



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**  
**Facoltà di Ingegneria**

**Corso di Laurea in:**  
**INGEGNERIA MECCANICA**

Tesi di Laurea:  
**Ingegneria Della Manutenzione**  
**Maintenance Engineering**

Candidato:  
De Palma Luca

Relatore:  
Prof. Maurizio Bevilacqua

*Anno Accademico 2018-2019*

# Ingegneria della Manutenzione

Strategie e metodi della Gestione della manutenzione

## Indice

<b>Introduzione all' ingegneria della Manutenzione</b> .....	4
<b>Premessa</b> .....	4
<b>Definizione di Ingegneria della Manutenzione</b> .....	6
<b>Ruolo dell'Ingegneria di Manutenzione</b> .....	8
<b>Attività dell'Ingegneria di Manutenzione</b> .....	9
<b>Studio di approcci di Manutenzione</b> .....	10
<b>Introduzione</b> .....	10
<i><b>Valutazioni affidabilistiche</b></i> .....	10
<i><b>Valutazioni economiche</b></i> .....	12
<i><b>Valutazioni tecniche</b></i> .....	12
<i><b>Scelta della politica di manutenzione</b></i> .....	13
<b>Politica di manutenzione preventiva ciclica</b> .....	13
<b>Politica di manutenzione su condizione</b> .....	18
<b>Metodologia FMECA (Failure Modes and Effect Analysis)</b> .....	19
<b>Introduzione</b> .....	19
<b>Terminologia</b> .....	20
<b>Metodologia</b> .....	22
<i><b>Fasi della metodologia FMECA</b></i> .....	22
<i><b>Scomposizione dell'entità</b></i> .....	22
<i><b>Individuazione dei meccanismi e delle cause di guasto</b></i> .....	26
<i><b>Individuazione degli effetti di guasto</b></i> .....	26
<i><b>Individuazione dei sintomi di guasto e dei metodi di rilevazione</b></i> .....	27
<i><b>Analisi delle criticità (in accordo a fonti SAE)</b></i> .....	27
<i><b>Individuazione delle azioni correttive e pianificazione della manutenzione</b></i> .....	29
<i><b>Organizzazione di un'analisi FMECA</b></i> .....	31
<b>Metodi quantitativi per l'analisi affidabilistica</b> .....	33
<b>Introduzione</b> .....	33
<b>Fault Tree Analysis (FTA)</b> .....	34
<b>Event Tree Analysis (ETA)</b> .....	35

<b>Metodo Monte Carlo</b> .....	36
<b>Total Productive Maintenance (TPM)</b> .....	38
<b>Introduzione</b> .....	38
<i>Il Lean Flow come filosofia globale di gestione</i> .....	39
<i>Principi pratici del Lean Flow</i> .....	40
<i>Strumenti del Lean Flow</i> .....	41
<i>Ordine e pulizia</i> .....	41
<i>Basi del TPM (Concetto di perdita)</i> .....	42
<i>Obiettivi del TPM</i> .....	45
<b>Sistemi software per l'ingegneria di manutenzione</b> .....	46

## **Introduzione all' ingegneria della Manutenzione**

### **Premessa**

Il veloce processo di globalizzazione che sta avvenendo a livello mondiale richiede a tutte le imprese di mettere in campo delle mirate iniziative per adeguare il proprio livello di competitività agli standard internazionali, operando con un approccio organizzativo che favorisca, attraverso l'innovazione, il mantenimento della competitività per il futuro. Grazie all'accresciuta sensibilità agli aspetti di sicurezza, qualità, eco-sostenibilità e conservazione che si stanno positivamente sviluppando nelle nostre Società la manutenzione sta ricevendo nuovo impulso e attenzione. Fondamentale per mantenere competitività di un impianto industriale è sicuramente l'efficienza di esercizio, nel cui ambito in particolare si distingue la capacità di gestione del patrimonio impiantistico, nell'ottica di una sua conservazione e, nel contempo, di un suo utilizzo ottimale per la massimizzazione dei profitti generati lungo la vita utile dell'impianto. In questa nuova ottica la manutenzione non viene più considerata come un centro di costo, bensì come un'alternativa per migliorare i risultati aziendali lungo tutto il ciclo di vita di attrezzature e degli impianti.

Far assumere alla manutenzione il carattere di "investimento strategico" richiede però di anche di introdurre una serie di elementi organizzativi e gestionali, quali, per esempio:

- Il coinvolgimento della manutenzione sin dal progetto e dalla selezione dei nuovi impianti, per contribuire, sulla base dell'esperienza acquisita nel loro utilizzo, a migliorarne l'affidabilità e la manutenibilità;
- La selezione delle politiche di manutenzione, attraverso la definizione del giusto mix di manutenzione correttiva, preventiva, su condizione e migliorativa, con l'obiettivo di ottimizzare i costi/benefici nell'utilizzazione degli impianti;

- Una cultura organizzativa fortemente orientata al miglioramento continuo delle prestazioni, raggiunto attraverso il sistematico ripensamento del progetto degli impianti, grazie alla conoscenza ed esperienza acquisita durante il loro utilizzo; a tal riguardo, è emblematica il concetto giapponese: “un impianto nuovo si trova nel suo peggior stato di prestazione”;
- Il coinvolgimento di tutte le altre funzioni dell’impresa nella conservazione del patrimonio impiantistico, in particolare con la partecipazione degli operatori di produzione, in accordo alla filosofia del TPM (Total Productive Maintenance);
- Il riconoscimento dei ruoli del personale dell’area di manutenzione, perché le persone di maggior potenziale e che si identificano con i compiti di questa area non la debbano abbandonare per cercare la crescita professionale in altri ambiti dell’impresa;
- Una struttura di manutenzione formata da manager sensibilizzati sull’importanza della gestione del patrimonio impiantistico;
- Il cambiamento di visione della manutenzione, da “spesa” ad “investimento strategico”, ottenuto assegnando le risorse nell’ottica di una pianificazione a lungo termine nella vita utile dell’impianto e non unicamente fissando un limite di budget annuale.

È ancora molto radicato lo stereotipo del tecnico di manutenzione come figure tecnico-specialistiche ma molto slegate dal resto di azienda e non adeguate alle attuali necessità delle imprese industriali oltre che lontane dai percorsi di carriera più favorevoli.

È perciò fondamentale la formazione da *service engineer*, figura in cui si devono riunire competenze tecniche, know-how sui temi economico-gestionali, capacità relazionali e di marketing, sensibilità agli strumenti di diagnostica e ai sistemi di *Information Technology*. A questa trasformazione può certamente dare un fondamentale contributo una più cosciente percezione sociale della manutenzione. Infatti per quanto possa sembrare banale, vi è tuttavia una stretta connessione fra le cose semplici quali ordine, pulizia e cura manifestate da una popolazione (cose cui la manutenzione è certamente connessa) e il grado di civiltà della

medesima (in termini di importanza attribuita alla sicurezza, alla qualità della vita, al rispetto dell'ambiente).

Peraltro, se volessimo analizzare il problema anche dal punto di vista economico, riferendoci per esempio al campo della manutenzione industriale, dei trasporti e dei servizi, non è esagerato dire che i miglioramenti possibili con una gestione più ingegneristica della manutenzione sono potenzialmente "impressionanti". Studi recenti effettuati a livello Europeo hanno infatti stimato che i costi propri di manutenzione hanno valori compresi fra il 4% e l'8% del fatturato di ciascuna impresa (in dipendenza dal settore), per un valore, per l'intera Europa, dell'ordine di centinaia di miliardi di Euro. Poiché i conseguenti costi indotti (relativi alla mancanza della produzione o del servizio) sono mediamente stimati della stessa entità dei costi propri, otteniamo una stima sulla quale non appare irragionevole supporre la possibilità di risparmi valutabili nell'ordine delle centinaia di milioni di Euro, nel caso di miglioramenti appena significativi della qualità della manutenzione.

La strada da seguire è quindi quella di sviluppare e applicare quell'insieme di principi, tecniche e procedure che sono comprese nell'Ingegneria della Manutenzione.

## **Definizione di Ingegneria della Manutenzione**

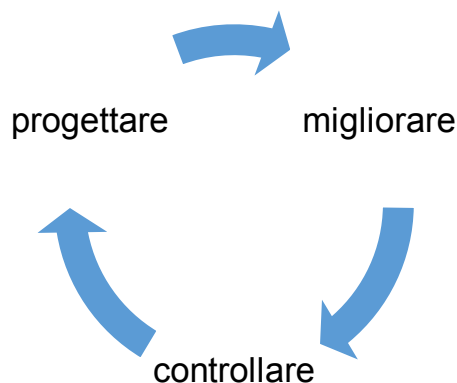
Con il termine di Ingegneria della Manutenzione si identifica quell'insieme di principi, tecniche e procedure di tipo affidabilistico, gestionale ed organizzativo che permettono di affrontare il tema della manutenzione da un punto di vista ingegneristico, cioè fondato sui principi scientifici dell'ingegneria e dell'organizzazione, allo scopo di ottenere significativi miglioramenti di efficienza ed efficacia nella progettazione, nella gestione, nella conduzione e nel controllo della manutenzione.

In maniera corrispondente, l'applicazione all'interno di un'impresa dei metodi dell'Ingegneria della Manutenzione, può portare alla creazione di una funzione organizzativa che è incaricata di porre in essere i metodi propri di tale disciplina. È possibile identificare tre principali macro-processi organizzativi della manutenzione:

- Il processo di *Esecuzione della Manutenzione*
- Il processo di *Gestione della Manutenzione*
- Il processo di *Ingegneria di Manutenzione*

In particolare:

- Il processo di *Esecuzione della Manutenzione* riceve gli ordini operativi dal processo di *Gestione della Manutenzione* e riporta ad esso lo stato di avanzamento degli stessi, nonché tutte le informazioni sugli interventi (preventivi o a guasto);
- A sua volta il processo di *Gestione della Manutenzione* invia il report delle attività svolte alla funzione *Ingegneria di Manutenzione* incaricata di tutte le analisi utili a qualificare il comportamento affidabilistico delle entità e dei sistemi sotto controllo, a valutare il quadro gestionale delle attività manutentive effettuate e ad analizzare i risvolti sotto il profilo economico;
- Infine il processo di *Ingegneria di Manutenzione*, utilizzando tutto l'insieme di strumenti software e tecniche che le sono propri, ha il compito di dedurre, dalle analisi quantitative svolte, adeguate proposte di miglioramento della manutenzione, sia dal punto di vista tecnico, che gestionale. Le deduzioni ed i piani dell'*Ingegneria di Manutenzione* vengono quindi trasferiti come input alla *Gestione della Manutenzione*, che ha il compito di prepararne la messa in pratica.



## **Ruolo dell'Ingegneria di Manutenzione**

Possiamo rappresentare il ruolo assunto dall'Ingegneria di Manutenzione negli anni più recenti come il risultato di una evoluzione della manutenzione da forme puramente reattive, a seguito dell'evento di guasto, verso forme via via più sofisticate in cui si mobilitano concetti e metodi tipici dell'Ingegneria per ottenere risultati sempre migliori in termini di sicurezza efficienza, efficacia e costi.

