

Università degli Studi di Napoli Federico II



Facoltà di Ingegneria

Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali e della Produzione Industriale (DICMAPI)

XXV Ciclo di Dottorato in Tecnologie e Sistemi di Produzione

**IMPLEMENTAZIONE DI UN SISTEMA DI MANUTENZIONE
PREVENTIVA PER LA DETERMINAZIONE DELL'INDICE
MTTR OTTIMO PER UNA LINEA DI PRODUZIONE CRITICA:
CASO STUDIO PRESSO LO STABILIMENTO PRYSMIAN DI
ARCO FELICE**

Tutor

Prof. Ing. L. C. Santillo

Coordinatore

Prof. Ing. Luigi Carrino

Dottorando

Piervincenzo Costagliola

Anno 2013 - 2014

Indice

1) INTRODUZIONE	4
2) Capitolo 1: LA MANUTENZIONE	8
1.1 Definizione di Manutenzione	8
1.2 Principi di teoria della manutenzione	9
1.3 Evoluzione della manutenzione.....	11
1.4 I costi di manutenzione	13
1.5 Le Politiche di Manutenzione.....	17
1.5.1 Manutenzione correttiva (a guasto)	19
1.5.2. Manutenzione Preventiva	21
1.5.3 Manutenzione ciclica o programmata.....	22
1.5.4 Manutenzione su condizione e predittiva	27
1.5.6. Manutenzione Migliorativa	34
1.5.7. Manutenzione su opportunità.....	35
1.6 Strategia di scelta della politica di manutenzione più opportuna.....	36
1.7 Ingegneria di Manutenzione	42
3) Capitolo 2: TOTAL PRODUCTIVE MAINTENANCE	46
INTRODUZIONE	46
2.1 Il TPM nell'ottica della Lean Production.....	48
2.2 Gli strumenti della Lean Production	51
2.3 Origine ed affermazione del Total Productive Maintenance	52
2.4 I campi d'azione del TPM.....	57
2.5 Il tempio del TPM	59
2.6 Gli 8 pilastri del TPM	60
2.6.1 I Pilastro – Leadership.....	60
2.6.2 II Pilastro – Organizzazione	61
2.6.3 III Pilastro – Manutenzione Autonoma (Autonomous Maintenance)	62
2.6.4 IV Pilastro – Miglioramento Focalizzato (Focused Improvement)	65
2.6.5 V Pilastro – Manutenzione Progressiva	72
2.6.6 VI Pilastro – Addestramento	74
2.6.7 VII Pilastro – Qualità	76
2.6.8 VIII Pilastro – Amministrazione.....	76
2.7 L'analisi delle perdite: l'OEE e le Six Big Losses	77

2.8 Fasi per una corretta implementazione del TPM	84
4) Capitolo 3: TEORIA DELL’AFFIDABILITÀ	86
3.1 - Definizioni e parametri affidabilistici	86
3.2. Definizioni	89
3.2.1. Il Guasto	89
3.2.2 L’Affidabilità	89
3.3 Grandezze affidabilistiche	91
3.4 Descrizione della vita dei componenti	96
3.5 Modelli di Affidabilità	99
3.5.1. Modello Esponenziale	100
3.5.2 Modello di Weibull	102
3.6 Parametri di affidabilità	108
3.7 Affidabilità di un sistema	110
3.7.1. Sistema in serie	111
3.7.2 Sistemi in parallelo o ridondanti	114
3.8 Disponibilità e Manutenibilità	117
5) Capitolo 4: MODELLI DI OTTIMIZZAZIONE DELLE POLITICHE DI MANUTENZIONE	120
INTRODUZIONE	120
4.1 Modelli di ottimizzazione delle politiche preventive di sostituzione	121
4.1.1. Modelli di sostituzione totale	122
4.1.2. Modelli di sostituzione parziale	129
4.2 Modello di ottimizzazione delle politiche manutentive sotto revisione di fine lotto.	142
6) Capitolo 5: LO STATO DELL’ARTE	148
5.1. Maintenance Literature Review	148
5.2. Principali modelli e metodi di ottimizzazione	162
5.2.1. Introduzione	162
5.2.2. Ottimizzazione applicata a sistemi semplici	162
5.2.3. Ottimizzazione applicata a sistemi complessi	163
5.2.4. L’uso di algoritmi genetici	165
5.2.5. Il ricorso a metodi di simulazione	167
5.2.6. L’uso combinato di algoritmi genetici e simulazione Monte Carlo	169
5.2.7. Manutenzione e Sicurezza	170
7) Capitolo 6: APPLICAZIONE DEL MODELLO	174
INTRODUZIONE	174

6.1 Il Gruppo Prysmian	175
6.1.1 Clienti e progetti	183
6.1.2 Ricerca & Sviluppo	185
6.1.3 La nave posacavi Giulio Verne: una nave unica al mondo	185
6.2 Lo stabilimento di Arco Felice (Pozzuoli)	187
6.2.1 Cavi con isolamento stratificato	188
6.2.2 Cavi ad isolamento estruso (o ad isolamento solido)	191
6.3 Reparti produttivi	194
6.4 Flusso produttivo cavo in carta o con isolamento stratificato	196
6.5 Flusso produttivo cavi estrusi o ad isolamento estruso	200
6.6. Test Elettrico e collaudo del cavo	205
6.7 Gestione delle attività di manutenzione	207
6.8 La fasciatrice per cavi energia in carta	210
6.8.1 Descrizione della macchina fasciatrice	210
6.8.2. Manutenzione della macchina fasciatrice	212
6.9 Raccolta e Analisi dati	218
6.10 Definizione Problema	225
6.11 Implementazione del Modello di ottimizzazione delle politiche manutentive sotto revisione di fine lotto	229
6.12. Analisi dei risultati	239
8) BIBLIOGRAFIA	240

Allegato : "Lean Maintenance Model to Reduce Scraps and WIP in Manufacturing System: Case Study in Power Cables Factory", [WSEAS Transactions on Systems, Issue 12, Volume 12, December 2013](#)

INTRODUZIONE

L'evoluzione della tecnica, la ricerca di una maggiore efficienza tecnico-economica delle aziende, lo sviluppo dei processi tecnologici hanno portato alla costruzione di apparecchiature e macchine sempre più complesse e delicate e mutando l'approccio alle metodologie risolutive di alcuni problemi. Tra questi, uno dei più sentiti in questo periodo storico è forse l'esigenza di mantenere inalterate l'efficienza degli impianti e delle macchine che li compongono, cioè della "manutenzione", ovvero quella funzione aziendale preposta al ruolo di assicurare la continuità di buon funzionamento delle strutture produttive.

La manutenzione moderna, concepita come servizio aziendale, si basa su alcune proprietà che la contraddistinguono rispetto ai modi di esecuzione caratteristici del passato periodo storico-industriale:

- Il lavoro di manutenzione, in passato prevalentemente legato al singolo evento, si trasforma in lavoro programmabile.
- La funzione manutenzione, spesso slegata e spesso considerata semplicemente complementare alle attività produttive, si trasforma in un'unità responsabile caratterizzata da razionalità e competenza nonché da un forte senso di integrazione nelle attività dell'impresa.
- La manutenzione è oggi chiamata a programmare, coordinare e controllare le sue attività in modo che il lavoro svolto da tutta l'impresa sia tecnicamente più completo e economicamente più vantaggioso.

