare quindi chiaro come questo parametro non possa darci alcuna informazione circa lo stato della macchina, giacchè questo viene misurato solo in seguito ad un intervento manutentivo che altera lo stato stesso: lo studio citato, d'altronde era teso a correlare il segment offset con il placement offset, in modo da darne una valutazione indiretta. Purtroppo però, su questa linea noi non disponiamo di uno strumento AOI in grado di fornirci una misura del placement offset in uscita dalle P&P: le sole informazioni le otteniamo dalla stazione X-ray, peraltro attualmente non in linea, e successivamente dall'ICT.

### **L'approccio proposto**

Nessuno dei dati forniti appare essere un buon parametro di funzionamento delle P&P: i dati tecnici forniti dalle macchine non appaiono correlati con la bontà della performance, come d'altronde risulta dai vari studi in materia, sia di origine accademica che industriale. La volontà quindi di introdurre una politica CBM basata su uno o più parametri tecnici da monitorare risulta quindi frustrata, non essendo possibile individuare uno stressor confacente allo scopo.

D'altro canto, perseguire una politica manutentiva su base temporale non appare adeguato, visti gli scarsi risultati ed i continui interventi non programmati che si impongono attualmente. Tali interventi sono decisi valutando, in maniera oltretutto non sistematica, la resa per prodotto: ma questa, oltre ad essere

influenzata dalle differenze fra questi che montano, come detto in precedenza, quantità ben diverse di componenti, è influenzata dagli errori generati sull'intera linea, e non solo sulle P&P. Delle tipologie di errore presenti nella tabella di troubleshooting della linea SMT,

- Open
- Solder balls
- Saldatura fredda / voids
- Corti
- Componente mancante o disallineato

solo l'ultima appare causato da errori delle macchine P&P. Inoltre, come detto in precedenza, tali difetti risultano per la quasi totalità imputabili ad un errore delle P&P.

Si è ritenuto quindi di ricavare un ulteriore indice, in termini di Difetti Per Milioni di Opportunità (DPMO). In tal senso, si sono presi in considerazione soltanto i difetti da componente mancante o disallineato, rilevabili dai report dell'analisi Abc dei difetti.

Effettuata quindi la scrematura dei difetti, va considerato il numero di opportunità di generare un difetto, che varia da scheda a scheda in ragione dei componenti previsti su ognuna. Inoltre, bisognerà attribuire ogni difetto alla macchina, delle cinque della serie, che lo ha generato, volendo noi programmare interventi mirati sulla singola macchina e non sull'intera linea. Le informazioni necessarie sono state reperite accedendo ad i file di montaggio NC: sono questi i file che riportano la sequenza di montaggio di ogni singolo prodotto. Sono caricati sul computer di linea, e programmano l'attività delle P&P, indicando per ognuna di esse la sequenza esatta, per ogni componente il segmento che lo monta, il relativo portale e la macchina, la posizione, ricavata dal file CAD della scheda, ed anche il set di nozzle che è previsto per ogni testa per quel prodotto.

Da questi file abbiamo ricavato:

- Il numero dei montaggi effettuati da ogni macchina, per ogni prodotto
- Per ogni componente mancante o disallineato, la macchina deputata a montarlo

Le informazioni riguardo al tempo di lavorazione, li ricaviamo invece dai file, relativi ad ogni P&P, che riportano i dati relativi ad ogni macchina, i tempi di running, di attesa, di fermo e l'indicazione del prodotto processato

Attraverso un foglio excel abbiamo ricavato i DPMO quotidiani delle cinque macchine, basati su campioni di dimensione e composizione variabile dei quattro prodotti principali della linea. La formula utilizzata è la seguente:

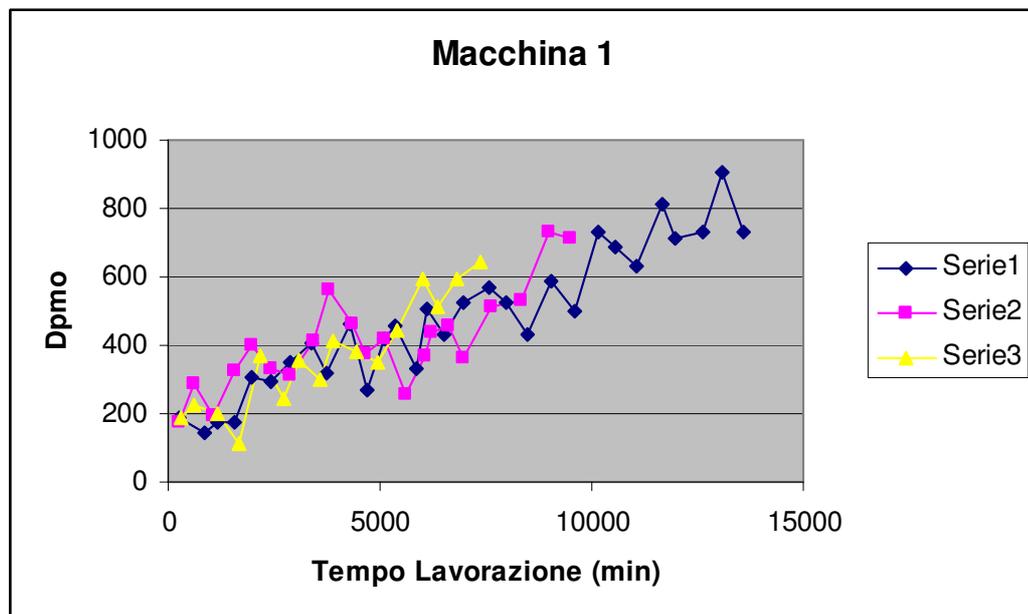
$$Dpmo = \frac{E}{\sum_i C_i \cdot N_i} \times 10^6$$

Dove

E = numero di errori commessi dalla macchina nel campione ispezionato

C<sub>i</sub> = numero di componenti per scheda del prodotto i

N<sub>i</sub> = numero delle schede del prodotto i nel campione



**DPMO per macchina 1**

I dati così ottenuti sono stati raccolti in un'altra tabella, in cui per ogni giorno abbiamo, per ogni macchina, il tempo di lavorazione in minuti, la funzione cumulata dei tempi di lavorazione a partire dall'ultima manutenzione considerata (con riferimento ad interventi di pulizia e calibrazione delle teste a revolver), e il

DPMO. Abbiamo così ricavato per ogni macchina più serie di dati, che ci mostrino come varia il DPMO all'aumentare del tempo effettivo di lavorazione. I dati a nostra disposizione sono limitati, comunque da essi appare evidente una deriva delle prestazioni, come si può notare dai grafici ricavati, di cui riportiamo quello relativo a macchina 1.