I principali compiti dell'Ingegneria di Manutenzione si possono riassumere nei seguenti:

- Progettare e promuovere le politiche e le tecniche manutentive più adeguate alla specifica situazione: si tratta di studiare l'applicazione delle diverse politiche di manutenzione (Preventiva, Correttiva, Migliorativa, Straordinaria), individuando il loro mix ottimale (cioè quel mix che minimizza il costo totale di manutenzione);
- Pianificare la manutenzione: si tratta di analizzare le diverse attività manutentive scomponendole in fasi, in vista della determinazione delle risorse materiali e professionali necessarie e di una razionalizzazione delle attività tesa all'ottimizzazione delle risorse economiche utilizzate;
- Progettare interventi per il miglioramento dell'affidabilità e manutenibilità;
- Promuovere la standardizzazione dei sistemi gestionali e informativi;
- Contribuire a razionalizzare ed ottimizzare l'uso delle prestazioni di terzi;
- Progettare la gestione dei materiali;
- Promuovere lo sviluppo/miglioramento dei metodi di lavoro (piani di manutenzione, standard lavori, specifiche tecniche, attrezzature);
- Promuovere il miglioramento continuo delle prestazioni tecniche dei sistemi e dei costi di manutenzione;
- Promuovere lo sviluppo e la valorizzazione delle competenze manutentive;



- Costruire il riferimento culturale di tutta l'organizzazione manutentiva.

Quanto sopra è stato tradotto dall'UNI, con la Norma UNI 10366, nel seguente percorso progettuale in più passi per l'applicazione dell'approccio ingegneristico alla manutenzione:

1. Selezione dei beni;
2. Individuazione dei beni critici (prima fase);
3. Analisi affidabilità dei beni critici (seconda fase);
4. Selezione delle politiche di manutenzione (fase tecnica);
5. Valutazione economica delle politiche di manutenzione;
6. Stesura del piano di manutenzione;
7. Definizione e quantificazione delle risorse di manutenzione;
8. Controllo economico della manutenzione.

### **Attività dell'Ingegneria di Manutenzione**

Il concetto di *Ingegneria di Manutenzione* si è sviluppato in tempi relativamente recenti e non è stato ancora raggiunto un completo consenso sulle attività e sulle tecniche che ne fanno parte. È evidente che le modalità di formalizzazione dei contenuti dell'Ingegneria di Manutenzione dipendano anche dalle dimensioni aziendali e dal tipo di attività manutentive che le caratteristiche dei processi aziendali richiedono. È chiaro che in una piccola realtà alcune delle attività, che vengono descritte come facenti parte dell'ingegneria di manutenzione possono essere attribuite a processi manutentivi di più basso livello. Al contrario, in realtà industriali di grandi dimensioni, le attività proprie dell'ingegneria di manutenzione possono essere strutturate e distribuite, in modi organizzativamente diversi.

## **Studio di approcci di Manutenzione**

### **Introduzione**

Lo studio di approcci di Manutenzione è un'attività di ingegneria di manutenzione che riguarda il dimensionamento dei principali parametri operativi del piano di manutenzione, come:

- a) L'intervallo di esecuzione delle sostituzioni da effettuare in manutenzione preventiva ciclica;
- b) L'intervallo delle ispezioni necessarie per una manutenzione su condizione/predittiva;
- c) La frequenza statisticamente attesa degli interventi di manutenzione correttiva a guasto.

Tale dimensionamento è fatto allo scopo di considerare gli obiettivi tecnici e/o economici del piano di manutenzione. Il processo di dimensionamento può naturalmente far propendere anche per una politica di manutenzione a guasto, qualora questa soluzione risulti più efficace rispetto agli obiettivi fissati. La corretta progettazione dell'approccio di Manutenzione richiede la valutazione di diversi punti di vista così da tenere conto sia di aspetti più propriamente affidabilistici, sia di aspetti economici, che di aspetti di priorità del servizio reso.

### ***Valutazioni affidabilistiche***

La fase del ciclo di vita in cui si trova un'entità può essere determinata a partire da uno storico dei guasti sufficientemente esteso con l'uso di opportuni metodi di analisi statistica. Per esempio l'identificazione della funzione di affidabilità dell'entità con una curva di Weibull (con i suoi parametri: vita caratteristica  $a$ , fattore di forma  $b$  e fattore di posizione  $g$ .), permette di definirne la fase del ciclo di vita tramite l'analisi del

fattore di forma  $b$ . Analizzare invece la scelta della politica di manutenzione sulla base di valutazioni affidabilistiche, significa, verificare quali politiche siano potenzialmente utilizzabili in funzione della fase del ciclo della vita operativa in cui si trova l'unità da manuzionare.

❖ *Fase di mortalità infantile* (Weibull con fattore di forma  $b < 1$ ) sono possibili due politiche alternative:

- attendere il guasto, secondo una politica di tipo correttivo
- effettuare un'attività di ispezione/monitoraggio secondo una politica di manutenzione su condizione, prima della messa in servizio operativo dell'entità.

Ad es. nel caso di circuiti elettronici è usuale l'effettuazione di un adeguato periodo di funzionamento dell'entità all'interno di speciali stufe, per essere sottoposta, prima dell'immissione sul mercato, a ripetuti cicli termici di riscaldamento-raffreddamento (burn-in) allo scopo di portare al guasto eventuali componenti "deboli" del circuito; analogo scopo hanno attività di "rodaggio" di motori, macchine e apparecchiature in genere.

❖ *Fase di vita utile* (Weibull con fattore di forma  $b = 1$ ) le politiche alternative possibili sono:

- politiche di manutenzione su condizione/predittiva
- politiche di correzione successiva al guasto.

In particolare l'attività di ispezione/monitoraggio consente la rettifica dei piccoli difetti che potrebbero portare l'entità al guasto (pur essendo nella fase di vita a tasso di guasto costante).

L'ispezione consente infatti la localizzazione dei componenti che si stanno degradando, richiedendone la sostituzione con interventi preventivi. Si raggiungono così due risultati principali: l'anticipo del guasto che si genererebbe con il progredire del degrado di tali componenti e il mantenimento di condizioni di vita utile dell'entità entro cui i componenti operano.

❖ *Fase di usura* (Weibull con fattore di forma  $b > 1$ ) le politiche alternative possibili sono:

- la politica di manutenzione su condizione, poiché l'ispezione/monitoraggio è in tale situazione a maggior ragione utile

per valutare il progressivo degrado dell'entità (e dei suoi componenti),

-la politica di manutenzione basata sul tempo di funzionamento dell'entità (manutenzione preventiva ciclica), dato che l'entità è ormai entrata nella fase di invecchiamento in cui è inevitabile l'aumento della propensione (tasso) di guasto e quindi dei guasti complessivamente attesi nell'immediato futuro,

-la terza possibilità è naturalmente rappresentata dalla politica di manutenzione correttiva a seguito di guasto.

### ***Valutazioni economiche***

Se da un punto di vista affidabilistico sono definibili, come abbiamo visto, le diverse politiche di manutenzione in funzione della fase del ciclo di vita in cui l'entità si trova, la loro valutazione da un punto di vista economico può permettere di individuare la politica migliore, nella soluzione a più basso costo totale di manutenzione (somma di costi propri e costi indotti).

### ***Valutazioni tecniche***

In alcuni casi, la prestazione obiettivo che si intende conseguire può essere di tipo tecnico, cioè diversa da quella economica. Se ad esempio si desidera ottenere la massima capacità produttiva (o di servizio) dell'entità, l'obiettivo può essere costituito dalla massimizzazione della disponibilità operativa o, equivalentemente, dalla minimizzazione del down time, anche se questa condizione non necessariamente corrisponde alla situazione di minimo costo totale di manutenzione. Infatti nella realtà operativa la scelta della politica di manutenzione è spesso condizionata dal posizionamento competitivo dell'azienda o dalla situazione di mercato. È per esempio usuale adottare un criterio di scelta che possiamo definire di tipo tecnico nelle aziende che operano in un mercato stagionale. Quando la domanda di mercato è molto forte l'obiettivo aziendale più importante diviene il soddisfacimento della domanda di prodotto e l'ottimizzazione economica della manutenzione viene sacrificata dalla produttività. Quando però la domanda è bassa,

l'impianto diventa sotto-utilizzato e la politica di manutenzione viene fatta rispondere a criteri di affidabilità ed economici.

### ***Scelta della politica di manutenzione***

Riassumendo quanto discusso fin qui, una guida pratica alla scelta della politica di manutenzione comprende i seguenti passi:

- Anzitutto, con il criterio affidabilistico si determinano le possibili politiche in funzione della fase del ciclo di vita in cui l'entità si trova;
- Di seguito, si deve scegliere un opportuno criterio per analizzare le alternative individuate al punto precedente: in particolare si può adottare un criterio economico o un criterio tecnico;
- La soluzione che risulta più conveniente in base al criterio adottato costituisce la politica preferibile.

### **Politica di manutenzione preventiva ciclica**

La progettazione di dettaglio della politica di manutenzione ciclica può essere applicata secondo due differenti situazioni:

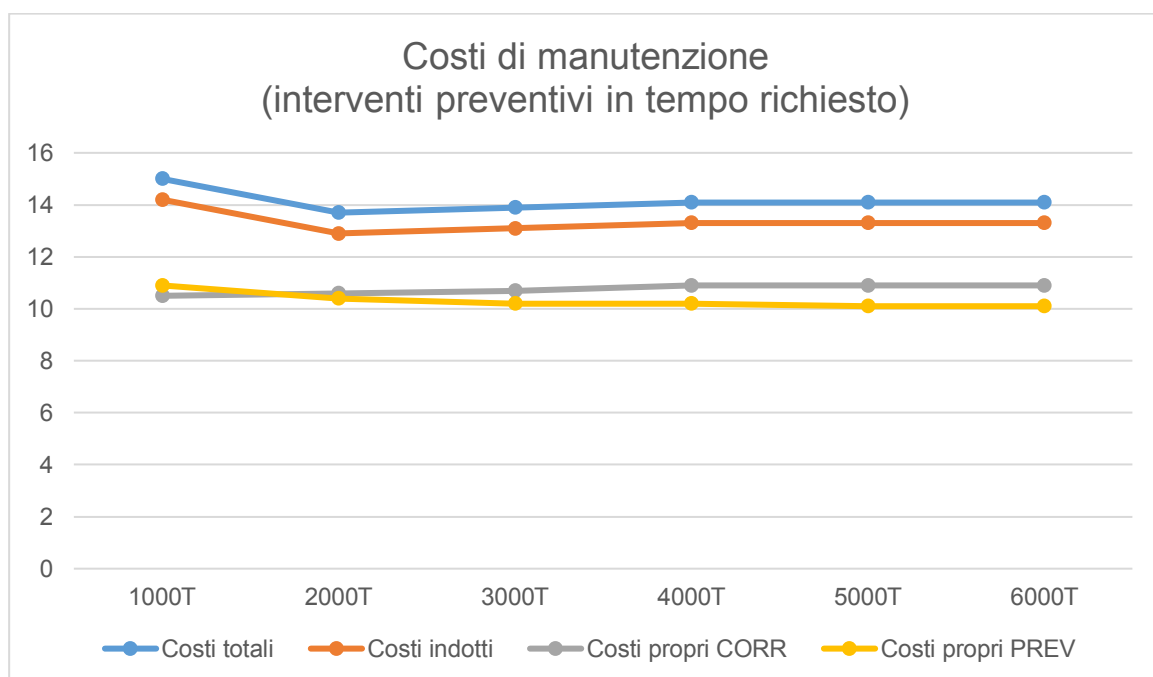
- Disponibilità di informazioni sperimentali sull'uso di politiche diverse con le relative risultanze economiche
- Disponibilità delle sole informazioni di guasto

Nel primo caso la disponibilità di informazioni sulle prestazioni tecnico-economiche ottenute in situazioni gestionali diverse (cioè con politiche diverse) permette di interpretare analiticamente tali dati per individuare la situazione di gestione ottimale. Nel secondo caso invece è necessario stimare il comportamento di affidabilità (curva di Weibull) a partire dallo storico dei guasti o da informazioni di targa per valutare con un modello analitico gli effetti di ciascuna politica. I modelli di calcolo che verranno presentati a tal riguardo consentono di scegliere la politica ottimale tra manutenzione preventiva ciclica e manutenzione correttiva a guasto, quando l'entità è in fase di usura, e, nel caso di convenienza della

manutenzione preventiva, di determinare l'intervallo ottimale di esecuzione degli interventi ciclici.

