# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in

INGEGNERIA GESTIONALE

Tesi di Laurea Magistrale

## Confronto di tattiche manutentive tradizionali e predittive per i macchinari a controllo numerico: caso di studio riguardante la manutenzione dell'utensile installato su una fresatrice

**Relatore:**
Prof. Franco Lombardi

**Candidato**:
Pierpaolo Bernini

**Correlatori:**
Prof.ssa Giulia Bruno
Dott. Emiliano Traini

Anno Accademico 2019/2020

# SOMMARIO

ABSTRACT ..... 4
1 INTRODUZIONE AI PRINCIPI GENERALI DELLA MANUTENZIONE ..... 5
1.1 Modello centralizzato ..... 5
1.2 Modello decentralizzato ..... 6
1.3 Ingegneria della manutenzione ..... 7
1.4 Politiche di manutenzione ..... 8
1.5 Manutenzione correttiva ..... 9
1.5.1 Requisiti organizzativi ..... 10
1.5.2 Vantaggi e svantaggi ..... 10
1.6 Manutenzione preventiva ciclica ..... 11
1.7 Manutenzione preventiva ciclica a data costante ..... 11
1.8 Manutenzione preventiva ciclica ad età costante ..... 12
1.8.1 Requisiti organizzativi ..... 12
1.8.2 Vantaggi e svantaggi ..... 13
1.9 Manutenzione predittiva ..... 14
1.9.1 Requisiti organizzativi ..... 15
1.9.2 Vantaggi e svantaggi ..... 16
1.10 Costi di manutenzione ..... 17
2 MODELLI PER POLITICHE DI MANUTENZIONE ..... 20
2.1 Introduzione Ai Processi Di Markov ..... 20
2.2 Manutenzione Correttiva ..... 21
2.2.1 Assunzioni del modello ..... 21
2.2.2 Notazione per il modello ..... 22
2.2.3 Modellizzazione ..... 22
2.3 Manutenzione Preventiva A Data Costante ..... 24
2.3.1 Modello I ..... 24
2.3.2 Modello II ..... 26
2.4 Manutenzione Preventiva Ad Età Costante ..... 30
2.4.1 Modello I ..... 30
2.4.2 Modello II ..... 34
2.4.3 Modello III ..... 38
2.5 Manutenzione Predittiva ..... 40
2.5.1 Modello I ..... 42
2.5.2 Modello II ..... 43
3 CASO STUDIO ..... 45

3.1 Introduzione ..... 45
3.2 Descrizione caso studio ..... 45
3.3 Introduzione alla simulazione ..... 48
3.4 Simulazione manutenzione correttiva ..... 49
3.5 Simulazione manutenzione periodica a data costante ..... 51
3.6 Simulazione periodica a età costante ..... 55
3.7 Simulazione predittiva ..... 61
3.7.1 Degradation Model ..... 62
3.7.2 Residual similarity model ..... 64
4 CONCLUSIONI ..... 66
5 Bibliografia ..... 72

# ABSTRACT

Nel presente lavoro di tesi vengono spiegate e riportate le principali strategie di manutenzione: manutenzione a guasto, manutenzione periodica, manutenzione predittiva.
Nel primo capitolo si affronta il tema dell'ingegneria della manutenzione, cercando di mettere in luce quanto questa disciplina sia sempre più importante nel contesto industriale odierno. Vengono descritte le principali politiche di manutenzione, manutenzione a guasto, manutenzione periodica, manutenzione predittiva, considerando i requisiti organizzativi, i vantaggi e gli svantaggi e le principali fonti di costo.
Nel secondo capitolo viene presentata la modellizzazione delle politiche di manutenzione introdotte nel primo capitolo. Per la manutenzione periodica vengono descritti cinque modelli: due modelli per la politica di manutenzione a data costante e tre per la politica di manutenzione a età costante. I modelli presentati hanno l'obiettivo di determinare il periodo ottimo di intervento che minimizza il costo di manutenzione. Per la politica di manutenzione predittiva, vengono descritti due modelli utilizzati per determinare il Remaining Useful Life dell'entità.
Nel terzo capitolo vengono messe a confronto tramite simulazione le diverse politiche di manutenzione sotto il punto di vista dei costi di manutenzione. Il caso studio proposto riguarda la manutenzione di un utensile installato su una fresatrice. L'utensile lavora sotto determinati parametri di lavorazione (Depth of cut, feed, material) che determinano otto scenari differenti di lavorazione. La funzione di costo considerata dipende dal rapporto tra costo di manutenzione preventiva e costo di manutenzione correttiva, perciò vengono considerati tre differenti rapporti di costo. Sono stati creati tramite l'utilizzo del software MATLAB otto differenti simulatori, uno per ogni politica di manutenzione, e tramite essi sono state confrontate le politiche di manutenzione per ciascun rapporto di costo.

# 1 INTRODUZIONE AI PRINCIPI GENERALI DELLA MANUTENZIONE

Negli ultimi anni il concetto di manutenzione ha subito un'evoluzione rinnovandosi profondamente. L'attività di manutenzione si è trasformata, da attività prevalentemente operativa di riparazione a complesso sistema in grado di predire il guasto e orientata verso il miglioramento continuo. Questa trasformazione implica un cambiamento culturale sia del ruolo del manutentore ma anche del management dell'impresa. Le moderne organizzazioni aziendali non considerano la manutenzione come una funzione di supporto alla produzione ma bensì come una parte integrante di essa. Perciò in molte aziende, di media e grandi dimensioni, l'organizzazione della manutenzione viene attuata attraverso due modelli:

- Modello centralizzato
- Modello decentralizzato

## 1.1 Modello centralizzato

Questo tipo di modello è presente in molte realtà aziendali e può essere descritto dallo schema a blocchi rappresentato in Figura 1. Si può notare come la funzione DIREZIONE MANUTENZIONE può essere considerata un filtro tra le informazioni che provengono dalla produzione e quelle che poi vengono trasmesse ai manutentori.
Il Direttore/responsabile della manutenzione interagisce contemporaneamente e in modo contestuale con:

- La produzione
- I manutentori
- Il magazzino ricambi
- Il management

Nel modello in esame si evince che il ruolo del Direttore della manutenzione è quello di far eseguire determinati compiti ai manutentori. Questo fa sì che i manutentori devono essere risorse altamente specializzate ma scarsamente flessibili e tutto ciò rende il modello molto rigido. Questo tipo di centralizzazione può avere senso quando la motivazione al lavoro è bassa.

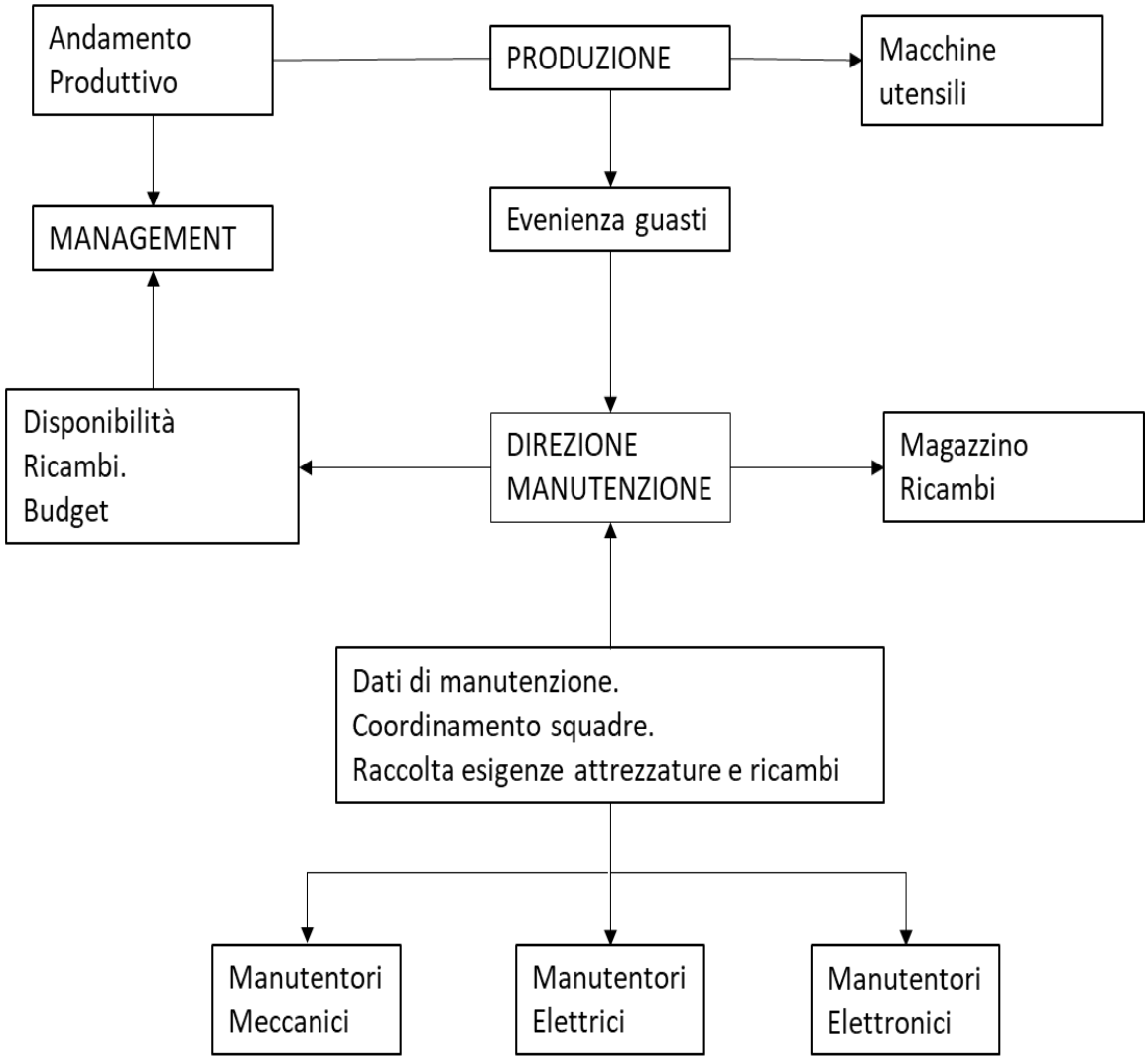



*Figura 1. Modello centralizzato.*

## 1.2 Modello decentralizzato

Il modello manutentivo decentralizzato è rappresentato in Figura 2. In questo caso il responsabile della manutenzione interviene solo in alcuni casi straordinari nei quali i singoli manutentori non sono in grado di risolvere in modo autonomo il problema. In questo modo i manutentori diventano più autonomi, assumendosi responsabilità su diversi settori aziendali. Per attuare questo modello occorre rendere meno specializzati i manutentori, ovvero, rendere il personale multi specializzato.

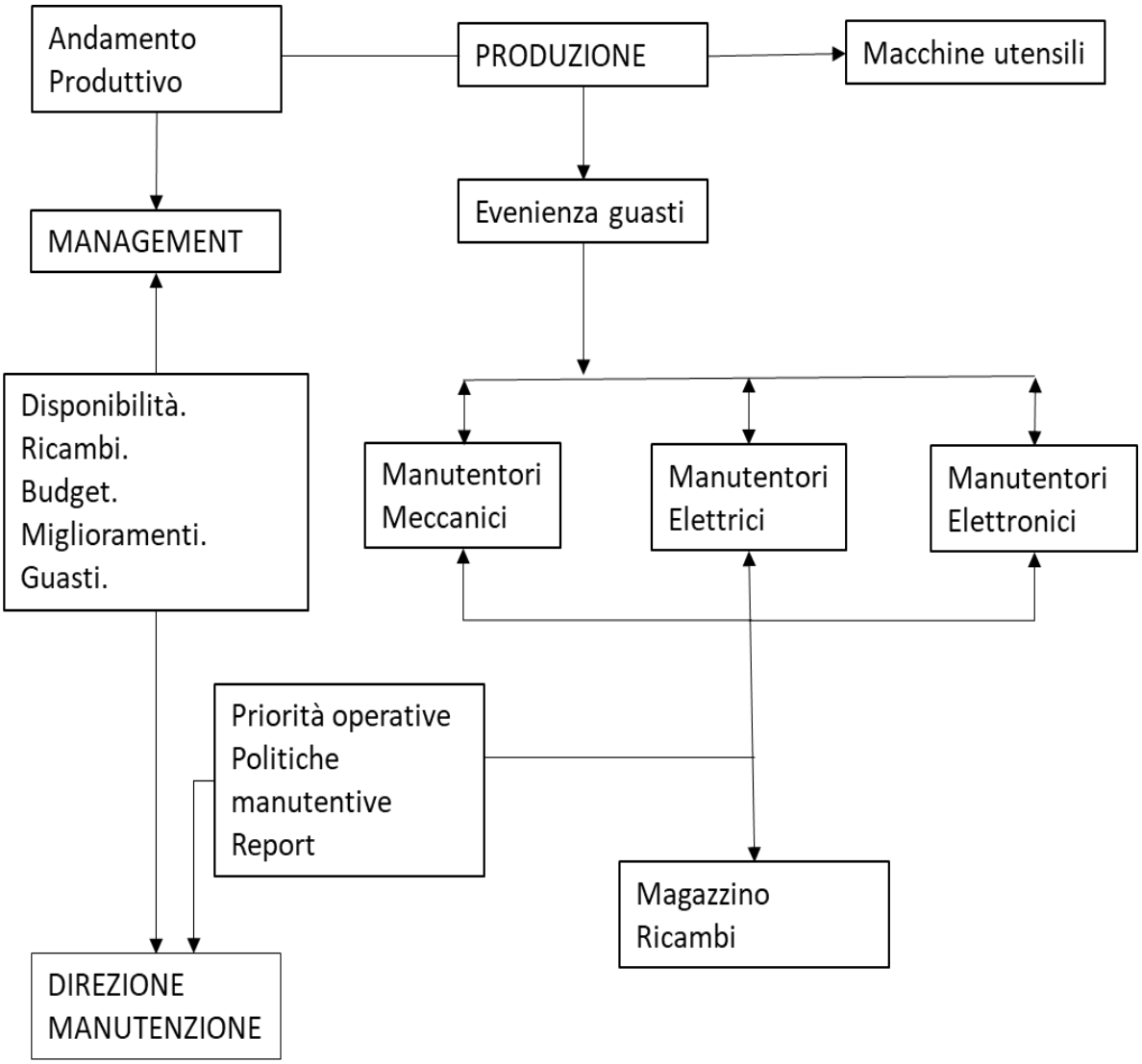



*Figura 2. Modello Decentralizzato*

## 1.3 Ingegneria della manutenzione

Constatato che la manutenzione ha un ruolo sempre di maggiore importanza per le imprese si è sviluppata una branca dell'ingegneria chiamata Ingegneria della manutenzione. Quest'ultima viene definita come "*quell'insieme di principi, tecniche e procedure di tipo affidabilistico, gestionale ed organizzativo che permettono di affrontare il tema della manutenzione da un punto di vista ingegneristico, cioè fondato sui principi scientifici dell'ingegneria e dell'organizzazione, allo scopo di ottenere significativi miglioramenti di efficienza ed efficacia nella progettazione, nella gestione, nella conduzione e nel controllo della manutenzione.*" [1]

Le principali mansioni dell'ingegneria della manutenzione possono essere riassunte nei seguenti:

- Individuare e progettare le principali tecniche manutentive specifiche per ogni situazione, studiando l'applicazione delle politiche di manutenzione (correttiva, preventiva, migliorativa), e individuandone il mix ottimale che minimizza il costo totale di manutenzione;
- Schedulare interventi per migliore l'affidabilità del sistema
- Gestire l'approvvigionamento dei materiali necessari per gli interventi manutentivi
- Sviluppare e valorizzare competenze manutentive
- Promuovere un miglioramento continuo delle prestazioni dei sistemi e dei costi di manutenzione

Quanto sopra descritto mostra che lo scopo dell'ingegneria della manutenzione risulta essere quello di ottenere significativi miglioramenti nella gestione e nel controllo della manutenzione in termini di efficienza produttiva ed economica.

## 1.4 Politiche di manutenzione

Per poter raggiungere determinati obiettivi, quali per esempio disponibilità operativa e/o minimizzazione del costo di manutenzione, l'attività di manutenzione deve essere progettata nel modo più congruo possibile ai bisogni dell'azienda sia dal punto di vista tecnico che organizzativo. Si tratta di definire quale politica di manutenzione si applica meglio al caso in esame. In particolare, bisogna definire:

- Se e quando intervenire con interventi di riparazione solo dopo la manifestazione di un guasto.
- Se e quando può risultare più conveniente effettuare interventi di manutenzione preventiva, prevenendo così il verificarsi del guasto.
- Se ci sono attività di manutenzione e/o entità per i quali è opportuno ricercare soluzioni migliori rispetto a quella già esistente.

Progettare le politiche di manutenzione significa fissare a priori la modalità di esecuzione dell'attività di manutenzione sul sistema/ entità in analisi. La politica di manutenzione scelta sarà una conseguenza di una scelta razionale derivata dalle seguenti domande:

- Qual è il comportamento dell'entità soggetta a guasto e quale forma di manutenzione è più appropriata per controllarlo?

- Qual è il confronto del costo tra il costo sostenuto se la manutenzione viene effettuata a seguito di un guasto (correttiva), e il costo sostenuto se la manutenzione viene effettuata anticipando il guasto (preventiva)?
- Quali sono i costi e i benefici che possono derivare da miglioramenti dell'organizzazione della manutenzione?

Di seguito verranno spiegate le diverse politiche di manutenzione che sono classificate in Figura 3.

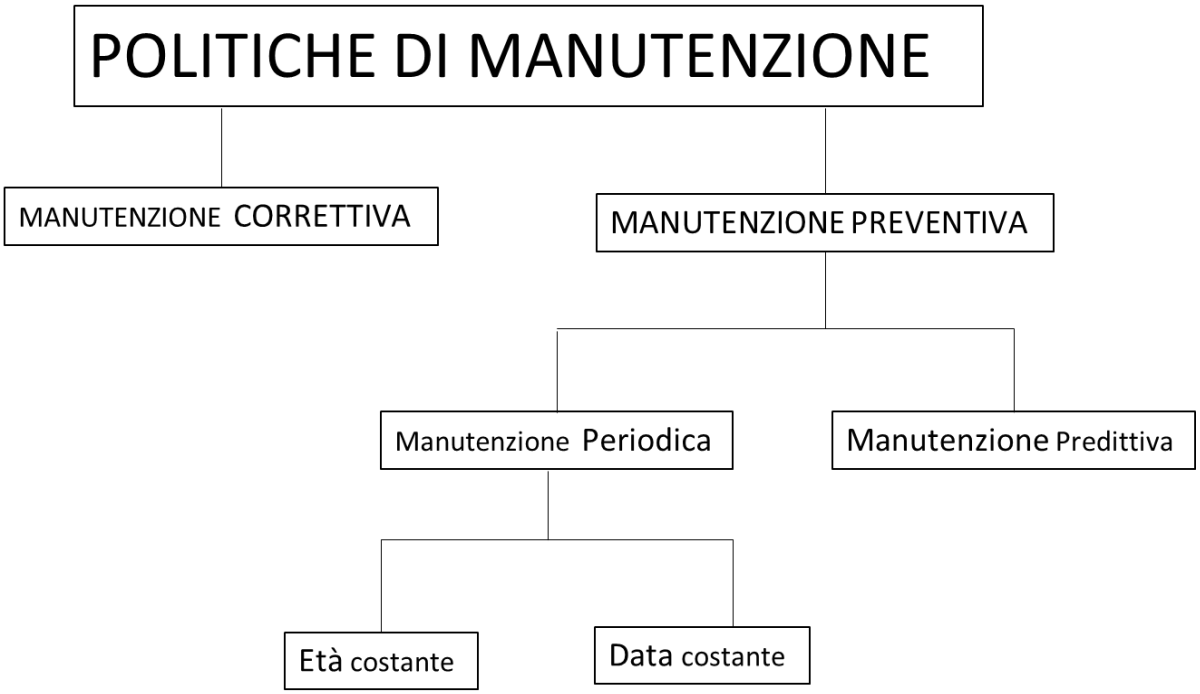



*Figura 3.Principali politiche di manutenzione*

## 1.5 Manutenzione correttiva

Se si decide di applicare una politica di manutenzione di tipo correttiva, il manutentore/gestore interviene solo nel momento in cui si manifesta il guasto. La Figura 4 mostra l'evoluzione della manutenzione correttiva nel tempo.

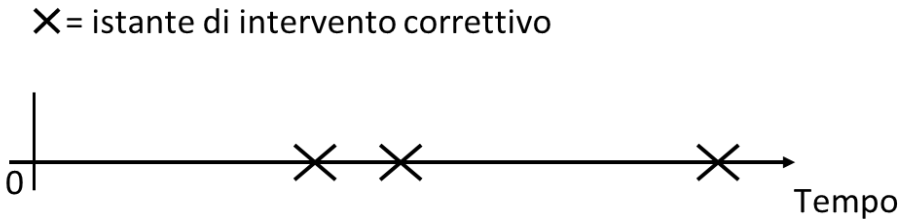



*Figura 4. Politica manutenzione correttiva*

### 1.5.1 Requisiti organizzativi

Per applicare la politica di manutenzione correttiva sono richiesti alcuni requisiti organizzativi per garantire la miglior risposta possibile in caso di guasto.

- Il personale addetto alla manutenzione deve assicurare una risposta adeguata ed efficace sia in termini di tempo di esecuzione che in termini di qualità dell'intervento tecnico da effettuare.
- Il personale deve essere in grado di diagnosticare nel più breve tempo possibile e in modo corretto i guasti, proponendo soluzioni in base al tipo di guasto.
- Il personale dovrebbe essere dotato di competenze multidisciplinari per poter fornire la migliore soluzione al problema.
- Per non ritardare gli interventi di manutenzione l'attrezzatura necessaria per eseguirla dovrebbe essere sempre disponibile.
- I pezzi di ricambio più critici, cioè quelli che hanno tempi di approvvigionamento lunghi, devono essere disponibili a magazzino in modo da limitare il tempo di fermo macchina.

### 1.5.2 Vantaggi e svantaggi

La politica di manutenzione correttiva presenta i seguenti vantaggi e svantaggi.