- La formazione del personale assume un ruolo importante nel creare una mentalità adatta ad accettare le nuove procedure organizzative e a renderle operativamente efficaci.
- La moderna manutenzione è anche chiamata a migliorare e conservare i dispositivi che garantiscono la sicurezza e la salute del lavoratore; si rende pertanto necessaria un'opera di responsabilizzazione rivolta ad incrementare l'efficienza del servizio e la contemporanea tutela del personale.

Nel 1963 la OCSE (Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico) definì la manutenzione “funzione aziendale alla quale sono demandati il controllo costante degli impianti e l'insieme dei lavori di riparazione e revisione necessari ad assicurare il funzionamento regolare e il buono stato di conservazione degli impianti produttivi, dei servizi e delle attrezzature di stabilimento”.

Nel 1991, dopo quasi trent'anni, nella norma UNI 9910 (Terminologia sulla fidatezza e sulla qualità del servizio) la Manutenzione è stata definita “la combinazione di tutte le azioni tecniche ed amministrative, incluse le azioni di supervisione, volte a mantenere o a riportare un'entità in uno stato in cui possa svolgere la funzione richiesta ”.

Dal confronto fra queste due definizioni si nota il processo evolutivo che ha portato la manutenzione da compiti semplicemente correttivi a compiti prevalenti di prevenzione dei guasti e dei malfunzionamenti, di adeguamento a livelli prestazionali crescenti, di contributo al miglioramento delle prestazioni complessive dei sistemi produttivi.

In relazione a questa evoluzione la manutenzione si è data scopi, forme organizzative e modalità più evolute, tali da rendere conseguibili obiettivi non limitati agli aspetti di efficienza tecnica, ma concernenti anche aspetti di efficienza gestionale e organizzativa.

In generale gli obiettivi e gli incarichi che un moderno servizio di manutenzione aziendale è chiamato a raggiungere e a svolgere possono essere così definiti:

- minimizzare le fermate per guasti assicurando la continuità produttiva degli impianti;
- gestire le risorse aziendali allo scopo di minimizzare i costi derivanti dalla possibile rottura e/o dalla riparazione delle risorse tecniche destinate alla produzione;
- operare con continuità allo scopo di mantenere strutture e macchine in grado di funzionare nelle condizioni stabilite e limitare il decadimento delle prestazioni delle stesse;
- contribuire ad aumentare l'efficienza del sistema produttivo;
- formare ed educare gli addetti di produzione ad alcuni aspetti di correttezza e sicurezza nell'utilizzo dei macchinari e responsabilizzarli nei confronti della gestione iniziale delle anomalie e dei guasti agli impianti.

Le attività necessarie per raggiungere tali obiettivi sono di natura esecutiva, tecnica, organizzativa, gestionale e consultiva. Vengono elencati di seguito:

- Attività in ambito *esecutivo*: lubrificazione, pulizia, ispezioni e controlli; riparazioni, sostituzioni e revisioni; assistenza a terzi.
- Attività in ambito *tecnico*: preparazione dei piani di manutenzione preventiva e delle ispezioni, preparazione dei lavori; analisi dei guasti, raccolta e analisi dei dati sulle prestazioni; calcolo degli indicatori di prestazione; ricerca di nuovi metodi, tecniche, mezzi ed attrezzature; addestramento tecnico per operai e tecnici; proposte di modifiche e migliorie; adeguamenti impiantistici alle norme di sicurezza.
- Attività in ambito *organizzativo/gestionale*: elaborazioni di rapporti periodici su andamenti e consumi; individuazione di ricambi e

materiali, quantità a magazzino e livelli di riordino; programmazione e reperimento delle risorse necessarie ad eseguire i lavori; elaborazione di piani tecnico-economici.

- Attività in ambito *consultivo*: contributo nell'installazione ed avviamento di nuovi impianti e nella progettazione di modifiche e di rifacimenti; addestramento dei conduttori dell'impianto.

Capitolo 1: LA MANUTENZIONE

1.1 Definizione di Manutenzione

La normativa definisce oggi la **Manutenzione** come la “*Combinazione di tutte le azioni tecniche e amministrative e gestionali, incluse le azioni di supervisione, volte a mantenere o a riportare un’entità (macchina, componente, dispositivo, unità funzionale, apparecchiatura o sistema) in uno stato in cui possa eseguire una funzione richiesta*”.

La manutenzione ha quindi, il compito di effettuare, in maniera costante, verifiche e controlli sulle entità al fine di assicurare il loro regolare funzionamento ed il buono stato di conservazione nel tempo. Questo perché una qualsiasi entità ha un ciclo vitale caratterizzato da un’alternanza di periodi in cui può compiere correttamente la sua missione e periodi in cui la produttività è parzialmente o completamente compromessa da un guasto e da una successiva riparazione, cioè percorre diversi *cicli di funzionamento – guasto – riparazione* come riportato in fig. 1.2, (dove T_i sono i tempi di funzionamento e τ_i sono tempi di fermo per guasto e riparazione):

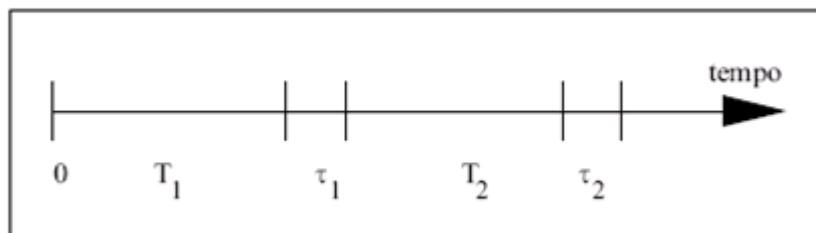


Fig. 1.2: Generico ciclo di vita di un'entità industriale

In particolare la *manutenzione* è la funzione aziendale che ha la supervisione di tutti gli impianti di produzione di beni e di servizi e deve progettare, organizzare e realizzare gli interventi con lo scopo di garantire la potenzialità nominale ed il buon stato di conservazione delle attrezzature nei periodi di funzionamento, ovvero di minimizzare gli intervalli di fermo necessari per ripristinare queste caratteristiche ed inoltre essa si deve occupare di mettere in campo tutte quelle procedure gestionali di supporto alle attività eseguite direttamente sugli impianti, come ad esempio la gestione dei ricambi, la gestione delle conoscenze degli operatori ed altre ancora.

Quindi la manutenzione può essere vista come l'insieme delle attività atte alla conservazione delle caratteristiche di efficienza e di disponibilità di una entità. In pratica il suo compito è di "cooperare lungo tutto il ciclo di vita di un'entità", con l'obiettivo del miglioramento continuo della disponibilità operativa dell'entità e del contenimento dei costi globali di manutenzione.

1.2 Principi di teoria della manutenzione

Una generica macchina viene progettata e costruita per svolgere una missione nota a priori e di cui si conoscono le caratteristiche in termini di tempi, di prestazioni e di costi. Il suo funzionamento, basato sulla continua interazione tra i sottosistemi che la compongono, non è tuttavia continuo nel tempo a causa delle inevitabili anomalie che insorgono nel corso della sua vita utile e che possono essere determinate da svariati fattori umani e ambientali. In questo contesto di possibile interruzione della sua funzionalità si inseriscono i concetti di affidabilità e disponibilità.

L'affidabilità può essere definita come la probabilità che un elemento (macchina, sottosistema o componente) funzioni senza guastarsi per un

determinato tempo t dal suo avviamento e in predeterminate condizioni ambientali.