La progettazione della politica di manutenzione preventiva ciclica richiede di definire la dimensione dell'intervallo ottimo di intervento. Tale determinazione, sulla base di un criterio di scelta di tipo economico, può essere illustrata secondo lo schema di fig.1 nel caso di interventi manutentivi effettuati in tempo richiesto, e nella fig.2 nel caso gli interventi siano invece effettuati in tempo non richiesto.

Fig.1



Periodo di intervento: T, Costi: migliaia

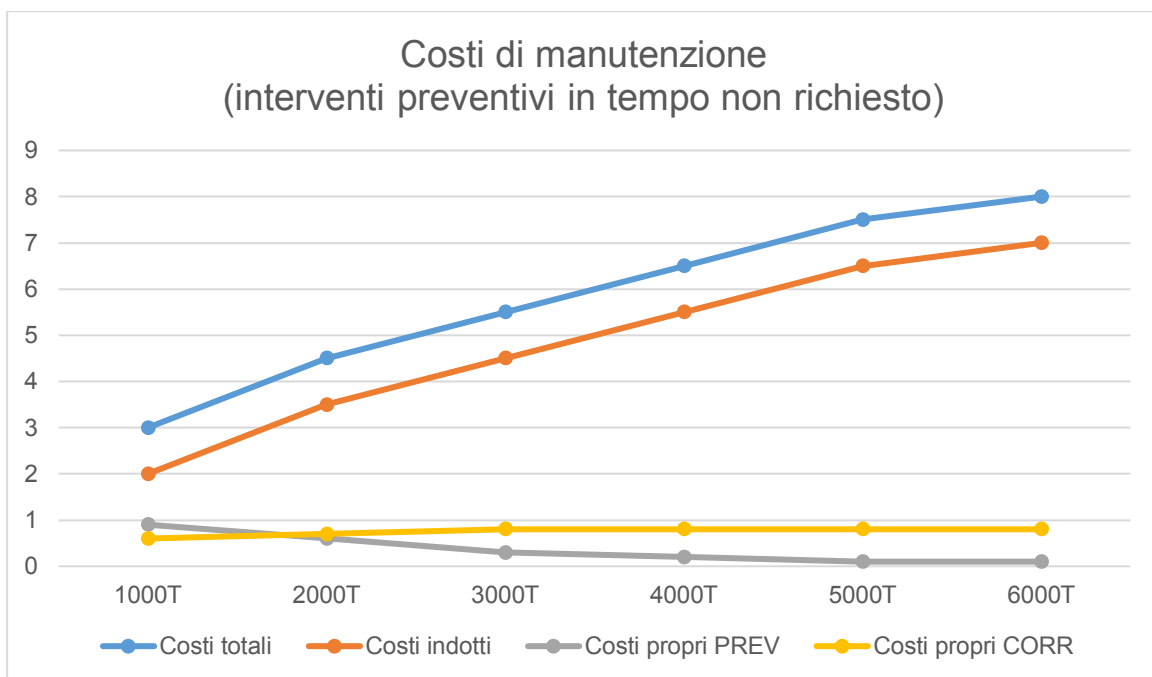
Come si può notare dal grafico:

- Il costo proprio degli interventi correttivi ha un andamento crescente all'aumentare dell'intervallo di manutenzione preventiva, andando asintoticamente al valore del costo totale proprio della manutenzione correttiva quando l'intervallo tende all'infinito (cioè non vi è manutenzione preventiva),
- La curva dei costi indotti ha un andamento prima decrescente (grazie alla minore influenza dei fermi per interventi preventivi) e poi crescente a causa della maggiore frequenza di fermate

per guasto, l'asintoto cui la curva tende è rappresentato dal valore dei costi indotti in condizioni di manutenzione puramente correttiva,

- La curva dei costi dovuti agli interventi preventivi ha naturalmente un andamento continuamente decrescente al crescere dell'intervallo di manutenzione preventiva,
- Infine, la curva dei costi totali (somma di tutte le precedenti) permette di individuare il valore ottimo dell'intervallo di preventiva in corrispondenza del punto di minimo di tale curva.

Fig.2



Periodo di intervento: T, Costi: migliaia

La fig.2 mette in luce l'analogia situazione di calcolo nel caso di interventi preventivi effettuati in tempo non richiesto: la differenza principale fra i due casi sta nella curva dei costi indotti che, con interventi preventivi in tempo non richiesto, risulta dipendere solo dalle fermate per guasto e quindi ha un andamento sempre crescente con l'intervallo di preventiva. La modalità di individuazione dell'intervallo ottimo di intervento sopra illustrata può naturalmente essere adottata quando siano disponibili dati storici sul comportamento affidabilistico dell'entità con valori diversi

dell'intervallo di intervento. Infatti in tal caso la performance di affidabilità dell'entità, al variare del livello di manutenzione preventiva, è direttamente espressa dalla variazione del numero di guasti sperimentalmente riscontrata sull'entità al cambiare dell'intervallo di preventiva. Possiamo quindi concludere che questa modalità di calcolo dell'intervallo ottimo degli interventi di manutenzione preventiva ciclica (sia esse indifferentemente a data costante o a periodo costante) è una modalità sperimentale adottabile quando si ha una profonda conoscenza del comportamento a guasto dell'entità (cioè si abbia a disposizione un gran numero di dati sul comportamento di affidabilità dell'entità stessa).

Diversa è invece la situazione quando si dispone di uno storico dei guasti, ma non se ne conosce la relazione con l'intervallo di manutenzione preventiva. In tal caso la determinazione dell'intervallo ottimo di intervento preventivo a data costante può essere effettuata con un modello analitico. Si ricorda che, per politica di manutenzione preventiva a data costante, si intende l'effettuazione di interventi di manutenzione preventiva con un intervallo temporale  $T$ , a calendario, costante. All'interno del periodo  $T$  (periodo  $(0, T]$ ) possono occorrere uno o più guasti (con il relativo intervento di manutenzione correttiva).

Per calcolare, al variare del valore di  $T$ , il numero totale atteso di interventi preventivi e correttivi su un dato orizzonte temporale, è quindi necessario stimare il numero di interventi a guasto che avvengono in un ciclo  $T$ . L'analisi del risultato ottenuto per diversi valori di  $T$  permette di calcolare il conseguente costo totale di manutenzione e di trovare il valore di  $T$  ottimale. Il metodo di calcolo comprende i seguenti passi:

- a. Stima del numero di guasti atteso nell'intervallo  $T$  di manutenzione,
- b. Calcolo dell'intervallo ottimo con obiettivo economico,
- c. Calcolo dell'intervallo ottimo con obiettivo tecnico.



Nel caso di interventi di manutenzione ciclica ad età costante, la manutenzione avviene nel momento in cui viene raggiunta una certa età di servizio  $T$ , rispetto all'ultimo intervento preventivo o correttivo occorso (misurazione in ore di utilizzo, battute, chilometri percorsi, ...). Pertanto, all'interno del periodo  $(0, T]$  può cadere l'intervento preventivo ciclico (quando l'età " $T$ " è raggiunta) oppure può cadere l'intervento correttivo a seguito di un guasto (prima del raggiungimento dell'età " $T$ ").

La durata di un ciclo di manutenzione non coincide con il periodo  $T$ , come capita nel caso della manutenzione a data costante. Risulta, invece, inferiore e pari alla media dell'intervallo che intercorre tra una manutenzione e la successiva, qualunque essa sia (alias è il MTBM, Mean Time Between Maintenance). È perciò necessario stimare il valore MTBM statisticamente atteso. Il metodo di stima di MTBM presentato consente la stima al variare dell'età " $T$ " prescelta ( $MTBM(T)$ ). In maniera intuitiva si può, infatti, osservare che il valore MTBM dipende necessariamente dall'età " $T$ " scelta. Se l'età " $T$ " è molto elevata, MTBM tende a coincidere con MTBF (Mean Time Between Failures). È infatti molto improbabile il raggiungimento di un'età " $T$ " molto elevata, poiché vi è una alta probabilità che avvenga prima di un guasto. La manutenzione avviene quindi approssimativamente con intervallo pari alla frequenza intrinseca di guasto dell'entità ( $1/MTBF$ ). Se d'altra parte, l'età " $T$ " è molto bassa, MTBM tende a coincidere con l'età  $T$  medesima (infatti, si anticipa a tal punto che l'intervento preventivo da ridurre quasi a zero la probabilità che occorra un guasto). In questo caso la frequenza dell'intervento è regolata dall'età  $T$  scelta (pari a  $1/T$ ). Una volta stimato il valore  $MTBM(T)$  è possibile calcolare la quota parte di interventi a guasto e interventi preventivi che occorrono entro la durata del ciclo di manutenzione  $MTBM(T)$ . A partire dalla conoscenza del numero degli interventi per ciclo, è anche possibile calcolare le relative grandezze derivate tecniche (es., down time, ...) ed economiche (costi propri e indotti). Il calcolo può essere realizzato al variare di  $T$ , determinando così l'intervallo  $T$  ottimale rispetto al criterio tecnico-economico prescelto.

## Politica di manutenzione su condizione

La scelta della politica di manutenzione su condizione si presenta come alternativa alla manutenzione correttiva, quando l'entità è in fase di vita utile. Nel caso in cui si intraveda la convenienza della manutenzione su condizione si tratta poi di determinare l'intervallo (o frequenza) ottimale di ispezione. In particolare, il modello che verrà presentato prende in esame il problema dell'organizzazione della manutenzione ispettiva: cioè l'organizzazione delle ronde ispettive fatte, a cadenza fissata, da personale di manutenzione. Tale personale, a seguito dell'avvenuto superamento di un livello di allarme misurato durante l'ispezione, avvia una manutenzione su condizione. Le ronde ispettive, effettuate con una frequenza da fissare (ad es. una volta al mese) hanno l'obiettivo di localizzare i componenti dell'entità che stanno progressivamente usurandosi. Se la "profondità" di ispezione è adeguata (consentendo la localizzazione dei componenti in degrado) si possono fare le seguenti due ipotesi:

- L'accadimento di alcuni guasti viene evitato con l'intervento preventivo su condizione, con l'effetto ultimo di dar luogo ad un tasso di guasto dell'entità più ridotto, a confronto con il suo tasso di guasto intrinseco (cioè che si osserverebbe quando l'entità fosse soggetta ad una politica di manutenzione correttiva);
- Il tasso di guasto osservato si mantiene pressoché costante, si evita cioè di "entrare" in fase di usura; questa seconda ipotesi vale almeno fino a quando l'entità nel suo complesso non risulta eccessivamente invecchiata, tanto da raggiungere l'età di usura e richiedere una revisione generale (su condizione o ciclica), non essendo le piccole manutenzioni su condizione più sufficienti a contenere il degrado.

In base alle precedenti ipotesi (tasso di guasto ridotto e costante) vengono stimati il numero di ispezioni  $n$  (e le relative piccole

manutenzioni preventive conseguenti) e il numero di interventi a guasto residui attesi per unità di tempo è possibile calcolare le grandezze derivate tecniche (ad esempio il down time) ed economiche (ad esempio i costi propri e indotti), che sono utili per la scelta finale. Il calcolo può essere realizzato al variare del numero  $n$  di ispezioni per unità di tempo, trovando la frequenza di ispezione ottimale rispetto al criterio tecnico – economico prescelto.