*Tabella 1. Vantaggi e svantaggi politica di manutenzione correttiva*

<table>
<tr><th>Vantaggi</th><th>Svantaggi</th></tr>
<tr><td rowspan="3">È in grado di contenere i costi propri di manutenzione, poiché questi non si manifestano fino a quando l'entità funziona correttamente. (Il costo si manifesta solo quando avviene un guasto)</td><td>Il guasto accade in modo accidentale e questo causa l'interruzione improvvisa della produzione/servizio con possibile riduzione della qualità del prodotto/servizio</td></tr>
<tr><td>Le squadre di manutenzione spesso rimangono inutilizzate in attesa che si manifesti un guasto</td></tr>
<tr><td>A causa dell'accidentalità del guasto il gestore preferisce sovradimensionare il magazzino ricambi per far fronte ad un eventuale guasto</td></tr>
</table>

Questa politica potrebbe essere adottata per macchinari per cui l'accidentalità del guasto non genera importanti problemi in termini di disservizio (es. irrisoria produzione persa per fermo macchina).

## 1.6 Manutenzione preventiva ciclica

Il concetto di base per la politica di manutenzione preventiva ciclica si basa sulla sostituzione dell'entità non ancora giunta a rottura, con una nuova in modo da prevenirne il guasto accidentale. In questo caso si preferisce rinunciare ad una parte di vita utile dell'utensile a favore dell'affidabilità del sistema. Per implementare questa politica i reparti che gestiscono la produzione e la manutenzione devono collaborare rispettando i vincoli reciproci. Adottando una politica di questo tipo, con interventi preventivi ciclici, si limitano gli interventi correttivi a guasto che non potranno essere totalmente eliminati. Altri interventi di manutenzione preventiva ciclica possono riguardare componenti dell'entità che verranno sottoposti a interventi di pulizia, lubrificazione, cambio olio….

## 1.7 Manutenzione preventiva ciclica a data costante

Per quanto riguarda la manutenzione ciclica a data costante, si sceglie un intervallo di tempo fisso (es. un mese) per eseguire un intervento di sostituzione preventiva, indipendentemente da ciò che succede nell'intervallo di tempo scelto. La Figura 5 mostra l'andamento nel tempo della politica di manutenzione preventiva ciclica a data costante. Come mostrato in figura, anche se si sono manifestati guasti accidentali tra due interventi di manutenzione programmati non si cambia la politica adottata.

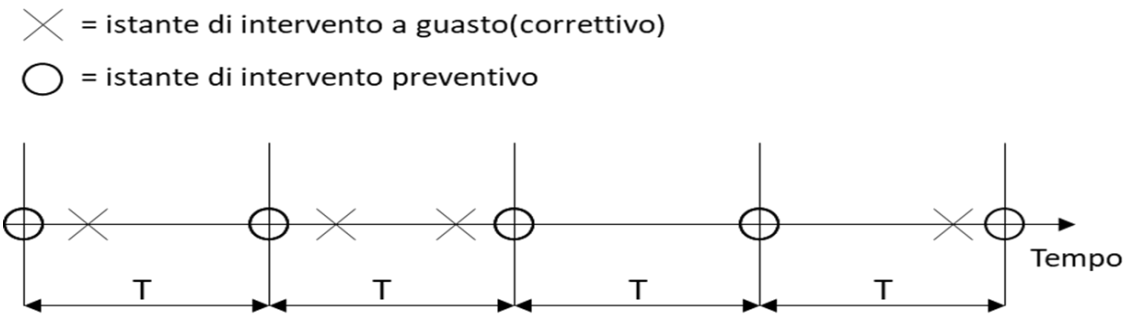



*Figura 5. Politica di manutenzione a data costante*

## 1.8 Manutenzione preventiva ciclica ad età costante

La Figura 6 mostra l'andamento nel tempo della politica di manutenzione ciclica ad età costante. In questo caso l'entità viene sostituita nell'istante in cui ha raggiunto una certa età T dall'ultimo intervento di manutenzione preventivo o correttivo. Diversamente da quanto accade per la manutenzione ciclica a data costante, se all'interno dell'intervallo preventivo avviene un guasto, il successivo intervento preventivo verrà schedulato a partire da questo momento.

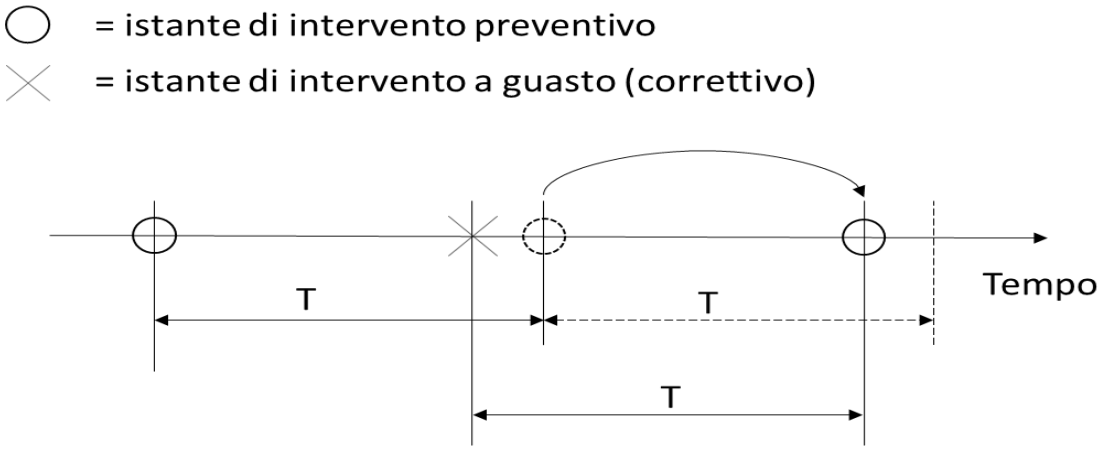



*Figura 6. Politica di manutenzione ad età costante*

### 1.8.1 Requisiti organizzativi

Sia per la politica di manutenzione ciclica a data costante, che per quella ciclica a età costante devono esserci determinati requisiti organizzativi per poterle implementare al meglio, assicurando una corretta programmazione degli interventi.

- Per gestire la politica di manutenzione ciclica, e quindi determinare l'intervallo T di intervento preventivo, è fondamentale conoscere la legge di affidabilità dell'entità, cioè conoscere il comportamento a guasto dell'entità. Per conoscere tale comportamento è fondamentale una raccolta dati sui guasti delle macchine.
- È fondamentale l'utilizzo di un buon sistema informativo per supportare le attività di gestione e programmazione della manutenzione, così da poter schedulare le attività di manutenzione ciclica tenendo conto sia dei vincoli di produzione che delle statistiche di guasto dell'entità.

- La gestione del magazzino dei pezzi di ricambio deve essere coordinata con il programma di manutenzione ciclica, così da garantire la presenza dei ricambi richiesti per l'attività di manutenzione.
- Il personale addetto alla manutenzione deve essere in grado di coordinarsi con le altre attività aziendali coinvolte nell'intervento di manutenzione (es. magazzino materiale di ricambio) al fine di predisporre al meglio tutte le risorse necessarie per l'intervento.
- Il personale deve avere delle competenze tecniche specialistiche per poter eseguire gli interventi di manutenzione preventiva.

### 1.8.2 Vantaggi e svantaggi

La politica di manutenzione preventiva ciclica presenta i seguenti vantaggi e svantaggi

*Tabella 2. Vantaggi e svantaggi politica di manutenzione ciclica*

| Vantaggi | Svantaggi |
|---|---|
| Consente di ridurre la probabilità che accadono guasti accidentali, con una conseguente riduzione dei costi dovuto al disservizio o mancata produzione. | Se gli interventi di tipo preventivo non vengono eseguiti a regola d'arte, possono aumentare la probabilità di guasto intrinseca |
| Permette di schedulare meglio l'impiego degli operatori addetti alla manutenzione. | |
| Vengono ottimizzati i magazzini dei ricambi grazie ad un coordinamento tra le attività cicliche di manutenzione e le attività di approvvigionamento dei materiali. | Può indurre a programmare interventi di manutenzione troppo frequenti e non necessari, con conseguente aumento dei costi propri di manutenzione. (es. eccessiva sostituzione dei componenti) |
| I tempi di fermo macchina sono ridotti, rispetto alla politica di manutenzione correttiva, grazie ad una preventiva predisposizione delle risorse necessarie per eseguire la manutenzione. | |

A differenza della politica di manutenzione correttiva, la politica di manutenzione ciclica può essere adottata da quei macchinari che presentano criticità, cioè per quei macchinari in cui l'accidentalità di guasto genera importanti problemi in termini di disservizio/ mancata produzione.

## 1.9 Manutenzione predittiva

Per poter applicare questa politica di manutenzione è necessario conoscere lo stato di usura (attuale o atteso) dell'entità. Dal momento che si conosce lo stato di usura dell'entità non viene eseguito alcun tipo di intervento di manutenzione preventivo fintanto che il/i parametri di usura dell'entità non raggiungono un determinato livello di allerta. Una volta superato il livello di allerta il modello di manutenzione predittiva è in grado di predire quando effettuare un intervento programmato di manutenzione, basandosi su una stima dell'usura nel tempo. Per poter conoscere lo stato di usura si adottano dei metodi di misura strumentale di grandezze chimico-fisiche sui macchinari. Le principali grandezze che vengono misurato sono la temperatura, pressione, forza, accelerazione, velocità, vibrazione, suono…. Queste grandezze vengono misurate grazie ad appositi sensori collocati in determinate zone della macchina. Dopo aver raccolto i dati di misurazione di queste grandezze fisiche (data collection), avviene un processo di pulizia e rielaborazione dei dati in informazioni utili (data processing) per essere implementati in un modello di predizione. Infine, viene implementato un modello che tramite un algoritmo fornisce la stima di quando avverrà un guasto nel futuro. La Figura 7 mostra la previsione del parametro di usura utilizzato per effettuare la manutenzione predittiva

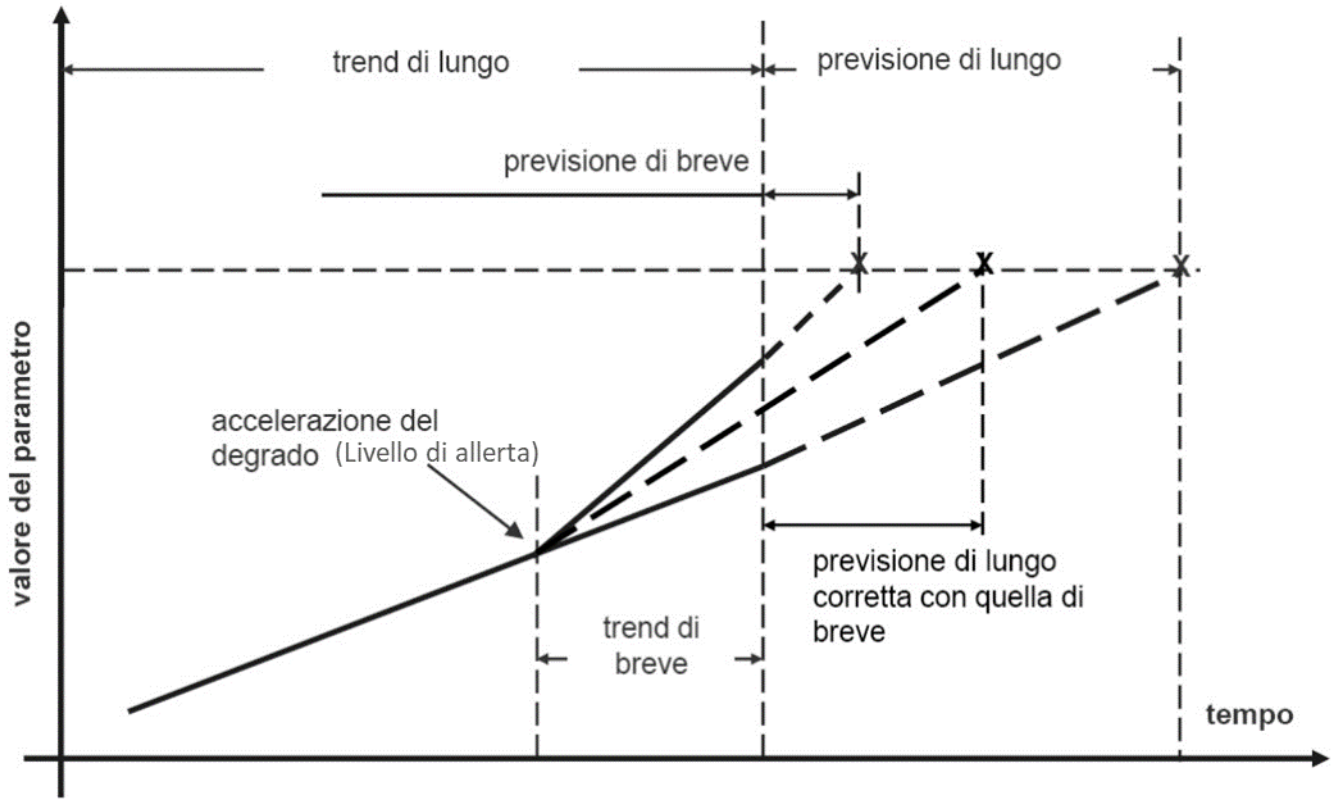



*Figura 7. Manutenzione predittiva*

### 1.9.1 Requisiti organizzativi

Come nelle politiche di manutenzione precedentemente descritte anche per questa politica sono necessari alcuni requisiti organizzativi.

- Prima di procedere all'implementazione della manutenzione predittiva bisogna stabilire quali sono i parametri di usura da tenere sotto controllo e fissare il livello di allerta.
- Come per la manutenzione preventiva ciclica è fondamentale che chi esegue l'attività di manutenzione deve essere in grado di coordinarsi con le altre attività aziendali coinvolte nell'intervento di manutenzione (es. magazzino materiale di ricambio) al fine di predisporre al meglio tutte le risorse necessarie per l'intervento.
- La presenza di un adeguato sistema informativo per integrare le informazioni su quando eseguire la manutenzione per poter organizzare al meglio i diversi attori della manutenzione.
- Il personale deve avere determinate conoscenze tecniche per saper utilizzare gli strumenti diagnostici, e per essere in grado di dare una accurata valutazione sull'attendibilità dei dati rilevati nel processo.

### 1.9.2 Vantaggi e svantaggi

La politica di manutenzione predittiva presenta i seguenti vantaggi e svantaggi.

*Tabella 3. Vantaggi e svantaggi politica di manutenzione predittiva*

<table>
<tr><th>Vantaggi</th><th>Svantaggi</th></tr>
<tr><td>Migliora la disponibilità dei macchinari</td><td>Si devono sostenere alti costi di investimento dovuti all’acquisto dell’attrezzatura necessaria per metterla in pratica</td></tr>
<tr><td>La manutenzione viene effettuata solo se realmente necessaria e tenendo conto dello stato di degrado dell’entità</td><td rowspan="2">Necessari periodi di training per gli operatori</td></tr>
<tr><td>Permette di accumulare conoscenze sui segnali di degrado dell’entità che possono essere utili per migliorare la stessa politica o per applicarla ad altri impianti</td></tr>
<tr><td>La gestione del personale di manutenzione viene migliorata</td><td rowspan="2">È necessario un periodo di “rodaggio” nel quale individuare le soglie di allerta e sviluppare una conoscenza sui trend dei segnali misurati per poter valutare correttamente le reali condizioni dell’entità</td></tr>
<tr><td>Consente una miglior gestione del magazzino dei ricambi con un miglioramento sulla gestione delle scorte di materiale utile per l’esecuzione della manutenzione</td></tr>
</table>

## 1.10 Costi di manutenzione

Come già detto precedentemente il ruolo della manutenzione all'interno di un'impresa viene spesso visto come un costo. Ma se le attività di manutenzione vengono progettate correttamente, si possono ottenere dei significativi miglioramenti produttivi in termini di quantità, qualità e servizio erogato. Quindi la manutenzione può essere vista come un'attività che costa, ma che se ben progettata, può favorire un risparmio di costi dovuti a guasti e un conseguente incremento del profitto. La Figura 8 mostra la struttura dei costi di manutenzione.

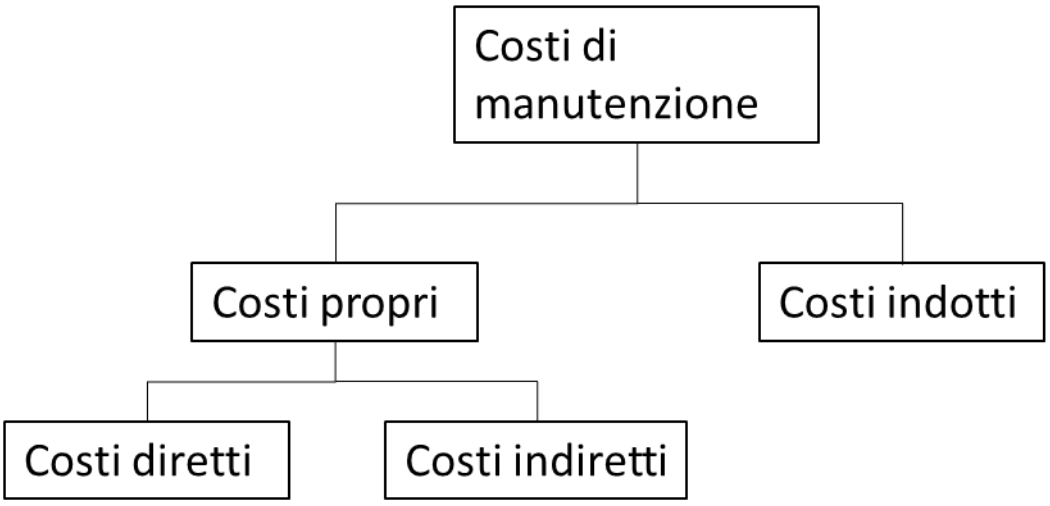



*Figura 8. Principali costi di manutenzione*

I costi propri, divisi in costi propri diretti e costi propri indiretti, rappresentano il costo delle risorse impiegate nella manutenzione.

I *costi propri diretti* comprendono:

1. *Manodopera diretta*: costi del personale direttamente impiegato negli interventi di manutenzione
2. *Prestazioni di terzi*: riguardano i costi sostenuti se l'attività di manutenzione viene svolta da società esterne che forniscono questi servizi, comprende manodopera, uso di attrezzature e materiali
3. *Materiali*: costi legati all'acquisto di materiali necessari per eseguire la manutenzione.

I *costi propri indiretti* comprendono:

1. Costi del personale indiretto che fa parte della struttura organizzativa della manutenzione
2. Costi delle attrezzature necessarie per l'operatività della struttura di manutenzione
3. Costi di giacenza a magazzino del materiale di ricambio, quindi gli oneri finanziari che derivano dal fatto di mantenere a magazzino dei pezzi di ricambio per eseguire il servizio di manutenzione.
4. Costi di eventuali servizi ausiliari per eseguire le attività di manutenzione.

Conseguentemente al presentarsi di un guasto si manifesta un'interruzione di servizio, e in questo caso si parla di mancata prestazione. La mancata prestazione può riguardare la qualità del servizio, l'efficienza del servizio o anche la mancata sicurezza (per l'ambiente, personale…). La valorizzazione economica di questa mancata prestazione è rappresentata dai costi indotti. In generale, il costo indotto può manifestarsi come conseguenza di un guasto del sistema (manutenzione correttiva), o come effetto della schedulazione di lavori di manutenzione sull'entità (manutenzione preventiva). Il fatto che gli interventi di manutenzione preventiva, possono essere fonti di costi indotti, non deve indurre a pensare che andrebbero evitati, poiché gli interventi preventivi svolgono una funzione essenziale nel ridurre la probabilità di guasto e quindi nel ridurre le interruzioni dovute a guasti. Inoltre, gli interventi di manutenzione programmata, essendo schedulati in modo da essere in linea con il piano di produzione, limitano il più possibile l'impatto dei costi indotti. Quindi si può affermare che i costi indotti possono essere ridotti con una buona politica di manutenzione programmata.

Le principali cause dei costi indotti sono:

1. Ritardata manutenzione: si generano dei costi indotti poiché non viene rispettato il programma di manutenzione e conseguentemente ci saranno delle interruzioni di servizio dovute a guasti (manutenzione correttiva)
2. Manutenzione imprecisa: se la qualità degli interventi di manutenzione è scarsa e quindi la manutenzione non rispristina il sistema nelle sue condizioni ottimali, dovrà essere ripetuta e conseguentemente si dovranno sostenere ulteriori costi.
3. Utilizzo dell'entità in modo improprio: se avviene un utilizzo scorretto dell'entità da parte del personale si generano dei costi indotti.

La tabella di seguito mostra alcuni esempi di costi indotti

*Tabella 4. Principali costi indotti*

| **Costi indotti per mancata erogazione del servizio** | |
|---|---|
| **Componente di costo** | **Descrizione** |
| Costi di mancato utilizzo dell'entità | Ridotto o mancato utilizzo della capacità di servizio durante il fermo marcia a seguito di un guasto |
| Costi di mancato utilizzo della manodopera | Ridotto o mancato utilizzo della manodopera nel caso non possa essere impiegata per svolgere altri compiti |
| Costi interni di non qualità (costi dovuti allo scarto del prodotto) | - Ispezione per identificare la difettosità del prodotto prima di essere immesso nel mercato<br>- Scarto del prodotto e del valore aggiunto durante la produzione |
| Costi esterni di non qualità | - Rimpiazzo di prodotti difettosi consegnati al cliente, analisi dei difetti ed eventuale riparazione<br>- Garanzia e responsabilità sul prodotto<br>- Mancate vendite come effetto della degradazione dell'immagine aziendale |
| **Costi indotti per inefficienza dell'esercizio** | |
| Costi di inefficienza di processo | Dovuti ad extra consumi di utilities (energia, acqua,…) e di altri materiali (oli lubrificanti,…) a causa del deterioramento progressivo dell'entità |

# 2 MODELLI PER POLITICHE DI MANUTENZIONE

In questo capitolo verrà presentata la modellizzazione delle politiche di manutenzione introdotte del capitolo precedente attraverso l'utilizzo della teoria dei processi stocastici Markoviani. Questo paragrafo si occupa di fornire le conoscenze di base dei processi di Markov per poter comprende al meglio i modelli che saranno presentati.

## 2.1 Introduzione Ai Processi Di Markov

I processi di Markov sono un particolare processo stocastico, in cui la probabilità di passare ad uno stato successivo dipende solo dallo stato attuale del sistema e non dalla storia passata del sistema. I processi stocastici di Markov definiti da spazi discreti e a tempo discreto sono anche conosciuti come Catene di Markov.