Individuato il parametro in base a cui valutare l'opportunità o meno dell'intervento manutentivo, ciò che occorre fare è determinare le soglie di intervento: a tal scopo, si è deciso di realizzare un modello simulativo della serie P&P e della relativa attività di manutenzione. Fatto ciò, sarà possibile ottimizzarlo andando ad ottimizzare la funzione obiettivo comprensiva dei costi della manutenzione, della mancata produzione e delle perdite legate alla difettosità. Si è quindi scelto di utilizzare per rappresentare il nostro sistema un simulatore ad eventi, Arena.

Un modello che sia adeguato ai nostri obiettivi necessita di due aspetti fondamentali: dovrà simulare il funzionamento della linea produttiva, con entità il cui flusso attraverso i moduli rappresenti il flusso delle PCB fra le P&P, registrandone il degrado delle prestazioni; dovrà altresì contestualmente simulare anche il processo manutentivo, giacché i due processi sono interrelati: il DPMO, fattore nella scelta di effettuare o meno la manutenzione, sarà dipendente dalle lavorazioni effettuate dalle varie macchine nel processo produttivo, mentre tali manutenzioni influiranno sulla disponibilità o meno a produrre delle macchine stesse.

In sostanza, si è deciso di utilizzare il modello descritto in questa tesi, opportunamente adeguato e esemplificato, per ottimizzare gli interventi di manutenzione sulle macchine, adottando quale parametro di usura indiretto il livello di non conformità misurate con i DPMO.

### **La simulazione**

Una volta effettuata la modellazione strutturale del modello, è stato necessario procedere alla modellazione quantitativa, determinando i parametri e le distribuzioni opportune per simulare i processi della linea P&P che vogliamo rappresentare. In particolare, abbiamo bisogno di:

#### **1. Tempi**

- di produzione, per tutti i prodotti su ogni macchina
- di setup
- di manutenzione, per tutte le macchine
- di ripristino in caso di fermo macchina

## 2. Costi

- di manutenzione
- di rework

## 3. Valore generato per ogni prodotto

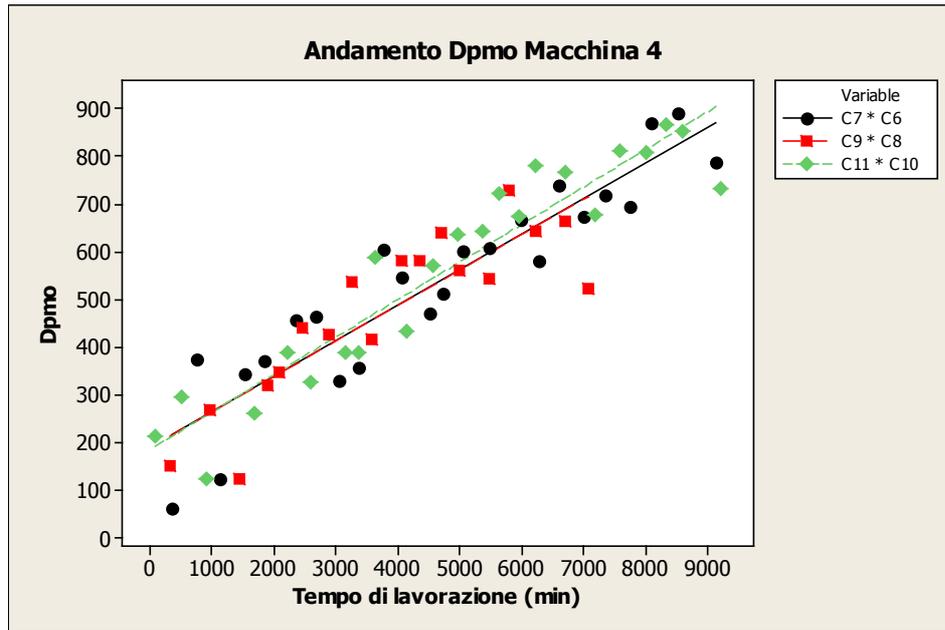
## 4. Variazioni dei DPMO

## 5. Risorse

## 6. Buffer

Per analizzare i dati raccolti e trarne le distribuzioni da porre nel modello, sono stati utilizzati il software Minitab ed un componente di Arena, l'Input Analyzer, che può essere utilizzato per determinare la qualità dell'adattamento di una determinata funzione di distribuzione di probabilità ai dati, effettuando a tal scopo i test del Chi quadrato e di Kolmogorov - Smirnov.

Uno dei fattori più significativi del modello è dato da come sono rappresentate le variazioni dei nostri indici DPMO in quanto su questo parametro si baserà l'attività decisionale che ci interessa: ciò cui siamo interessati è una funzione aleatoria che descriva gli incrementi del DPMO in funzione del tempo di lavorazione per ogni macchina. Per determinare queste funzioni, si è proceduto nel seguente modo:



**DPMO macchina 4**

In primo luogo, si è osservato che in seguito ad intervento di pulizia e calibrazione dei segmenti i valori di DPMO non apparivano comunque tendere a zero, bensì ad un valore comunque significativo, simile dopo ogni intervento.

Non potendo ovviamente noi avere i valori di DPMO al tempo di produzione zero, ma solo dopo una giornata lavorativa (la giornata lavorativa è stata da noi scelta come unità base per la valutazione dei DPMO; producendo infatti la linea poche centinaia di schede al giorno, un intervallo minore porterebbe ad un campione troppo limitato per trarne delle informazioni attendibili), si è operata una regressione lineare delle serie di dati a disposizione per stimare il valore del DPMO al tempo zero; si è così osservato che non vi erano notevoli differenze fra serie diverse su una stessa macchina, come si può vedere a titolo di esempio dal grafico relativo a macchina 4.