La disponibilità può invece essere definita come la percentuale di tempo di buon funzionamento rispetto al tempo totale in cui è richiesto il funzionamento stesso dell'elemento.

Affidabilità e disponibilità rappresentano due grandezze attraverso le quali è possibile misurare la continuità con cui un impianto può garantire il raggiungimento della missione per la quale è stato ideato e costruito.

In ambito economico, l'implementazione a livello industriale di azioni di miglioramento affidabilistiche applicate a risorse produttive comporta inevitabilmente dei costi che devono essere equilibrati in funzione dello scopo finale. Nella figura 1.1 si può osservare che la funzione del costo totale sostenuto è data dalla somma dei costi sostenuti per le azioni di incremento dell'affidabilità o della disponibilità delle macchine e dei costi di mancata produzione dovuti all'inaffidabilità o indisponibilità delle stesse.

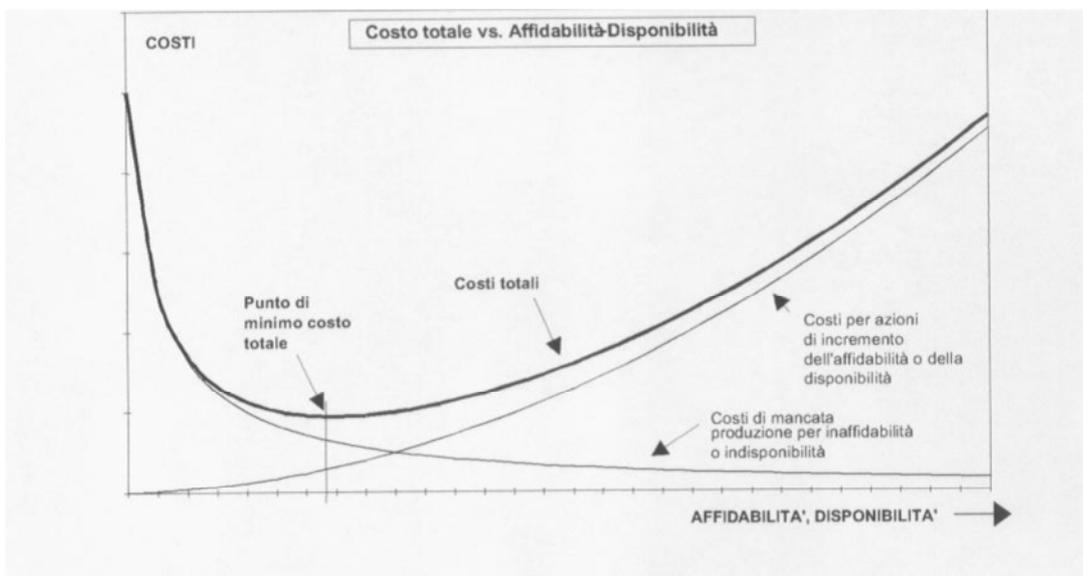


Figura 1.1

Se in ambito sicurezza l'affidabilità assume un ruolo della massima importanza, a livello produttivo il suo posto viene spesso preso dalla

disponibilità attraverso la quale il gestore d'impianto riesce a monitorare la reale efficienza operativa delle macchine nel corso della loro vita utile.

Poiché, come già affermato, le macchine si guastano, l'affidabilità e la disponibilità vengono garantite, dove possibile, attraverso adeguate politiche manutentive che, se da una lato contribuiscono a un funzionamento globale regolare e continuativo, dall'altro rappresentano un onere economico spesso non indifferente, intervenendo in sede di gestione dell'impianto, oppure nella progettazione o riprogettazione di parti o insiemi di macchine o nell'installazione di unità di riserva (sistemi ridondanti).

1.3 Evoluzione della manutenzione

L'attività manutentiva ha radici antichissime, infatti analizzando la storia si può notare che i problemi relativi alla manutenzione in campo produttivo erano già presenti nelle vecchie botteghe artigiane. In questo modo, l'artigiano si trovava ad essere l'unico autore del prodotto, garantendone e controllandone qualità e conservazione, mantenendo inoltre tutto il know-how relativo. Quell'artigiano compiva anche implicitamente il controllo di qualità e con esso le azioni di manutenzione che riteneva necessarie per la sua garanzia. La manutenzione era semplicemente un insieme di azioni di carattere correttivo da intraprendere per ripristinare la funzionalità dell'impianto a seguito di un guasto. Il carattere di funzione prettamente operativa è dunque rimasto incollato alla manutenzione per secoli, però negli ultimi anni il pensiero manutentivo si è evoluto e rinnovato profondamente e la manutenzione si è trasformata, in termini di mission, da attività prevalentemente operativa di riparazione a complesso sistema gestionale

orientato alla prevenzione del guasto e al miglioramento continuo, come si vede in fig. 1.2.

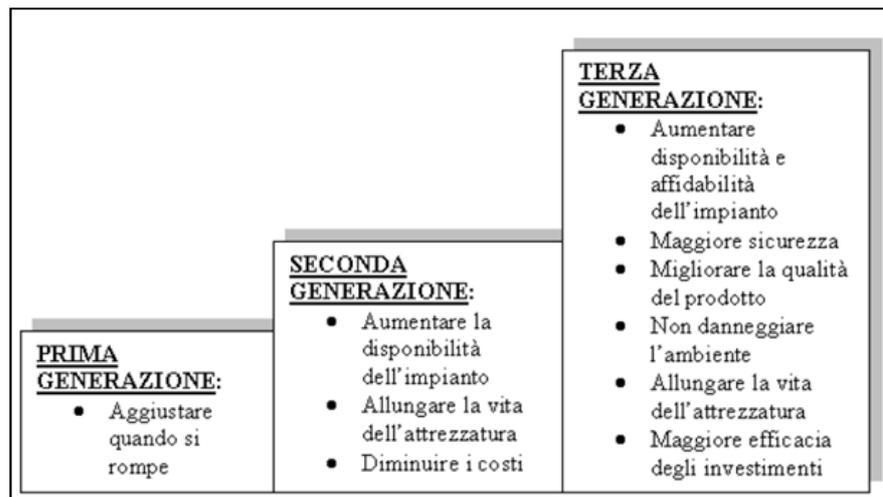


Fig. 1.2: Evoluzione storica dei requisiti di manutenzione

Il concetto di manutenzione ha quindi, subito una profonda evoluzione, evidenziata dal fatto che non è più subita come male necessario e non è più legata essenzialmente ai guasti. In pratica si è passato progressivamente dalla manutenzione correttiva, che interviene dopo il guasto, alla manutenzione preventiva che era dapprima sistematica, cioè effettuata seguendo uno scadenario e dunque cieca, e che ora è su condizione o predittiva e tiene conto delle informazioni fornite da strumenti sullo stato di certe caratteristiche o sull'evoluzione di certi sintomi di degrado fino ad arrivare, allo sviluppo e l'affermazione di una vera e propria Ingegneria di Manutenzione che si configura come l'insieme delle conoscenze e competenze in grado di controllare e migliorare il servizio manutentivo.

Verosimilmente il volano di questa mutazione è racchiuso nella presa di coscienza che la manutenzione non è un centro di costi inevitabili, ma un modo di investire razionalmente le risorse aziendali al fine di assicurare la continuità di esercizio dei sistemi nelle condizioni stabilite, di contribuire ad aumentare l'efficienza del sistema produttivo e di garantire la sicurezza del personale e la tutela ambientale.