Le catene di Markov sono definite da:

- Uno spazio numerabile di stati $\{S_1, \dots, S_n\}$;
- Una probabilità di stato iniziale $\pi(0) = [p_{s_1}(0) \quad \dots \quad p_{s_n}(0)]$;
- Una matrice $n \times n$ di probabilità di transizione

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix}$$

Dove $p_{11}$ rappresenta la probabilità che al tempo successivo il processo rimanga nel primo stato, mentre $p_{12}$ rappresenta la probabilità di passare dallo stato 1 allo stato 2, e così via. In generale, $p_{ij}$ con $i, j = 1,2, \dots, n$ rappresenta la probabilità che il sistema passi dallo stato $i$ allo stato $j$ nello step temporale successivo. Si noti che la riga $i$-esima rappresenta dunque la distribuzione di probabilità riferita alla posizione che assumerà nell'immediato un sistema attualmente allo stato $i$. Per tal motivo ogni riga della matrice $P$ è normalizzata, ovvero:

$$\sum_{j=1}^{n} p_{ij} = 1 \quad \forall\, i = 1, \dots, n$$

Definiti gli stati possibili del sistema $\{S_1, \dots, S_n\}$ e fissato un intervallo di tempo $\Delta t$, la probabilità $p_{s_j}$ che il sistema si trovi nello stato $S_j$ al tempo $t + \Delta t$ è data da:

$$p_{S_j}(t + \Delta \mathrm{t}) = p_{1j} \cdot p_{S_1}(t) + \cdots + p_{nj} \cdot p_{S_n}(t) = \sum_{i=1}^{n} p_{ij} \cdot p_{S_j}(t)$$

Il vettore, di dimensione $n$ pari al numero di stati, che raccoglie tutte le probabilità di trovare il sistema in un determinato stato al tempo $t$ viene definito come:

$$\pi(t) = [p_{s_1}(t) \quad \dots \quad p_{s_n}(t)]$$

In generale è possibile calcolare il vettore $\pi(t + \Delta t)$ come:

$$\pi(t + \Delta t) = \pi(t) \cdot P$$

I processi di Markov che verranno presentati di seguito presentano due caratteristiche principali. Essi sono:

- *Processi omogenei*, ovvero processi in cui le probabilità di transizione $p_{ij}$ sono costanti nel tempo;
- *Processi ergodici*, ovvero processi omogenei, dove il valore finale di probabilità di stare in un determinato stato non dipende dalle condizioni iniziali del sistema.

Inoltre, se un processo di Markov è omogeneo ed ergodico, questo raggiunge uno stato stazionario (stato limite) che viene identificato da un vettore di probabilità stazionarie, calcolato risolvendo le seguenti equazioni:

$$\pi = \pi \cdot P$$

con la condizione supplementare:

$$\sum_{i=1}^{n} p_{S_i} = 1$$

## 2.2 Manutenzione Correttiva

Nel caso in cui si decida di seguire una strategia di manutenzione correttiva, l'entità verrà sostituita/riparata (as good as new), non appena si verifica il guasto. In questo caso quindi, l'output del modello sarà un costo medio di manutenzione stimato, Expeted Cost Maintenance per Period (ECMP). La modellizzazione presentata di seguito sarà sviluppata attraverso le catene di Markov in accordo con [2].

### 2.2.1 Assunzioni del modello

Il modello prevede le seguenti assunzioni:

- il processo considerato è omogeneo;
- Il tempo medio di manutenzione dell'entità è molto breve confrontato con il tempo medio di guasto e quindi può essere trascurato.

- La performance dell'entità non è una funzione del tempo trascorso dall'ultimo guasto (il guasto dell'entità può avvenire in modo casuale)
- L'attrezzatura può essere considerata "as good as new" dopo la manutenzione
- Nell'intervallo di transizione selezionato può verificarsi un solo guasto.

### 2.2.2 Notazione per il modello

La tabella di seguito mostra le variabili considerate nel modello.

*Tabella 5. Notazioni modello Manutenzione correttiva*

| Variabile | Descrizione |
|---|---|
| T | Intervallo Di Tempo Discreto Della Catena Di Markov. $T \in [1, T_{max}]$ |
| $T_{max}$ | Tempo Massimo Nel Quale L'entità Può Essere Operativa Senza Che Si Manifesti Il Guasto |
| $S_{max}$ | Numero Massimo Di Stati Della Catena Di Markov $(S_{max} = T_{max})$ |
| $P$ | Matrice Di Transizione Della Catena Di Markov |
| $S_1$ | Stato Di Partenza Della Catena Di Markov |
| $S_i$ | Stato I-Esimo Della Catena Di Markov |
| $p_{i,1}$ | Probabilità Di Transizione Dallo Stato I-Esimo Allo Stato 1 ($S_1$) |
| $p_{i,i+1}$ | Probabilità Di Transizione Dallo Stato I ($S_i$) Allo Stato I+1 ($S_{i+1}$) |
| $\lambda(t)$ | Tasso Di Guasto |
| $\pi^*$ | Vettore Delle Probabilità Di Stato A Regime |
| $p_{S_i}{}^*$ | Probabilità A Regime Di Essere Nello Stato I |
| $C_c$ | Costo Di Manutenzione Correttiva [Unità Monetarie/Intervento] |
| $i \in [1, S_{max}]$ | |

### 2.2.3 Modellizzazione

La catena di Markov che rappresenta il sistema è rappresentata in Figura 1.

Il sistema parte dallo stato $S_1$ e ad ogni passo di clock T, il sistema può passare allo stato successivo con probabilità $p_{i,i+1}$ nel caso non si manifesti un guasto, oppure tornare allo stato $S_1$ con probabilità $p_{i,1}$ nel caso si manifesti un guasto. Le probabilità di transizione sono definite:

- $p_{i,1} = \lambda(i)$ con $i = 1, \dots, T_{max}$
- $p_{i,i+1} = 1 - \lambda(i)$ con $i = 1, \dots, T_{max}$

Osservano la Figura 9 è possibile verificare che la catena non presenta stati assorbenti, e che ogni stato può essere raggiunto dopo un certo numero di transizioni. Quindi il processo si può definire ergodico e può essere definita la matrice di transizione P:

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & 0 & \cdots & 0 \\ p_{21} & 0 & p_{23} & \cdots & 0 \\ \vdots & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ p_{T_{max}-1,1} & \vdots & \vdots & \cdots & p_{T_{max}-1,T_{max}} \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

Una volta definita la matrice P è possibile trovare il vettore delle probabilità di stato stazionarie (o probabilità a regime) del sistema $\pi^*$.

$$\pi^* = \begin{bmatrix} {p_{s_1}}^* & {p_{s_2}}^* & {p_{s_3}}^* & \cdots & {p_{s_{T_{max}}}}^* \end{bmatrix}$$

Attraverso la seguente equazione:

$$\pi = \pi \times P$$

con la condizione addizionale:

$$\sum_{i=1}^{T_{max}} p_{Si} = 1$$

Così una volta determinato il vettore di stato delle probabilità a regime (o stazionarie) è possibile calcolare il costo medio per periodo (ECMP) della politica di manutenzione correttiva. In particolare, bisogna conoscere il costo di manutenzione correttiva ($C_c$) e moltiplicarlo per il numero di interventi correttivi previsti quando il sistema raggiunge lo stato permanente (regime). Il numero di attività correttive è contenuto nella prima componente del vettore di stato delle probabilità a regime (${p_{S1}}^*$), che rappresenta la probabilità di trovare il sistema nello stato $S_1$ (stato nel quale l'entità si trova se ha subito un guasto e quindi una riparazione).

L'equazione che rappresenta il costo medio di manutenzione correttiva per periodo viene definita:

$$ECMP = C_c * {p_{S1}}^*$$

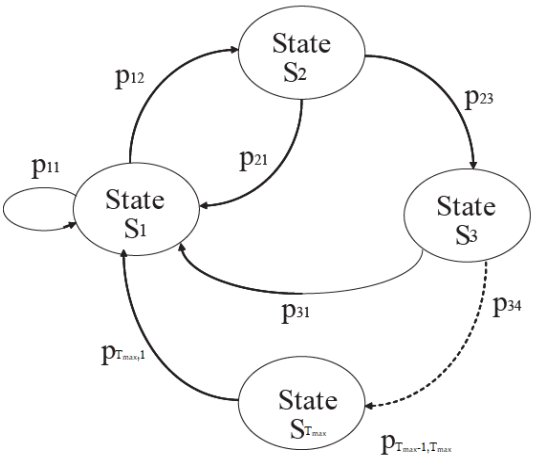



*Figura 9. Catena di Markov*

## 2.3 Manutenzione Preventiva A Data Costante

Nel caso si decida di attuare una strategia di manutenzione preventiva a data costante, l'entità sarà sottoposta a manutenzione di tipo preventivo ogni periodo T, e a manutenzione correttiva ogni volta che si verificherà un guasto all'interno dell'intervallo T. La Figura 10 mostra il sistema sottoposto a manutenzione preventiva a data costante. Nel seguente paragrafo verranno presentati 2 modelli per la strategia di manutenzione preventiva a data costante. Entrambi i modelli determinano l'intervallo $T^*$ ottimo di intervento preventivo che minimizza il costo di manutenzione ($ECMP^*$). Il primo utilizza un metodo modello I (Modello I), mentre il secondo modello prevede l'utilizzo delle catene di Markov (Modello II).

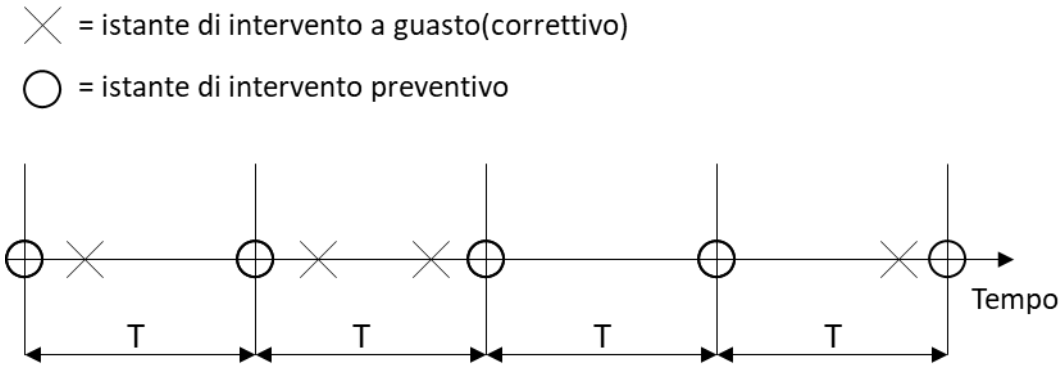



*Figura 10.Manutenzione a data costante*

### 2.3.1 Modello I

Il seguente modello si sviluppa in accordo con [1], [3].

#### 2.3.1.1 Assunzioni del modello

Il modello prevede le seguenti assunzioni:

- Il tempo medio di manutenzione dell'entità è molto breve confrontato con il tempo medio di guasto e quindi può essere trascurato.
- Il tempo medio di manutenzione preventiva dell'entità è molto breve confrontato con il tempo medio di guasto e quindi può essere trascurato.
- L'attrezzatura può essere considerata "as good as new" dopo l'intervento di manutenzione correttivo/preventivo
- Il periodo T deve essere scelto in modo che all'interno di T può avvenire al più un solo guasto.
- Il costo di manutenzione preventiva deve essere minore del costo di manutenzione correttiva, perché altrimenti risulterebbe inutile un'azione di tipo preventivo.
- L' entità una volta ripristinata/sostituita segue sempre la stessa legge di affidabilità R(T)

#### 2.3.1.2 Notazione per il modello

La tabella di seguito mostra le variabili considerate nel modello.

*Tabella 6. Notazioni modello I Data Costante*

| Variabile | Descrizione |
|---|---|
| T | Intervallo Di Manutenzione Preventiva (Durata Ciclo Di Manutenzione).$\mathrm{T} \in [1, T_{max}]$ |
| $T_{max}$ | Periodo Massimo Nel Quale L'entità Può Essere Operativa Senza Che Si Manifesti Il Guasto |
| $T^*$ | Intervallo Ottimo Di Manutenzione Preventiva Che Minimizza Il Costo Di Manutenzione (Durata Ottima Ciclo Di Manutenzione) |
| $ECMP(T)$ | Expected Cost Maintenance Per Period |
| $ECMP^*(T)$ | Expected Cost Maintenance Per Period Ottimo |
| $H(t)$ | Numero Atteso Di Guasti Nell'intervallo (0, T] |
| $f(t)$ | Funzione Di Densità Di Probabilità Del Guasto |
| $C_p$ | Costo Di Intervento Di Tipo Preventivo [Unità Monetarie/Intervento] |
| $C_c$ | Costo Di Intervento Di Tipo Correttivo [Unità Monetarie/Intervento] |

#### 2.3.1.3 *Modellizzazione*

Per cercare di creare un modello per questa politica di manutenzione bisogna definire una funzione che determini il costo atteso per ogni intervallo di manutenzione T:

$$ECMP(T) = \frac{C_p + C_c * H(T)}{T}$$

Cioè il costo atteso per periodo T può essere determinato come il costo di manutenzione preventiva, sommato al costo di manutenzione correttiva per il numero di guasti che si sono verificati nell'intervallo (0, T].

Una volta descritta la funzione di costo, il primo passo da eseguire consiste nel determinare il numero atteso di guasti nel periodo T di manutenzione ciclica come segue:

$$H(T) = \sum_{i=0}^{T-1} [1 + H(T - i - 1)] * \int_{i}^{i+1} f(t)dt$$

Quindi per ogni periodo T∈[1, $T_{max}$] si calcola il numero atteso di guasti H(T), e conoscendo i costi $C_p$ e $C_c$ è possibile calcolare il costo atteso di manutenzione per ogni ciclo di manutenzione ECMP(T). Il periodo ottimo $T^*$, corrisponde al periodo dove il ECMP(T) è minimo.

In generale il ECMP(T) dipende dai costi $C_p$ e $C_c$ e anche dalla funzione di densità di probabilità $f(t)$. Una volta calcolati per T∈[1, $T_{max}$] tutti gli ECMP, la funzione dovrebbe essere una funzione convessa, che prima decresce fino a $T^*$ e poi cresce fino a $T_{max}$.

Nel caso venisse fuori una funzione monotona decrescente il modello prevede che non è necessaria alcuna manutenzione di tipo preventiva ma è più conveniente in termini di costi una manutenzione correttiva.

### 2.3.2 Modello II

Il modello presentato di seguito è in accordo con [2].

#### 2.3.2.1 *Assunzioni del modello*

Il modello prevede le seguenti assunzioni:

- Il processo considerato è omogeneo
- Il tempo medio di manutenzione correttiva dell'entità è molto breve confrontato con il tempo medio di guasto e quindi può essere trascurato.

- Il tempo medio di manutenzione preventiva dell'entità è molto breve confrontato con il tempo medio di guasto e quindi può essere trascurato.
- La performance dell'entità non è una funzione del tempo trascorso dall'ultimo guasto (il guasto dell'entità può avvenire in modo casuale)
- Indipendentemente dalla politica di manutenzione, i guasti si verificheranno in base a una determinata funzione di distribuzione.
- L'attrezzatura può essere considerata "as good as new" dopo l'intervento di manutenzione correttivo/preventivo
- Nell'intervallo di transizione selezionato può verificarsi un solo guasto.
- Il costo di manutenzione preventiva deve essere minore del costo di manutenzione correttiva, perché altrimenti risulterebbe inutile un'azione di tipo preventivo.

#### *2.3.2.2 Notazione per il modello*

La tabella di seguito mostra le variabili considerate nel modello.

*Tabella 7. Notazioni modello II Data Costante*

| Variabile | Descrizione |
|---|---|
| T | Intervallo Di Tempo Discreto Della Catena Di Markov. $T \in [1, T_{max}]$ |
| $T_{max}$ | Tempo Massimo Nel Quale L'entità Può Essere Operativa Senza Che Si Manifesti Il Guasto |
| $T_2$ | intervallo di manutenzione preventiva. $T_2 \in [1, T_{max}]$ |
| $S_{max}$ | Numero Massimo Di Stati Della Catena Di Markov ($S_{max} = T_{max}$) |
| $P$ | Matrice Di Transizione Della Catena Di Markov |
| $M$ | Matrice Di Manutenzione |
| $S_1$ | Stato Di Partenza Della Catena Di Markov (entità è pari al nuovo) |
| $S_i$ | Stato I-Esimo Della Catena Di Markov |
| $p_{i,1}$ | Probabilità Di Transizione Dallo Stato I-Esimo Allo Stato 1 ($S_1$) |
| $p_{i,i+1}$ | Probabilità Di Transizione Dallo Stato I ($S_i$) Allo Stato I+1 ($S_{i+1}$) |
| $\lambda(t)$ | Tasso Di Guasto |
| $\pi(T)$ | vettore delle probabilità di stato al tempo T |
| $p_{S_i}(T)$ | probabilità di essere nello stato i al tempo T |
| $\pi(0)$ | vettore di stato iniziale (il sistema si trova nello stato $S_1$) |
| $C_c$ | Costo Di Manutenzione Correttiva [Unità Monetarie/Intervento] |
| $C_p$ | costo di intervento di tipo preventivo [unità monetarie/intervento] |
| $i \in [1, S_{max}]$ | |

#### 2.3.2.3 Modellizzazione

Come detto precedentemente si assume che se la manutenzione viene fatta dopo il verificarsi di un guasto si parla di manutenzione correttiva invece se viene effettuata ogni intervallo di tempo $T_2$ si parla di manutenzione preventiva. Il sistema parte dallo stato $S_1$ e ad ogni passo di clock T può passare allo stato successivo con probabilità $p_{i,i+1}$ nel caso non si manifesti un guasto, oppure tornare allo stato $S_1$ con probabilità $p_{i,1}$ nel caso si manifesti un guasto. Le probabilità di transizione sono definite:

- $p_{i,1} = \lambda(i)$ con $i = 1, \dots, T_2$
- $p_{i,i+1} = 1 - \lambda(i)$ con $i = 1, \dots, T_2$

La Figura 11 mostra l'evoluzione del sistema.

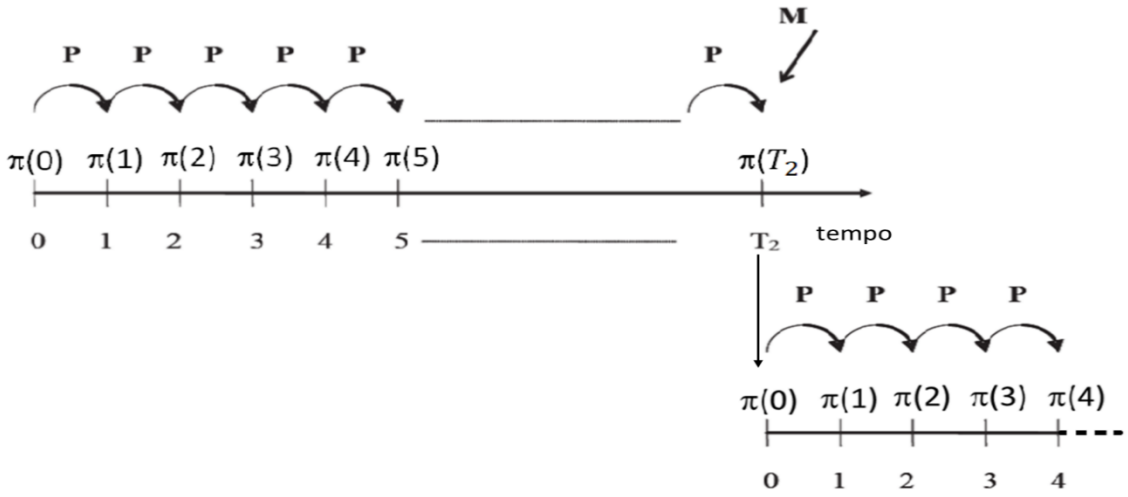



*Figura 11.Evoluzione del sistema con politica di manutenzione a data costante*

In particolare, il sistema ogni $T_2$ periodi di tempo, risulta sempre as good as new e questo viene formalizzato introducendo la matrice di manutenzione M. Per formalizzare nel modello l'effetto della manutenzione la matrice M deve essere definita come segue:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

Ovvero una matrice quadrata di dimensioni $T_{max} \times T_{max}$, dove gli elementi della prima colonna sono uguali a 1 mentre il resto della matrice è settata a 0. Questo permette di modellare l'effetto della manutenzione preventiva:

$$\pi(0) = \pi(T_2) \times \mathrm{M} \qquad \text{con } \pi(0) = [1 \quad 0 \quad \cdots \quad 0 \quad 0]$$

Cioè per ogni intervallo di manutenzione preventiva $T_2$ il vettore di stato al tempo $T_2$ viene moltiplicato per la matrice di manutenzione M, e questo riporta il sistema alle condizioni iniziali $\pi(0)$ , dove la probabilità che il sistema si trovi nello stato $S_1$ è pari a 1.

L'evoluzione del sistema all'interno del ciclo di manutenzione può essere formalizzata come segue:

$$\pi(i+1) = \pi(i) \times P \qquad con\ i = 0, \ldots\ldots, T_2 - 1$$

Dove la matrice P è la matrice di transizione di dimensione $T_{max} \times T_{max}$ definita come segue:

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & 0 & \cdots & 0 \\ p_{21} & 0 & p_{23} & \cdots & 0 \\ \vdots & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ p_{T_2-1,1} & \vdots & \vdots & \cdots & p_{T_2-1,T_2} \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

Osservando la figura 3, si può notare come il sistema non è rappresentato da un processo ergodico, poiché con l'azione della manutenzione preventiva il sistema viene resettato ogni ciclo $T_2$, non permettendo il raggiungimento del regime stazionario come nel caso del modello di manutenzione correttiva.

Una volta capito come evolve il sistema, è possibile calcolare il costo atteso per ogni periodo della politica di manutenzione adottata come:

$$ECMP(T_2) = \frac{C_p + C_c * \sum_{i=1}^{T_2} p_{S1}(i)}{T_2}$$

Dove $\sum_{i=1}^{T_2} p_{S1}(i)$ rappresenta il numero atteso di volte che il sistema si trovi nello stato $S_1$, e quindi il numero atteso di volte che si è verificata un'azione di tipo correttivo a seguito di un guasto verificatosi all'interno dell'intervallo di manutenzione preventiva $T_2$.