Si è quindi proceduto alla stima del valore cercato attraverso una regressione lineare della serie generalizzata dei dati di ogni macchina. I risultati mostrano valori analoghi di DPMO iniziale per le quattro Siplace S25 Hm, per cui si è deciso di porre per tutte queste il valore dato dalla media dei quattro trovati; differisce invece il valore per la macchina F5 Hm.

Continuiamo a mostrare i risultati relativi alla quarta macchina:

l'equazione di regressione determinata è:

$$\text{DPMO} = 186 + 0,0766 T$$

con un valore di  $R^2=84,9\%$ .

Il risultato medio delle prime quattro macchine è risultato essere 185, che è quindi il valore posto come DPMO dopo un intervento manutentivo. Per la quinta macchina tale valore è 450. Tali valore sono stati considerati deterministici e non aleatori in ragione della scarsa varianza nel campione a disposizione, della limitatezza del campione stesso, in particolar modo per macchina 5, ma soprattutto per la scarsa sensibilità dimostrata dal modello alla sua variazione nel campo dei valori riscontrati, verificata attraverso vari run di simulazione che non hanno mostrato differenze significative.

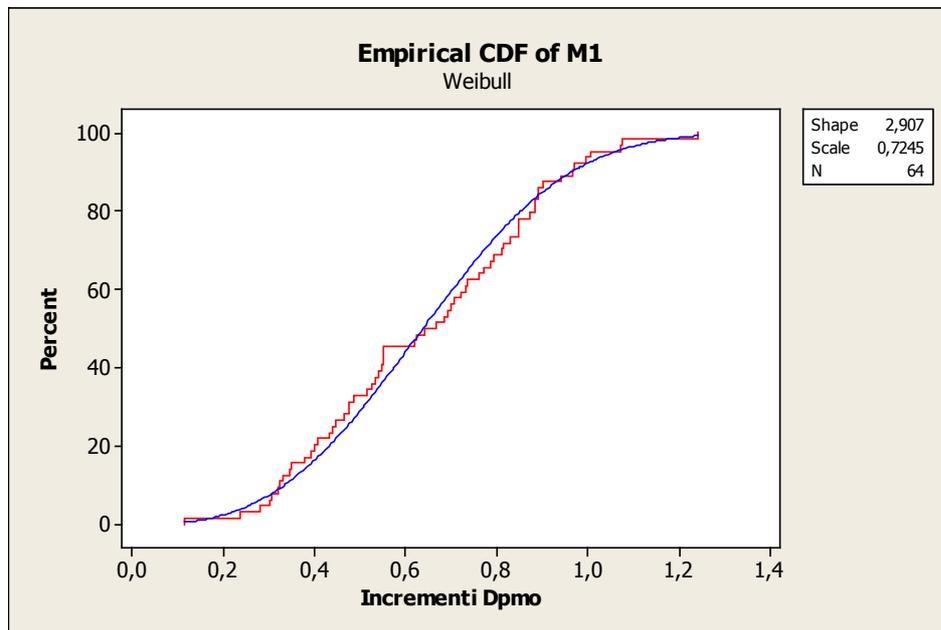
Determinato ora il valore iniziale, si sono raccolti in tabelle separate i dati relativi ad ogni macchina. Si sono poi ricavati da questa tabella i valori di incremento al minuto per ogni giorno, secondo la formula:

$$\frac{\text{Dpmo}_{k+1} - \text{Dpmo}_k}{T_{k+1} - T_k}$$

I valori così determinati sono stati poi analizzati attraverso l'Input Analyzer, per adattare loro una distribuzione: ne sono risultate, come vedremo, distribuzioni differenti, alcune Weibull altre Normali. Ciò è però forse dipendente dalla limitata dimensione del campione, non essendo possibile come detto recuperare informazioni antecedenti a quelle utilizzate: data la natura dei fenomeni responsabili del peggioramento delle prestazioni delle P&P, è presumibile che si riscontri un andamento normale. Ad ogni modo, abbiamo preferito mantenere le distribuzioni determinate con i dati a disposizione, quali esse siano.

A questo punto occorre una precisazione: come detto, i dati a disposizione sono il frutto della produzione giornaliera; la numerosità del campione è quindi variabile, e altrettanto variabile è il tempo effettivo di lavorazione intercorrente fra una rilevazione e l'altra. Il modo in cui abbiamo ottenuto i valori di incremento rapportati al minuto sottintende che noi supponiamo costante l'incremento

all'interno di ogni intervallo, rappresentante un giorno: la funzione risulterebbe infatti linearizzata a tratti.



**CDF per macchina 1**

Se però noi ponessimo le distribuzioni così ottenute nel nostro modello, Arena effettuerebbe un'estrazione casuale differente per ogni minuto o residuo: avremmo quindi centinaia di estrazioni al giorno, il che tenderebbe a darci un incremento quotidiano quasi costante in rapporto ai minuti lavorati, giacché l'incremento quotidiano medio convergerebbe stocasticamente alla media delle distribuzioni date.

Per riprodurre le condizioni reali su cui abbiamo determinato le nostre funzioni, facciamo sì che per ogni macchina Arena effettui ogni giorno una sola estrazione casuale dalle distribuzioni date: tale valore sarà l'incremento al minuto di quella giornata, in analogia al modo in cui abbiamo trattato i dati reali a disposizione.

Il costo derivante dalla rilavorazione delle schede difettose è dovuto essenzialmente al fatto che i componenti mancanti o disallineati dovranno essere, una volta individuati dall'X-ray ( e dopo che l'operatore abbia valutato la correttezza della chiamata, cosa che non sempre si verifica) saldati manualmente da un operatore. Non si considera il costo del componente, in quanto questo

avrebbe dovuto comunque essere già presente sulla scheda, quindi non rappresenta un extra-costo. Ciò che rimane quindi da valutare è il costo dell'operatore e della stazione per il tempo necessario alla correzione.