## **Metodologia FMECA (Failure Modes and Effect Analysis)**

### **Introduzione**

La FMECA è una metodologia di studio affidabilistico che fu pensata originariamente a supporto della progettazione di prodotti/sistemi complessi. Inizialmente denominata FMEA venne introdotta dalla NASA a partire dal 1950, nell'ambito del programma lunare Apollo. Negli anni più recenti ha però trovato ampio spazio di applicazione in altri ambiti di utilizzo, quali l'analisi di processo e la manutenzione industriale. Per identificare le sue diverse applicazioni (che comportano delle varianti specifiche della metodologia) si parla anche di M-FMECA (Maintenance-FMECA), o anche di D-FMECA (Design-FMECA) o di P-FMECA (Process-FMECA). La D-FMECA viene eseguita per eliminare i guasti durante progettazione delle attrezzature e tenendo conto di tutti i tipi di guasti durante tutta la vita dell'attrezzatura, la P-FMECA si concentra sui problemi derivanti da come l'apparecchiatura è fabbricata mantenuta o utilizzata, la M-FMECA cerca potenziali problemi e colli di bottiglia in processi più grandi, come intere linee di produzione. Per quanto riguarda l'applicazione della metodologia nella manutenzione industriale essa si è affermata come strumento ottimo per: 1) l'analisi delle modalità di guasto di un'entità complessa, 2) l'identificazione dei suoi elementi critici dal punto di vista affidabilistico, 3) la definizione ragionata del piano di manutenzione a partire dai componenti critici.

La FMECA è una metodologia che si è consolidata nel tempo sia per effetto della presenza di numerosi standard internazionali, che per la sua adozione, secondo diverse interpretazioni, nella pratica industriale. La normativa UNI stessa richiama i criteri alla base della FMECA (analisi dei

guasti, degli effetti e delle criticità) come un elemento metodologico fondamentale nell'ingegneria della manutenzione. Sostanzialmente la metodologia FMECA è costituita da una procedura per l'analisi di un'entità complessa (macchina, impianto, sistema di qualsivoglia natura) fondata su 2 principi fondamentali. Il primo è costituito dalla scomposizione gerarchica dell'entità sotto esame in sottogruppi a complessità decrescente, fino ad arrivare al livello di dettaglio voluto (eventualmente anche fino ai componenti elementari). Si ottiene così uno schema ad albero rovesciato, in modo analogo alla ben nota struttura della distinta base, con la sostanziale differenza che nel caso della FMECA il principio ispiratore del meccanismo di scomposizione è l'analisi funzionale (e non la sequenza di montaggio come nel caso della distinta base). Il secondo principio consiste nell'esecuzione dell'analisi di affidabilità ad ogni livello e cioè nella determinazione di modo, causa, meccanismo ed effetto del guasto a quel livello, valutando in modo opportuno la criticità dell'entità in esame. Alla fine di questo processo di analisi si ottiene un quadro estremamente articolato e documentato del modo e della probabilità con cui si possono generare i guasti nell'entità e, su tale base, si possono definire le più opportune azioni di progettazione, pianificazione e miglioramento della manutenzione o del progetto dell'entità.

## ***Terminologia***

Tab. 1 – Terminologia d'uso comune

<b>Termine</b>	<b>Significato</b>
Modo di guasto	Modo in cui si manifesta il guasto e il suo impatto sulle operazioni di un'entità (può essere: Totale, parziale, intermittente)
Meccanismo di guasto	Fenomeno naturale di degrado del funzionamento di un'entità che perdurando nel tempo può portare al guasto della stessa
Causa di guasto	Origine determinante che spiega il guasto, cioè la "circostanza che porta al guasto", di un'entità (può essere dovuto a: non adeguata progettazione, non adeguata fabbricazione, non adeguata installazione, ad usura, ad utilizzazione scorretta, ad uso improprio, ad errata manutenzione)

Tab. 2 - Terminologia d'uso specifico

Termine	Significato
Effetto di guasto	Conseguenze che un modo di guasto ha sulla funzionalità di un'entità
Effetto locale	Conseguenze che un modo di guasto ha sulla funzionalità di un'entità al livello di "scomposizione" più basso (livello dell'item componente l'entità)
Effetto superiore	Conseguenze che un modo di guasto ha sulla funzionalità di un'entità a livello di "scomposizione" immediatamente superiore a quello in cui è stato individuato l'effetto locale (livello dell'insieme di cui l'item componente dell'entità è parte)
Effetto finale	Conseguenze che un modo di guasto ha sulla funzionalità di un'entità a livello di "scomposizione" più alto (livello dell'entità vista come sistema completo)
Azione correttiva	Modifica documentata del progetto, del processo, di una procedura, dei materiali utilizzati, implementata per correggere un difetto progettuale e/o prevenire o limitare una causa di guasto

## Metodologia

### *Fasi della metodologia FMECA*

Tab. 3 - Fasi della metodologia FMECA per la progettazione del piano di manutenzione

<b>Fasi</b>	<b>Descrizione</b>
Scomposizione dell'entità	Scomposizione dell' entità nei suoi sottoinsiemi principali (gruppi funzionali, assiem e sotto-assiem) e item componenti
Individuazione dei modi, dei meccanismi e delle cause di guasto	Individuazione dei modi di guasto, dei meccanismi e delle cause potenzialmente associati all'entità (ai suoi sottosistemi e agli item componenti)
Individuazione degli effetti di guasto	Individuazione degli effetti di guasto associati a ciascun modo di guasto
Individuazione dei sintomi e dei metodi di rilevazione	Individuazione dei sintomi di guasto incipiente / avvenuto associati a ciascun modo di guasto, e dei metodi e delle modalità di rilevazione precoce / successiva al guasto
Analisi delle criticità	Attribuzione dell'indice di criticità (detto anche indice di rischio) associato a ciascun modo di guasto
Individuazione delle azioni correttive e pianificazione della manutenzione	Individuazione degli interventi di manutenzione preventiva richiesti; individuazione delle proposte di manutenzione migliorativa; individuazione dei requisiti di supporto logistico (specializzazioni di mestiere e squadre di manutenzione, parti di ricambio, materiali di consumo, attrezzature di supporto)

### *Scomposizione dell'entità*

Utilizzando come criterio la scomposizione guidata dal rischio associato ai guasti, si procede alla scomposizione di quelle entità che risultano critiche per la severità degli effetti di guasto (durata del guasto molto elevata, forte riduzione di capacità produttiva disponibile, danno ambientale, ...) e/o per la probabilità di accadimento del guasto (frequenza del guasto elevata).

Ad esempio nel caso l'entità sia costituita da una macchina utensile a controllo numerico, si può pensare di aver inizialmente scomposto la

macchina nei suoi sottoinsiemi principali (gruppi funzionali, come riportato sull'asse orizzontale della fig.1) e aver registrato uno storico dei guasti associati al livello dei sottosistemi medesimi. L'analisi statistica dello storico evidenzia facilmente la necessità di scomporre ulteriormente alcuni dei gruppi funzionali. Ad esempio il gruppo mandrino è senz'altro un oggetto di manutenzione da scomporre perché presenta delle criticità sia per la forte indisponibilità, conseguente a guasti di lunga durata (MDT a guasto elevato), che per la non trascurabile frequenza di guasto (numerosità dei guasti).

Fig. 1 – Dati di affidabilità di una macchina utensile CNC

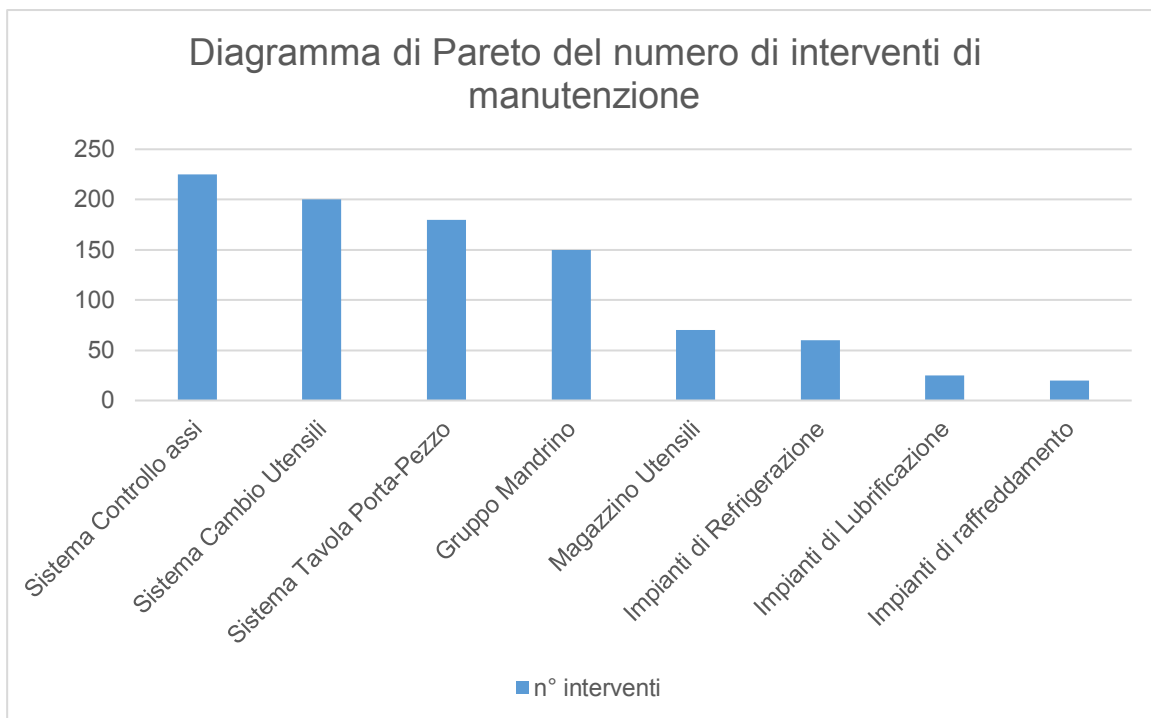
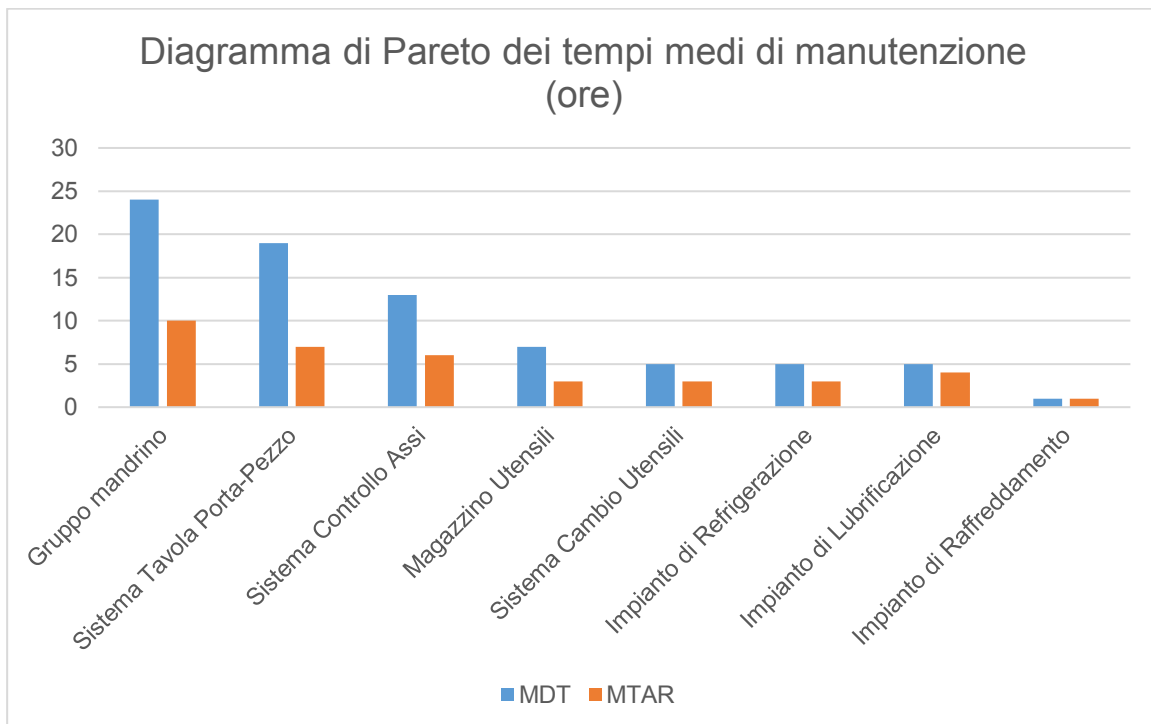


Fig. 2 - Dati di manutenibilità di una macchina utensile CNC (MDT e MTAR)





Il secondo criterio basa la scomposizione degli oggetti di manutenzione in funzione dei compiti di supporto logistico che sono affidati alla manutenzione. In accordo a questo criterio, la scomposizione viene attuata in accordo ai compiti da assegnare alla responsabilità della funzione manutenzione fino al livello dei componenti rimpiazzati (oggetti di rimpiazzo) e/o tenuti sotto controllo (oggetti sotto controllo con monitoraggio continuo o ispezione a cadenza).