Applicando il modello per $T_2 \in [1, T_{max}]$ sarà possibile calcolare il costo atteso di manutenzione per ogni periodo $T_2$ e quindi andare a identificare il $T_2$ al quale corrisponde il $ECMP(T_2)_{min}$. Anche in questo caso come nel modello I, la funzione di ECMP($T_2$) dovrebbe essere una funzione convessa, che prima decresce fino a $T_2$ e poi cresce fino a $T_{max}$. Nel caso venisse fuori una funzione monotona decrescente di ECMP($T_2$) il modello prevede che non è necessaria alcuna manutenzione di tipo preventiva ma è più conveniente in termini di costi una manutenzione correttiva.

## 2.4 Manutenzione Preventiva Ad Età Costante

Nel caso si decida di seguire una strategia di manutenzione preventiva ad età costante, la manutenzione viene eseguita nel momento in cui viene raggiunta una determinata età di servizio (T) rispetto all'ultimo intervento di manutenzione eseguito, sia esso preventivo o a guasto. La figura 4 mostra il sistema sottoposto ad intervento preventivo ad età costante. Pertanto, durante il periodo (0, T] il sistema può essere sottoposto ad intervento preventivo se raggiungerà l'età T, oppure potrà essere sottoposto ad intervento correttivo qualora il guasto si verifichi prima del raggiungimento dell'età T. Nel seguente paragrafo verranno presentati 2 modelli per la strategia di manutenzione preventiva ad età costante. Entrambi i modelli determinano il $T^*$ ottimo di intervento preventivo che minimizza il costo di manutenzione ($ECMP^*$). Il primo utilizza un metodo modello I (Modello I), mentre il secondo modello prevede l'utilizzo delle catene di Markov (Modello II).

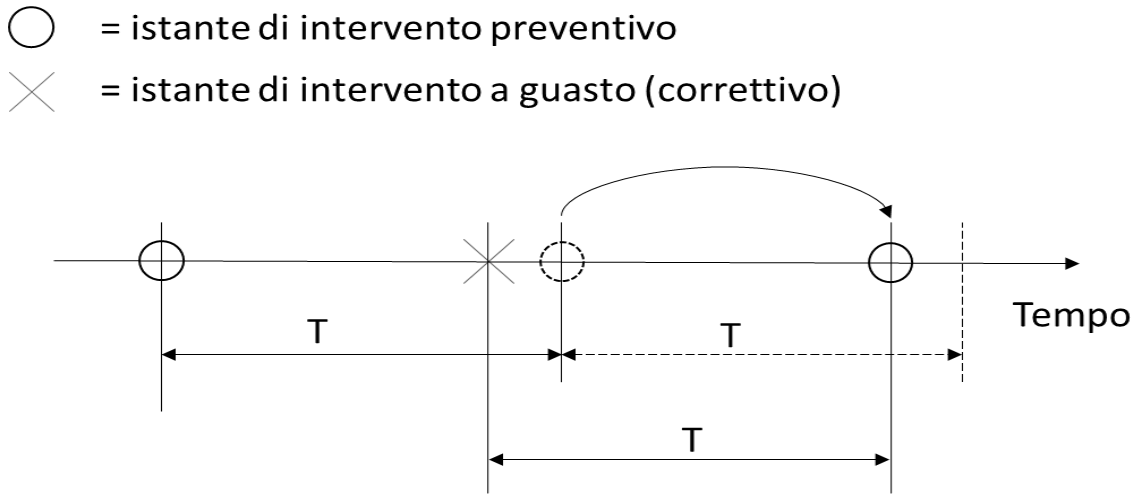



*Figura 12. Manutenzione ad età costante*

### 2.4.1 Modello I

Il seguente modello fa riferimento [1], [3]

#### *2.4.1.1 Assunzioni del modello*

Il modello prevede le seguenti assunzioni:

- Il tempo medio di manutenzione correttiva dell'entità è molto breve confrontato con il tempo medio di guasto e quindi può essere trascurato.

- Il tempo medio di manutenzione preventiva dell'entità è molto breve confrontato con il tempo medio di guasto e quindi può essere trascurato.
- La performance dell'entità non è una funzione del tempo trascorso dall'ultimo guasto (il guasto dell'entità può avvenire in modo casuale)
- Indipendentemente dalla politica di manutenzione, i guasti si verificheranno in base a una determinata funzione di distribuzione.
- L'attrezzatura può essere considerata "as good as new" dopo l'intervento di manutenzione correttivo/preventivo
- Il periodo T deve essere scelto in modo che all'interno di T può avvenire al più un solo guasto.
- Il costo di manutenzione preventiva deve essere minore del costo di manutenzione correttiva, perché altrimenti risulterebbe inutile un'azione di tipo preventivo.
- L' entità una volta ripristinata/sostituita segue sempre la stessa legge di affidabilità R(T)

#### *2.4.1.2 Notazione per il modello*

La tabella di seguito mostra le variabili considerate nel modello.

*Tabella 8. Notazioni modello I Età Costante*

| Variabile | Descrizione |
|---|---|
| T | Intervallo Di Manutenzione Preventiva (Durata Ciclo Di Manutenzione).$T \in [1, T_{max}]$ |
| $T_{max}$ | Periodo Massimo Nel Quale L'entità Può Essere Operativa Senza Che Si Manifesti Il Guasto |
| $T^*$ | Periodo Ottimo Di Manutenzione Preventiva Che Minimizza Il Costo Di Manutenzione (Durata Ottima Ciclo Di Manutenzione) |
| $ECMP(T)$ | Expected Cost Maintenance Per Period |
| $ECMP^*(T)$ | Expected Cost Maintenance Per Period Ottimo |
| $f(t)$ | Funzione Di Densità Di Probabilità Del Guasto |
| $F(T)$ | inaffidabilità al tempo T (funzione cumulata di $f(t)$) |
| $R(T)$ | affidabilità al tempo T ( $1 - F(T)$) |
| $M(T)$ | Durata attesa del ciclo di guasto |
| $MTBM(T)$ | Mean time between maintenance |
| $C_p$ | Costo Di Intervento Di Tipo Preventivo [Unità Monetarie/Intervento] |
| $C_c$ | Costo Di Intervento Di Tipo Correttivo [Unità Monetarie/Intervento] |

#### 2.4.1.3 Modellizzazione

Come visto nella descrizione del funzionamento della strategia ad età costante illustrata all'inizio del paragrafo, la durata del ciclo di manutenzione non coincide sempre con il periodo T come nel caso di manutenzione preventiva a data costante. Il ciclo di manutenzione può durare T se non si verifica nessun guasto nell'intervallo T (viene eseguito un intervento preventivo), oppure sarà uguale a M(T) nel caso il sistema si guasta all'interno dell'intervallo di T. Quindi la durata attesa del ciclo di manutenzione al variare di T può essere calcolata come segue:

$$MTBM(T) = R(T) * T + F(T) * M(T)$$

Dove:

R(T): rappresenta la probabilità che l'età T venga raggiunta senza l'accadimento di un guasto e quindi rappresenta la probabilità di effettuare una sostituzione preventiva

F(T): rappresenta la probabilità che l'età T non venga raggiunta e quindi la probabilità di effettuare manutenzione correttiva

T: durata del ciclo di manutenzione se viene effettuata manutenzione preventiva

M(T): durata attesa del ciclo di manutenzione se viene effettuata manutenzione correttiva a seguito di un guasto nell'intervallo (0, T]

Per poter procedere con lo sviluppo del modello è necessario calcolare quindi MTBM(T), e quindi calcolare M(T). Osservando la Figura 13 si nota che: nel caso in cui si voglia eseguire sola manutenzione correttiva (T tendente ad infinito) il MTBF (mean time between failuire) sarebbe:

$$MTBF = \int_0^{\infty} t * f(t)dt$$

Invece, nel caso in cui si voglia eseguire manutenzione ciclica a età costante T, la durata attesa del ciclo di manutenzione in caso di intervento correttivo risulta essere:

$$M(T) = \frac{\int_0^T t * f(t)dt}{[1 - R(T)]}$$

Sostituendo quest'ultimo termine nell'equazione del MTBM(T) si ottiene:

$$MTBM(T) = R(T) * T + \int_0^T t * f(t)dt$$

Che come detto precedentemente rappresenta la durata attesa del ciclo di manutenzione al variare di T.

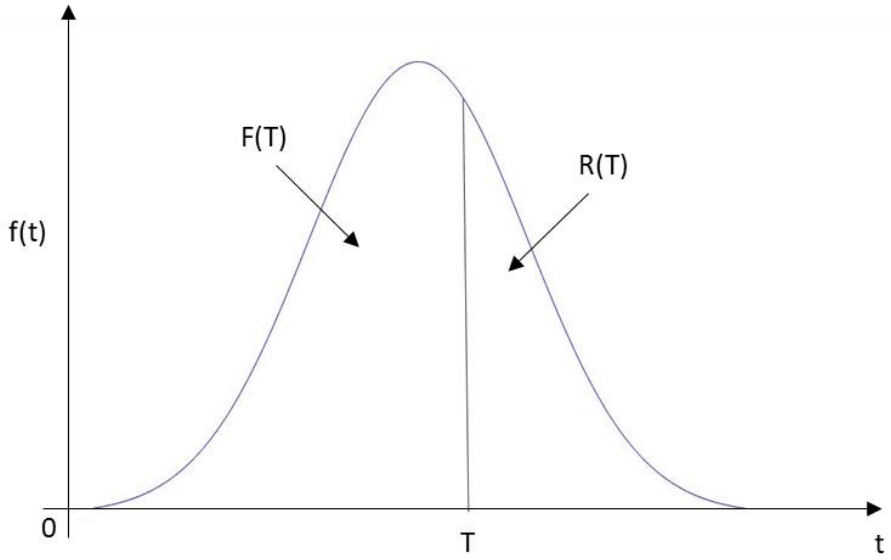



*Figura 13. Calcolo della durata attesa del ciclo di manutenzione in caso di intervento correttivo*

Una volta definito il MTBM(T) bisogna definire una funzione di costo ECMP(T).

$$ECMP(T) = \frac{C_c * F(T) + C_p * R(T)}{MTBM(T)}$$

Cioè ci sarà un costo di manutenzione correttiva moltiplicata per la probabilità che il guasto avvenga prima di T, sommato al costo di manutenzione preventiva per la probabilità che l'entità sopravviva fino al tempo T. Il tutto viene diviso per la durata attesa del ciclo di manutenzione.

Quindi per ogni $T \in [1, T_{max}]$ viene calcolato il MTBM(T) e consecutivamente il ECMP(T), e come nel caso della manutenzione preventiva a data costante viene presa l'età $T^*$ ottima che minimizza il $ECMP^*(T^*)$. La funzione di ECMP(T) dovrebbe essere una funzione convessa, che prima decresce fino a $T^*$ e poi cresce fino a $T_{max}$. Nel caso venisse fuori una funzione monotona decrescente di ECMP(T) il modello prevede che non è necessaria alcuna

manutenzione di tipo preventiva ma è più conveniente in termini di costi una manutenzione correttiva.

### 2.4.2 Modello II

Il seguente modello è in accordo con [2]

#### *2.4.2.1 Assunzioni del modello*

Il modello prevede le seguenti assunzioni:

- Il processo considerato è omogeneo
- Il tempo medio di manutenzione correttiva dell'entità è molto breve confrontato con il tempo medio di guasto e quindi può essere trascurato.
- Il tempo medio di manutenzione preventiva dell'entità è molto breve confrontato con il tempo medio di guasto e quindi può essere trascurato.
- La performance dell'entità non è una funzione del tempo trascorso dall'ultimo guasto (il guasto dell'entità può avvenire in modo casuale)
- Indipendentemente dalla politica di manutenzione, i guasti si verificheranno in base a una determinata funzione di distribuzione.
- L'attrezzatura può essere considerata "as good as new" dopo l'intervento di manutenzione correttivo/preventivo
- Nell'intervallo di transizione selezionato può verificarsi un solo guasto.
- Il costo di manutenzione preventiva deve essere minore del costo di manutenzione correttiva, perché altrimenti risulterebbe inutile un'azione di tipo preventivo.

#### *2.4.2.2 Notazione per il modello*

La tabella di seguito mostra le variabili considerate nel modello.

*Tabella 9. Notazioni modello II Età Costante*

| Variabile | Descrizione |
|---|---|
| T | Intervallo Di Tempo Discreto Della Catena Di Markov. $T \in [1, T_{max}]$ |
| $T_{max}$ | Tempo Massimo Nel Quale L'entità Può Essere Operativa Senza Che Si Manifesti Il Guasto |
| $T_2$ | intervallo di manutenzione preventiva. $T_2 \in [1, T_{max}]$ |

| Variabile | Descrizione |
|---|---|
| $T_3$ | numero minimo di intervalli di funzionamento del sistema per eseguire la manutenzione preventiva $T_3 \in [2, T_{max})$ |
| $tp$ | istante di inizio del ciclo limite |
| $S_{max}$ | Numero Massimo Di Stati Della Catena Di Markov ($S_{max} = T_{max}$) |
| $P$ | Matrice Di Transizione Della Catena Di Markov |
| $M$ | Matrice Di Manutenzione |
| $S_1$ | Stato Di Partenza Della Catena Di Markov (entità è pari al nuovo) |
| $S_i$ | Stato I-Esimo Della Catena Di Markov |
| $p_{i,1}$ | Probabilità Di Transizione Dallo Stato I-Esimo Allo Stato 1 ($S_1$) |
| $p_{i,i+1}$ | Probabilità Di Transizione Dallo Stato I ($S_i$) Allo Stato I+1 ($S_{i+1}$) |
| $\lambda(t)$ | Tasso Di Guasto |
| $\pi(T)$ | vettore delle probabilità di stato al tempo T |
| $p_{S_i}(T)$ | probabilità di essere nello stato i al tempo T |
| $C_c$ | Costo Di Manutenzione Correttiva [Unità Monetarie/Intervento] |
| $C_p$ | costo di intervento di tipo preventivo [unità monetarie/intervento] |
| $i \in [1, S_{max}]$ | |

### *2.4.2.3 Modellizzazione*

Come per gli altri modelli sviluppati secondo processi Markoviani, il sistema parte dallo stato $S_1$ e ad ogni passo di clock T, può passare allo stato successivo con probabilità $p_{i,i+1}$, nel caso non si manifesti un guasto, oppure tornare allo stato $S_1$ con probabilità $p_{i,1}$nel caso si manifesti un guasto. Le probabilità di transizione sono definite:

$$p_{i,1} = \lambda(i) \qquad \text{con } i = 1, \dots, T_2$$

$$p_{i,i+1} = 1 - \lambda(i) \qquad \text{con } i = 1, \dots, T_2$$

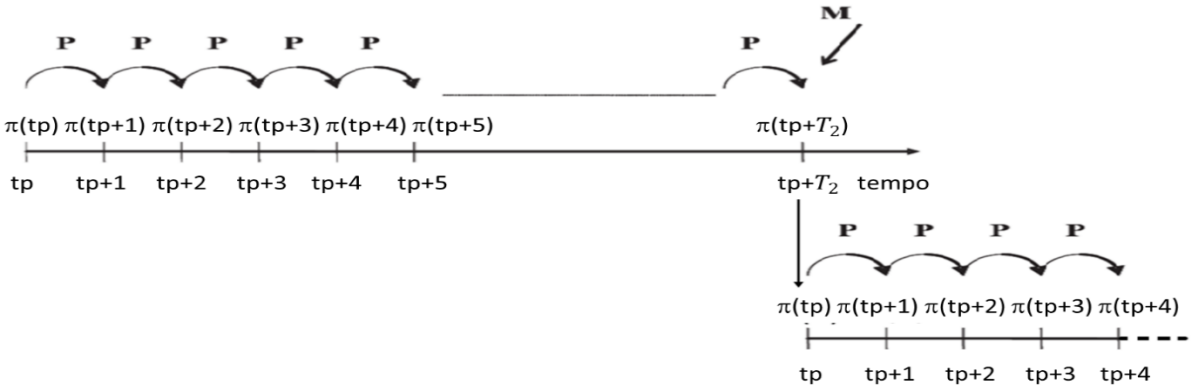



*Figura 14.Evoluzione del sistema in caso di manutenzione basata sull'età*

La strategia di manutenzione prevede che ogni $T_2$ periodi di tempo viene eseguito un intervento preventivo se il sistema sta funzionando da più di $T_3$ periodi senza aver subito guasti.

$T_3$ deve sodisfare le seguenti condizioni:

- $T_3<T_{max}$ poiché per come viene definito $T_{max}$, nessun sistema può "sopravvivere" più di $T_{max}$ periodi di tempo. Inoltre, se $T_3\geq T_{max}$ vorrebbe dire non eseguire alcun intervento preventivo e si ritornerebbe alla strategia di manutenzione correttiva.
- $T_3>1$ poiché altrimenti il modello ritornerebbe ad essere lo stesso del caso di manutenzione preventiva a data costante.

Come nel modello presentato per la politica di manutenzione a data costante, dopo la manutenzione preventiva, vi è una transizione del sistema da uno stato qualsiasi $S_i$ allo stato $S_1$ (stato in cui il sistema è as good as new). In questo modello però il sistema viene ripristinato ogni $T_2$ periodi di tempo, solo se sono passati $T_3$ periodi di funzionamento senza guasti. Per formalizzare l'effetto di questa politica di manutenzione viene introdotta una matrice di manutenzione M strutturata come segue:

$$M = \begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccccccc} & & & & T_3 & T_3+1 & \\ \end{array} \\ \left[\begin{array}{ccccc|cc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \hline 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{array}\right] \end{array}$$

M è definita come una matrice quadrata di dimensione $T_{max}\times T_{max}$ che sarà una matrice diagonale fino alla riga $T_3$, mentre dopo la riga $T_3$ la matrice M è uguale alla matrice M presentata nel caso di politica di manutenzione a data costante cioè la prima colonna sarà uguale a uno e il resto della matrice sarà settata a zero. La matrice M introdotta non resetta il vettore delle probabilità di stato ogni $T_2$ periodi di tempo. (Ora, viene considerato il tempo trascorso dall'ultimo guasto dell'attrezzatura, oltre al valore di T2 selezionato nella politica di manutenzione.) Di conseguenza, si può dimostrare che il sistema non raggiunge uno stato permanente o uno stato limite, ma un ciclo limite o ciclo permanente che si ripete. Durante

questo ciclo di periodi di tempo, il vettore di stato assume determinati valori che si ripetono periodicamente nel tempo. La figura 6 mostra l'evoluzione del sistema. L'evoluzione del sistema prima di raggiungere il ciclo permanente sarà uguale al caso visto per un sistema al quale si effettua solo manutenzione correttiva:

$$\pi(k+1) = \pi(k) \times P \qquad con\ k = 0,1,2,\dots,tp-1$$

Finché non viene raggiunto il ciclo limite

$$\pi(tp) = \pi(tp) \times P$$

Dove la matrice P è la matrice di transizione di dimensione $T_{max} \times T_{max}$ definita come segue:

$$P = \begin{bmatrix} p11 & p12 & 0 & \cdots & 0 \\ p21 & 0 & p23 & \cdots & 0 \\ \vdots & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ pT_2 - 1,1 & \vdots & \vdots & \cdots & pT_2 - 1, T_2 \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

Una volta raggiunto il ciclo limite il sistema evolverà come segue:

$$\pi(tp+1) = \pi(tp) \times P$$

$$\pi(tp+2) = \pi(tp+1) \times P = \pi(tp) \times P^2$$

$$\dots$$

$$\pi(tp+T_2) = \pi(tp+T_2-1) \times P = \pi(tp) \times P^{T_2}$$

Il sistema evolve in modo simile al caso della politica di manutenzione a data costante solo che in questo caso il vettore di stato da cui parte il sistema dopo la manutenzione è $\pi(tp)$ (condizione del sistema nell'istante iniziale del ciclo limite) invece di essere $\pi(0)$ come nel caso a data costante.

Facendo riferimento a quanto detto:

$$\pi(tp+T_2) \times M = \pi(tp) \times P^{T_2} \times M = \pi(tp)$$

Quindi è possibile ottenere il vettore di stato $\pi(tp)$ per il periodo di tempo del ciclo limite (tp) come segue:

$$\pi(tp)[P^{T_2} \times M - I] = 0 \qquad con\ I: matrice\ identità\ e\ 0\ matrice\ nulla$$

E con la seguente condizione addizionale:

$$\sum_{i=1}^{T_{max}} p_{Si}\,(tp) = 1$$

Una volta determinato il vettore $\pi(tp)$ possono essere applicate le equazioni sopra descritte per il sistema dopo aver raggiunto il ciclo limite.

Osservazione: il calcolo dei vettori di probabilità dello stato del ciclo limite potrebbe essere effettuato partendo da un diverso punto nel tempo del ciclo. Ad esempio, attraverso il seguente sistema di equazioni:

$$\pi(tp + T_2)[P^{T_2} \times M - I] = 0 \qquad con\ I: matrice\ identità\ e\ 0\ matrice\ nulla$$

$$\sum_{i=1}^{T_{max}} p_{Si}\,(tp + T_2) = 1$$

Una volta determinato $\pi(tp + T_2)$ si possono determinare il resto degli elementi del ciclo limite.

Appreso come evolve il sistema è possibile calcolare il costo atteso per ogni valore di $T_2$ e $T_3$ ECMP ($T_2$, $T_3$):

$$ECMP(T_2, T_3) = \frac{C_p * \sum_{i=T_{3+1}}^{T_{max}} p_{Si}(tp + T_2) + C_c * \sum_{i=tp+1}^{tp+T_2} p_{S1}(i)}{T_2}$$

Dove:

$\sum_{i=T_{3+1}}^{T_{max}} p_{Si}(tp + T_2)$ rappresenta il numero atteso di manutenzioni di tipo preventivo

$\sum_{i=tp+1}^{tp+T_2} p_{S1}(i)$rappresenta il numero atteso di interventi di tipo correttivo

Quindi è possibile determinare per tutti i valori di $T_2$ e $T_3$ il costo atteso e quindi i valori di $T_2^*$ e $T_3^*$ ottimi a cui corrisponde il ECMP $(T_2^*, T_3^*)_{min}$. La funzione di ECMP ($T_2$, $T_3$) dovrebbe essere una funzione convessa, che prima decresce fino a $T^*$ e poi cresce fino a $T_{max}$. Nel caso venisse fuori una funzione monotona decrescente di ECMP ($T_2$, $T_3$) il modello prevede che non è necessaria alcuna manutenzione di tipo preventiva ma è più conveniente in termini di costi una manutenzione correttiva.

### 2.4.3 Modello III

#### *2.4.3.1 Notazione per il modello*

La tabella di seguito mostra le variabili considerate nel modello.