Il costo orario di esercizio della stazione di rework alla Nokia Siemens è da loro stimato con il valore di 78.65 €. Resta quindi da valutare il tempo medio impiegato a correggere un difetto, per ogni prodotto. La ditta ha raccolto i tempi di rework per ogni prodotto: questi però sono affetti da un numero differente di difetti per scheda. Per stimare i valori da noi cercati abbiamo semplicemente diviso il tempo medio di rework per il numero medio di difetti per scheda, sul dato delle sole schede difettose, naturalmente. Abbiamo così ottenuto un valore di tempo necessario a correggere un difetto per ogni prodotto: tale valore così ottenuto va però relazionato ai vari DPMO di ogni macchina.

#### Opportunità di errore per macchina e per prodotto

Prod.\macch.	M1	M2	M3	M4	M5
36	202	60	46	80	42
50	223	196	130	160	58
68	348	218	174	148	80
92	346	371	307	268	48

Abbiamo quindi costruito una matrice prodotto/macchina, in cui è riportato per ogni cella il numero corrispondente di componenti montati: sono quindi queste le opportunità che abbiamo di generare un difetto, non valutando noi all'X-ray l'effettivo funzionamento del componente ma solo il suo piazzamento. La formula per valutare i costi di rework sarà quindi:

$$\sum_m \sum_p \frac{C \cdot T_p \cdot N_p \cdot Dpmo_m \cdot Opp_{pm}}{10^6}$$

Dove:

C = costo orario di produzione

T = tempo di rework di un difetto, in ore

N = numero di schede prodotte

Opp = numero di componenti previsti  
m,p = indice di macchine, di prodotti

Una volta realizzato il modello, si è provveduto ad ottimizzarlo economicamente attraverso un altro tool di Arena, Optquest. Come controlli, ossia i valori che l'ottimizzatore andrà a variare, sono stati naturalmente scelti i valori delle soglie di manutenzione, opportuna e preventiva.

La funzione obiettivo, da massimizzare, è definita come Valore generato netto, data dalla differenza fra il valore generato lordo (ricavato dai dati SAP che calcolano il valore di ogni prodotto sulla base di un ciclo a zero difetti) ed i costi di rework e di manutenzione.

## **Risultati**

I risultati dell'ottimizzazione hanno dato una scarsa differenza fra i valori di soglia opportuna e preventiva, come è del resto comprensibile data l'irrilevanza dei costi di setup dopo fermo e la scarsità dei manutentori che rende impossibile realizzare più di due interventi contemporanei.

La soluzione iniziale del processo di ottimizzazione è stata scelta casualmente, essendo la logica simulata non ancora presente in azienda.

Si è successivamente effettuato un run di simulazione della soluzione ottima, in modo da avere risultati più precisi. Attraverso la procedura a due fasi, si è valutata la lunghezza del run in 50 repliche, per ottenere un valore di funzione obiettivo medio con semiampiezza dell'intervallo di confidenza non superiore all'1%. I risultati così ottenuti presentano un incremento del 7.98% del valore generato netto rispetto ai risultati ottenuti sulla linea nel periodo di osservazione, grazie ad una significativa riduzione del costo di rework.

Al fine di verificare se però quest'intervento fosse motivabile dall'introduzione della metrica DPMO, oppure semplicemente dalla non ottimizzazione delle procedure in uso, basate sulla resa, si è realizzata una variante del modello, in cui sono rimaste immutate la logica produttiva e le rilevazioni dei costi, sempre basati sui DPMO, basando però il processo di valutazione della manutenzione appunto sulla resa: per fare ciò, dai valori di DPMO, che rimangono alla base del

modello, si ricavano come segue i valori della resa, e per ogni prodotto si prevedono delle soglie di manutenzione.

$$Dpu_{pm} = \frac{Dpmo_m \cdot Opp_{pm}}{10^6}$$

$$Y = e^{-DPU}$$

Anche questo modello è stato ottimizzato, ciò nonostante, come si può vedere dai risultati di seguito riportati, il modello che basa la scelta sui DPMO presenta un valore generato netto superiore del 4.19% rispetto al secondo modello.

$$RESA = Y_{P\&P} \cdot Y_{nonP\&P}$$

I dati reali del periodo di osservazione, di uguale durata del tempo simulato, sono:

Valore generato netto	67.921,26
Valore generato lordo	96.233,47
Costi di Rework	27.042,27
Costi manutenzione	1.269,94

Il modello DPMO proposto ha fornito:

Valore generato netto	73.340,44
Costi di Rework	18.955,54
Valore generato lordo	94.581,40
Costi manutenzione prev.	2.106,20
Costi manutenzione opp.	179,22

Il modello di confronto basato sulle rese, invece:

Valore generato netto	70.392,88
Costi di Rework	25.608,30
Valore generato lordo	96.926,20

Costi manutenzione

925,02

In conclusione, quindi, il modello proposto appare in grado, con l'introduzione della metrica DPMO, di offrire un valutazione più precisa dell'opportunità di un intervento di manutenzione.

Inoltre, la flessibilità del modello potrà permettere in futuro, similmente a quanto già fatto con il modello di confronto, di effettuare attraverso lievi modifiche al processo decisionale la valutazione di eventuali proposte alternative alla metrica DPMO realizzata.

## **APPENDICE B: UNA PROPOSTA DI APPLICAZIONE PER LA MANUTENZIONE STRADALE**

Il modello di ottimizzazione della politica di manutenzione su condizione sviluppato in questa tesi può essere agevolmente adattato in contesti diversi, ovunque ci sia la necessità di gestire correttamente le strategie di intervento bilanciando i costi propri di manutenzione e i costi dell'indisponibilità.

Una possibile e interessante applicazione potrebbe darsi nel campo della manutenzione stradale. Il bene oggetto di manutenzione in questo caso è la strada, che è un sistema costituito da diversi elementi: sovrastruttura (pavimentazione), segnaletica orizzontale e verticale, barriere di protezione, opere d'arte ecc. La disponibilità del bene ad un certo livello di servizio predefinito è l'obiettivo della gestione. Tuttavia, la necessità di effettuare gli interventi di manutenzione può ridurre, temporaneamente, la piena fruibilità della strada, per effetto della presenza dei cantieri, con i conseguenti effetti sulla sicurezza e confort della circolazione.