Ad esempio nel caso di motore elettrico installato in un impianto industriale, affidato in revisione ciclica alla manutenzione (che si incarica della sostituzione di componenti quali cuscinetti, spazzole, ecc..) la scomposizione dell'impianto verrà condotta fino al livello degli item rimpiazzati. Ciò consente di progettare il piano di revisione in modo adeguato, con le informazioni al giusto livello di scomposizione per la scelta del periodo di manutenzione e per disporre dei codici dei ricambi necessari.

Generalizzando, si può affermare che, in uno studio FMECA, si hanno diversi livelli di scomposizione di un'entità, tipicamente:

-primo livello, corrispondente all'entità in esame (macchina o stazione operativa);

-secondo livello, in cui si individuano i sottosistemi/gruppi funzionali dell'entità;

-terzo livello, in cui si individuano i sotto-assiemi preposti alle operazioni elementari necessarie alla operatività dei sottosistemi funzionali dell'entità;

-quarto livello, in cui si individuano gli item componenti (elettrici, elettronici, idraulici, meccanici, ...) di ciascun sotto assieme soggetti a guasto.

Il meccanismo di scomposizione è utile per focalizzare l'attenzione sui meccanismi e le cause di guasto (la scomposizione porta l'analista a concentrarsi sulle parti dell'entità dove si origina il meccanismo/la causa del guasto), aiuta inoltre a definire con precisione gli effetti di guasto (la scomposizione porta l'analista a discriminare se l'effetto di guasto interessa il livello componente, il livello sotto-assieme superiore o l'entità completa).

### *Individuazione dei meccanismi e delle cause di guasto*

Obiettivo di questa fase dello studio FMECA è, prima di tutto, individuare i modi di guasti dell'entità. Saranno, poi, individuati i modi di guasto di ciascuna funzione, unitamente alle parti dell'entità (sotto-assiemi e componenti) dove i guasti si originano. È chiaramente pregiudiziale, allo svolgimento di questa fase, l'aver provveduto alla scomposizione dell'entità.

Dall'individuazione dei modi di guasto dell'entità si passa all'individuazione del meccanismo e della causa che li hanno determinati (meccanismi e cause, se più d'uno): vengono, in particolare, identificati, per ogni modo di guasto dell'entità, i meccanismi e le cause più probabili.

L'identificazione dei meccanismi e cause di guasto è essenziale per una buona progettazione del piano di manutenzione: per sua definizione, il piano nasce, infatti, per eliminare o, tutt'al più, limitare meccanismi e cause di guasto; il suo progetto non può quindi prescindere da una chiara identificazione dei meccanismi e delle cause di guasto; al contrario, con una descrizione ambigua i meccanismi e cause, la proposta degli interventi di manutenzione da prevedere nel piano può essere irrimediabilmente fuorviata.

### *Individuazione degli effetti di guasto*

Per ciascun modo di guasto, gli effetti di guasto (distinti tra effetti locali, superiori e finali) possono essere di diversa natura:

- Mancata sicurezza (sull'ambiente e sulle persone)
- Mancata erogazione del servizio (mancato utilizzo della capacità produttiva / di servizio)
- Mancata qualità (scarto, rilavorazioni, resi di prodotti difettosi, ...)
- Inefficienza di esercizio (extra-consumi di utilities e materiali)
- Impegno di materiali di manutenzione (quantità di materiale sostituito o riparato)
- Impegno di personale di manutenzione (ore di manodopera impiegata negli interventi)

L'effetto può essere valorizzato attraverso il suo costo proprio o indotto di manutenzione.

Ad esempio, la rottura di un cuscinetto del motore del gruppo mandrino della macchina utensile a controllo numerico ha: come effetto locale il costo di sostituzione del componente rotto, con, in aggiunta, l'eventuale riparazione di altri componenti danneggiati (es. le piste dei cuscinetti), come effetto superiore, la fermata del motore predisposto alla rotazione del mandrino, da cui discende anche l'effetto finale, cioè la fermata della macchina utensile ed il conseguente mancato utilizzo della sua capacità produttiva (con relativi costi indotti di manutenzione).

### *Individuazione dei sintomi di guasto e dei metodi di rilevazione*

Per ciascun modo di guasto, e le relative cause, sono, ora, individuati i sintomi premonitori e i sintomi di guasto avvenuto, utili, rispettivamente, come segnali per la diagnosi prima del guasto o a seguito del suo accadimento. L'individuazione dei sintomi di guasto è un primo passo per poter valutare se è possibile pianificare una manutenzione su condizione/predittiva.

Il secondo passo è un naturale seguito dell'individuazione dei sintomi di guasto: sono ora esplicitamente individuati alcuni esempi di sintomi e dei metodi di rilevazione potenzialmente utilizzabili.

Sintomi	Metodi di rilevazione
Perdite d'olio, rumore, surriscaldamento...	Ispezioni sensoriali (non strumentate)
Variazione di spessori, variazione di eccentricità, ...	Ispezioni strumentate (con strumenti non specialistici ad es. un calibro)
Distribuzione delle temperature, frequenza e valore assoluto delle vibrazioni, ...	Monitoraggio diagnostico (con strumenti specialistici, ad es. termocamera)
Velocità di rotazione di un motore, portata erogata di fluido di processo, ...	Controllo di processo (con sensori di controllo di processo)
Difetti di saldatura	Test specialistici sui materiali (con strumenti di test specialistici ad es. raggi x)

### *Analisi delle criticità (in accordo a fonti SAE)*

L'analisi delle criticità serve allo scopo di valorizzare il rischio operativo di ciascun modo di guasto. La valorizzazione è basata sull'assegnazione di

un cosiddetto indice di criticità (o indice di rischio). L'indice può essere calcolato con diverse modalità. In ambito SAE l'indice di criticità è denominato in inglese, Risk Priority Number ed è calcolato come il prodotto di tre fattori:

$$\text{RPN (Risk Priority Number)} = O \times S \times D$$

Dove:

- "O" è il fattore che misura l'occurrence, cioè la probabilità di accadimento stimata per il guasto;
- "S" è il fattore che misura la severity, cioè la severità (o gravità) degli effetti del guasto;
- "D" è il fattore che misura la detectability, cioè la facilità con cui il guasto può essere rilevato in anticipo mediante rilevazione del sintomo premonitore e/o la facilità con cui è rilevato a guasto avvenuto

Ciascun fattore è definito a partire da una propria scala a punteggio. La scala è costruita assegnando dei punteggi crescenti in corrispondenza del peggioramento delle condizioni di rischio associate: più alto è il punteggio peggiore è la occurrence (è più probabile che capiti il guasto), la severity (l'effetto di guasto è più grave / severo), la detectability (è meno facile rilevare in anticipo il guasto incipiente e/o il guasto avvenuto). Le scale sono definite con un approccio che si potrebbe chiamare semi quantitativo. Se possibile, la scala è costituita facendo corrispondere il punteggio al range di un indice quantitativo e rappresentativo del rischio crescente. Ad es., il MDT è un indice che può essere ben utilizzato per la misura quantitativa della severity di un effetto di guasto di mancata erogazione del servizio, il fattore severity assume quindi un punteggio più elevato per guasti caratterizzati da un range di MDT maggiori. Altrimenti, il punteggio è l'espressione sintetica di una descrizione qualitativa. È tipicamente il caso della detectability, definita, in genere, attraverso una valutazione generale (e quindi una descrizione), che può combinare elementi diversi: il riscontro dell'esistenza di un chiaro sintomo premonitore di guasto (ci si chiede se il sintomo esiste o non esiste), della base tecnica – strumentale per rilevarlo e della capacità organizzativa di organizzare campagne di rilievo. L'occurrence è definita attraverso un criterio quantitativo, partendo, cioè dal confronto tra l'indice MTBF e il tempo T richiesto dall'utente senza che accadano guasti. Più alto è il

MTBF rispetto al tempo T, minore è la probabilità di accadimento di guasto, minore è il punteggio assegnato all'occurrence. Minore è quindi, la sua incidenza sull'indice di rischio operativo RPN.

Osservazioni:

- È da ricordare che la valutazione dell'occurrence presuppone la disponibilità di uno storico dei guasti (da cui dedurre MTBF, numero di interventi a guasto o R(T)). In caso di mancanza di storico, la stima è comunque fatta da esperienza (su macchine analoghe con uno storico dei guasti disponibile) e/o a partire da altre fonti (manuale del costruttore).
- La severity è, invece, una scala che dipende in maniera rilevante dalla natura delle entità in studio: in particolare, dai loro effetti tipici di guasto (ad es. mancanza di sicurezza, qualità, ...) e delle modalità di gestione della manutenzione. La scala presentata da fonte SAE è certamente utilizzabile per la misura delle severity di macchine operatrici in industrie manifatturiere.
- La detectability è un fattore che dipende fortemente dall'esistenza di sintomi di guasto incipiente e/o sintomi di guasto avvenuto e dall'implementazione dei relativi metodi di rilevazione. In alcuni casi non è per niente migliorabile proprio perché non esiste alcun sintomo rilevabile.

### *Individuazione delle azioni correttive e pianificazione della manutenzione*

Una volta che, a valle dell'analisi di criticità, sono stati selezionati modi di guasto e componenti critici si passa alla fase propositiva dello studio FMECA. In questa fase, sono individuate le azioni correttive per correggere un difetto progettuale, prevenire o limitare una causa di guasto.

Le azioni correttive sono, in genere, di diversa natura e possono comprendere: modifiche di progetto, del processo, di una procedura, dei materiali usati. Così tra le azioni correttive che sono tipicamente sotto la responsabilità della manutenzione, sono da contemplare:

- I provvedimenti a carattere non periodico di manutenzione migliorativa (piccole modifiche di progetto di impianto);

- Le revisioni periodiche, sempre possibili, al piano di manutenzione corrente, con le relative modifiche a procedure ed interventi di manutenzione preventiva previsti a piano (può. Ad es., risultare dallo studio FMECA, la necessità di introdurre ispezioni non previste nel piano corrente, allo scopo di potenziare la manutenzione su condizione, o può essere richiesta la ritaratura delle frequenze di alcuni interventi in sostituzione preventiva ciclica);
- Le modifiche alle procedure di gestione dei ricambi di manutenzione (come, ad es. una modifica delle politiche di gestione delle scorte, in particolare, l'inserimento di materiali prima non tenuti a scorta; o la scelta di rifornirsi di materiali di maggior qualità, per sostituire materiali correttamente in uso ma risultati inadeguati per l'eccessiva frequenza dei guasti registrata)

Sono anche da considerare, tra le azioni correttive, i provvedimenti che comportano modifiche rilevanti al progetto o rimessa a nuovo dell'impianto in alcune sue parti ed eventuali ammodernamenti tecnologici e modifiche di processo. Un esempio di modifica di impianto può essere conseguente alla scarsa affidabilità di un sottosistema di un impianto e alla decisione di aumentare il livello di ridondanza (passando, ad es., da 2 a 3 pompe installate). La connotazione di questo tipo di azioni correttive spesso va al di là dei limiti di budget di manutenzione ordinaria, coinvolgendo la necessità di una valutazione economica (investimento) e tecnica (riprogettazione di impianto-processo) più ampia.