*Tabella 10. Notazioni modello III Età Costante*

| Variabile | Descrizione |
|---|---|
| T | periodo di manutenzione preventiva |
| $ECMP(T)$ | Expected Cost Maintenance Per Period |
| $Nguasti$ | numero di interventi correttivi effettuati durante la simulazione |
| $Npreventivi$ | numero di interventi preventivi effettuati durante la simulazione |
| Soglia | Soglia di usura max al di sopra della quale si manifesta il guasto |
| $C_p$ | Costo Di Intervento Di Tipo Preventivo [Unità Monetarie/Intervento] |
| $C_c$ | Costo Di Intervento Di Tipo Correttivo [Unità Monetarie/Intervento] |

### *2.4.3.2 Modellizzazione*

Per poter implementare il modello che verrà descritto è necessario conoscere lo stato di usura del sistema $Y(t)$ per ogni unità temporale fino al guasto $Y(t_{max})$. Inoltre, è necessario conoscere un valore di soglia dell'indicatore di usura del sistema altre il quale si verifica un guasto. Come primo step del modello si procede stimando un modello di tipo lineare o esponenziale partendo dai dati storici di degrado del sistema.

Nel caso in cui l'andamento di degradazione del sistema sia di tipo lineare il modello di riferimento è il seguente:

$$M(t) = \Phi + \theta(t)t + \varepsilon(t)$$

Dove:

$\Phi$: è l'intercetta del modello

$\theta(t)$: è la pendenza del modello e viene modellata come una variabile casuale con una distribuzione normale con media Theta e varianza ThetaVariance

$\varepsilon(t)$: è il rumore aggiuntivo del modello modellato con una distribuzione normale con media zero e varianza NoiseVariance.

Se l'andamento di degradazione del sistema può essere approssimato ad un modello esponenziale bisognerà seguire:

$$M(t) = \Phi + \theta(t)\exp\left(\beta(t)\,t + \varepsilon(t) - \frac{\sigma^2}{2}\right)$$

Dove:

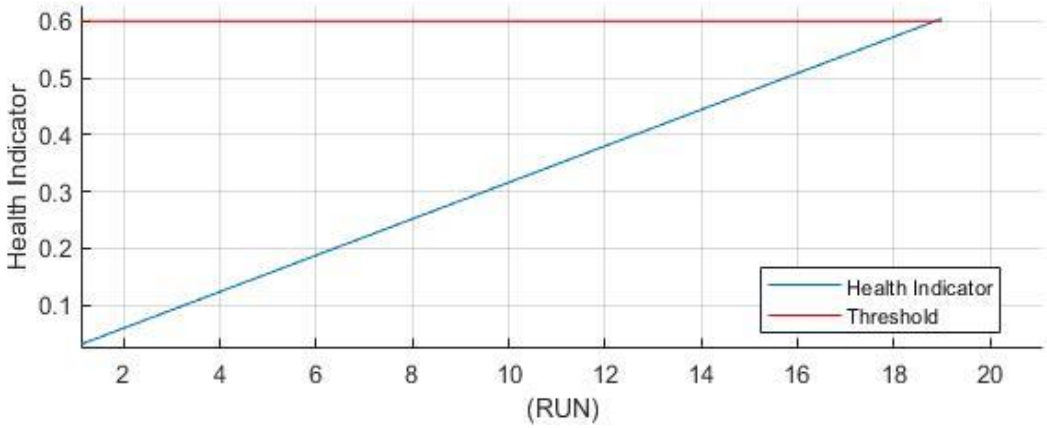
$\Phi$: è l'intercetta del modello

$\theta(t)$: è una variabile casuale che determina la pendenza del modello ed è distribuita secondo una distribuzione lognormale con media Theta e varianza ThetaVariance

$\beta(t)$: è una variabile casuale che determina la pendenza del modello ed è distribuita secondo una distribuzione Gaussiana con media Beta e varianza BetaVariance

$\varepsilon(t)$: è il rumore bianco Gaussiano e segue una normale con media zero e varianza NoiseVariance $\sigma^2$ .

Una volta stimato il modello che maggiormente si adatta ai dati storici a disposizione si calcola il periodo T di manutenzione preventiva come il periodo che viene fuori dall'intersezione del modello con la soglia di usura.




Una volta calcolato il periodo T non è possibile stimare a priori $ECMP(T)$, ma si può stimare un costo atteso solo attraverso la simulazione a eventi discreti. Il costo sarà:

$$ECMP = \frac{C_c * Nguasti + C_p * Npreventivi}{Tempo\ di\ lavorazione}$$

## 2.5 Manutenzione Predittiva

I modello presentati in precedenza, si basano tutti su dati storici di guasto e quindi determinano "a priori" un intervallo T ottimo di manutenzione e un costo atteso di manutenzione. Le strategie basate su manutenzione predittiva invece sono in grado di determinare intervalli di manutenzione T che dipendono dallo stato di usura dell'entità. Grazie a dei sensori installati sul sistema (tool condition monitoring), determinati parametri vengono letti e tramite algoritmi di previsione si riesce ad estimare lo stato di usura dell'entità. Questi algoritmi sono caratterizzati da indici di performances che descrivono l'affidabilità della predizione. Il criterio di valutazione più comunemente utilizzato è la distribuzione degli errori del modello $\varepsilon_{modello}$. Condizione necessaria per l'accettazione di un particolare modello è che la distribuzione dei suoi errori segui una distribuzione normale

attorno al valore nullo, ovvero $\varepsilon_{modello} \sim N(0, \sigma^2_{modello})$. I modelli che verranno presentati di seguito hanno come obiettivo centrale quello di prevedere il Remaning Useful Life (RUL) dell'entità, partendo da valori di dati storici di usura e dall'usura stimata. Il Remaning Useful Life è definito come la durata prevista o il tempo di utilizzo rimanente prima che la macchina richieda la riparazione o la sostituzione. Il termine durata prevista si riferisce alla vita della macchina definita in termini di quantità utilizzata per misurare la vita del sistema (numero di cicli, distanza percorsa…). Per questi modelli, basati su valori registrati dai sensori on time, non è possibile determinare un costo atteso a priori e per ciò ci si avvale dell'utilizzo della simulazione per determinare i costi.

La Figura 15 uno schema per la realizzazione di un algoritmo di machine learning per il tool condition monitoring che stima il livello di usura attesa dell'entità. In particolare, si crea un vettore M(t) che rappresenta le misurazioni dei sensori (possono essere sensori che registrano vibrazioni, video di lavorazioni, specifiche descritte dall'operatore…), e un vettore P(t) che contiene i parametri di produzione utilizzati (velocità di taglio, profondità di taglio…). Si esegue un'operazione di trasformazione dei dati, contenuti nei vettori M(t) e P(t), in informazioni da poter utilizzare nell'algoritmo di machine learning (data processing). Con l'operazione di data processing viene creato un vettore di informazioni X(t) che sarà l'input dell'algoritmo di machine learning ($f_{TCM}(\cdot)$) utilizzato per stimare il vettore di usura atteso $\hat{Y}(t)$. Prima di poter implementare l'algoritmo di tool condition monitoring è necessario eseguire una fase training, per allenare l'algoritmo. Questa fase è molto importante per l'affidabilità dell'algoritmo, e dipende dalla quantità di dati disponibili per il training.
Una volta stimato un indicatore di condizione $\hat{Y}(t)$ è possibile stimare il RUL di un'entità sviluppando un modello in grado di eseguire la stima in base all'evoluzione temporale o alle proprietà statistiche dei valori dell'indicatore di condizione.

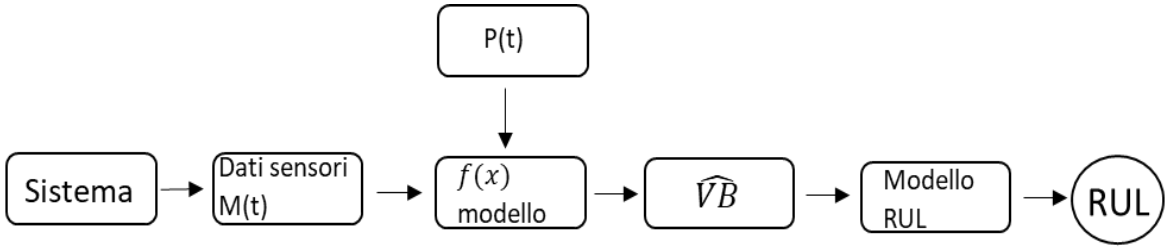



*Figura 15. Tool condition monitoring.*

### 2.5.1 Modello I

Il modello che verrà presentato di seguito è un modello che si basa sullo stato di degrado del sistema. Per poterlo implementare è necessario avere a disposizione:
delle cronologie di run-to-fail di sistemi simili a quello che si desidera diagnosticare
Valore di soglia noto dell'indicatore di condizione che indica un guasto.
Il primo step da fare consiste nell'andare a stimare un modello di degradazione lineare o esponenziale partendo dai dati storici che si hanno a disposizione.
Nel caso in cui l'andamento di degradazione del sistema sia di tipo lineare il modello di riferimento è il seguente:

$$M(t) = \Phi + \theta(t)t + \varepsilon(t)$$

Dove:

$\Phi$: è l'intercetta del modello

$\theta(t)$: è la pendenza del modello e viene modellata come una variabile casuale con una distribuzione normale con media Theta e varianza ThetaVariance

$\varepsilon(t)$: è il rumore aggiuntivo del modello modellato con una distribuzione normale con media zero e varianza NoiseVariance.

Se l'andamento di degradazione del sistema può essere approssimato ad un modello esponenziale bisognerà seguire:

$$M(t) = \Phi + \theta(t) \exp\left(\beta(t)\, t + \varepsilon(t) - \frac{\sigma^2}{2}\right)$$

Dove:

$\Phi$: è l'intercetta del modello

$\theta(t)$: è una variabile casuale che determina la pendenza del modello ed è distribuita secondo una distribuzione lognormale con media Theta e varianza ThetaVariance

$\beta(t)$: è una variabile casuale che determina la pendenza del modello ed è distribuita secondo una distribuzione Gaussiana con media Beta e varianza BetaVariance

$\varepsilon(t)$: è il rumore bianco Gaussiano e segue una normale con media zero e varianza NoiseVariance $\sigma^2$ .

Il secondo step consiste nel definire una soglia dell'indicatore di condizione del sistema al di sopra della quale il sistema va in guasto. La soglia dovrebbe essere scelta in base ai dati storici del sistema o su alcune conoscenze specifiche della condizione limite del sistema.
I modelli di degradazione stimano il RUL effettuando una predizione di quando l'indicatore considerato supererà una determinata soglia.
Come si può notare in Figura 16 il modello di degradazione lineare rappresentato attraversa la soglia predeterminata dopo circa 19 RUN. Quindi nel caso in cui si volesse predire il RUL dal tempo 0 risulterebbe essere di 19 RUN.

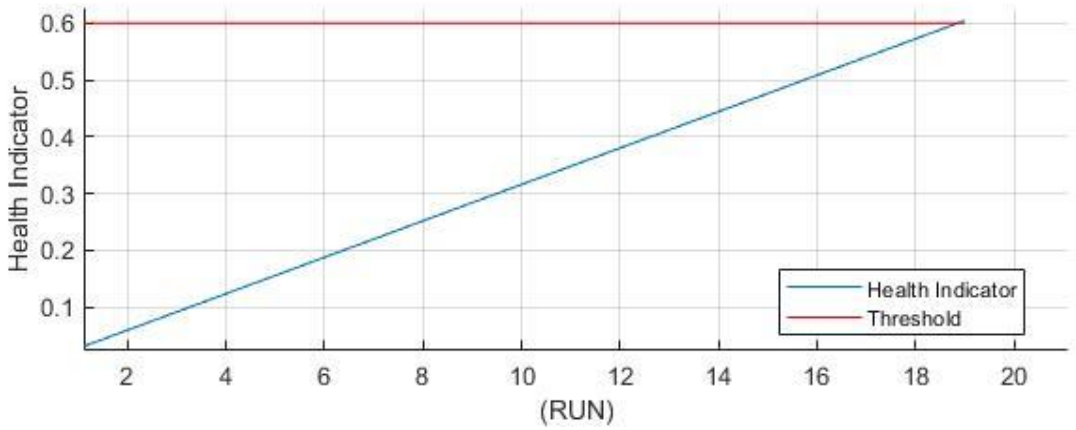



*Figura 16*

Una volta creato il modello è possibile aggiornarlo con i dati di usura stimati in tempo reale $\hat{Y}(t)$. Per ogni t il modello verrà aggiornato con un nuovo valore di usura stimata $\hat{Y}(t)$, una volta aggiornato il modello, si può procedere con il calcolo del tempo di guasto (Predicted failure (t)).Il Predicted failure (t) corrisponde al valore dell'ascissa quando il modello supera la soglia prestabilita. Una volta calcolato il Predicted failure (t) è possibile calcolare il $\widehat{RUL}$ stimato come:

$$\widehat{RUL}(t) = Predictedfailure(t) - t$$

### 2.5.2 Modello II

Il modello presentato di seguito basa le previsioni del RUL di un sistema basandosi sul comportamento di sistemi simili, cioè utilizza un modello di somiglianza sui confronti residui.
Questo modello può essere utilizzato quando:

- Sono disponibili dati di guasto storici da sistemi simili

- I dati run-to-failure mostrano comportamento di degrado simili, cioè i dati di usura del sistema cambiano in qualche modo caratteristico.

Il primo step da fare consiste nel costruire un modello lineare o esponenziale basato sui dati storici. Cioè per ogni i-esimo sistema simile viene costruito un modello di degradazione. Una volta costruito il modello ad ogni passo t viene aggiornato lo stato di usura stimato del sistema $\widehat{Y}_J(t)$. E per ogni passo t vengono calcolati i residui tra i dati previsti dai modelli stimati dai dati storici e i valori di usura stimata $\widehat{Y}_J(t)$. in tempo reale.

$$d(i,j,t) = \left\| \widehat{Y}_J(t) - \widehat{Y_{\text{modello J,I}}}(t) \right\|$$

Dove:

$\widehat{Y}_J(t)$: è l'indicatore delle condizioni del sistema j

$\widehat{Y_{\text{modello J,I}}}(t)$: è l'indicatore di salute del sistema j che viene stimato utilizzando il modello settato sui dati storici del sistema simile i.

Ogni volta che viene inserito un nuovo dato di usura in tempo reale t $\widehat{Y}_J(t)$ il modello troverà gli M membri più vicini nel set di dati storici, e adatterà una distribuzione di probabilità basata sugli M membri dei dati storici. La mediana di questa distribuzione verrà utilizzata come stima del predicted failure.

Quindi il $\widehat{RUL}$ stimato può essere calcolato:

$$\widehat{RUL}(t) = Predictedfailure(t) - t$$

# 3 CASO STUDIO

## 3.1 Introduzione

Nel presente caso studio è stato effettuato un confronto delle politiche di manutenzione presentate nei capitoli precedenti, dal punto di vista del costo. Le politiche di manutenzione sono state implementate attraverso l'uso di un simulatore e sono state messe a confronto. I simulatori utilizzati sono stati creati attraverso il software MATLAB.

## 3.2 Descrizione caso studio

Il caso studio considerato riguarda dei dati di usura di una milling machine. In particolare, viene considerata l'usura laterale (VB) dell'utensile, come parametro per valutare lo stato di degrado dell'utensile. L'usura sul fianco VB viene misurata come la distanza dal tagliente fino alla fine dell'usura abrasiva, sul fianco dell'utensile (Figura 17). Il tool della milling machine opera sotto diverse condizioni di lavorazione per un totale di otto scenari descritti in

Tabella 11. La norma ISO 8688-1:1989 definisce un'usura massima sul fianco, VBmax = 0.6$mm$, per i carburi cementati, gli acciai ad alta velocità e gli utensili in ceramica applicati nelle operazioni di spianatura. Al di sopra della soglia di usura scelta, pari a VB=0.6 mm, il pezzo lavorato con l'utensile usurato non presenta i requisiti di qualità richiesti e quindi deve essere rilavorato o scartato.

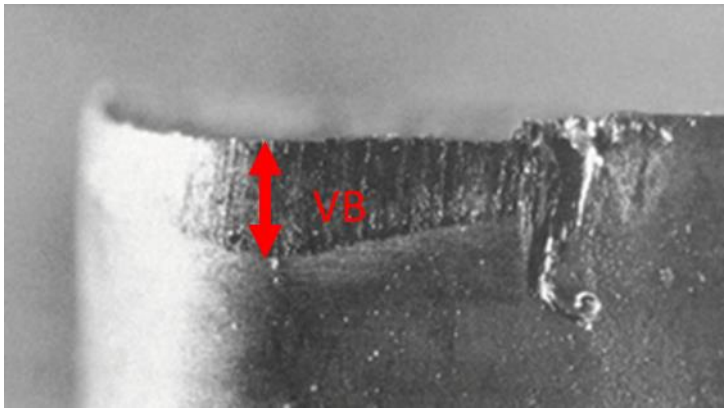



*Figura 17.Usura sul fianco*

*Tabella 11. Parametri di lavorazione*

| Scenario | Depth of Cut | Feed | Material |
|---|---|---|---|
| 1 | 0.75 | 0.25 | 1-cast iron |
| 2 | 0.75 | 0.25 | 2-stell |
| 3 | 1.5 | 0.25 | 1-cast iron |
| 4 | 1.5 | 0.25 | 2-stell |
| 5 | 0.75 | 0.5 | 1-cast iron |
| 6 | 0.75 | 0.5 | 2-stell |
| 7 | 1.5 | 0.5 | 1-cast iron |
| 8 | 1.5 | 0.5 | 2-stell |

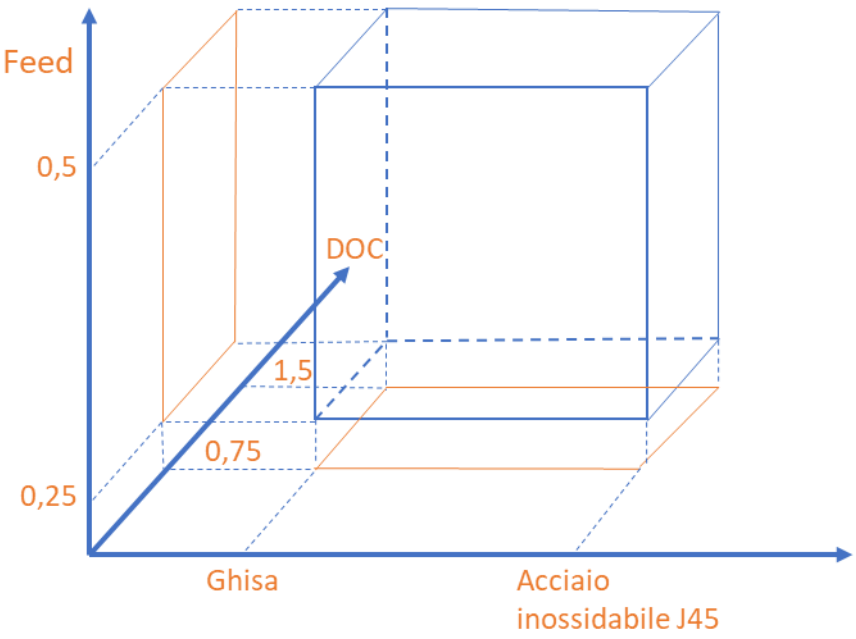



*Figura 18. Parametri di lavorazione otto scenari*

Il data set utilizzato è strutturato nel seguente modo:

| **DATASET** | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SCENARIO | RUN | VB | AC motore mandrino | DC motore mandrino | Vibrazioni del tavolo | Vibrazioni del mandrino | Emissioni acustiche tavolo | Emissioni acustiche mandrino |

Per ogni scenario sono disponibili i dati di usura (VB) alla fine di ogni RUN. Per ogni scenario sono presenti 90 utensili diversi, che eseguono le lavorazioni secondo i parametri indicati dallo scenario. I segnali utilizzati per la stima dell'usura provengono da tre tipi di sensori differenti: emissione sonora, sensori vibrazionali e sensori sulla corrente. Dopo aver trasformato i dati dei sensori in informazioni, attraverso un algoritmo di Tool Condition Monitoring [4], viene stimata l'usura alla fine di ogni lavorazione. La stima $\widehat{VB}(run)$ sarà utilizzato come dato in input per il calcolo del RUL nel caso di manutenzione predittiva. I dati di usura dei primi 30 utensili sono stati utilizzati come dati storici, mentre i restanti 60 sono stati utilizzati in sede di simulazione per effettuare il confronto tra le politiche di manutenzione. Ogni volta che viene eseguito un intervento di manutenzione, l'utensile viene sostituito con uno nuovo. La funzione di costo utilizzata per confrontare le diverse strategie di simulazione è la seguente:

$$F_{C,M} = \frac{Cc * N_{guasti} + Cp * N_{preventivi}}{tempo\ di\ lavorazione}$$

Dove:

$M_i$: rappresenta l'iesima strategia utilizzata

$C_c$: costo di intervento di tipo correttivo [unità monetarie/intervento]

$C_p$: costo di intervento di tipo preventivo [unità monetarie/intervento]

$N_{guasti}$: numero di interventi correttivi effettuati durante la simulazione

$N_{preventivi}$: numero di interventi preventivi effettuati durante la simulazione

$tempo\ di\ lavorazione$: unità temporali in cui l'utensile è utilizzabile durante la simulazione

Questa funzione di costo tiene conto del tempo di lavorazione che si riesce a sfruttare con un determinato utensile. Per poterla minimizzare, bisogna ridurre il più possibile gli interventi a guasto, ma contemporaneamente cercare di sfruttare il più possibile l'utensile, aumentandone il tempo di lavorazione.