Poiché la presenza di un cantiere su una strada limita la disponibilità dell'intero bene, non essendo usufruibili separatamente i vari elementi, è evidente che il sistema strada è in serie da un punto di vista affidabilistico. Questo significa che il guasto o l'interruzione di servizio di un componente, comporta l'indisponibilità totale o parziale dell'intero sistema. Si parla di indisponibilità parziale per intendere il fatto che un cantiere potrebbe anche solo limitare la dimensione della carreggiata stradale senza impedire del tutto la circolazione; in questo caso si avrebbe comunque una riduzione del livello di servizio dell'infrastruttura a seguito di un intervento di riparazione. Questo discorso vale almeno per i componenti principali del sistema strada, cioè per quelli, la cui riparazione richieda un cantiere con riduzione o chiusura della carreggiata: ad esempio, la pavimentazione, le opere d'arte ecc.

A questo punto va sottolineato che per guasto o interruzione di servizio si deve intendere una riduzione delle caratteristiche qualitative del componente tale da non consentirne più la fruibilità in sicurezza: ad esempio, la riduzione dell'aderenza della pavimentazione oltre una certa soglia induce la necessità di rifare il manto di usura in conglomerato bituminoso.

Definito il sistema strada, i suoi componenti e il guasto che può riguardarli, rimane da impostare la politica di manutenzione.

Attualmente, esistono diverse tecnologie che consentono di rilevare i parametri di usura dei componenti della strada:

- macchine ad alto rendimento per il rilievo dell'aderenza delle pavimentazioni
- strumenti ottici per il rilievo delle caratteristiche di riflettanza della segnaletica orizzontale e verticale
- strumenti di rilievo delle condizioni degli apparecchi di appoggio dei ponti
- ecc.

Si fa osservare che mentre i primi due strumenti sono ormai disponibili in una forma che consente di utilizzarli in condizioni normali di traffico, e quindi con costi significativi ma senza ricadute sulla circolazione stradale e cioè sulla disponibilità della strada, l'ultimo, o comunque la diagnosi sulle opere d'arte, potrebbe richiedere la chiusura al traffico dell'arteria. Verrebbe quindi a cadere l'ipotesi semplificativa di *on line monitoring* e sarebbe molto interessante lo studio della politica di ottimizzazione dell'intervallo tra le ispezioni. In questo caso, infatti, la politica potrebbe essere articolata su più soglie per tenere conto dei particolari oneri legati all'ispezione.

Raccolte tutte queste informazioni, la politica decisionale deve essere impostata per la minimizzazione del costo globale di manutenzione, inteso come somma dei costi propri (legati alla realizzazione degli interventi di ripristino dei vari elementi) e dei costi indotti (legati all'indisponibilità della strada: chiusura al traffico, riduzione di carreggiata ecc.).

Potrebbe essere interessante effettuare una caratterizzazione dei costi indotti anche in rapporto agli svantaggi che essi hanno per gli utenti della strada e quindi in termini di costi sulla collettività.

Nasce allora il problema di stabilire:

1. quando effettuare gli interventi di manutenzione preventiva
2. su quali tratti della rete intervenire
3. su quali elementi stradali intervenire
4. effettuare o meno interventi di manutenzione opportuna
5. quando effettuare gli interventi di prossima ispezione

Per rispondere a tutte queste domande si dovrà anzitutto caratterizzare il comportamento dei vari elementi soggetti ad usura. Quindi occorrerà definire i costi propri e indotti del sistema, tenendo conto anche delle osservazioni sopra riportate. Infine si potrà procedere alla simulazione del modello e alla sua ottimizzazione per individuare le soglie di allarme, preventiva e opportuna, necessarie alla definizione della politica decisionale.

Un'ultima importante osservazione va fatta a proposito dei costi di indisponibilità. Se in un processo produttivo essi sono legati essenzialmente alla mancata produzione, in questo caso essi sono ancora una volta legati al mancato utilizzo della strada da parte degli utenti. Dunque si tratta ancora di mancati benefici (monetizzabili) per la collettività.

Infine, occorre precisare che, non essendoci un vero e proprio guasto degli elementi della strada, esso va inteso come riduzione del livello di servizio ad un punto di inaccettabilità, che dovrebbe essere preventivamente stabilito sulla base, ad esempio, di analisi di sicurezza stradale.

Ad esempio si potrebbe stabilire una soglia di minima aderenza della pavimentazione stradale (soglia di guasto) al di sotto della quale la strada è comunque da considerarsi impercorribile. Quindi, al raggiungimento di tale soglia, la manutenzione andrebbe comunque effettuata.

In conclusione, l'applicazione del modello nella maniera qui ipotizzata si adatterebbe molto bene al moderno approccio alla manutenzione stradale, non più effettuata su base ciclica o periodica, ma basata su vaste applicazioni di tecnologie per la rilevazione degli stati di usura degli elementi stradali e sulla programmazione integrata di interventi di adeguamento e ripristino delle condizioni di fruibilità delle arterie.

## **ELENCO ABBREVIAZIONI**

TQM	Total Quality Management
TPM	Total Productive Maintenance
CMMS	Computer Management Maintenance System
CBM	Condition Based Maintenance
MTBF	Mean Time Between Failures
MTTR	Mean Time To Restore
RCM	Reliability Centered Maintenance
SIM	Sistemi Integrati di Manutenzione
cdf	Cumulative Density Function
pdf	Probability Density Function
f.o.	Funzione Obiettivo

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1: l'andamento del tasso di guasto nel tempo .....	22
Figura 1.2: diagramma dei costi a macchina in moto.....	37
Figura 1.3: diagramma dei costi a macchina ferma .....	37
Figura 1.4: costi di fermo macchina cumulati (la risorsa non è collo di bottiglia ) .....	39
Figura 1.5: costi di fermo macchina cumulati (la risorsa è collo di bottiglia) .....	40
Figura 1.6: le politiche manutentive .....	44
Figura 1.7: caratteristiche delle politiche manutentive .....	44
Figura 1.8: possibili trend del tasso di guasto.....	45
Figura 1.9: la manutenzione in Italia nelle PMI (per numero di dipendenti) .....	48
Figura 1.10: la manutenzione in Italia nelle PMI (per settore) .....	48
Figura 2.1: diagramma di transizione del sistema in [44].....	60
Figura 2.2: esempio di processo di usura [19].....	64
Figura 2.3: incremento dell'usura con aumenti stocastici indipendenti .....	67
Figura 2.4: incremento dell'usura con degradazione percentuale.....	68
Figura 2.5: probabilità condizionata di guasto in [20] .....	78
Figura 3.1: foglio di lavoro ARENA .....	92
Figura 3.2: userform per il codice VBA.....	99
Figura 3.3: overview della logica di manutenzione .....	105
Figura 3.4: sottomodello per la creazione dei componenti .....	106
Figura 3.5: il modulo "creazione entità comp." .....	107
Figura 3.6: il modulo "contatore componenti nel sistema" .....	108