1.4 I costi di manutenzione

Qualunque organizzazione finalizzata al mantenimento dei beni aziendali ha lo scopo di ridurre il costo globale di manutenzione, risultante dalla somma dei costi diretti e dei costi indiretti. La manutenzione però non deve essere vista unicamente come un centro di costo, in quanto produce anch'essa "valore" in termini di risparmio di costi conseguenti ai guasti che la manutenzione permette di evitare e come fattore d'incremento delle opportunità di profitto conseguenti ad un miglior funzionamento degli impianti e delle attrezzature. È opportuno perciò, nel valutare la manutenzione da un punto di vista economico, considerare non solo il costo delle risorse utilizzate per eseguirla (materiali, attrezzature, personale), ma quantificare anche il valore che essa produce in termini di servizio erogato e risparmio permesso.

La struttura complessiva dei costi di manutenzione è indicata nella figura seguente:

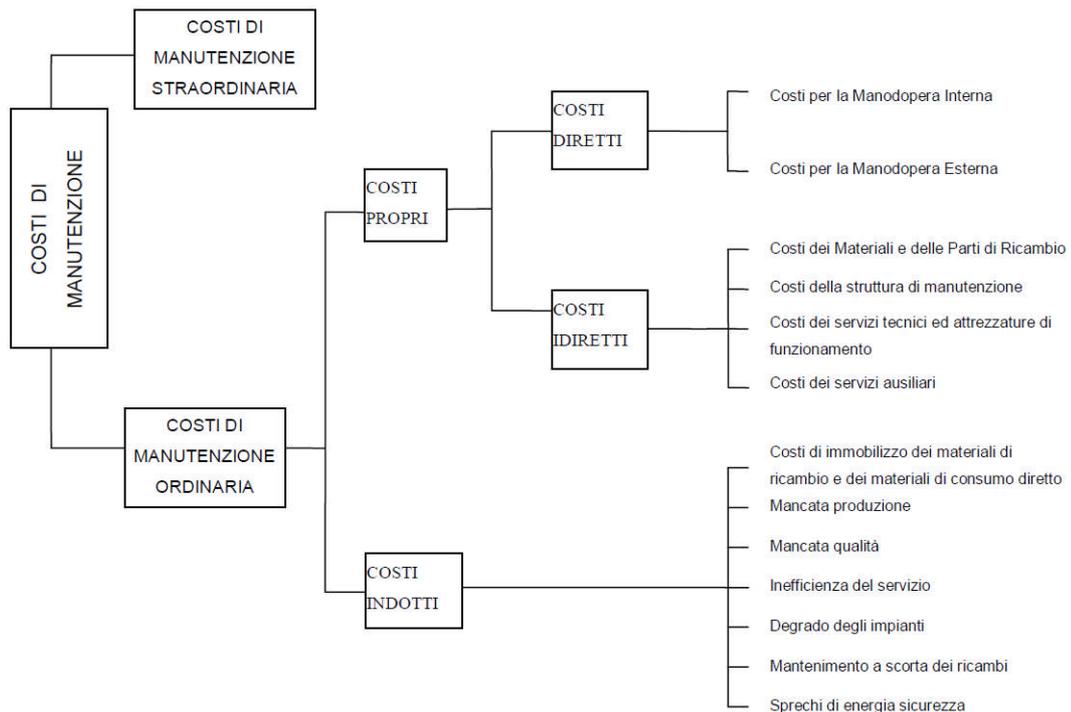


Figura 1.3 - Struttura dei Costi di Manutenzione.

Andando ad analizzare più nel dettaglio i costi relativi alla manutenzione ordinaria si possono distinguere le seguenti categorie:

- I costi propri diretti, che si articolano in costi per la manodopera interna, costi per la manodopera esterna (prestazioni di terzi) e costi dei materiali e parti di ricambio, sono relativi alle risorse direttamente associabili all'esecuzione degli interventi manutentivi.
- I costi propri indiretti, che si articolano invece in costi della struttura di manutenzione (costi della manodopera indiretta di manutenzione, come ad esempio costo dei capi officina, dei capi squadra, del personale di ingegneria di manutenzione, del gestore del magazzino materiali), costi dei servizi tecnici ed attrezzature di funzionamento (comprendono i costi annui delle attrezzature, del materiale d'esercizio generale, del materiale ausiliario e dei servizi tecnici necessari per lo svolgimento delle attività di manutenzione), costi di immobilizzo dei materiali di ricambio e dei materiali di consumo diretto (costi di

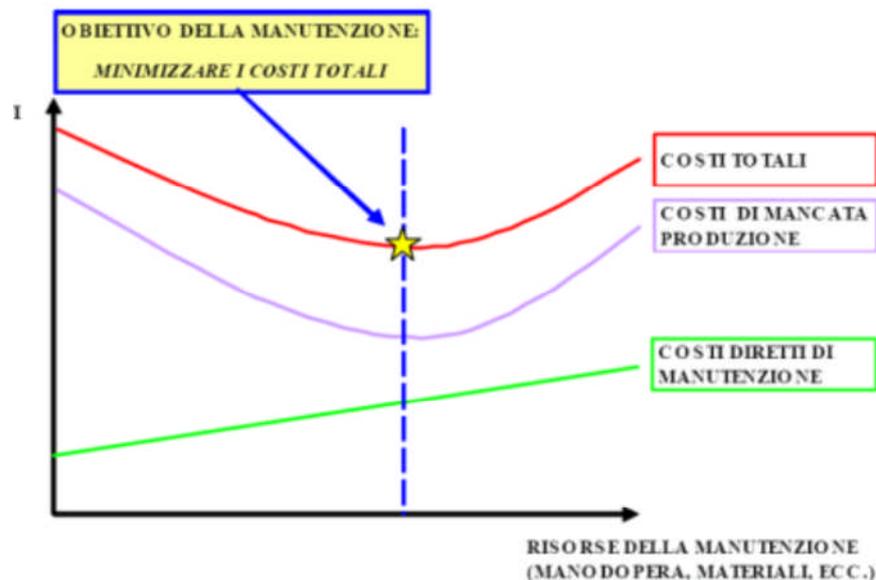
immobilizzo a magazzino dei materiali di manutenzione) e costi dei servizi ausiliari (sistema informativo di manutenzione), sono relativi alle risorse impiegate a livello organizzativo nell'esecuzione degli interventi manutentivi, ma non direttamente associabili a questi.

- I **costi indotti** nascono come conseguenza dell'interruzione del servizio/funzione di un impianto o una macchina, interruzione che può avere due diverse origini: il guasto (interruzione casuale ed estemporanea del servizio); o la volontaria interruzione per effettuare interventi di mantenimento. Essi sono quindi esprimibili come la valorizzazione economica di mancate prestazioni rispetto ad obiettivi fissati per gli impianti e macchine oggetto di manutenzione. Il concetto di mancata prestazione può riguardare diversi aspetti, fra cui: i costi di mancata produzione a causa della ridotta disponibilità degli impianti; i costi di mancata qualità (ad esempio scarti di prodotto a causa della riduzione della capacità del processo); i costi dovuti all'inefficienza del servizio (riduzione dei livelli di servizio, tempi di consegna di un prodotto, a causa di ritardi nell'esecuzione dei piani di produzione); - allungamento dei tempi di manutenzione, in quanto gli interventi a guasto, imprevisti, richiedono tempi "amministrativi" più lunghi; i costi dovuti al degrado degli impianti (la loro cattiva conservazione porta a rotture frequenti e riduzione della capacità di processo); i costi dovuti al mantenimento a scorta dei ricambi (Il livello dei magazzini è sempre alto se si adotta una politica di attesa del guasto. Solo con una politica preventiva è possibile ridurre il livello medio di giacenza ed ottimizzare la composizione del magazzino); i costi dovuti agli sprechi di energia; i costi imputabili alla mancata sicurezza (aumento del rischio di incidenti ed infortuni).
- I **costi propri diretti** possono essere ridotti attuando un miglior controllo degli interventi standard: è possibile, anche mediante

un'analisi storica sulle tipologie dei guasti accaduti, definire una serie di interventi di routine per i quali siano definibili nel dettaglio le modalità operative, tempistiche, attrezzature, quantità e specializzazioni del personale.