Il costo di intervento preventivo è stato considerato minore rispetto al costo di intervento di tipo correttivo. Questo caso è facilmente riscontrabile nella realtà poiché, nel caso in cui la manutenzione sia schedulata, i pezzi di ricambio possono essere gestiti in modo ottimale generando dei costi di magazzino e dei costi di riordino minori. Nel caso in cui la manutenzione deve essere effettuata da operatori specializzati, il costo risulterà essere

minore se l'intervento sarà di tipo preventivo, poiché schedulato. Inoltre, nel caso di impianti che non lavorano sulle 24 ore è possibile effettuare manutenzione preventiva durante i tempi di non produzione, non generando così costi di non produzione. Nel seguente caso studio il tempo di riparazione è stato considerato trascurabile.
Si può notare come la funzione di costo in realtà dipende solo da rapporto tra il costo di manutenzione preventiva e il costo di manutenzione correttiva:

$$\min F_{C,M}(Cp, Cc)$$

$$\min F_{C,M}(k\ Cp, k\ Cc)\ \ con\ k > 0$$

$$\min F_{C,M}\ k\ (Cp, Cc)$$

$$k\ \min F_{C,M}\ \ (Cp, Cc)$$

Si è dimostrato come la funzione di costo dipende solo dal rapporto:

$$r_c = \frac{Cp}{Cc}\ con\ Cp > 0\ e\ r_c < 1$$

Per questo motivo nello sviluppo del caso studio sono stati considerati 3 diversi rapporti di costo: $r_c \in \{0.25, 0.5, 0.75\}$.
Se il $r_c = 0.25$ il costo di manutenzione correttiva è tanto più grande del costo di manutenzione preventiva
Se il $r_c = 0.5$ il costo di manutenzione correttiva è il doppio rispetto al costo di manutenzione preventiva
Se il $r_c = 0.75$ il costo di manutenzione correttiva è di poco più grande del costo di manutenzione preventiva

## 3.3 Introduzione alla simulazione

Le simulazioni che verranno presentate di seguito sono state effettuate su 60 utensili diversi per ognuno degli 8 scenari. Più nel dettaglio, la simulazione riguarda la politica di manutenzione correttiva, periodica a data costante, periodica ad età costante e predittiva. L'unità temporale utilizzata per la simulazione è il ciclo di lavorazione (RUN). Verranno messi a confronto i costi totali di tutti gli scenari con le diverse strategie di manutenzione per

ciascun rapporto di costo. Per ciascun $r_c$, i costi di manutenzione correttiva e preventiva vengono definiti come di seguito:

*Tabella 12. Costi usati in simulazione*

| Rc | Cc [€] | Cp[€] |
|---|---|---|
| 0.25 | 400 | 100 |
| 0.5 | 200 | 100 |
| 0.75 | 133.33 | 100 |

Il lavoro sarà strutturato nel seguente modo: per ogni strategia manutentiva, sarà spiegato come è stato implementato il simulatore e come si è determinato il periodo di manutenzione (nel caso di manutenzione periodica) e verranno riportati i risultati.

## 3.4 Simulazione manutenzione correttiva

Se si decide di adottare una politica di manutenzione di tipo correttivo, verrà effettuata manutenzione solo quando l'utensile va a guasto. In questo caso il simulatore viene implementato nel seguente modo: per ogni scenario, l'utensile viene sostituito quando raggiunge il RUN di guasto. Il numero di interventi di tipo correttivo, per ogni scenario j, durante la simulazione sarà:

$$N_{guasti}(j)=N_{guasti}(j)+1$$

Il tempo di lavorazione totale per ogni scenario j sarà dato da:

$$tempo\ di\ lavorazione\ tot(j)=\sum_{i}^{60} tempo\ di\ lavorazione\ (i)$$

Dove:

$tempo\ di\ lavorazione\ (i)$: rappresenta il numero di RUN che l'utensile i-esimo ha eseguito.

$$tempo\ di\ lavorazione\ (i)=Run\ di\ guasto(i)-1$$

Il costo totale di manutenzione per ogni scenario sarà:

$$F_{C,Correttiva}(j)=\frac{Cc*N_{guasti}(j)}{tempo\ di\ lavorazione\ tot\ (j)}$$

Dove:

$N_{guasti}(j)$: rappresenta il numero interventi di tipo correttivo dello scenario j-esimo

$tempo\ di\ lavorazione\ tot\ (j)$: rappresenta il numero di RUN utili per ogni j-esimo scenario

Il numero di interventi di tipo correttivi nel caso di manutenzione correttiva sarà uguale al numero di utensili che vengono simulati

$$N_{guasti}(j) = \mathrm{N}_{\mathrm{utensili}}\,(\mathrm{j}) = 60$$

Il tempo di lavorazione totale per ogni scenario è riportato nella seguente tabella:

*Tabella 13. Numero di RUN effettuate in simulazione*

| Scenario | Tempo di lavorazione (RUN) |
|---|---|
| 1 | 1061 |
| 2 | 497 |
| 3 | 469 |
| 4 | 322 |
| 5 | 797 |
| 6 | 383 |
| 7 | 431 |
| 8 | 301 |

Il costo totale per ogni scenario e per ogni rapporto di costo:

| Costo [€/RUN] | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Rc/scenario | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | TOT |
| $r_c$=0.25 | 22.62 | 48.29 | 51.17 | 74.53 | 30.11 | 62.66 | 55.68 | 79.73 | 424.81 |
| $r_c$=0.5 | 11.31 | 24.14 | 25.59 | 37.27 | 15.06 | 31.33 | 27.84 | 39.87 | 212.41 |
| $r_c$=0.75 | 7.54 | 16.10 | 17.06 | 24.84 | 10.04 | 20.89 | 18.56 | 26.58 | 141.60 |

Nel caso di una politica di manutenzione di tipo correttivo il costo totale per ciascun rapporto di costo è il seguente:

| Costo totale [€/RUN] | |
|---|---|
| $r_c$=0.25 | 424.81 |
| $r_c$=0.5 | 212.41 |
| $r_c$=0.75 | 141.60 |

## 3.5 Simulazione manutenzione periodica a data costante

Nel caso di manutenzione periodica a data costante, vengono eseguiti interventi preventivi ogni periodo T, e interventi di tipo correttivo ogni volta che si manifesta un guasto. La Figura 19 mostra il funzionamento della politica di manutenzione a data costante.

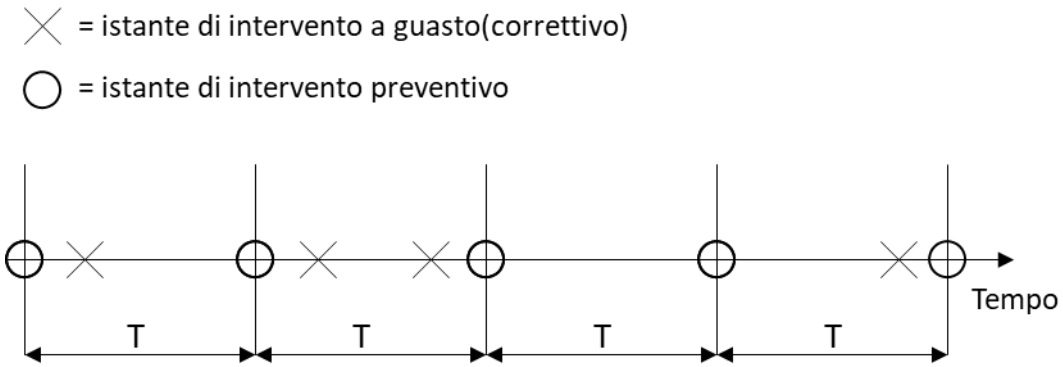



*Figura 19. Sistema a Data costante*

Il simulatore è stato implementato nel seguente modo: per ogni scenario, ad ogni T, viene eseguito un intervento di tipo preventivo, e quindi viene sostituito l'utensile con uno nuovo. Se il guasto si manifesta all'interno del periodo T viene effettuato un intervento di manutenzione correttiva, sostituendo l'utensile usurato. Il flow chart di seguito spiega il funzionamento del simulatore per la manutenzione periodica a data costante. Il simulatore è stato eseguito per ogni scenario j e per ogni rapporto di costo $r_c$.

$N_utensili$: rappresenta il numero totale di utensili simulati

$RUN\ guasto(i)$: rappresenta la lavorazione in cui si è manifestato il guasto dell'utensile i-esimo

$N_preventivi(j)$: rappresenta il numero di interventi preventivi effettuati nello scenario j-esimo

$N_guasti(j)$: rappresenta il numero di interventi a guasto effettuati nello scenario j-esimo

$Temp_lav(j)$: rappresenta il numero di RUN di produzione per lo scenario j-esimo

$T_delta$=rappresenta la differenza tra il prossimo intervento di manutenzione e il RUN guasto(i)

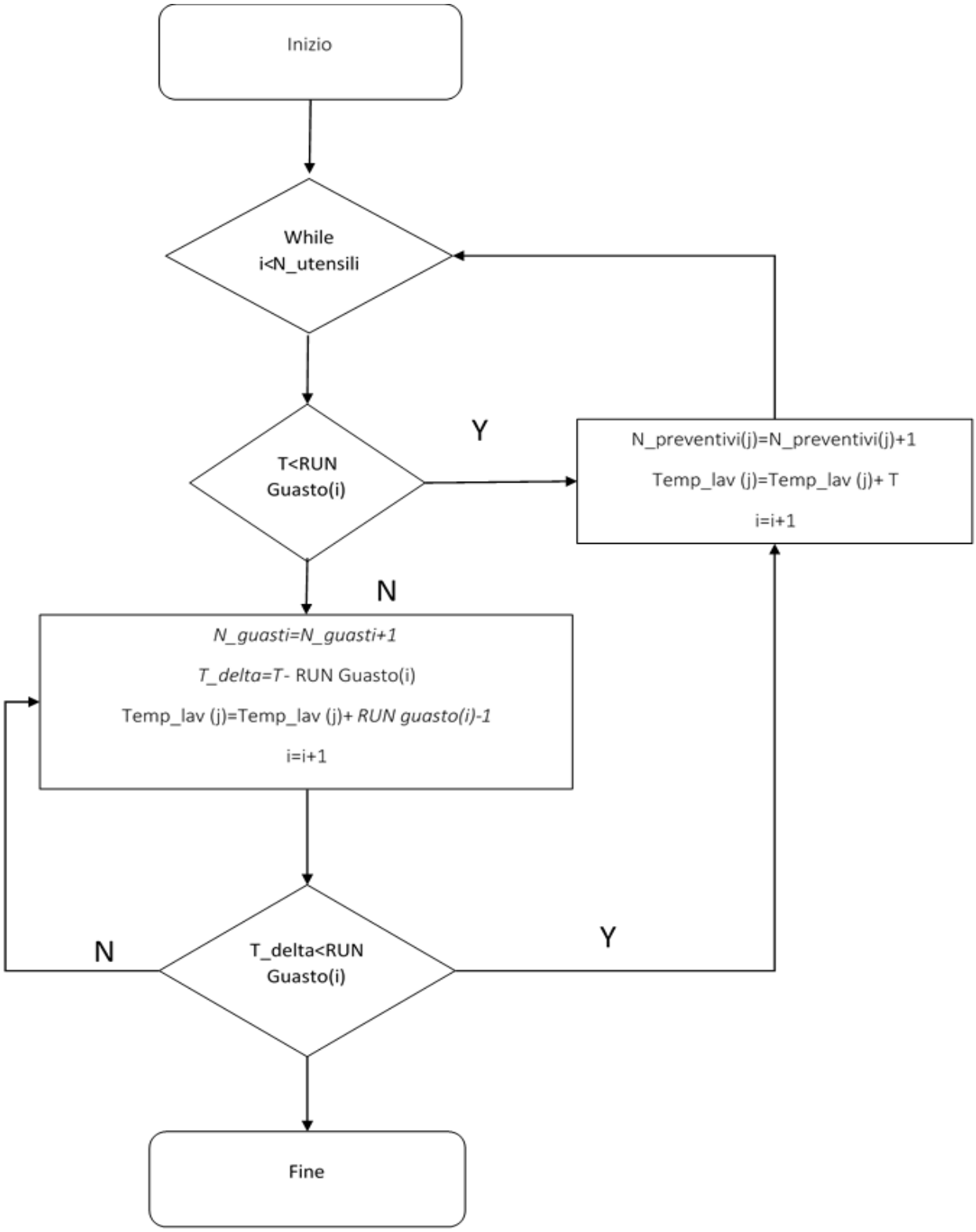



*Figura 20. Simulatore manutenzione a data costante*

La seguente condizione dovrà essere sempre soddisfatta:

$$N_{guasti}(j) + N_{preventivi}(j) = N_{utensili}\,(j) = 60$$

La funzione di costo per ogni scenario j:

$$F_{C,Data\ costante}(j) = \frac{Cc * N_{guasti}(j) + Cp * N_{preventivi}(j)}{tempo\ di\ lavorazione\ tot\ (j)}$$

Prima di poter simulare la strategia di manutenzione a data costante è necessario determinare il periodo di intervento preventivo per ogni scenario j $T(j)$. Per determinare il periodo ottimo di manutenzione vengono utilizzati i modelli descritti nel capitolo precedente. In particolare, per questo tipo di politica sono stati presentati 2 tipi di modelli: modello I e modello II (Markov). Per implementare questi modelli è necessario conoscere la funzione di densità di probabilità di guasto per ogni scenario j. Per determinarla sono stati utilizzati i dati di 30 utensili diversi per ogni scenario, così da poter usare i restanti 60 per eseguire la simulazione.

Per tutti gli scenari sono state calcolate le funzioni di densità di probabilità di guasto secondo una distribuzione Weibull con parametri $a$ (vita caratteristica) e $b$ (fattore di forma).

| Scenario | $a$ (vita caratteristica) (RUN) | $b$ (fattore di forma) |
|---|---|---|
| 1 | 20 | 13 |
| 2 | 10 | 9 |
| 3 | 10 | 9.5 |
| 4 | 7 | 10 |
| 5 | 15 | 14.5 |
| 6 | 8 | 9.5 |
| 7 | 8 | 12 |
| 8 | 6 | 10.5 |

Applicando i due modelli per determinare il T ottimo sono stati trovati i seguenti periodi di manutenzione a data costante per ciascun scenario e per ciascun rapporto di costo.

| | T modello Modello I (RUN) | | | T modello Markov (RUN) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Scenario | Rc=0.25 | Rc=0.5 | Rc=0.75 | Rc=0.25 | Rc=0.5 | Rc=0.75 |
| 1 | 15 | 16 | 17 | 15 | 16 | 16 |
| 2 | 7 | 7 | 17 | 6 | 7 | 7 |
| 3 | 7 | 7 | 17 | 6 | 7 | 7 |
| 4 | 5 | 5 | 19 | 4 | 5 | 5 |
| 5 | 11 | 12 | 12 | 11 | 11 | 11 |
| 6 | 5 | 6 | 22 | 5 | 5 | 6 |
| 7 | 6 | 6 | 23 | 6 | 6 | 6 |
| 8 | 5 | 5 | 24 | 4 | 4 | 5 |

Determinati i periodi ottimi di intervento sono state eseguite le simulazioni che hanno riportato i seguenti risultati:

| | $r_c$=0.25 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Scenario | T | Costo [€/RUN] | $N_{guasti}$ | $N_{preventivi}$ | Tempo di lavorazione (RUN) | Tipo di modello |
| 1 | 15 | 8.28 | 4 | 56 | 870 | Modello I/markov |
| 2 | 7 | 16.43 | 3 | 57 | 420 | Modello I |
| 3 | 6 | 18.33 | 2 | 58 | 360 | Markov |
| 4 | 4 | 26.25 | 1 | 59 | 240 | Markov |
| 5 | 11 | 9.55 | 1 | 59 | 660 | Modello I/markov |
| 6 | 5 | 24.41 | 4 | 56 | 295 | Modello I/markov |
| 7 | 6 | 16.67 | 0 | 60 | 360 | Modello I/markov |
| 8 | 4 | 26.25 | 1 | 59 | 240 | Markov |

| | $r_c$=0.5 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Scenario | T | Costo [€/RUN] | $N_{guasti}$ | $N_{preventivi}$ | Tempo di lavorazione (RUN) | Tipo di modello |
| 1 | 16 | 7.70 | 9 | 51 | 896 | Modello I/markov |
| 2 | 7 | 15.00 | 3 | 57 | 420 | Modello I/markov |
| 3 | 7 | 16.75 | 8 | 52 | 406 | Modello I/markov |
| 4 | 5 | 23.05 | 8 | 52 | 295 | Modello I/markov |
| 5 | 12 | 9.04 | 4 | 56 | 708 | Modello I |
| 6 | 6 | 20.54 | 9 | 51 | 336 | Modello I |
| 7 | 6 | 16.67 | 0 | 60 | 360 | Modello I/markov |
| 8 | 5 | 24.41 | 12 | 48 | 295 | Modello I |

| | $r_c$=0.75 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Scenario | T | Costo [€/RUN] | $N_{guasti}$ | $N_{preventivi}$ | Tempo di lavorazione (RUN) | Tipo di modello |
| 1 | 16 | 7.03 | 9 | 51 | 896 | Markov |
| 2 | 7 | 14.52 | 3 | 57 | 420 | Markov |
| 3 | 7 | 15.44 | 8 | 52 | 406 | Markov |
| 4 | 5 | 21.24 | 8 | 52 | 295 | Markov |
| 5 | 12 | 8.66 | 4 | 56 | 708 | Modello I |
| 6 | 6 | 18.75 | 9 | 51 | 336 | Markov |
| 7 | 23 | 16.52 | 45 | 15 | 454 | Modello I |
| 8 | 5 | 21.69 | 12 | 48 | 295 | Markov |

Per semplicità sono stati riportati il numero di interventi di tipo correttivo, preventivo e di lavorazioni effettuate (RUN), dei modelli che hanno dato un periodo T più performante in termine di costo, per ogni scenario e per ogni rapporto di costo.

| Costo [€/RUN] | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Rc/Scenari | Modello | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | TOT |
| $r_c$=0.25 | Modello I | 8.28 | 16.43 | 20.69 | 28.47 | 9.55 | 24.41 | 16.67 | 32.54 | 157.03 |
| | Markov | 8.28 | 16.67 | 18.33 | 26.25 | 9.55 | 24.41 | 16.67 | 26.25 | 146.39 |
| $r_c$=0.5 | Modello I | 7.70 | 15.00 | 16.75 | 23.05 | 9.04 | 20.54 | 16.67 | 24.41 | 133.15 |
| | Markov | 7.70 | 15.00 | 16.75 | 23.05 | 9.24 | 21.69 | 16.67 | 25.42 | 135.52 |
| $r_c$=0.75 | Modello I | 7.14 | 14.88 | 16.19 | 21.56 | 8.66 | 18.85 | 16.52 | 22.82 | 126.63 |
| | Markov | 7.03 | 14.52 | 15.44 | 21.24 | 9.14 | 18.75 | 16.67 | 21.69 | 124.49 |

I risultati mostrano che per i rapporti di costo 0.25 e 0.75 il modello che ha avuto una migliore performance in termini di costo è risultato essere il modello II (Markov), mentre per il rapporto di costo 0.5 il modello I fornisce costi minori.

## 3.6 Simulazione periodica a età costante

Nel caso di manutenzione ad età costante gli interventi di manutenzione preventiva vengono eseguiti ogni periodo T dall'ultimo intervento di manutenzione effettuato, sia esso di tipo correttivo o preventivo. La Figura 21 mostra il funzionamento della politica di manutenzione a età costante.

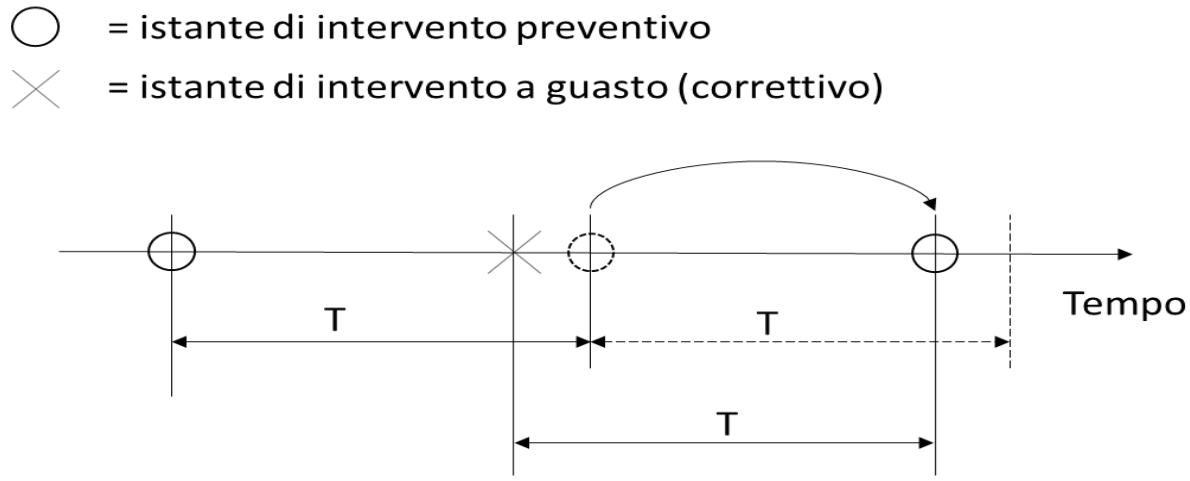



*Figura 21. Sistema ad età costante*

Il flow chart di seguito spiega la logica del simulatore per la manutenzione periodica a età costante. Il simulatore è stato eseguito per ogni scenario j e per ogni rapporto di costo $r_c$.