Figura 3.7: modulo di assegnazione soglie di manutenzione 1 .....	109
Figura 3.8: entità in coda in attesa del segnale di manutenzione .....	110
Figura 3.9: modulo di "attesa segnale di guasto o di manutenzione" .....	111
Figura 3.10: sottomodulo del controllo di sistema .....	111
Figura 3.11: modulo di "controllo_sistema" .....	112
Figura 3.12: sottomodulo cronometro giornaliero .....	117
Figura 3.13: modulo <i>decide</i> "controllo data di ispezione" .....	118
Figura 3.14: logica di manutenzione relativa agli effettivi interventi .....	119
Figura 3.15: modulo <i>decide</i> "necessità di ispezionare" .....	120
Figura 3.16: modulo <i>decide</i> "decisione di manutenzione" .....	121
Figura 3.17: modulo <i>process</i> "processo di manutenzione" .....	122
Figura 3.18: modulo <i>assign</i> "azzeramento usura e settaggio ispezione" .....	122
Figura 3.19: modulo <i>assign</i> "riaccensione impianto e aggiornamento parametri" .....	123
Figura 3.20: modulo <i>record</i> "record costi di ispezione" .....	125
Figura 3.21: modulo <i>decide</i> "contabilizzazione dei costi" .....	125
Figura 3.22: modulo <i>record</i> "record costi impropri" .....	126
Figura 3.23: modulo <i>decide</i> "decisione di fermare impianto".....	127
Figura 3.24: modulo <i>hold</i> "raccolta macchine" .....	128
Figura 3.25: sottomodulo della produzione con 4 macchine in serie .....	129
Figura 3.26: un modulo del modello produttivo.....	130
Figura 3.27: modulo "assegnazione tempi di processo per risorsa 2" .....	131
Figura 3.28: modulo "deviazione su schema usura per risorsa 2" .....	132
Figura 3.29: modulo "processo su risorsa 2" .....	133
Figura 3.30: schema usura e guasto per un modulo del processo.....	134
Figura 3.31: modulo "scorrimento 2" .....	135

Figura 3.32: modulo "incremento usura per risorsa 2" .....	136
Figura 3.33: modulo "probabilità di guasto per risorsa 2" .....	137
Figura 3.34: modulo "assegnazione guasto per risorsa 1" .....	138
Figura 3.35: record costi buffer .....	139
Figura 3.36: elenco risorse originali e fittizie .....	140
Figura 3.37: inserimento statistiche di frequenza per le risorse.....	143
Figura 3.38: percentuali di tempo speso in ogni stato.....	144
Figura 3.39: costi aggregati per componente .....	144
Figura 3.40: costi aggregati per tipologia più costi totali .....	145
Figura 4.1: funzionamento di un simulatore generico .....	150
Figura 4.2: nuovo modulo per l'assegnazione dei parametri delle lavorazioni..	156
Figura 4.3: modifiche al modello che creava le entità "comp" .....	157
Figura 4.4: effetto della variazione del costo unitario di ispezione in [19].....	166
Figura 4.5: andamento delle soglie al variare di $\rho_{isp}$ .....	168
Figura 4.6: andamento del minimo costo totale al variare di $\rho_{isp}$ .....	173
Figura 4.7: andamento delle soglie al variare di $\rho_{gua}$ con $c_{mlib}=100$ .....	177
Figura 4.8: andamento delle soglie al variare di $\rho_{gua}$ con $c_{mlib}=10$ .....	181
Figura 4.9: andamento del minimo costo totale al variare di $\rho_{gua}$ con $c_{mlib}=100$	184
Figura 4.10: andamento del minimo costo totale al variare di $\rho_{gua}$ con $c_{mlib}=100$ .....	184
Figura 4.11: andamento delle soglie al variare di $\rho_{mlib}$ .....	188
Figura 4.12: andamento delle soglie per $\rho_{mlib}<0,2$ .....	190
Figura 4.13: andamento del minimo costo di manutenzione al variare di $\rho_{mlib}$ .	193
Figura 4.14: effetto della velocità di deterioramento in [19] .....	195
Figura 4.15: influenza della velocità di usura sulle soglie .....	197

Figura 4.17: andamento del minimo costo totale di manutenzione al variare di $\square$ .....	201
Figura 4.18: dimensione ottima del buffer al variare di $c_{buff}$ .....	204
Figura 4.19: andamento delle soglie al variare di $c_{buff}$ .....	205
Figura 4.20: andamento del minimo costo di manutenzione al variare di $c_{buff}$ ..	207
Figura 4.21: andamento delle soglie al variare di $n$ .....	210
Figura 4.22: andamento dei valori max e min delle soglie al variare di $n$ .....	211
Figura 4.23: andamento del valore delle soglie al variare di $n$ .....	212
Figura 4.24: andamento del minimo costo totale al variare di $n$ .....	214