- I **costi propri indiretti**, invece, possono essere ridotti solo attuando una politica preventiva: svincolarsi dal rischio di guasto improvviso costituisce l'obiettivo finale di una moderna manutenzione, che ha tre scopi principali:
 1. Riparare i guasti;
 2. Impedire la loro insorgenza;
 3. Migliorare le prestazioni degli impianti.

Nella figura seguente sono rappresentate le curve dei costi propri (Costi Diretti di Manutenzione), di quelli indotti (Costi di Mancata Produzione) e di quelli totali, somma delle due precedenti curve.



1.5 Le Politiche di Manutenzione

Per raggiungere gli obiettivi dell'aumento della disponibilità degli impianti/macchine, della riduzione dei downtime e di contenimento dei costi di manutenzione, è fondamentale definire razionalmente gli approcci di manutenzione più appropriati a seconda della tipologia di impianto/macchina, sia dal punto di vista tecnico che organizzativo.

Un primo passo è quello di decidere le politiche manutentive da adottare caso per caso per perseguirne gli obiettivi strategici. In particolare si tratta di definire:

- se e quando operare con interventi di riparazione solo a seguito di un guasto;
- se e quando è invece più opportuno prevenire i guasti effettuando interventi preventivi di manutenzione;
- se e quando è opportuno acquistare strumenti dedicati al monitoraggio delle condizioni degli impianti, per intervenire quando si manifesti una variazione di un determinato parametro rispetto alle normali condizioni di funzionamento, senza attendere che l'evento degeneri nel guasto e nel conseguente fermo dell'impianto;
- per quali entità e attività di manutenzione è opportuno impegnarsi nella ricerca di soluzioni di miglioramento della situazione esistente.

Definire le politiche di manutenzione significa quindi decidere in anticipo le modalità di effettuazione delle attività di manutenzione che dovranno essere svolte sull'impianto. In tal modo, esse non saranno frutto di una semplice casualità, ma conseguenze di scelte razionali e coscienti derivanti dalla conoscenza approfondita degli impianti, dall'analisi dei guasti (tipologie di guasto, distribuzione del tasso di guasto) e da valutazioni di carattere

economico relative al costo del ciclo di vita delle macchine e impianti che costituiscono il patrimonio aziendale.

Tale presa di coscienza la si acquisisce rispondendo ad una serie di domande strategiche:

- quale è il comportamento a guasto di un impianto e quale è la più appropriata forma di manutenzione da adottare per controllarlo, tenendo conto delle eventuali possibilità di ispezionare/monitorare il funzionamento dell'entità?
- quale è il confronto tra il costo della manutenzione fatta a seguito del guasto e il costo dell'intervento fatto prima che il guasto accada?
- quali sono i costi ed i benefici derivanti dall'introduzione di possibili miglioramenti nel modo di operare della manutenzione?

Le diverse politiche di manutenzione comunemente (fig. 1.4) adottate a livello industriale e applicate alle diverse tipologie di componenti, possono essere ricondotte alle seguenti categorie:

1. Manutenzione Correttiva (a Guasto);
2. Manutenzione Preventiva:
 - a) Manutenzione ciclica o programmata;
 - b) Manutenzione su Condizione e Predittiva;
3. Manutenzione Migliorativa;
4. Manutenzione su opportunità.

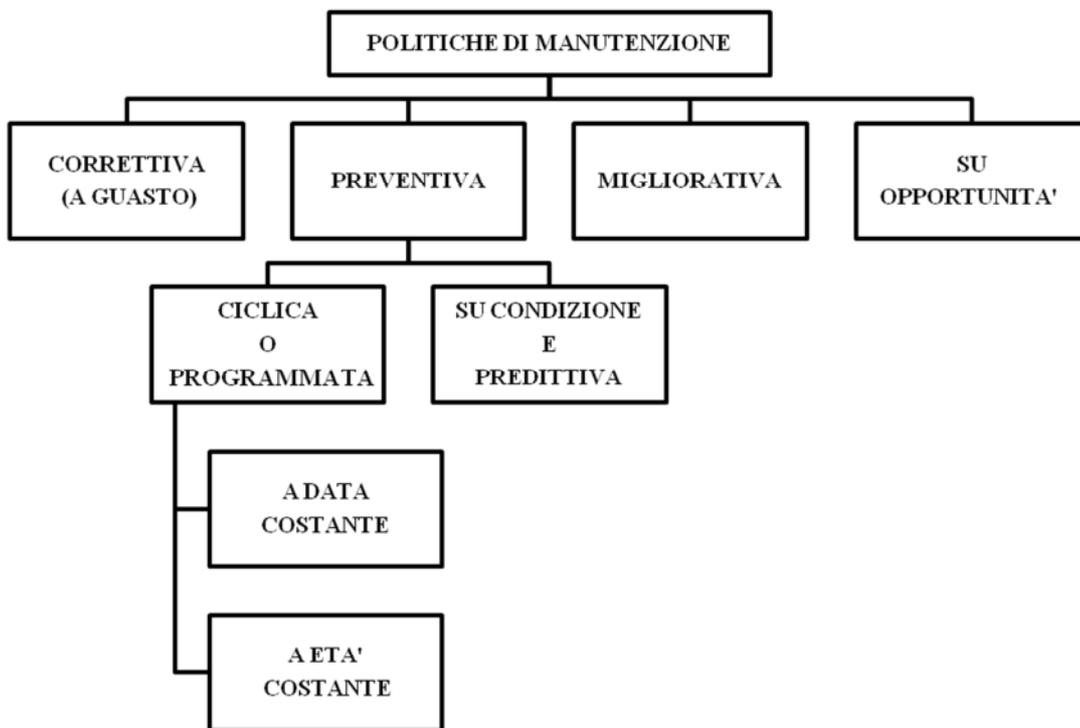


Fig. 1.4: Politiche di manutenzione

Di seguito saranno analizzate singolarmente ogni politica manutentiva al fine di evidenziarne le principali caratteristiche.

1.5.1 Manutenzione correttiva (a guasto)

La **manutenzione correttiva** detta anche **a guasto** è definita, dalla normativa, come la manutenzione “*eseguita a seguito di una avaria e volta a riportare un’entità nello stato in cui essa possa eseguire la funzione richiesta*”, si tratta della politica di impiego più antica e diffusa; è implementata infatti da sempre in ogni azienda in cui sia presente una entità soggetto a guastarsi. È un *approccio intuitivo*: prevede semplicemente di far funzionare l’entità (ad esempio la macchina) fino a che essa si guasti o il suo degrado obblighi l’operatore a fermarla.

L'obiettivo dell'intervento manutentivo è pertanto quello di riparare la macchina e ripristinare le condizioni iniziali di funzionamento nel minor tempo possibile.