$i$: rappresenta l'i-esimo utensile $\forall j: i \in [1: N_utensili]$

$T$: rappresenta il periodo T di manutenzione preventiva $[RUN]$

$N_utensili$: rappresenta il numero totale di utensili simulati

$RUN\ guasto(i)$: rappresenta la lavorazione in cui si è manifestato il guasto dell'utensile i-esimo

$N_preventivi(j)$: rappresenta il numero di interventi preventivi effettuati nello scenario j-esimo

$N_guasti(j)$: rappresenta il numero di interventi a guasto effettuati nello scenario j-esimo

$Temp_lav(j)$: rappresenta il numero di RUN di produzione per lo scenario j-esimo

La seguente condizione dovrà essere sempre soddisfatta:

$$N_{guasti}(j) + N_{preventivi}(j) = N_{utensili}\ (j) = 60$$

La funzione di costo per ogni scenario j:

$$F_{C,età\ costante}(j) = \frac{Cc * N_{guasti}(j) + Cp * N_{preventivi}(j)}{tempo\ di\ lavorazione\ (j)}$$

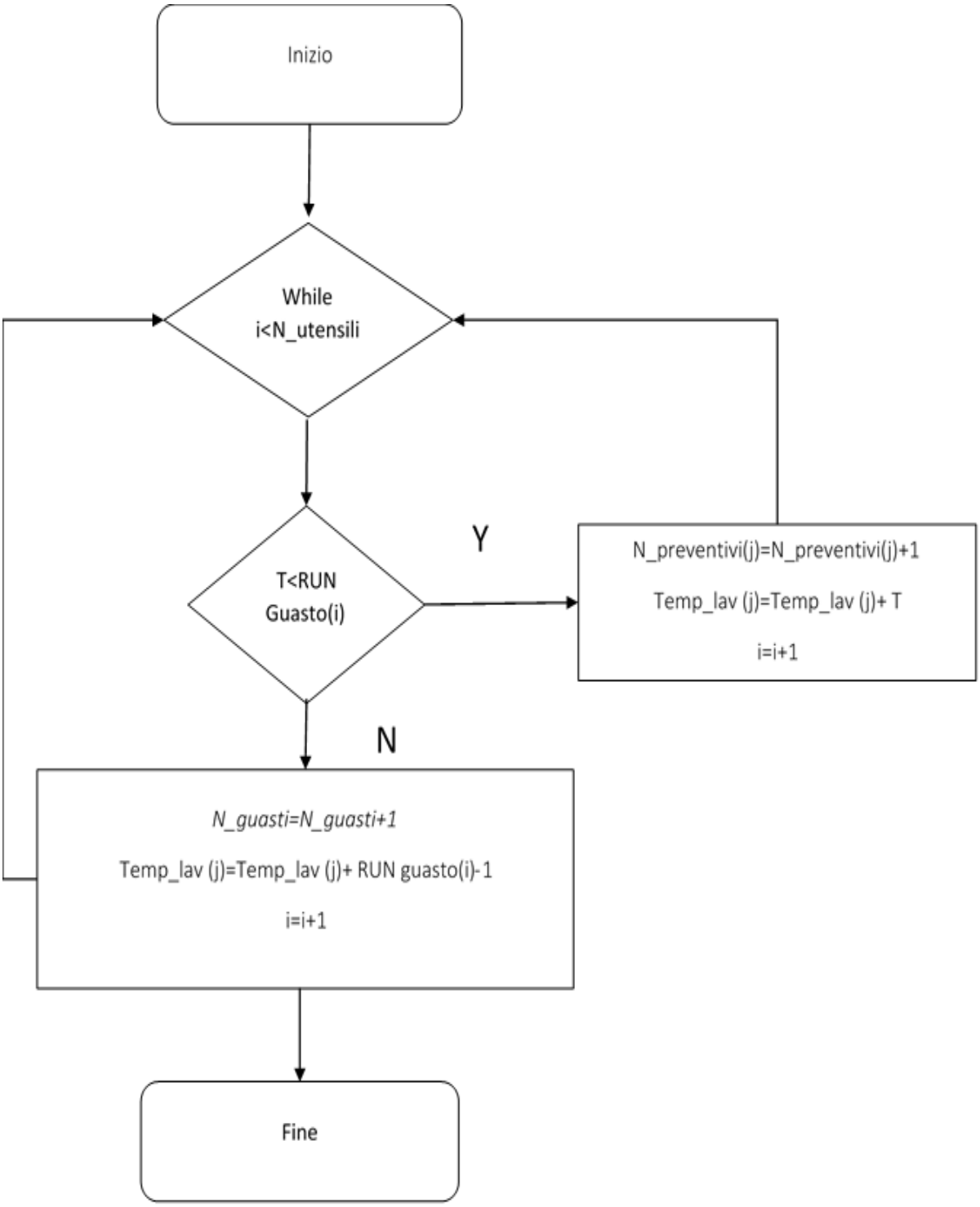



*Figura 22. Simulatore manutenzione ad età costante*

Prima di poter procedere con la simulazione della politica di manutenzione a età costante è necessario determinare il periodo di intervento $T(j)$ di manutenzione, per ogni scenario e per ogni rapporto di costo. Per determinare il periodo di manutenzione sono stati utilizzati i modelli descritti nel capitolo precedente. In particolare, per questa politica di manutenzione

sono stati usati 3 tipi di modelli: modello I, modello II (Markov), modello III. Per i primi due modelli sono state utilizzate le funzioni di densità di probabilità di guasto secondo una distribuzione Weibull calcolate nel medesimo modo della politica di manutenzione periodica a data costante. Nel modello III, per determinare la curva di degradazione dell'utensile per ogni scenario j sono stati utilizzati i dati storici di 30 utensili. Quindi il periodo T, per ogni scenario, è stato calcolato intersecando la curva di degradazione con la soglia di usura dell'utensile (VB=0.6). La Figura 23 mostra il modello di degradazione per lo scenario 1, che interseca la soglia a circa 18 RUN, quindi il periodo T scelto sarà pari a 17 RUN.

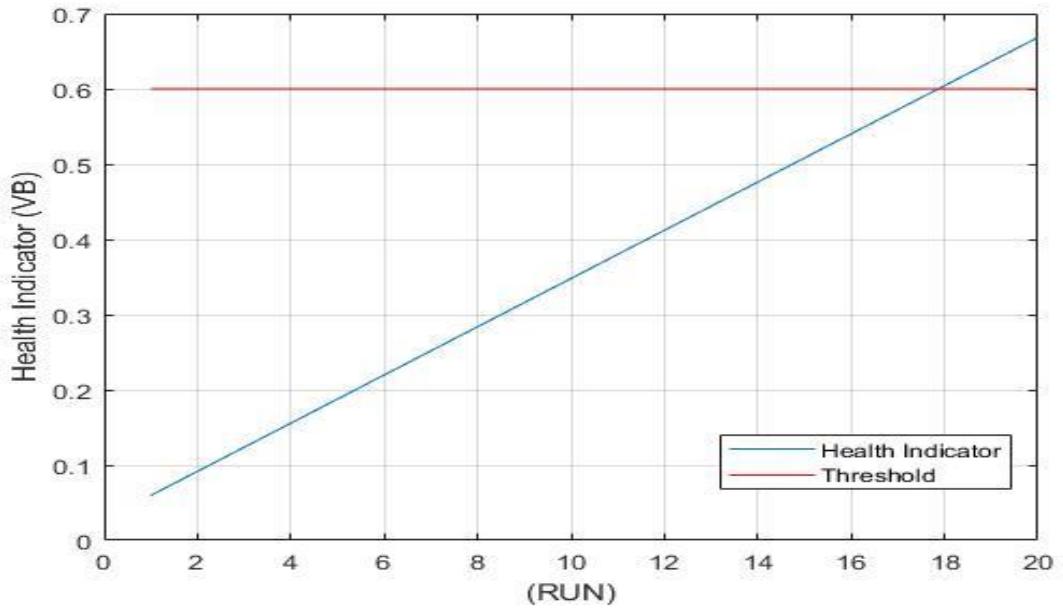



*Figura 23. Modello di degradazioni con soglia*

La seguente tabella mostra i periodi (RUN) di manutenzione per i diversi scenari e per tutti i rapporti di costi.

| | T modello Modello I (RUN) | | | T modello Markov (RUN) | | | T modello degradazione (RUN) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Scenario | Rc=0.25 | Rc=0.5 | Rc=0.75 | Rc=0.25 | Rc=0.5 | Rc=0.75 | Rc=0.25 | Rc=0.5 | Rc=0.75 |
| 1 | 16 | 17 | 18 | 15 | 16 | 18 | 17 | 17 | 17 |
| 2 | 7 | 8 | 9 | 7 | 7 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| 3 | 7 | 8 | 9 | 6 | 7 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 5 | 5 | 6 | 5 | 5 | 6 | 5 | 5 | 5 |
| 5 | 11 | 12 | 13 | 11 | 12 | 13 | 12 | 12 | 12 |
| 6 | 6 | 6 | 7 | 5 | 6 | 7 | 7 | 7 | 6 |
| 7 | 6 | 7 | 7 | 6 | 6 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| 8 | 5 | 5 | 6 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 |

Determinati i periodi ottimi di intervento sono state eseguite le simulazioni che hanno riportato i seguenti risultati:

| | $r_c$=0.25 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Scenario | T | Costo [€/RUN] | $N_{guasti}$ | $N_{preventivi}$ | Tempo di lavorazione (RUN) | Tipo di modello |
| 1 | 15 | 8.02 | 4 | 56 | 898 | Markov |
| 2 | 7 | 16.43 | 3 | 57 | 420 | Modello I/Markov |
| 3 | 6 | 18.33 | 2 | 58 | 360 | Markov |
| 4 | 5 | 28.09 | 8 | 52 | 299 | Modello I/markov/Degra |
| 5 | 11 | 9.55 | 1 | 59 | 660 | Modello I/Markov |
| 6 | 5 | 24.08 | 4 | 56 | 299 | Markov |
| 7 | 6 | 16.67 | 0 | 60 | 360 | Modello I/Markov |
| 8 | 4 | 26.25 | 1 | 59 | 240 | Markov/Degra |

| | $r_c$=0.5 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Scenario | T | Costo [€/RUN] | $N_{guasti}$ | $N_{preventivi}$ | Tempo di lavorazione (RUN) | Tipo di modello |
| 1 | 16 | 7.23 | 9 | 51 | 954 | Markov |
| 2 | 7 | 15.00 | 3 | 57 | 420 | Markov |
| 3 | 7 | 16.51 | 9 | 51 | 418 | Markov |
| 4 | 5 | 22.74 | 8 | 52 | 299 | Modello I/markov/Degra |
| 5 | 12 | 8.90 | 4 | 56 | 719 | Modello I/markov/Degra |
| 6 | 6 | 19.44 | 9 | 51 | 355 | Modello I/markov/Degra |
| 7 | 7 | 16.19 | 8 | 52 | 420 | Modello I/Degra |
| 8 | 5 | 24.41 | 13 | 47 | 299 | Modello I/Markov |

| | $r_c$=0.75 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Scenario | T | Costo [€/RUN] | $N_{guasti}$ | $N_{preventivi}$ | Tempo di lavorazione (RUN) | Tipo di modello |
| 1 | 17 | 6.50 | 16 | 44 | 1005 | Degradazione |
| 2 | 8 | 13.49 | 13 | 47 | 477 | Markov/Degra |
| 3 | 8 | 14.57 | 25 | 35 | 469 | Markov/Degra |
| 4 | 6 | 20.23 | 33 | 27 | 351 | Modello I/Markov |
| 5 | 13 | 8.43 | 16 | 44 | 775 | Modello I/Markov |
| 6 | 7 | 17.24 | 30 | 30 | 406 | Modello I/Markov |
| 7 | 7 | 14.92 | 8 | 52 | 420 | Modello I/markov/Degra |
| 8 | 5 | 21.52 | 13 | 47 | 299 | Markov |

Per semplicità sono stati riportati il numero di interventi di tipo correttivo, preventivo e il numero di lavorazioni effettuate (RUN) dei modelli che hanno dato un periodo T più performante in termine di costo, per ogni scenario e per ogni rapporto di costo.

| Costo [€/RUN] | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Rc/Scenari | Modello | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | TOT |
| $r_c$=0.25 | Modello I | 9.12 | 16.43 | 20.81 | 28.09 | 9.55 | 24.51 | 16.67 | 33.11 | 158.28 |
| | Markov | 8.02 | 16.43 | 18.33 | 28.09 | 9.55 | 24.08 | 16.67 | 26.25 | 147.42 |
| | Degradazione | 10.75 | 20.75 | 28.78 | 28.09 | 10.01 | 24.51 | 20.00 | 26.25 | 169.15 |
| $r_c$=0.5 | Modello I | 7.56 | 15.30 | 18.12 | 22.74 | 8.90 | 19.44 | 16.19 | 24.41 | 132.68 |
| | Markov | 7.23 | 15.00 | 16.51 | 22.74 | 8.90 | 19.44 | 16.67 | 24.41 | 130.90 |
| | Degradazione | 7.56 | 15.30 | 18.12 | 22.74 | 8.90 | 19.44 | 16.19 | 25.42 | 133.68 |
| $r_c$=0.75 | Modello I | 6.55 | 13.87 | 14.62 | 20.23 | 8.43 | 17.24 | 14.92 | 21.68 | 117.52 |
| | Markov | 6.55 | 13.49 | 14.57 | 20.23 | 8.43 | 17.24 | 14.92 | 21.52 | 116.94 |
| | Degradazione | 6.50 | 13.49 | 14.57 | 20.96 | 8.53 | 17.75 | 14.92 | 25.14 | 121.85 |

I risultati mostrano che il periodo di manutenzione ottenuto attraverso il modello di Markov risulta più performante in termini di costo, per ogni rapporto di costo.

## 3.7 Simulazione predittiva

Nel caso si decida di applicare una politica di manutenzione di tipo predittivo, verrà eseguito un intervento di manutenzione preventiva quando l'algoritmo di predizione segnala il superamento di determinati parametri. In particolare, sono stati utilizzati 2 modelli di previsione del RUL. Per entrambi i modelli è stata effettuata una prima fase di training, e infine si è eseguita la simulazione per poterli confrontare. In entrambi i casi il simulatore risulta lo stesso del caso di politica di manutenzione a età costante, ma in questo caso il periodo di intervento T dipenderà dalle condizioni dell'utensile e non sarà un periodo T fisso.

Il flow chart di seguito spiega il funzionamento del simulatore per la manutenzione predittiva. Il simulatore è stato eseguito per ogni scenario j e per ogni rapporto di costo $r_c$.

$i$: rappresenta l'i-esimo utensile $\forall j: i \in [1: N_utensili]$

$T$(i): rappresenta il periodo T di manutenzione preventiva per ogni i-esimo utensile $[RUN]$

$N_utensili$: rappresenta il numero totale di utensili simulati

$RUN\ guasto(i)$: rappresenta la lavorazione in cui si è manifestato il guasto dell'utensile i-esimo

$N_preventivi(j)$: rappresenta il numero di interventi preventivi effettuati nello scenario j-esimo

$N_guasti(j)$: rappresenta il numero di interventi a guasto effettuati nello scenario j-esimo

$Temp_lav(j)$: rappresenta il numero di RUN di produzione per lo scenario j-esimo

La seguente condizione dovrà essere sempre soddisfatta:

$$N_{guasti}(j) + N_{preventivi}(j) = N_{utensili}\,(j) = 60$$

La funzione di costo per ogni scenario j:

$$F_{C,predittiva}(j) = \frac{Cc * N_{guasti}(j) + Cp * N_{preventivi}(j)}{tempo\ di\ lavorazione\ (j)}$$

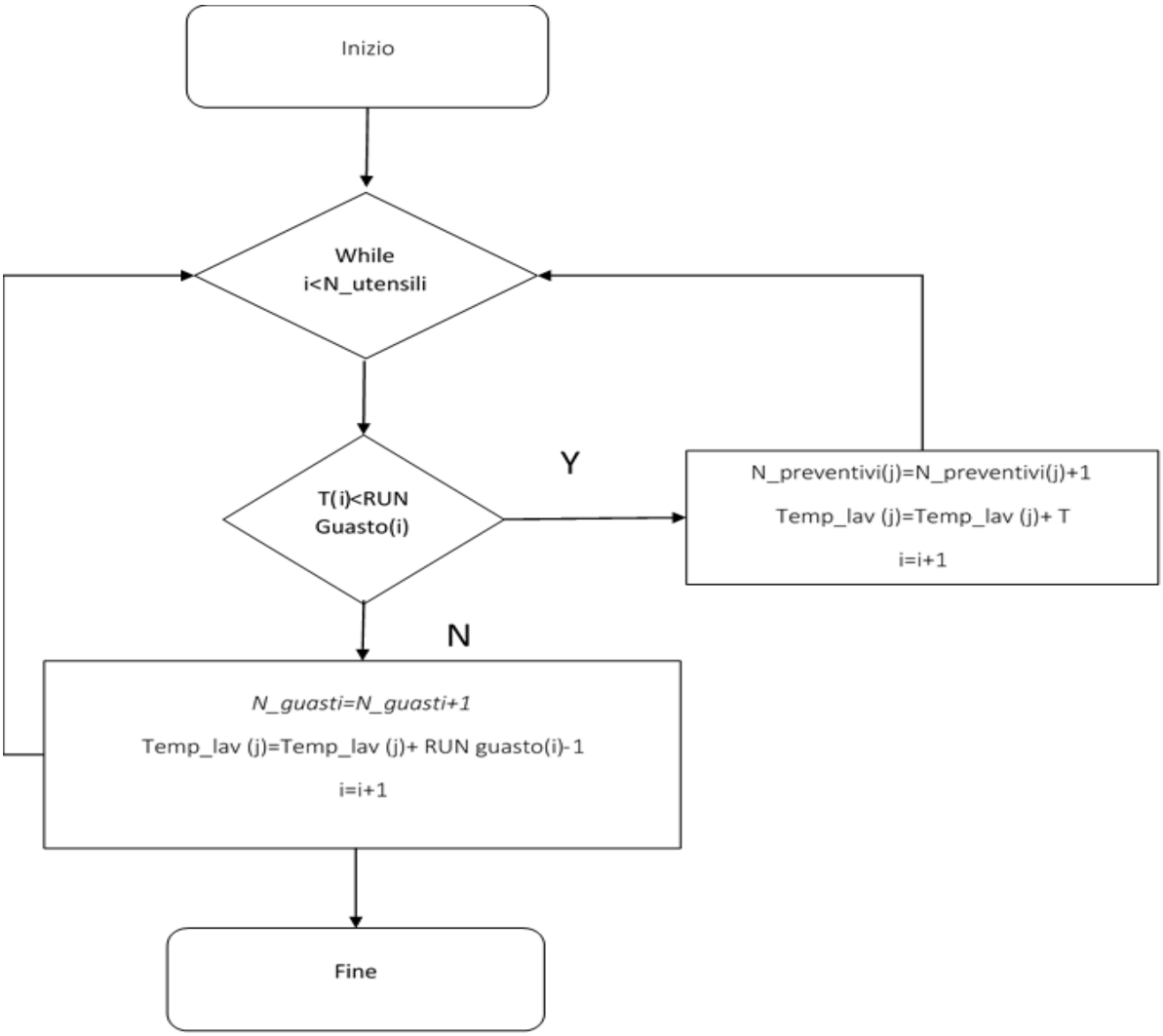



*Figura 24. Simulatore manutenzione predittiva*

### 3.7.1 Degradation Model

Il primo modello, implementato per la determinazione del RUL(quindi del periodo di intervento), si basa sulla degradazione dell'utensile durante i RUN. L'implementazione è stata eseguita nel seguente modo: per ogni scenario j sono stati presi i dati di usura di 30 utensili diversi per creare il modello di degradazione. Per tutti gli scenari è stata posta la soglia di usura pari a VB=0.6.

Nella simulazione è stato applicato il modello come descritto nel capitolo 2. Per ogni utensile i, alla fine di ogni RUN, viene aggiornato il modello di degradazione con $\widehat{VB}(i, RUN)$ e calcolato il $\widehat{RUL}(i, RUN)$. Se $\widehat{RUL}(i, RUN) < 1$ il tempo di manutenzione dell'i-esimo utensile sarà:

$$T(i) = RUN.$$

I risultati della simulazione effettuata con 60 utensili per ogni scenario j sono i seguenti:

| $r_c$=0.25 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Scenario | Costo [€/RUN] | $N_{guasti}$ | $N_{preventivi}$ | Tempo di lavorazione (RUN) |
| 1 | 8.52 | 11 | 49 | 1091 |
| 2 | 13.28 | 4 | 56 | 542 |
| 3 | 15.32 | 6 | 54 | 509 |
| 4 | 20.40 | 4 | 56 | 353 |
| 5 | 8.07 | 2 | 58 | 818 |
| 6 | 20.00 | 8 | 52 | 420 |
| 7 | 16.03 | 5 | 55 | 468 |
| 8 | 20.35 | 3 | 57 | 339 |

| $r_c$=0.5 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Scenario | Costo [€/RUN] | $N_{guasti}$ | $N_{preventivi}$ | Tempo di lavorazione (RUN) |
| 1 | 6.51 | 11 | 49 | 1091 |
| 2 | 11.81 | 4 | 56 | 542 |
| 3 | 12.97 | 6 | 54 | 509 |
| 4 | 18.13 | 4 | 56 | 353 |
| 5 | 7.58 | 16 | 58 | 818 |
| 6 | 16.19 | 25 | 52 | 420 |
| 7 | 13.89 | 4 | 55 | 468 |
| 8 | 18.58 | 18 | 57 | 339 |

| $r_c$=0.75 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Scenario | Costo [€/RUN] | $N_{guasti}$ | $N_{preventivi}$ | Tempo di lavorazione (RUN) |
| 1 | 5.84 | 11 | 49 | 1091 |
| 2 | 11.32 | 4 | 56 | 542 |
| 3 | 12.18 | 6 | 54 | 509 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 4 | 17.37 | 4 | 56 | 353 |
| 5 | 7.42 | 2 | 58 | 818 |
| 6 | 14.92 | 8 | 52 | 420 |
| 7 | 13.18 | 5 | 55 | 468 |
| 8 | 17.99 | 3 | 57 | 339 |

I costi totali per ogni rapporto di costo sono riportati in tabella di seguito:

| COSTO [€/RUN] | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Rc/Scenari | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | TOT |
| $r_c$=0.25 | 8.52 | 13.28 | 15.32 | 20.40 | 8.07 | 20.00 | 16.03 | 20.35 | 121.98 |
| $r_c$=0.5 | 6.51 | 11.81 | 12.97 | 18.13 | 7.58 | 16.19 | 13.89 | 18.58 | 105.66 |
| $r_c$=0.75 | 5.84 | 11.32 | 12.18 | 17.37 | 7.42 | 14.92 | 13.18 | 17.99 | 100.22 |

### 3.7.2 Residual similarity model

Il seguente modello basa le previsioni del RUL di un sistema facendo riferimento al comportamento di sistemi simili, cioè utilizza un modello di somiglianza sui confronti residui. Per ogni scenario j, sono stati utilizzati i dati di 30 utensili (training) per creare il modello di degrado di sistemi simili. I dati di training utilizzati riportano lo stato di usura ad ogni lavorazione, fino alla lavorazione di guasto dell'utensile i-esimo.

Nella fase di simulazione è stato applicato il modello come descritto nel capitolo 2. Per ogni utensile i, alla fine di ogni lavorazione, viene calcolato il residuo come:

$$d(i,t,j) = \left\| \widehat{VB}(i,t) - \widehat{VB_{\text{modello j}}}(t) \right\|$$

Dove:

$\widehat{VB}(i,t)$: rappresenta l'usura stimata alla fine della lavorazione t-esima

$\widehat{VB_{\text{modello j}}}(t)$: rappresenta la stima del modello di degradazione del j-esimo modello di training

Ogni volta che viene inserito un nuovo dato di usura in tempo reale $\widehat{VB}(t)$ il modello troverà gli M membri più vicini nel set di dati storici, e adatterà una distribuzione di probabilità basata sugli M membri dei dati di training. La mediana di questa distribuzione verrà utilizzata come stima del predicted failure. Quindi il $\widehat{RUL}$ stimato può essere calcolato:

$$\widehat{RUL}(i,t) = Predictedfailure(t) - t$$

Dove t rappresenta la lavorazione corrente.