Anche per lo studio di queste modifiche di elevato rilievo, la metodologia FMECA torna comunque certamente utile.

Il piano di manutenzione è il risultato finale di uno studio FMECA per la manutenzione. Prendendo avvio dall'individuazione dei componenti e dei modi di guasto critici, esso può essere sviluppato attraverso la raccolta di tutte le proposte di interventi di manutenzione preventiva (quali ispezioni, sostituzioni preventive cicliche, pulizie, lubrificazioni, ...) utili ad abbattere la criticità. Durante la raccolta sono specificate le informazioni utili a caratterizzare le specifiche d'intervento. Sono elencate, di seguito, le informazioni più comunemente utilizzate:

- Codice operazione;
- Descrizione dell'intervento;
- Frequenza o periodo di intervento;

- Tipo di lavoro (a macchine ferma o in moto);
- Tempo dell'intervento (minuti, ore, ...);
- Tipo di personale richiesto (conduttore di macchina vs manutentore e sua specializzazione);
- Numero di persone impiegate;
- Materiali (di ricambio, consumo...)

L'insieme di informazioni raccolto definisce lo standard lavoro dell'intervento. È normale prassi riferire lo standard lavoro all'oggetto di manutenzione di terzo livello, cioè ad un sotto-assieme di macchina, come un motore, un motoriduttore, una pompa, ... Al sotto-assieme vengono assegnati tutti gli interventi di manutenzione ritenuti necessari ad eliminare o limitare le cause di guasto individuate al quarto livello della scomposizione, quello degli item componenti dove il guasto si origina.

### *Organizzazione di un'analisi FMECA*

Riassumendo per poter efficacemente sviluppare uno studio FMECA è opportuno seguire alcuni criteri di organizzazione del lavoro, che vengono descritti e commentati nel seguito.

- Il gruppo di lavoro FMECA deve avere carattere interdisciplinare, è infatti opportuno che esso sia formato dalla riunione di professionalità distinte con le competenze tecniche richieste dall'entità oggetto di studio. In uno studio FMECA dovrebbero, in particolare, essere coinvolte le seguenti figure professionali interne all'azienda: responsabile di manutenzione; addetti di manutenzione, con specializzazioni complementari in funzione delle specifiche tecnologiche dell'entità (manutenzione meccanica, elettrica, strumentale, ...); ingegneria di processo e impianto (per la proposta di eventuali azioni correttive che richiedono modifiche di processo/impianto).
- È proficuo anche il coinvolgimento di progettisti e costruttori dell'impianto. Spesso il problema è infatti già stato affrontato e risolto in impianti precedentemente installati presso altri clienti industriali. Il coinvolgimento diventa pregiudiziale necessaria quando, nei processi "a rischio", devono essere approvate e omologate modifiche e migliorie.
- È utile, infine, la presenza di un leader di gruppo, responsabile della conduzione dello studio in accordo all'iter metodologico

convenzionalmente seguito e dell'eventuale formazione iniziale alla metodologia dei partecipanti al gruppo. In aziende medio piccole, con numero ridotto di persone nell'organizzazione di manutenzione, questa figura è in genere coperta da consulenti esterni esperti.

La costituzione del gruppo di lavoro consente così l'attuazione di una FMECA anche in scarsità di dati registrati nello storico di un impianto, attraverso il metodo del brainstorming e il ricorso all'esperienza e alla memoria individuale. È d'altronde evidente che un sistema informativo di manutenzione può migliorare l'efficienza di analisi: perché, come sistema informativo di gestione della manutenzione, fornisce un registro storico di guasti da analizzare; perché, come sistema informativo di ingegneria della manutenzione, supporta la metodologia FMECA con strumenti "*computer aided*" utili a rendere più rapida la raccolta delle informazioni nella modulistica FMECA e la stesura di report di studio corrispondenti.

Per quanto riguarda infine la programmazione, il criterio generale è che l'attività FMECA non dovrebbe essere fatta una tantum; dovrebbero invece, essere organizzate, sistematicamente, delle riunioni tecniche orientate all'esame continuo di modi e cause di guasto, all'identificazione dei modi e delle cause di guasto più critiche e alle decisioni di pianificazione di azioni correttive di miglioramento. Le riunioni sarebbero ovviamente utili anche al controllo delle prestazioni raggiunte a seguito dell'implementazione delle azioni correttive medesime (individuate in precedenti riunioni), secondo la filosofia generale di approccio tipica del miglioramento continuo (Total Productive Maintenance – TPM).



## Metodi quantitativi per l'analisi affidabilistica

### Introduzione

L'ingegneria dell'affidabilità, così come l'ingegneria della manutenzione, si trova ad affrontare problemi quantitativi che possono essere risolti mediante l'adozione di opportuni modelli analitici. La teoria dell'affidabilità si basa infatti su modelli probabilistici per lo più riconducibili alla "distribuzione di Weibull" la cui forma analitica, seppur non banale, si presta alla risoluzione di problemi semplificati in forma chiusa. Nella maggior parte dei casi però ci si imbatte in problemi rappresentabili da modelli matematici difficilmente "gestibili" (ad esempio quando si prevedono guasti non rappresentabili da intertempi esponenziali negativi). Inoltre, le leggi che governano l'affidabilità di sistemi con componenti in serie o parallelo, possono essere notevolmente complicate dalla presenza di elementi "a ponte".

Quando si passa poi dalla valutazione dell'affidabilità di un sistema alla ricerca di politiche ottimali di manutenzione (molto spesso specifiche per ogni sottosistema dell'impianto produttivo e fra di loro interagenti a causa dei vincoli sulle risorse disponibili) oppure alla minimizzazione delle fermate, alla gestione delle parti di ricambio, ecc., il compito diventa più arduo. È chiaro che ci si trovi in presenza di situazioni con un elevato numero di vincoli e variabili decisionali che danno luogo a problemi essenzialmente di tipo combinatorio, molto spesso classificabili, dal punto di vista della complessità computazionale, come NP-completi (*Non deterministic Polynomial Complete*), ovvero risolvibili in tempi che crescono esponenzialmente con il numero delle variabili. In tali situazioni

l'ottimizzazione del problema diviene numericamente intrattabile e in genere è necessario ricorrere alla ricerca di soluzioni sub-ottimali, ottenute con metodologie euristiche. Per situazioni di questo tipo, la ricerca operativa e l'analisi numerica hanno messo a punto una serie di strumenti diversi il cui utilizzo si è recentemente abbastanza diffuso, seppure a "macchia di leopardo", favorito dalla disponibilità di risorse di calcolo a basso costo e dalla produzione di software e librerie, spesso di pubblico dominio. In questo capitolo verranno presentate, sotto forma di schede, le principali tecniche analitiche e numeriche sviluppate negli ultimi decenni, che hanno trovato una proficua applicazione in campo manutentivo.

### **Fault Tree Analysis (FTA)**

La "Fault Tree Analysis" o "analisi degli alberi di guasto" è una tecnica quantitativa per lo studio affidabilistico di sistemi complessi, basata sulla individuazione dei legami logici fra tutti gli eventi che possono portare ad un fallimento o ad un guasto complessivo del sistema. Tali legami vengono rappresentati sotto forma di "albero rovesciato" in cui la radice, posta in alto, è il cosiddetto "top event" o "evento finale", mentre le foglie sono i "base event" o "eventi di base" che, legandosi mediante relazioni logiche, danno luogo a "eventi intermedi" fino ad arrivare "all'evento finale". Nell'evoluzione della tecnica sono stati introdotti ulteriori simboli con significati specifici per il contesto affidabilistico e per semplificare la rappresentazione di alberi complessi (negli studi affidabilistici sulle centrali nucleari o impianti di processo, nei quali hanno trovato larga applicazione gli alberi di guasto, si può arrivare anche ad alcune centinaia di eventi di base per un singolo modo di guasto del sistema). La costruzione dell'albero avviene in modo deduttivo, a partire dal top event, sviluppando con un approccio top-down i legami fra eventi intermedi, fino ad arrivare ad eventi "atomici", non più utilmente scomponibili. Per questi è necessario conoscere la probabilità di accadimento, sulla base del profilo di missione dell'impianto, ponendo attenzione alle probabilità condizionate fra eventi di base, detti anche guasti in modo comune. Una volta costruito l'albero e stimate le probabilità degli eventi di base, si possono utilizzare le regole dell'algebra booleana, unitamente al calcolo della probabilità, per ottenere come risultato la probabilità di accadimento dell'evento finale, ovvero del verificarsi del modo di guasto modellato dall'albero. L'interesse del metodo risiede anche nella possibilità di condurre uno studio qualitativo, ricavando informazioni sulle configurazioni di guasto. È detto

“Cut Set”, un insieme di eventi di base che portano al verificarsi dell’evento finale. Simmetricamente è detto “Path Set” un insieme di eventi che, qualora non si verificano, garantiscono di non produrre l’evento finale (buon funzionamento del sistema). Più interessante dei “Cut Set” e dei “Path Set” sono i Minimal Cut Set (MCS), ovvero i “Cut Set” nei quali ogni evento di base è necessario per il verificarsi dell’evento finale (basta cioè eliminare da un set un evento di base e l’evento finale non si verifica), e i Minimal Path Set (MPS), ovvero i “Path Set” nei quali il buon funzionamento di ogni elemento è indispensabile al funzionamento complessivo. La probabilità del verificarsi di Minimal Cut Set, può essere calcolata semplicemente dal prodotto delle probabilità dei singoli eventi di base che lo compongono. Al crescere delle dimensioni dell’albero di guasto si ha un’esplosione esponenziale del numero di MCS e già con qualche decina di eventi di base se ne possono contare centinaia. Ciò nondimeno non si commettono errori significativi se si considerano solo gli MCS con il numero più basso di eventi di base, poiché la probabilità di accadimento al crescere di elementi del MCS, diminuisce rapidamente.

## **Event Tree Analysis (ETA)**

“L’ Event Tree Analysis” o “analisi dell’albero degli eventi” viene impiegata per modellizzare la sequenza di eventi che si può sviluppare a partire da un “evento iniziatore”, portando a conseguenze significativamente diverse. Trova larga applicazione nella valutazione dell’efficacia dei sistemi automatici di allarme e di sicurezza, oltre che per introdurre l’affidabilità dell’operatore nel modello probabilistico delle conseguenze di un guasto. A differenza degli alberi di guasto che prendono origine da una molteplicità di eventi che si combinano per produrre un evento finale, nel caso dell’ETA, a partire da un solo evento iniziatore si possono produrre molte diverse conseguenze. L’albero viene in genere rappresentato con la radice (evento iniziatore) a sinistra e con i rami che procedono orizzontalmente verso destra. In esso si hanno, in corrispondenza delle colonne, nodi probabilistici nei quali vi è un intervento di contenimento del guasto affidato ad un componente del sistema o ad un operatore (con una certa probabilità di successo). Le “foglie” dei “rami”, rappresentate all’estrema destra del diagramma rappresentano la conseguenza finale

dell'evoluzione del guasto e per esse può essere calcolata semplicemente la probabilità.