Questa tipologia manutentiva è caratterizzata da un costo contenuto in quanto si interviene solo quando strettamente necessario, cioè a seguito del guasto; viceversa impone un immobilizzo non indifferente di capitali per i magazzini in quanto i ricambi devono essere immediatamente disponibili onde evitare lunghe fermate produttive.

Dal punto di vista della gestione delle risorse umane non risulta ottimale poiché si lavora in emergenza alternando momenti di sovraccarico lavorativo a momenti di inattività, infatti l'impegno richiesto da questa politica è di tipo "pompieristico". Tale situazione può essere parzialmente evitata adottando soluzioni organizzative volte ad allargare il compito assegnato ai manutentori addetti all'emergenza.

Non esistono controindicazioni tecniche all'implementazione di una politica correttiva: qualunque entità ne può essere oggetto, anzi inevitabilmente, a dispetto della migliore prevenzione, prima o poi si verificherà una rottura o un malfunzionamento imprevisti, nei confronti dei quali si renderà necessario intervenire, questo perché non è tecnicamente possibile annullare tutti i guasti di un sistema.

Quindi i **punti di forza** che caratterizzano gli interventi di manutenzione a guasto sono:

1. bassi costi, se correttamente applicata, infatti consente di contenere i costi propri di manutenzione, essendo il costo variabile di manutenzione nullo sempre, quando la macchina funziona correttamente (si sostituiscono solo i componenti che si guastano).
2. non richiesta di strutture organizzative e pianificazioni particolarmente complesse.

Mentre i **punti di debolezza** sono riassumibili come segue:

1. Il guasto si produce accidentalmente, in genere senza nessun preavviso, con la creazione di possibili situazioni di rischio per la sicurezza, con l'interruzione repentina del servizio e quindi mancanza di produzione o con una possibile riduzione di qualità della produzione/servizio.
2. La natura aleatoria del guasto provoca un uso molto variabile delle risorse fisse cioè non permette l'utilizzo ottimale delle squadre di manutenzione, spesso inutilizzate in attesa di guasti;
3. La necessità di proteggersi dall'aleatorietà dell'accadimento del guasto determina una tendenza al sovradimensionamento del magazzino ricambi.

In conclusione, la manutenzione correttiva risulta conveniente per tutte quelle macchine il cui guasto non risulta essere critico per la sicurezza delle persone e dell'ambiente e l'impatto dovuto all'interruzione dell'attività produttiva causato dal guasto è ridotto (bassa perdita di produzione, di qualità, ecc.).

1.5.2. Manutenzione Preventiva

La **manutenzione preventiva** è definita, dalla normativa, come la manutenzione *“eseguita a intervalli predeterminati o in accordo a criteri prescritti e volta a ridurre la probabilità di guasto o la degradazione del funzionamento di una entità”*.

La politica preventiva si basa quindi sulla sostituzione programmata di un determinato componente della macchina ancora perfettamente funzionante, con uno nuovo, in modo tale da prevenirne il cedimento incontrollato. Infatti ci si basa sul concetto che *“prevenire è meglio che curare”*. Quindi l'obiettivo principale è quello di evitare per quanto possibile l'insorgenza del guasto e preservare in buone condizioni gli impianti durante la loro vita operativa.

Inoltre la programmabilità dell'intervento consente una maggiore organizzazione del lavoro di manutenzione, una gestione più efficiente dei materiali tecnici e la possibilità di gestire la fermata della macchina nella maniera più conveniente.

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

- la manutenzione ciclica o programmata;
- la manutenzione su condizione e predittiva.

1.5.3 Manutenzione ciclica o programmata

La **manutenzione ciclica o programmata** (detta anche periodica, a cicli prefissati, a calendario o sistematica), è la forma di manutenzione preventiva più semplice, in quanto gli interventi sono legati ad un periodo di tempo prefissato cioè sono previsti ad una data fissa e costante, ossia quella in cui si presume si possa verificare un certo tipo di guasto.

Si tratta in pratica di una politica di manutenzione caratterizzata da interventi effettuati periodicamente che determinano la sostituzione, appunto programmata, di una determinata macchina o componente della stessa che non si è ancora guastato, con uno nuovo, allo scopo di evitare il guasto accidentale. È chiaro che operando in questo modo si sacrifica parte della vita utile della macchina, privilegiando l'affidabilità di funzionamento del sistema cui la macchina appartiene.

La manutenzione ciclica generalmente viene effettuata secondo due modalità:

1. a **intervalli costanti** o a **data costante** (Fig. 1.5)
2. a **età costante** (Fig. 1.6).

Nella manutenzione preventiva a **intervalli costanti**, l'intervento di manutenzione o sostituzione viene effettuato con una frequenza nota (settimanale, mensile, ecc) cioè l'intervallo di tempo tra un intervento di sostituzione preventiva e il seguente è **fisso** ed inoltre è indipendente da quello che succede durante questo intervallo. In pratica la modalità d'intervento non cambia, incluso se, tra due interventi preventivi programmati, sono stati effettuati interventi correttivi cioè interventi di sostituzione/riparazione su guasto.

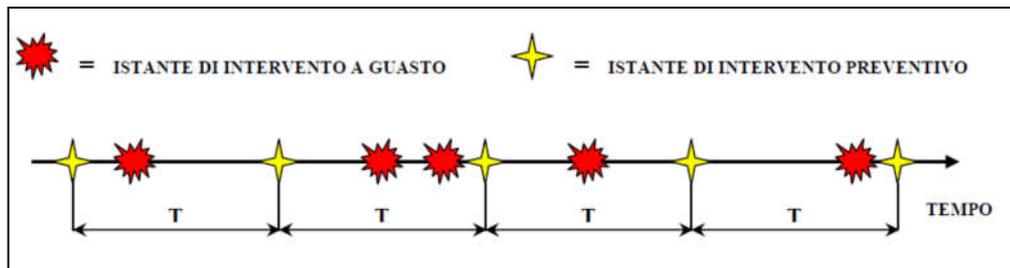


Fig. 1.5: *Manutenzione preventiva a intervalli costanti*

Invece, nella manutenzione preventiva a **età costante** o **basata sull'età**, il componente viene sostituito nel momento in cui lo stesso raggiunge una certa età di funzionamento costante rispetto l'ultimo intervento cui è stato sottoposto, che si tratti di un intervento di correttivo o preventivo. L'età di funzionamento viene misurata in termini di ore di funzionamento, chilometri percorsi, battute, ecc. Ne consegue che, se all'interno del suddetto intervallo accade un guasto, il successivo istante d'intervento preventivo viene ricalcolato in modo tale che tra il guasto e il nuovo intervento preventivo trascorra l'età costante.



Fig. 1.6: *Manutenzione preventiva ciclica ad età costante*

Entrambe le politiche di manutenzione ciclica richiedono alcuni prerequisiti organizzativi per assicurare la programmabilità degli interventi:

- è necessaria che sia nota la legge di affidabilità del componente/macchina per poter definire nella maniera più opportuna l'intervallo tra un intervento e il successivo; tale legge può essere trasmessa dal costruttore del componente /macchina o desunta dall'analisi dei dati storici sui guasti che si sono verificati.
- è necessario l'uso di un buon sistema informativo a supporto della programmazione e gestione delle attività di manutenzione, così da calendarizzare ed in seguito tenere sotto controllo l'esecuzione delle attività cicliche;
- la gestione dei ricambi deve essere coordinata con i piani di manutenzione ciclica;
- il personale deve possedere le competenze tecniche specialistiche per poter eseguire gli interventi preventivi assegnati ed essere capace di gestire bene la propria attività coordinandosi con le altre aree aziendali coinvolte nell'intervento (ad es. il magazzino materiali), al fine di predisporre tutte le risorse necessarie per l'intervento, prima di impegnare la macchina con la manutenzione

Inoltre è bene sottolineare che l'attività preventive deve essere opportunamente concordata tra le funzioni Manutenzione e Produzione, in

modo tale che il programma delle attività preventive rispetti sia le esigenze di capacità operativa dei macchinari, sia le necessità di realizzazione della manutenzione preventiva.