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 2.1: Quadro sinottico della letteratura scientifica sul CBM .....	54
Tabella 4.1: parametri del modello.....	160
Tabella 4.2: costruzione del parametro adimensionale.....	161
Tabella 4.3: configurazione dell'"ottimizzazione base" .....	163
Tabella 4.4: simulazioni consigliate funzione dei controlli .....	165
Tabella 4.5: valori di $\rho_{isp}$ fissati come input delle ottimizzazioni.....	167
Tabella 4.6: risultati delle ottimizzazioni al variare di $\rho_{isp}$ .....	168
Tabella 4.7: valori ottimi delle soglie utilizzati per le simulazioni al variare di $\rho_{isp}$ .....	171
Tabella 4.8: risultati ottenuti al variare di $C_{isp}$ .....	172
Tabella 4.10: valori di $\rho_{gua}$ fissati come input delle ottimizzazioni con $c_{mlib}=100$ .....	175
Tabella 4.11: valori di $\rho_{gua}$ fissati come input delle ottimizzazioni con $c_{mlib}=10$	176
Tabella 4.12: risultati delle ottimizzazioni al variare di $\rho_{gua}$ con $c_{mlib}=100$ .....	177
Tabella 4.13: risultati della simulazione "base" .....	179
Tabella 4.14: risultati delle ottimizzazioni al variare di $\rho_{gua}$ con $m_{lib}=10$ .....	180
Tabella 4.15: risultati ottenuti per valori di $c_{gua}$ con $c_{mlib}=10$ .....	183
Tabella 4.16: valori di $\rho_{mlib}$ fissati come input .....	187
Tabella 4.17: risultati delle ottimizzazioni al variare di $\rho_{mlib}$ .....	188
Tabella 4.18: valori ottime delle soglie utilizzati per le simulazioni al variare di $\rho_{isp}$ .....	192

Tabella 4.19: risultati ottenuti dai report di Arena per valori $c_{mlib}$ .....	192
Tabella 4.20: risultati delle ottimizzazioni al variare di $\square$ .....	196
Tabella 4.21: valori delle soglie utilizzati per le simulazioni al variare di $\square$ .....	200
Tabella 4.22: risultati ottenuti al variare di $\square$ .....	200
Tabella 4.23: risultati ottimizzazione al variare di $c_{buff}$ .....	203
Tabella 4.24: valori delle soglie e della dimensione del buffer utilizzati per le simulazioni al variare di $c_{buff}$ .....	206
Tabella 4.25: risultati ottenuti al variare di $c_{buff}$ .....	206
Tabella 4.26: risultati delle ottimizzazioni al variare di $n$ .....	209
Tabella 4.27: valori medie delle soglie .....	212
Tabella 4.28: risultati ottenuti al variare di $n$ .....	213
Tabella 4.29: minimo costo totale di manutenzione al variare di $n$ .....	214

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Norma UNI-9910
- [2] Minati M. - *La manutenzione: Strategie e politiche manutentive (cap. 5)* - Dispense dal corso effettuato dalla società "2M servizi" (2005)
- [3] Minati M. - *La manutenzione: Elementi per il controllo delle prestazioni in manutenzione (cap. 7)* - Dispense dal corso effettuato dalla società "2M servizi" (2005)
- [4] Sundberg A. - *Management aspects on CBM, the new opportunity for maritime industry* - 9th international conference on marine engineering systems
- [5] Norma UNI 10388
- [6] M. Bengtsson, E. Olsson, P. Funk M. Jackson - *Technical design of condition based maintenance system* - Maintenance and Reliability Conference, Proceedings of the 8th Congress, May 2nd - 5th, 2004, University of Tennessee - Maintenance and Reliability Center, Knoxville, USA.
- [7] Jarrell D., Sisk D., Bond L. - *Prognostics and CBM, a scientific crystal ball* - Nuclear Technology (2004)
- [8] M. Bengtsson, Olsson E., Funk P., Jackson M. - *Condition Based Maintenance System Technology, Where is Development Heading?* - Euromaintenance 2004, Proceedings of the 17th European Maintenance Congress, 11th - 13th of May, 2004, AMS (Spanish Maintenance Society), Barcelona
- [9] Brochure informativa della Vibrosystem sui sistemi CBM - Part 1: a CBM approach - (2004)

- [10] Cattaneo M. – *La manutenzione in Italia nelle PMI – indagine dell'Associazione Italiana Manutenzione* (2004)
- [11] Mitchell, J. S. - *Five to ten year vision for CBM - ATP Fall Meeting – Condition Based Maintenance Workshop, Atlanta, USA*
- [12] H. Haymann – *Dispense sull' affidabilità, section 3: reliability* – University of Portsmouth UK
- [13] Erto P.- *Probabilità e statistica per le scienze e l'ingegneria* – McGraw-Hill (2004)
- [14] Jiang R., Murthy D.N.P. - *Mixture of weibull distributions – parametric characterization of failure rate function - applied stochastic models and data analysis, volume 14* (1998)
- [15] Minati M. - *La manutenzione: gestione delle macchine (cap. 4) – dispense del corso* (2005)
- [16] Speaks S. – *Reliability and MTBF overview* – Dispense dal corso interno tenuto alla Vicor System.
- [17] Scarf P.A. – *On the application of mathematical models in maintenance* – European Journal of operational research (1997)
- [18] Wenocur M.L. – *A reliability model based on the Gamma Process and its analytic theory* – Advances in applied probability, vol. 21, n°4 (1989)
- [19] Grall A., Berenguer C., Dieulle L. – *A condition-based maintenance policy for stochastically deteriorating systems* – Reliability engineering and system safety (2002)
- [20] Castanier B., Grall A., Berenguer C. – *A condition-based maintenance policy with non-periodic inspections for a two unit series system* – Reliability engineering and system safety (2005)
- [21] Kececioglu D., Feng-Bin Sun – *A general discrete time dynamic programming model for the opportunistic replacement policy and its application to ball bearing systems* – Reliability engineering and system safety (1995)
- [22] Barros A., Grall A., Berenguer C.– *A maintenance Policy Optimized with imperfect monitoring and/or partial monitoring* – Annual reliability and maintainability symposium (2003)