## **Metodo Monte Carlo**

Sotto il metodo Monte Carlo sono classificate varie tecniche di risoluzione di problemi basate sull'utilizzo di numeri casuali. Infatti, laddove un modello matematico presenti difficoltà per essere risolto in forma chiusa, oppure i legami funzionali fra variabili non siano esprimibili in forme analitiche semplici, ma solo mediante complesse relazioni logico matematiche, od ancora sia significativa la componente aleatoria del modello, il metodo Monte Carlo si presenta come un'utile alternativa. Sostanzialmente la logica di funzionamento del metodo è la seguente:

- Le prestazioni di un sistema che evolve nel tempo, sulla base di cambiamenti di stato prodotti da eventi puntuali, possono essere stimate riproducendo il suo funzionamento mediante un modello simulativo nel quale gli eventi vengono generati con l'estrazione di numeri casuali;
- Gli eventi danno luogo a cambiamenti di stato nel sistema, che a loro volta possono indurre nuovi eventi, la successione degli stati del sistema costituisce una "storia" che può essere studiata in termini di comportamento del sistema e delle sue parti.

In generale, l'applicazione del metodo Monte Carlo non può quindi essere separata dal suo inserimento all'interno di un modello logico-matematico di simulazione ad eventi (il modello di simulazione è lo strumento che permette l'applicazione del principio di generazione casuale degli eventi ispiratore del metodo Monte Carlo). Tuttavia la simulazione ad eventi è una tecnica che ha una sua autonoma individualità e verrà quindi trattata successivamente in modo separato. Nella pratica industriale, il metodo Monte Carlo è ormai in uso comune per risolvere alberi di guasto, sia per la stima delle probabilità di accadimento del top event che per l'analisi di sensitività sull'incertezza dei parametri. In pratica viene valutata la probabilità di accadimento di un guasto, sulla base degli eventi che lo producono. Piuttosto che cercare di risolvere le relazioni probabilistiche sottostanti l'albero stesso (spesso complicate, come detto, dalla presenza

di guasti di modo comune) viene generato uno stato del sistema di probabilità compatibile con le leggi che rappresentano il funzionamento dei suoi componenti ed i relativi guasti, utilizzando un generatore di numeri casuali (normalmente disponibile in ogni linguaggio di programmazione). Se, ad esempio in un dato orizzonte temporale, un guasto si verifica con probabilità pari a  $P$ , con  $0 < P < 1$ , estraendo un numero casuale uniformemente distribuito fra 0 e 1, ed assumendo come verificato il guasto qualora tale numero sia minore o uguale a  $P$ , possiamo dire che asintoticamente quell'evento avrà frequenza  $P$ , e che quindi la probabilità del suo verificarsi è proprio  $P$ . Ripetendo tali estrazioni per ogni evento dell'albero, tenendo conto delle eventuali probabilità condizionate e di ogni altra caratteristica (spesso difficilmente trattabile con un modello analitico), si ottiene una configurazione di sistema coerente con le leggi di probabilità che lo descrivono. È facile, a questo punto, semplicemente applicando le regole logiche booleane descritte dalla struttura dell'albero, ricavare lo stato finale del sistema, ovvero il verificarsi o meno del top event. La semplicità concettuale e la facilità di implementazione di questa metodologia, unita all'incrementata velocità di calcolo degli elaboratori, fa propendere per l'utilizzazione delle tecniche Monte Carlo anche in situazioni nelle quali, con poco sforzo ulteriore, sarebbe possibile ottenere una soluzione in forma chiusa. Non bisogna però dimenticare che uno "stimatore Monte Carlo", essendo basato sul campionamento di numeri casuali, è affetto da un errore di stima che è, in prima approssimazione, inversamente proporzionale alla radice quadrata del numero di configurazioni simulate e alla probabilità che si intende valutare. Il metodo Monte Carlo può anche essere utilizzato in abbinamento a modelli analitici per valutarne la sensitività della soluzione, ma, tenendo conto dello sforzo in generale non banale che è necessario profondere per lo sviluppo del modello logico-matematico, possiamo definire questo metodo come un second best approach, da utilizzarsi solo laddove non esistano metodologie analitiche più "eleganti" ma soprattutto più efficienti per affrontare il problema.

## **Total Productive Maintenance (TPM)**

### **Introduzione**

Il TPM è uno dei fondamenti delle tecniche produttive giapponesi, di cui è utile richiamare la genesi. L'origine delle tecniche produttive giapponesi, che vengono alternativamente citate sotto i nomi di Just in Time, Total Productive Maintenance, Zero Inventory, Total Quality Management ecc, risale agli anni '60 quando nella fabbrica di automobili Toyota la ricerca di metodi efficaci per il miglioramento della produttività globale portò i tecnici giapponesi ad una serrata critica ai metodi gestionali di derivazione statunitense e, successivamente, al loro superamento secondo principi profondamente diversi. Inizialmente l'ambito di studio e applicazione di questi metodi fu orientato al miglioramento della produzione dal punto di vista della disponibilità e regolarità di funzionamento degli impianti (che diede origine al TPM), da cui si passò poi all'analisi dei metodi per il miglioramento della qualità (che diede origine al TQM) e poi al miglioramento dei flussi logistici (da cui nasce il Just in Time). Negli anni '90 la rivisitazione di questi approcci portò poi alla visione integrata del Lean Manufacturing in cui tutte le precedenti metodologie si inquadravano nella visione globale di un approccio migliorativo alla produzione. Infine, l'integrazione dei medesimi concetti di base anche alle attività di progettazione e ingegnerizzazione dei prodotti, abbracciando così l'intero percorso dei processi di produzione. Caratteristica dell'approccio che per convenzione nel seguito definiremo "Lean Flow", è di guardare all'uso di questo insieme di tecniche da un punto di vista "filosofico", oltre che applicativo. Alla base di tutto, costituendo di fatto la vera innovatività del metodo, vi è la concezione (tipicamente orientale) che qualunque ostacolo materiale possa essere superato attraverso un approccio incrementale a piccoli passi (principio di miglioramento continuo). Vi è quindi alla base del Lean Flow la sostituzione dell'approccio occidentale (e più tipicamente nordamericano) dell'affrontare i problemi "di petto", in modo emergenziale o definitivamente risolutivo, con un approccio più morbido e graduale,

basato sull'impegno permanente. Il fatto che le tecniche utilizzate siano in sé molto semplici non significa che l'applicazione del Lean Flow sia banale, al contrario il Lean Flow rappresenta una realtà complessa che richiede una profonda e convinta comprensione del modello gestionale che gli sta dietro e l'applicazione secondo una successione di passi gradualmente, pena l'insuccesso. Possiamo dire che il Lean Flow può essere alternativamente inquadrato come una nuova filosofia globale di gestione, come una collezione di tecniche o come uno strumento operativo da impiegare per trasformare una realtà industriale.

### *Il Lean Flow come filosofia globale di gestione*

I principi generali della "filosofia" Lean Flow si possono riassumere nei seguenti:

- Orientamento dei processi al cliente: il cliente di un qualsivoglia processo (produttivo, di servizio, ...) è la vera ragione di esistenza del processo medesimo; da ciò consegue che l'obiettivo di un processo è la soddisfazione del cliente, le cui ragioni devono essere viste come prioritarie (ciò vale sia nel caso il cliente sia interno, che esterno all'azienda),
- Enfasi sul miglioramento continuo: si postula che non vi sia un limite al miglioramento; da questa visione consegue che è necessario mantenere un atteggiamento di costante tensione al miglioramento e non pensare mai che i risultati raggiunti possano costituire un limite invalicabile,
- Coinvolgimento delle persone: per operare è indispensabile il coinvolgimento delle persone a tutti i livelli; da questa visione consegue la necessità di pensare l'organizzazione in modo da ottenere il coinvolgimento delle persone non sulla base dell'autorità, ma del convincimento e della condivisione degli obiettivi,
- Gestione per processi: l'organizzazione aziendale deve essere impostata per processi, cioè per catene di attività che arrivino ad un risultato compiuto e non per funzioni che obbediscano ad un criterio di semplice appartenenza funzionale.

Questi principi costituiscono la "visione" all'interno del Lean Flow non hanno di per sé stessi degli immediati risvolti applicativi, rappresentano però il "clima naturale" entro cui è necessario utilizzare tutti gli strumenti

di miglioramento che fanno parte del set delle tecniche produttive giapponesi.

Il Lean Flow punta all'analisi e al miglioramento delle attività in modo globale, basandosi su due capisaldi:

- ❖ Una serie di principi pratici sul fronte del progetto del prodotto e sul fronte del processo produttivo,
- ❖ Una serie di strumenti applicativi da utilizzare per mettere in pratica i principi di cui sopra.

### *Principi pratici del Lean Flow*

Per quanto riguarda gli aspetti progettuali del prodotto, l'approccio Lean Flow guarda alla ricerca della semplicità e della standardizzazione per assicurare la soluzione più efficace rispetto alle funzioni che un prodotto, una macchina, un impianto devono fornire. Tali principi si declinano nelle seguenti pratiche:

- Ricerca della ripetitività e della semplificazione dei flussi produttivi già dalla fase di progettazione del prodotto attraverso la standardizzazione dei componenti e dei materiali,
- Ricorso a criteri di modularizzazione nella progettazione del prodotto (impiego multiplo di moduli standard),
- Impiego (ove possibile) di distinte a clessidra o a fungo per i prodotti destinati a produzioni ripetitive,
- Attenzione a tutti i tipi di costo (non solo ai costi diretti, ma anche ai costi industriali impliciti o indotti, come quelli dovuti a difettosità, mancata produzione, costi delle attrezzature necessarie, ...)

Per quanto riguarda invece il fronte del processo l'approccio Lean Flow propugna oltre alla ricerca della semplicità, la ricerca della flessibilità perseguendo i seguenti obiettivi:

- Riduzione dei tempi di cambio (bassi costi di set-up consentono l'ottenimento di lotti piccoli a basso costo, che consentono di ridurre il work in progress ed il lead time),
- Linearità dei flussi, continuità e regolarità di processo (ottenibili con l'adozione della group technology, il frazionamento della capacità, la realizzazione di linee dedicate e/o di linee corte, la conformazione ad "U" delle linee, l'analisi della process capability, ...)



- Riduzione della crescente complessità dei processi produttivi, derivante la proliferazione dei codici di prodotto e di semilavorato, che rendono le fabbriche di difficile gestione malgrado i grossi investimenti in sistemi informativi,
- Attenzione alla riduzione del Lead Time che è direttamente proporzionale ai costi industriali (sulla base del Toyota Principle), infatti lungo il Lead Time il prodotto accumula costi operativi che non aggiungono valore, inoltre il Lead Time è il nemico del servizio al cliente, perché ad un lungo Lead Time si associano lunghi tempi di risposta al cliente e quindi un basso livello di servizio.

### *Strumenti del Lean Flow*

Il principale strumento per la raccolta delle informazioni sulla generazione di valore lungo un processo è il Value Stream Mapping o mappatura del valore. Questa tecnica di mappatura riproduce i flussi fisici e informativi all'interno di un processo, oltre alle rispettive interrelazioni offrendo un'immagine efficace e sintetica di tali flussi (Actual State). La mappatura contiene la linea del tempo, che registra sia il tempo a valore aggiunto, sia il tempo totale di attraversamento il cui rapporto è un indicatore del potenziale miglioramento. La mappatura permette inoltre di vedere dove è possibile ed auspicabile fare miglioramenti (Future State).

### *Ordine e pulizia*

Il posto di lavoro, le macchine, le attrezzature, i materiali, i componenti e la documentazione devono essere mantenuti in ordine e in stato di pulizia. Ciò non solo consente di recuperare con facilità ciò che serve, ma anche di evitare incidenti (miglioramento della sicurezza), di diagnosticare eventuali anomalie incipienti delle macchine (es. trafile di olio) e, per quanto riguarda i materiali di ricambio di contenerne lo stoccaggio, alienando quelli non più necessari.