La manutenzione preventiva programmata è caratterizzata da costi piuttosto elevati in quanto, dovendo intervenire con largo anticipo sul guasto, spesso si sostituiscono componenti relativamente nuovi o si effettuano operazioni che potrebbero essere rimandate più in là nel tempo. D'altra parte questo approccio consente una gestione più efficiente dei materiali tecnici cioè garantisce magazzini ricambi più snelli in quanto l'ordine del ricambio può essere fatto sulla base del piano di manutenzione garantendo la disponibilità della parti quando necessarie.

Inoltre anche l'organizzazione del lavoro trae benefici dalla programmazione, garantendo una migliore distribuzione degli impegni delle squadre di manutenzione, in quanto il lavoro viene pianificato in anticipo cioè prima di effettuare l'intervento preventivo.

I **punti di forza** che caratterizzano l'esecuzione degli interventi di manutenzione programmata, sono quindi:

- riduzione dei guasti;
- miglior utilizzo delle squadre di manutenzione, attraverso un'adeguata pianificazione del lavoro;
- ottimizzazione delle scorte di materiali tecnici (ricambi), attraverso un'adeguata coordinazione tra i piani delle attività cicliche di manutenzione e i piani di approvvigionamento dei materiali;
- riduzione dei costi dovuti alle perdite di funzionalità legate a guasti accidentali su componenti critici;
- riduzione dei tempi di fermo impianto rispetto al caso di manutenzione correttiva, approvvigionando le risorse necessarie prima che l'intervento abbia luogo.

I **punti di debolezza** sono invece riassumibili come segue:

- l'intervento di manutenzione è applicabile solo per problemi legati all'invecchiamento degli impianti;
- programmazione di interventi di manutenzione potenzialmente non necessari, con il conseguente aumento dei costi propri della manutenzione (ad esempio, dovuti alla sostituzione eccessiva dei componenti);
- introduzione del rischio intrinseco di aumentare la probabilità di certi guasti, a causa di alcuni interventi preventivi non realizzati in modo impeccabile o per l'installazione di alcuni materiali difettosi (ovvero soggetti ad esempio a mortalità infantile).

Inoltre a differenza della correttiva, la manutenzione preventiva ciclica risulta conveniente per quelle macchine, dove la natura aleatoria del guasto determina una criticità per la sicurezza delle persone e dell'ambiente e/o l'impatto dovuto all'interruzione dell'attività produttiva causato dal guasto è significativo (elevata perdita di produzione, di qualità, ecc.) ed inoltre la manutenzione preventiva, rispetto alla manutenzione correttiva, quando riesce a migliorare la disponibilità del sistema, garantisce un costo di esercizio inferiore (ovvero il costo della manutenzione preventiva risulta più basso del costo complessivo atteso in caso di manutenzione correttiva).

Possiamo affermare che la manutenzione preventiva programmata, per quanto finora visto, è efficace sia in termini economici che di riduzione della indisponibilità della macchina quando il guasto presenta una certa regolarità di accadimento. Tuttavia, ad un guasto che sia difficile da prevedere, non è conveniente applicare tecniche di manutenzione programmata in quanto si rischia realmente di sostituire un componente la cui vita utile è tutt'altro che terminata. La soluzione generalmente adottata in questi casi è quella di constatarne le reali condizioni (ad esempio di usura) e prendere la decisione se cambiarle o meno: si fa quindi una manutenzione su condizione e/predittiva.

Infine notiamo che oltre alla manutenzione ciclica su descritta, detta anche *manutenzione basata sul tempo* cioè sul ciclo di vita (o di deterioramento), statisticamente determinato, dei vari componenti dell'impianto, sui quali si interviene con cadenza regolare, provvedendo alla semplice sostituzione, esiste anche un altro tipo di manutenzione ciclica detta **manutenzione di revisione**, ovvero **di ispezione completa e riparazione**, effettuata smontando periodicamente e ispezionando-controllando l'intero impianto, per riparare o sostituire le parti deteriorate o usurate. Anche per questo tipo di manutenzione, il tempo a cui effettuare la revisione viene determinato *preferibilmente* su base statistica.

1.5.4 Manutenzione su condizione e predittiva

La **manutenzione su condizione e predittiva** è una forma di manutenzione preventiva più sofisticata di quella ciclica, in quanto l'intervento non è legato ad un periodo di tempo prefissato, ma ad un monitoraggio delle reali condizioni di funzionamento di una qualsiasi entità (macchina, componente, ecc.) al fine di provvedere alla riparazione/sostituzione solo quando questa è veramente necessaria. Il monitoraggio delle condizioni può essere visto come lo strumento che indica lo stato di "salute" della macchina utilizzando parametri che evidenziano i cambiamenti avvenuti nel tempo.

L'obiettivo principale di questo tipo di manutenzione è quello di evitare interventi di urgenza (tipici della manutenzione correttiva) ma anche quello di evitare di eseguire con eccessivo anticipo interventi non richiesti o inutili, (tipici della manutenzione preventiva ciclica), infatti essa si è sviluppato in seguito alla constatazione che lo smontaggio ed il rimontaggio di alcune

attrezzature, nel corso di visite sistematiche (manutenzione preventiva ciclica), provocano un ulteriore rischio di guasto, oltre a maggiori costi (in termini di risorse umane, materiali tecnici, ecc.).

In generale si parla di manutenzione preventiva su condizione e predittiva quando l'intervento è pianificato ed eseguito in base alle reali condizioni di funzionamento della macchina/componente, cioè in risposta al degrado effettivo misurato della stessa.

La misura del degrado può essere eseguita con diversi livelli di sofisticazione, a partire dalle ispezioni sensoriali fino ad esami più specialistici. Elenchiamo di seguito i modi con cui si può misurare tale degrado:

- *Ispezioni sensoriali effettuate dal personale di produzione.* La metodologia più semplice si basa sull'utilizzo dei sensi percettivi dell'uomo (vista, tatto, udito, olfatto). Perché sia efficace, è necessario stimolare il personale addetto alle macchine affinché faccia attenzione al funzionamento della propria macchina con l'obiettivo di segnalare ogni possibile sintomo di mal funzionamento. Ad esempio, una fuga di vapore può indicare che una determinata tenuta si è deteriorata. Una volta che l'operatore si è accorto di un'anomalia nel funzionamento della macchina, deve segnalarlo in modo tale che venga avviata una diagnosi per verificare l'effettiva causa della perdita e possa essere compiuto un intervento di ripristino delle condizioni di funzionamento ideali. Al fine di permettere una facile individuazione di possibili sintomi premonitori del deterioramento di una parte della macchina è necessario che l'operatore mantenga il suo posto di lavoro pulito e ordinato.
- *Ispezioni periodiche effettuate dal personale di manutenzione.* Il personale di manutenzione, durante le visite d'ispezione periodica, esegue ispezioni di tipo strumentale e sensoriale dei macchinari (le ispezioni sensoriali non sono prerogativa esclusiva degli addetti alle

macchine). Tali ispezioni sono volte a identificare i segnali di avvertimento di guasti incipienti e possono essere eseguite a macchina ferma o funzionante, secondo la necessità o meno di smontare la macchina per realizzare il controllo. Una volta che viene stabilito che uno o più dei parametri monitorati ha superato il livello di guardia, si va a ripristinare il normale livello per quel dato parametro attraverso un'azione di manutenzione, che può spaziare dalla semplice regolazione della macchina fino alla sostituzione preventiva di un componente/sottosistema della stessa.