- [23] Castanier B., Berenguer C., Grall A. – *A sequential condition-based repair/replacement policy with non-periodic inspections for a system subject to continuous wear* – Applied stochastic models in business and industry
- [24] Christer A.H., Wang W. – *A simple condition monitoring model for a direct monitoring process* – European journal of operational research (1995)
- [25] Ohnishi M., Kawai H., Mine H. – *An optimal inspection and replacement policy for a deteriorating system* – Journal of applied probability (1986)
- [26] Dieulle L., Berenguer C., Grall A., Roussignol M. – *Continuous time predictive maintenance scheduling for a deteriorating system* – Annual reliability and maintainability symposium (2001)
- [27] Liao H., Elsayed E.A., Chan L.Y. – *Maintenance of continuously monitored degrading system* – Preprint submitted to Elsevier Science (2004)
- [28] Van der Duyn Schouten F.A., Vanneste S.G.– *Maintenance optimization of a production system with buffer capacity* – European journal of operational research (1995)
- [29] McCall J.J. – *Maintenance policies for stochastically failing equipment: a survey* – Management science (1965)
- [30] Barros A., Berenguer C., Grall A. – *Maintenance policy for a two components system with stochastic dependences and imperfect monitoring* – Preprint submitted to Elsevier science (2005)
- [31] Park K.S. – *Optimal continuous wear limit replacement under periodic inspection* – IEEE transaction on reliability (1988)
- [32] Park K.S. – *Optimal wear limit replacement with wear dependent failures* – IEEE transaction on reliability (1988)
- [33] Newby M., Dagg R. – *Optimal inspection and maintenance for stochastically deteriorating systems* – Preprint of Norwegian Institute of Technology
- [34] Chiang J.H., Yuan J. – *Optimal maintenance policy for a markovian system under periodic inspection* – Reliability engineering and system safety (2001)
- [35] Teresa Lam C., Yeh R.H. – *Optimal maintenance policies for deteriorating systems under various maintenance strategies* – IEEE transaction on reliability (1994)

- [36] Dieulle L., Berenguer C., Grall A., Roussignol M. – *Sequential condition based maintenance scheduling for a deteriorating system* – European Journal of operational research (2003)
- [37] Barata J., Guedes Soares C., Marseguerra M., Zio E. - *Simulation modelling of repairable multi component deteriorating systems for 'on condition' maintenance optimisation* – Reliability engineering and system safety (2002)
- [38] van der Duyn Schouten F.A., Vanneste S.G. – *Two simple control policies for a multicomponent Maintenance system* – Operations research (1993)
- [39] Guizzi G., Santillo C.L., Zoppoli P. - *Condition Based Maintenance: Implementation and optimization of a two-unit serial system model with multi-threshold policy* – 8th international conference on “The modern information technology in the innovation processes of the industrial enterprise” settembre 2006 Budapest, Ungheria.
- [40] Suprasad V. Amari, Leland McLaughlin – *Optimal design of a Condition-Based Maintenance Model* – Relax Software Corporation (2004)
- [41] Saassouh B., Dieulle L., Grall A. – *Online maintenance policy for a deteriorating system with random change of mode* - Reliability engineering and system safety (2006)
- [42] Wu J., Makis V. - *Economic and economic-statistical design of a chi-square chart for CBM* - European Journal of operational research (2007)
- [43] Wang W., Zhang W. – *An asset residual life prediction model based on expert judgments* - European Journal of operational research (2007)
- [44] Montoro-Carloza Delia, Pérez-Ocon Rafael – *A maintenance model with failures and inspection following Markovia arrival processes and two repair modes* – European Journal of operational research (2007)
- [45] Kahle W. - *Optimal maintenance policies in incomplete repair models* - Reliability engineering and system safety (2006)
- [46] Wang L., Chu J., Mao W. - *A condition-based order-replacement policy for a single-unit system* – Applied mathematical modelling (2007)
- [47] Zequeira I., Valdes E., Berenguer - *Optimal buffer inventory and opportunistic preventive maintenance under random production capacity availability* - International Journal of Production Economics (2008)

- [48] Salameh M.K., Ghattas R.E. - *Optimal just-in-time buffer inventory for regular preventive maintenance* - International Journal of Production Economics (2001)
- [49] Chelbi A., Rezg N. - *Analysis of a production/inventory system with randomly failing production unit subjected to a minimum required availability level* - International Journal of Production Economics (2006)
- [50] Kyriakidis E.G., Dimitrakos T.D. - *Optimal preventive maintenance of a production system with an intermediate buffer* - European Journal of Operational Research (2006)
- [51] Dekker R., Wildeman R., van der Duyn Schouten F. - *A review of multi-component maintenance models with economic dependences* - Mathematical method of operations research (1997)
- [52] Dekker R. - *Applications of maintenance optimization models: a review and analysis* - Reliability engineering and system safety (1996)
- [53] Yam R.C.M., Tse P.W., Li L., Tu P. - *Intelligent predictive decision support system for Condition Based Maintenance* - Advance Manufacturing Technology (2001)
- [54] A Report of the IEEE/PES Task Force on Impact of Maintenance Strategy on Reliability of the Reliability, Risk and Probability Applications Subcommittee - *The present status of maintenance strategies and the impact of maintenance on reliability* - IEEE transaction on power systems (2001)
- [55] Pandey M.D., van Noortwijk J.M., Kallen M.J. - *Gamma processes for time-dependent reliability of structures* - Preprint submitted to Elsevier science
- [56] Tsilevich N., Vershik A., Yor M. - *Distinguished properties of gamma processes and related topics* - preprint (2000)
- [57] Gallo M., Guizzi G., Zoppoli P. - *Production yield improvement in a series system by a multithreshold CBM model* - International Journal Of Systems Applications, Engineering & Development - Issue 4, Volume 1, 2007
- [58] Guizzi G., Santillo L.C., Zoppoli P. - *On methods for cost optimization of Condition Based Maintenance systems* - Proceedings of the Thirteenth ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design - ISBN: 978-0-9763486-2-7, agosto 2007, Seattle
- [59] Guizzi G., Santillo L.C., Zoppoli P. - *Multithreshold CBM: Cost optimization for a n units serial system with a simulation approach* - Proceedings of the

Third International Conference on Maintenance and Facility Management,  
ISBN: 978-88-95405-02-5, settembre 2007, Roma

- [60] AA.VV. – *Arena professional edition reference guide* – redatto dal supporto tecnico della rockwell software nel 2000
- [61] AA.VV. – *Arena standard edition user's guide* – redatto dal supporto tecnico della rockwell software nel 2003
- [62] AA.VV. – *Arena's Input Analyzer online help* – versione 8.0 del 2003
- [63] AA.VV. – *Arena's Output Analyzer online help* – versione 8.0 del 2003
- [64] AA.VV. – *Arena's Process Analyzer online help* - versione 8.0 del 2003