### *Metodo delle 5S*

Il metodo delle 5S è utilizzato per ottenere e mantenere ordine e pulizia sul posto di lavoro. Esso prende il nome da cinque parole giapponesi che iniziano con la lettera "S" ed è semplicemente un percorso facile da

comprendere e da adottare per conseguire ordine e pulizia attraverso un approccio “step by step”. Ciò facilita la comprensione e la standardizzazione di un concetto altrimenti vago, come “ordine” o “pulizia”, spostando il focus da un concetto astratto ad un percorso operativo chiaro che un gruppo di lavoro deve adottare in un determinato periodo di tempo.

SEIRI	→	Seleziona ( <i>Elimina il non necessario/non richiesto</i> )
SEITON	→	Metti in ordine ( <i>Un posto per ogni cosa necessaria</i> )
SEISO	→	Pulisci ( <i>Pulizia del posto di lavoro e delle macchine</i> )
SEIKETSU	→	Standardizza ( <i>Crea e migliora procedure standard</i> )
SHITSUKE	→	Diffondere ( <i>Utilizza questo modo di pensare per tutte le attività aziendali</i> )

Tab. 1 - I passi del metodo delle 5S

Il quinto passo (shitsuke) può anche essere inteso come allargamento delle 5S da esperimenti pilota ad altre attività che possono goderne.

Questa metodologia investe quindi un atteggiamento aziendale di miglioramento continuo, in modo che ogni giorno sia un giorno per il miglioramento e per scoprire altri “Muda”(termine giapponese che identifica attività inutili, che non aggiungono valore o improduttive) ed eliminarli: infatti se i primi tre passi possono essere svolti con poco sforzo, il cuore del miglioramento e del sistema è negli ultimi due che rendono l'attività costante e strutturale.

### *Basi del TPM (Concetto di perdita)*

Uno dei principi informatori fondamentali del Lean Flow è il concetto di perdita (“loss”). Secondo la logica del Lean Flow per perdita si intende qualunque attività che non produce un valore (un output) percepibile dal cliente. Un’ analisi di questa definizione permette di capire come essa sia molto radicale e ricca di contenuti. In base ad essa infatti non solo la produzione di un componente di scarto costituisce una perdita di un processo produttivo, ma allo stesso modo sono una perdita anche tutte

le attività di movimentazione che avvengono all'interno del processo. Infatti se alcune attività di movimentazione possono certamente essere necessarie per lo svolgimento di un ciclo tecnologico di produzione, tuttavia esse non apportano di per sé "valore" al cliente finale. Ciò significa che una revisione del ciclo produttivo che riduca la necessità di movimentazione è un'attività di riduzione delle perdite che, senza togliere valore al cliente, migliora il rendimento aziendale. Il medesimo principio può essere utilizzato in campo manutentivo nell'analisi dei metodi di lavoro dei manutentori, nel campo dei servizi per analizzare un'attività al fine di eliminare delle fasi inutili, ecc...

I risultati di diverse indagini sui processi produttivi hanno permesso di evidenziare l'importanza di questa visione, visto che il valore delle perdite, così come sono state definite, ha valori sorprendentemente elevati e superiori al 50% del valore aggiunto dal processo (con valori fino al 70% e generalmente superiori nelle industrie manifatturiere, rispetto a quelle di processo).

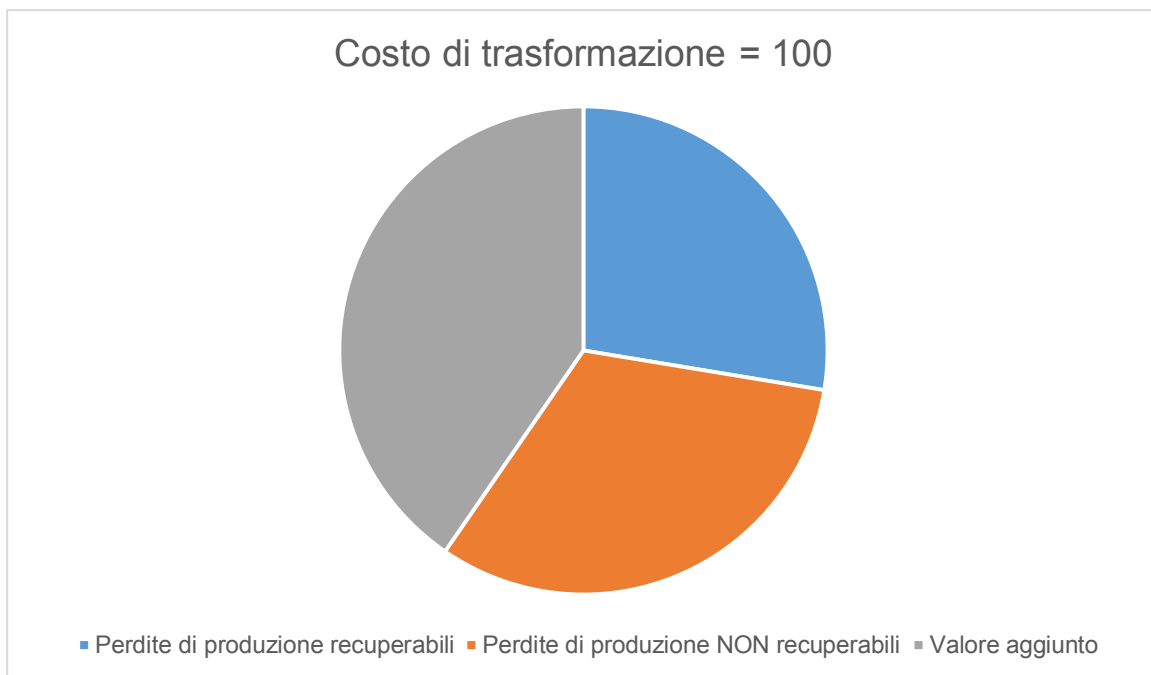


Fig. 6 – Valori delle perdite su costi di trasformazione (Efeso Consulting, Factory Models 2002)

Naturalmente non tutte le perdite possono essere eliminate (vi sono cioè, attività quali ad esempio le prevenzioni di sicurezza per gli operatori in un processo, le movimentazioni tra fasi di processo, che pur non dando valore aggiunto al cliente non possono essere eliminate). Possiamo quindi suddividere le perdite in due categorie, quelle che potenzialmente

possono essere eliminate (costo attaccabile, che può quindi divenire oggetto di programmi di miglioramento) e quelle non eliminabili (costo inattaccabile).

### *Overall Equipment Effectiveness (OEE)*

Un parametro fondamentale per l'analisi e il monitoraggio delle perdite, in vista della loro progressiva riduzione con adeguati programmi di miglioramento, è costituito dall'indice OEE, che può essere calcolato dalla seguente espressione:

$$OEE = \frac{\text{produzione buona effettiva}}{\text{produzione teoricamente realizzabile}}$$

o, in alternativa con l'espressione:

$$OEE = \frac{\text{tempo minimo teorico per produrre un dato output}}{\text{tempo programmato effettivo}}$$

L'indice OEE misura l'efficacia produttiva di una risorsa nel tempo programmato in cui è impiegata (è quindi esclusa dalla misura la valutazione di utilizzo teorico della risorsa nell'eventuale tempo non programmato). Per il calcolo dell'OEE si fa riferimento ad un sottoinsieme delle categorie di perdite. Precisamente si considerano sei grandi tipi di perdite, raggruppate in tre tipologie:

1. Perdite di disponibilità, che comprendono:
  - Perdite per set-up e messa a punto,
  - Perdite per guasti,
2. Perdite di prestazione, che comprendono:
  - Perdite per piccole fermate,
  - Perdite per velocità,
3. Perdite di qualità, che comprendono:
  - Perdite all'avvio,
  - Perdite durante il processo.

## *Obiettivi del TPM*

Gli obiettivi dell'approccio TPM si possono sintetizzare nei seguenti punti:

- ❖ Raggiungimento dell'impiego più efficace ed efficiente degli impianti,
- ❖ Impostazione di un sistema di eliminazione delle perdite,
- ❖ Collaborazione di persone di diversi settori aziendali per la riduzione delle perdite,
- ❖ Raggiungimento delle "perdite zero" attraverso la motivazione individuale, la collaborazione ed il lavoro in piccoli gruppi,
- ❖ Impostazione, realizzazione e mantenimento di un sistema di prevenzione dalle perdite.

Il TPM rappresenta uno degli elementi fondamentali per l'applicabilità delle tecniche produttive giapponesi, si può infatti dire che la gestione degli asset di un'azienda secondo i principi del TPM (elevata disponibilità delle macchine, regolarità e garanzia di funzionamento, facile manutenibilità, ecc.) fa da supporto al funzionamento dei sistemi JIT (Just in Time) e TQM (Total Quality Management) che, in un'azienda, presidiano la realizzazione efficace ed efficiente della funzione produzione.

Per la sua pratica applicazione nella realtà aziendale, il TPM può essere articolato in più programmi di miglioramento ognuno dei quali abbraccia una diversa area di tematiche gestionali, per esempio secondo il programma dei Sei Pilastri un progetto TPM comprende le seguenti fasi:

- 1) Il pilastro del miglioramento focalizzato, si occupa delle perdite macchina e uomo legate ai temi tipici dell'ingegneria industriale,
- 2) Il pilastro della qualità, si occupa delle perdite relative alla bassa capacità dei processi (difetti e scarti),
- 3) Il pilastro della manutenzione pianificata, si occupa delle perdite relative all'inaffidabilità degli impianti (guasti o piccole fermate),

- 4) Il pilastro della manutenzione (o gestione) autonoma, si occupa delle perdite relative alla incapacità di gestione dei processi produttivi da parte dell'operatore (ad es, guasti, difetti, piccole fermate derivanti da scarsa pulizia, lubrificazione carente, disordine e incompetenza operativa),
- 5) Il pilastro della sicurezza e dell'ambiente, si occupa della riduzione e prevenzione degli incidenti operativi ed ambientali,
- 6) Il pilastro della formazione, si occupa delle perdite relative alla mancanza di competenza operativa a tutti i livelli.

## **Sistemi software per l'ingegneria di manutenzione**

I sistemi software per l'ingegneria di manutenzione sono ambienti di modellazione, analisi e simulazione che supportano l'Ingegneria di Manutenzione nella progettazione/riprogettazione della gestione della manutenzione, con l'obiettivo di migliorare le prestazioni della manutenzione stessa e del sistema mantenuto. Spesso nella pratica applicativa tali sistemi software vengono brevemente identificati con l'acronimo MES (Maintenance Engineering System). Questi sistemi software mettono infatti a disposizione diversi tipi di analisi e di supporti alle scelte di ingegneria di manutenzione, quali ad esempio, la scelta della miglior politica di manutenzione e di gestione dei materiali di ricambio, la definizione dell'assetto organizzativo del personale di manutenzione, le valutazioni di opportunità di modifica dell'aspetto fisico del sistema sottoposto a manutenzione, ecc. Dal punto di vista dei contenuti possiamo dire che i sistemi software per l'ingegneria di manutenzione costituiscono il supporto operativo delle diverse metodologie di analisi ingegneristica dell'affidabilità e della manutenzione generale. È grazie all'impiego di queste tecniche che la funzione Ingegneria di Manutenzione è in grado di adottare o proporre (quando la delega è in carico ad altre funzioni dell'organizzazione aziendale) le scelte di esercizio o di investimento finalizzate al miglioramento della manutenzione. I sistemi software per l'Ingegneria di Manutenzione devono naturalmente essere integrati con i sistemi software dedicati alla gestione delle operation sia aziendali in generale, che più specificamente di manutenzione (cioè con il SIM). Infatti i software di gestione delle operation costituiscono il complemento

indispensabile ai MES sia in ingresso (principalmente allo scopo di ricevere le informazioni sulle entità mantenute, sugli interventi di manutenzione, sui consumi di materiali, ecc.), che in uscita (per ricevere dati sulle politiche di manutenzione da adottare, per aggiornare i criteri di gestione dei materiali, ecc.).