Se $\widehat{RUL}(i,\mathrm{t}) < 1$ il tempo di manutenzione dell'i-esimo utensile sarà:

$$T(i) = t.$$

I risultati della simulazione effettuata con 60 utensili per ogni scenario j sono i seguenti:

| $r_c$=0.25 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Scenario | Costo [€/RUN] | $N_{guasti}$ | $N_{preventivi}$ | Tempo di lavorazione (RUN) |
| 1 | 13.26 | 28 | 32 | 1086 |
| 2 | 13.97 | 3 | 57 | 494 |
| 3 | 21.73 | 16 | 44 | 497 |
| 4 | 23.93 | 8 | 52 | 351 |
| 5 | 11.68 | 11 | 49 | 796 |
| 6 | 21.64 | 9 | 51 | 402 |
| 7 | 14.32 | 0 | 60 | 419 |
| 8 | 21.02 | 2 | 58 | 314 |

| $r_c$ =0.5 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Scenario | Costo [€/RUN] | $N_{guasti}$ | $N_{preventivi}$ | Tempo di lavorazione (RUN) |
| 1 | 8.10 | 28 | 32 | 1086 |
| 2 | 12.75 | 3 | 57 | 494 |
| 3 | 15.29 | 16 | 44 | 497 |
| 4 | 19.37 | 8 | 52 | 351 |
| 5 | 8.92 | 11 | 49 | 796 |
| 6 | 17.16 | 9 | 51 | 402 |
| 7 | 14.32 | 0 | 60 | 419 |
| 8 | 19.75 | 2 | 58 | 314 |

| $r_c$=0.75 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Scenario | Costo [€/RUN] | $N_{guasti}$ | $N_{preventivi}$ | Tempo di lavorazione (RUN) |
| 1 | 6.38 | 28 | 32 | 1086 |
| 2 | 12.35 | 3 | 57 | 494 |
| 3 | 13.15 | 16 | 44 | 497 |
| 4 | 17.85 | 8 | 52 | 351 |
| 5 | 8.00 | 11 | 49 | 796 |
| 6 | 15.67 | 9 | 51 | 402 |
| 7 | 14.32 | 0 | 60 | 419 |
| 8 | 19.32 | 2 | 58 | 314 |

I costi totali per ogni rapporto di costo sono riportati in tabella di seguito:

| COSTO [€/RUN] | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Rc/Scenari | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | TOT |
| $r_c$=0.25 | **13.26** | **13.97** | **21.73** | **23.93** | **11.68** | **21.64** | **14.32** | **21.02** | **141.55** |
| $r_c$=0.5 | **8.10** | **12.75** | **15.29** | **19.37** | **8.92** | **17.16** | **14.32** | **19.75** | **115.67** |
| $r_c$=0.75 | **6.38** | **12.35** | **13.15** | **17.85** | **8.00** | **15.67** | **14.32** | **19.32** | **107.04** |

# 4 CONCLUSIONI

Il grafico di seguito mostra i costi risparmiati applicando le varie politiche di manutenzione preventiva rispetto alla politica di manutenzione correttiva:

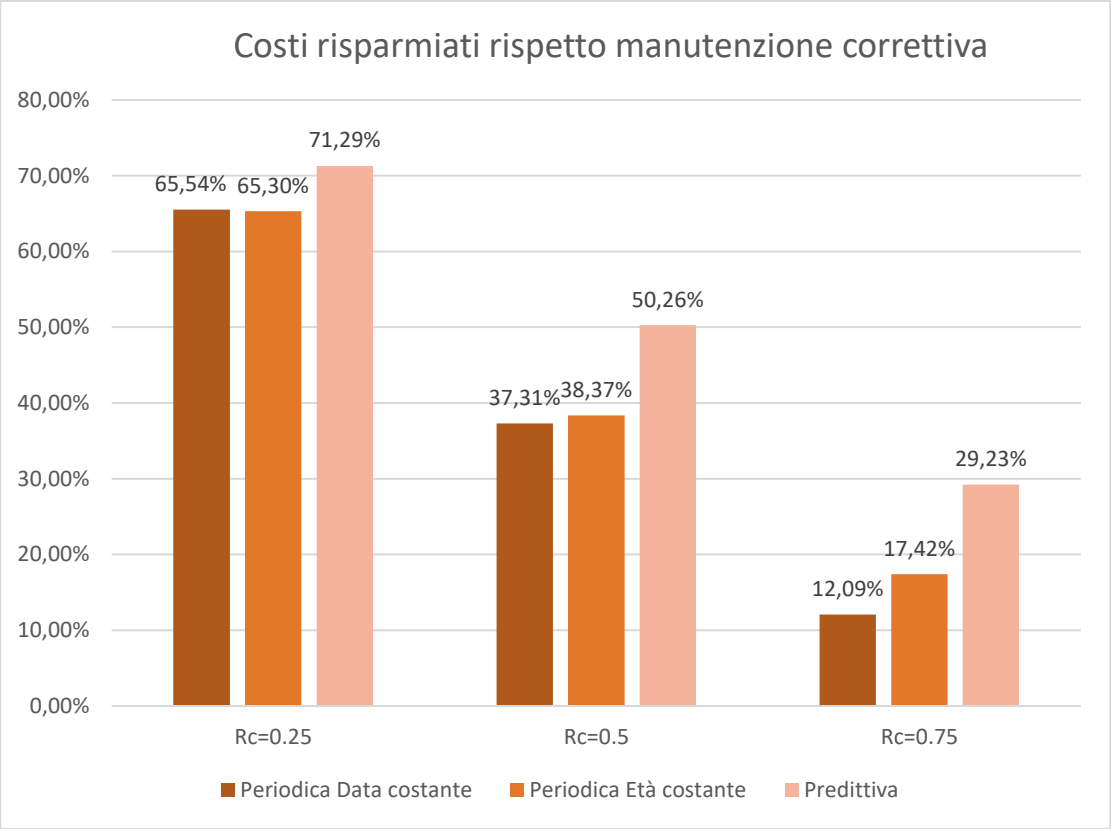



*Figura 25. Confronto politiche*

In tutti e tre gli scenari di costo la manutenzione predittiva risulta essere più performante. In particolare, più il rapporto di costo cresce più si evidenzia che la manutenzione predittiva performa meglio rispetto alle altre politiche di manutenzione.

Sapendo che il rapporto dei costi è dato da:

$$\frac{C_p}{C_c} = \frac{Costo\ utensile + cpi\ preventiva}{Costo\ utensile + cpi\ correttiva + ci\ correttiva}$$

Dove:

$C_c$: costo di intervento di tipo correttivo [unità monetarie/intervento]

$C_p$: costo di intervento di tipo preventivo [unità monetarie/intervento]

$Costo\ utensile$: costo proprio dell'utensile [€/pezzo]

$cpi\ preventiva$: costo proprio indiretto della manutenzione preventiva (costo magazzino, fermo macchina, ecc.)

$cpi\ correttiva$: costo proprio indiretto della manutenzione preventiva (costo magazzino, fermo macchina, ecc.)

$ci\ correttiva$: costo indotto manutenzione correttiva (costo mancata qualità e conseguente scarto del pezzo)

Con:

$$cpi\ correttiva > cpi\ preventiva$$

$$ci\ correttiva > 0$$

Una volta scorporati i costi di manutenzione preventiva e correttiva, se il rapporto di costo risulta essere 0.25, $Costo\ utensile \ll\ cpi\ correttiva + ci\ correttiva$. In tal caso il costo dell'utensile pesa molto meno rispetto al costo di manutenzione correttiva ed è preferibile sostituire più spesso l'utensile, anziché andare incontro ad un possibile guasto. Se il rapporto di costo è 0.75 invece si cerca di sfruttare tutta la vita utile dell'utensile correndo il rischio di andare a guasto. In conclusione, quando il rapporto di costo è 0.25 si preferisce effettuare manutenzione più spesso, rinunciando ad una parte di vita utile dell'utensile. Al contrario, quando il rapporto di costo è 0.75, si cerca di sfruttare al meglio la vita utile dell'utensile rischiando di andare incontro ad un guasto. Per questo la manutenzione predittiva, che tiene conto dell'usura dell'utensile, risulta essere molto più performante quando il rapporto di costo è 0.75, sfruttando il più possibile la vita utile dell'utensile. Invece, quando il rapporto di costo è 0.25, poiché l'obiettivo principale è non andare a guasto anziché sfruttare al massimo la vita dell'utensile, anche le altre due politiche di manutenzione riescono ad essere performanti.

Il grafico di seguito mostra i costi risparmiati applicando le varie politiche di manutenzione preventiva rispetto alla manutenzione correttiva. Rispetto al grafico precedente è riportato il risultato della manutenzione predittiva, che utilizza solo il 20% dei dati di training per stimare l'usura $\widehat{VB}(i,t)$.

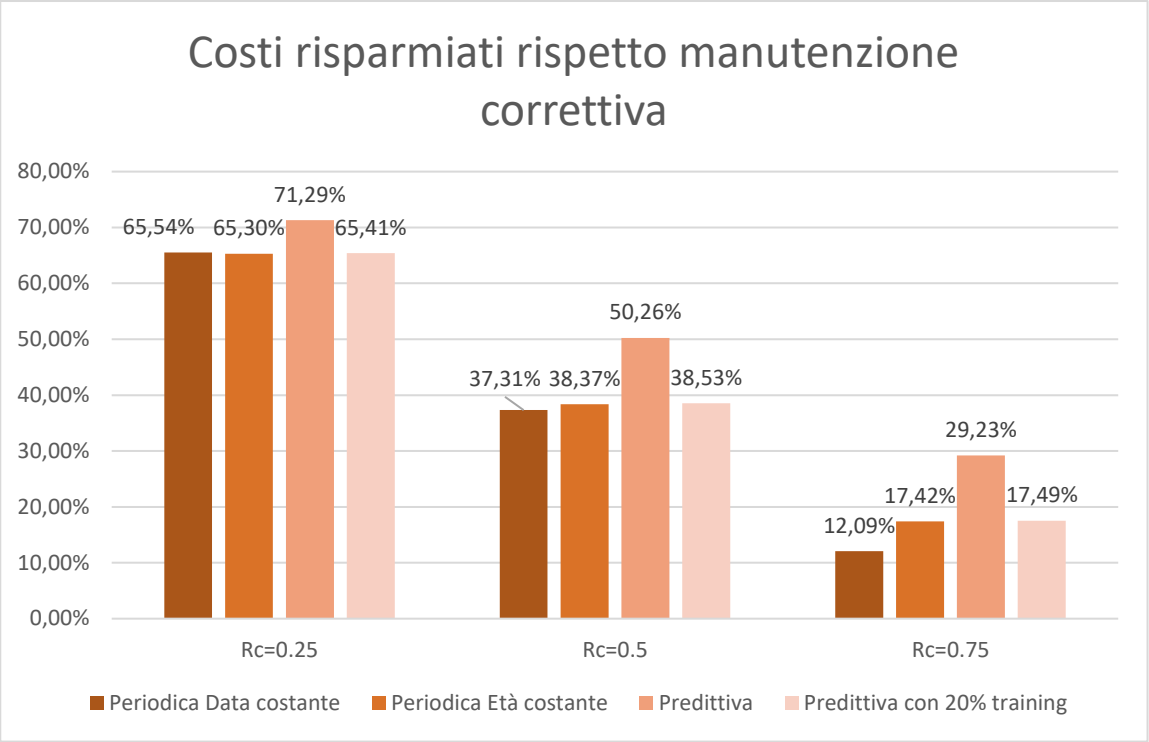
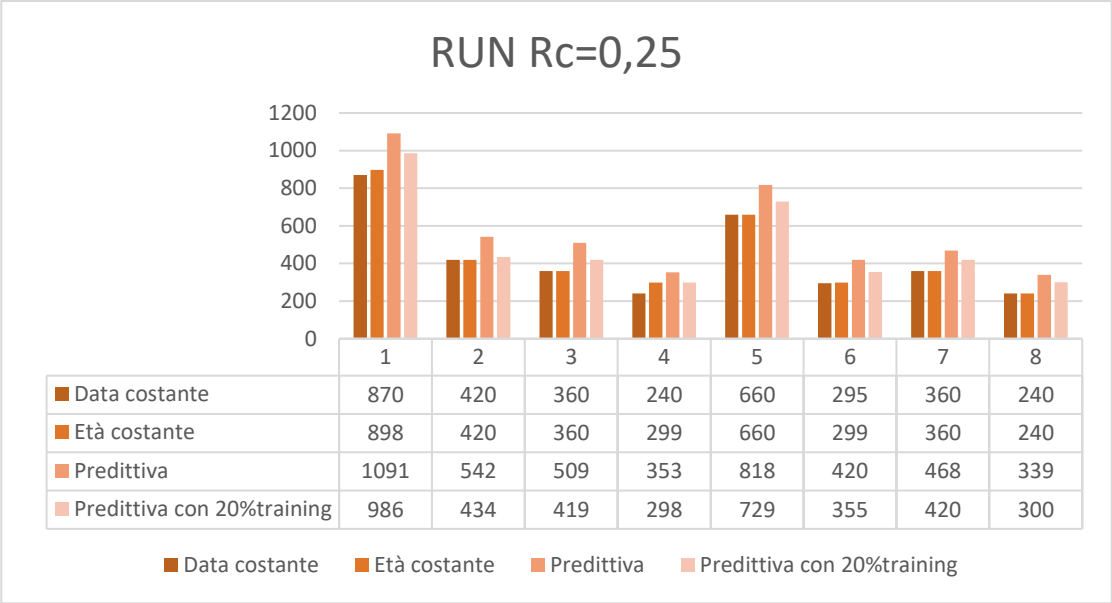



*Figura 26. Confronto politiche di manutenzione*

In questo caso si può notare come la manutenzione predittiva sviluppata con solo il 20 % dei dati di training risulta di poco migliore rispetto agli altri modelli. Infatti, per ottenere una buona performance della manutenzione predittiva, è necessario avere a disposizione una certa quantità di dati di training. Gli errori dell'algoritmo di tool condition monitoring, usando il 20% e il 100% dei dati di training, seguono una distribuzione normale con media 0 e varianza 0.0485 e 0.005, rispettivamente.

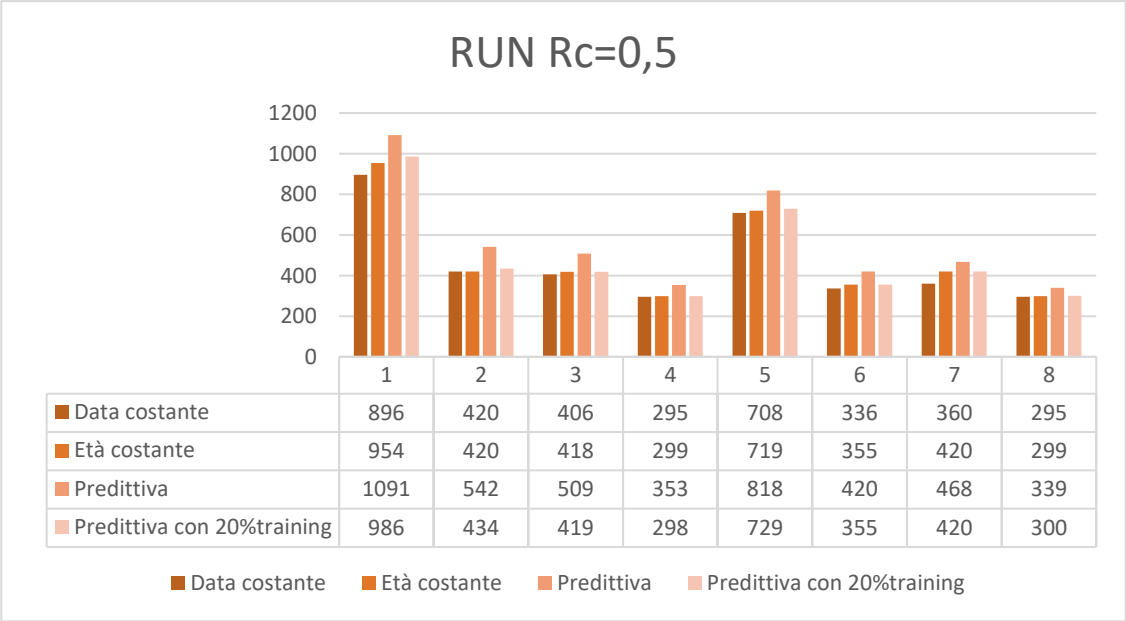
I grafici riportati di seguito, mostrano il numero di lavorazioni (RUN) effettuate con le diverse politiche di manutenzione, ed i diversi rapporti di costo. Questi mostrano come la predittiva riesca ad effettuare un numero di RUN maggiore rispetto alla altre.




| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Data costante | 870 | 420 | 360 | 240 | 660 | 295 | 360 | 240 |
| Età costante | 898 | 420 | 360 | 299 | 660 | 299 | 360 | 240 |
| Predittiva | 1091 | 542 | 509 | 353 | 818 | 420 | 468 | 339 |
| Predittiva con 20%training | 986 | 434 | 419 | 298 | 729 | 355 | 420 | 300 |

Data costante Età costante Predittiva Predittiva con 20%training

*Figura 27.Confronto lavorazioni effettuate con rapporto di costo 0.25*




| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Data costante | 896 | 420 | 406 | 295 | 708 | 336 | 360 | 295 |
| Età costante | 954 | 420 | 418 | 299 | 719 | 355 | 420 | 299 |
| Predittiva | 1091 | 542 | 509 | 353 | 818 | 420 | 468 | 339 |
| Predittiva con 20%training | 986 | 434 | 419 | 298 | 729 | 355 | 420 | 300 |

Data costante Età costante Predittiva Predittiva con 20%training

*Figura 28.Confronto lavorazioni effettuate con rapporto di costo 0.5*

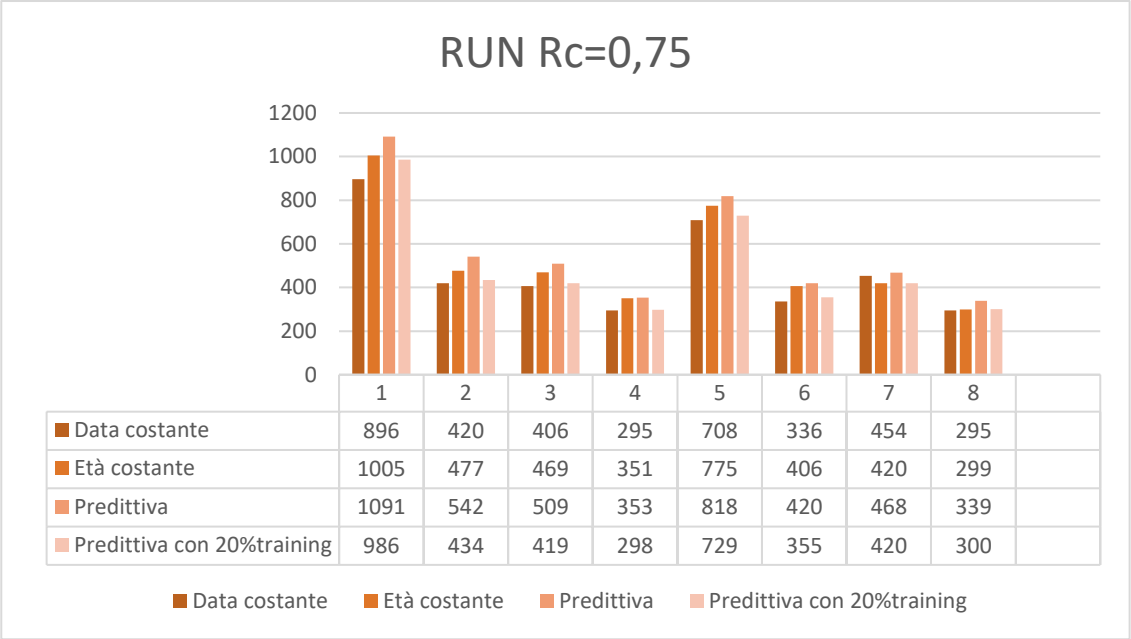



*Figura 29.Confronto lavorazioni effettuate con rapporto di costo 0.75*

In generale si può concludere che la predittiva è la politica di manutenzione più performante ma, per poter essere implementata, è necessario avere a disposizione un numero importante di dati di training, al fine di allenare adeguatamente l'algoritmo di predizione. In letteratura sono presenti diversi algoritmi di predizione performanti che, per essere tali, necessitano di una fase di training. Quindi, non solo è richiesto un investimento relativo a strumentazione e sensori, ma è anche necessario raccogliere un numero importante di dati storici per poter rodare bene gli algoritmi di tool condition monitoring. Uno dei limiti che per ora mostra la politica di manutenzione predittiva infatti è che, per poterla applicare al meglio, ha bisogno di un quantitativo di dati storici non indifferente. Ovviamente, per poter collezionare i dati storici, sono necessari tempo ed impiego di risorse, ad un costo non trascurabile.

Ai fini di un possibile studio futuro, potrebbe essere interessante riuscire a creare dei modelli che, in base a bontà dei modelli di TCM, di RUL, quantità e affidabilità dei dati a disposizione, riescano a stimare quale sarebbe il risparmio di costi conseguente all'applicazione di una politica di manutenzione predittiva.

# 5 Bibliografia


[1] M. G. ,. M. M. Luciano Furlanetto, Ingegneria della manutenzione. Strategie e metodi, Franco Angeli, 2007.

[2] A. C. Márquez, The Maintenance Management Framework: Models and Methods for Complex Systems Maintenance, Springer London Ltd, 2007.

[3] R. P. Manzini, Maintenance for Industrial Systems, Springer Verlag, 2010.

[4] G. B. F. L. E. Traini, «Tool Condition Monitoring framework for Predictive Maintenance: case study on milling process.».

[5] M. G. ,. M. M. Luciano Furlanetto, Principi generali di gestione della manutenzione, Franco Angeli, 2006.

[6] G. Calafiore, ELEMENTI DI AUTOMATICA, CLUT, 2007.

[7] N. A. ,. A. M. S. Muhammad Sharil Yahaya, «A Maintenance Cost Study of Transformers Based on Markov Modek Utilizing Frequency of Teansition Approach,» 2018.

[8] MathWorks, 2019. [Online]. Available: https://www.mathworks.com/help/predmaint/ug/rul-estimation-using-rul-estimator-models.html.

[9] R. P. G. L. M. Salvatore Bianchi, «Why and When Must The Preventive Maintenance be Performed?,» 2012.