- *Test non distruttivi compiuti dal personale di manutenzione.* Si effettuano prove specialistiche che permettono di misurare lo stato di salute della macchina in base ai difetti che presenta il materiale componente dalla macchina stessa (per esempio si parla di difetti di saldatura, di fusione, dovuti all'attrito, agli urti, ecc.). Più specificamente si eseguono opportuni test di rilievo, chiamate prove non distruttive, il cui scopo è identificare i difetti che si sono prodotti durante il funzionamento della macchina. Se il test da esito positivo significa che il test ha superato il livello minimo di tolleranza accettato per quel dato difetto e, di conseguenza, è necessario prendere provvedimenti di manutenzione preventiva sulla macchina.
- *Monitoraggio automatico di grandezze fisiche premonitrici dello stato di degrado della macchina.* Si tratta di applicare *metodi di misura strumentale di grandezze fisiche* che permettono di acquisire, controllare e analizzare in modo automatico, cioè continuo, quei parametri della macchina (in genere temperature di fluidi, vibrazioni, ecc.) il cui valore influenza o dipende dal buon funzionamento della stessa, e quindi risulta indicativo del suo degrado. Una volta acquisito il segnale di un determinato parametro significativo, lo si diagramma in funzione del tempo e, fissando dei limiti di funzionamento accettabili, si può prevedere quando effettuare l'intervento di

manutenzione preventiva che contrasti il deterioramento della macchina.

Una volta che si è in grado di monitorare un determinato segnale premonitore (inteso come sintomo di avaria), la politica di manutenzione su condizione e predittiva prevede che non si esegua nessun intervento di manutenzione fino a quando il valore di tale parametro (fig. 1.7) non abbia superato un determinato livello, detto *livello di allerta* (fase di rilevamento dell'anomalia). A partire da questo momento in avanti è necessario compiere un controllo più frequente e preciso del parametro (fase di diagnosi precisa e diagnosi di conferma), al fine di evitare che l'eventuale accelerazione della fase di degrado della macchina colga il personale di manutenzione impreparato arrivando al guasto della macchina stessa.

In particolare si parla di **manutenzione su condizione** quando ci si limita a intervenire preventivamente (attraverso regolazione, riparazione, ricostruzione, sostituzione, ecc.), una volta che il segnale raggiunge il *livello di allarme*, in altre parole, quando l'intervento viene programmato in funzione del massimo valore tollerabile prima che la macchina si rompa o cessa di funzionare correttamente.

Invece si parla di **manutenzione predittiva** quando si effettua una stima della tendenza al degrado del segnale nel tempo che prevede quando la macchina supererà il livello di allerta e in base ad essa si riesce appunto a *predire* quando effettuare l'intervento programmato. In particolare la manutenzione predittiva non richiede né la fermata degli impianti, né lo smontaggio degli stessi, in quanto fornisce una stima del tempo residuo di funzionamento.

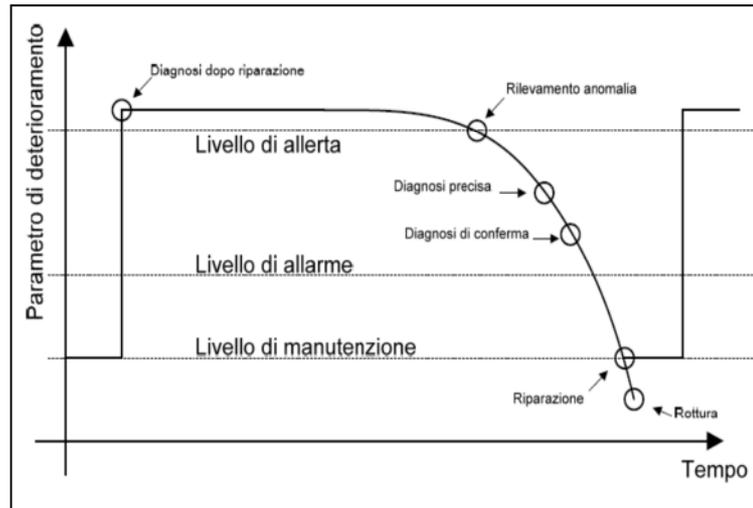


Fig. 1.7: Andamento del segnale di monitoraggio del degrado di una macchina

In pratica questo tipo di manutenzione impone sulle attrezzature controlli e diagnosi lungo l'intero arco della loro vita; quindi adottare una politica di manutenzione predittiva e su condizione significa quindi dotarsi di strumenti di diagnosi che permettano il monitoraggio di un componente relativamente a precise caratteristiche tecniche e parametri di funzionamento, in maniera tale da riuscire a monitorare lo stato di deterioramento onde evitare il sopraggiungere del guasto e la fermata dell'impianto.

Riassumendo, si può affermare che la manutenzione predittiva e su condizione è quindi un approccio di tipo diagnostico, che fornisce indicazioni sullo stato di salute del sistema e consente di pianificare interventi di revisione basandosi sulle reali condizioni dei componenti, piuttosto che sul loro tempo di funzionamento come avviene nel caso della manutenzione ciclica.

L'implementazione di questa politica richiede un'attenta progettazione, volta a definire le entità che devono essere sottoposte a ispezioni e monitoraggio e a stabilire i parametri, con relativi limiti di tolleranza, che dovranno essere tracciati come sintomi premonitori del degrado. Dal punto di vista operativo, è rilevante l'investimento richiesto per le attrezzature impiegate e il costo della taratura periodica delle stesse, per mantenere le caratteristiche di qualità

delle misure strumentali effettuate. È inoltre necessario che il personale possieda adeguate competenze per impostare la campagna di rilievo, per utilizzare operativamente gli strumenti diagnostici e per interpretare le osservazioni; infatti una tale politica presenta un elevato costo d'investimento (acquisto di macchinari d'ispezione, formazione del personale di manutenzione).

I **punti di forza** derivanti dall'adozione di una tale politica manutentiva sono quindi:

- riduzione delle fermate per guasto e conseguente aumento della disponibilità dell'impianto;
- migliore gestione del magazzino ricambi;
- migliore gestione delle risorse manutentive (attraverso una più efficace pianificazione degli interventi del team di manutenzione);
- sfruttamento ottimale dei componenti secondo la loro vita utile e aumento di quest'ultima;
- possibilità di fermare un impianto prima che questo si arresti generando problemi di messa in sicurezza e fermo produzione e conseguente riduzione dei tempi di riparazione;
- riduzione degli smontaggi inutili, o la riparazione e/o sostituzione di componenti che non ne necessitano;

Fra i **punti di debolezza** è possibile segnalare i seguenti:

- molte delle tecniche diagnostiche richiedono attrezzature specialistiche e training con conseguenti elevati costi d'investimento e di formazione;
- è necessario un certo periodo di tempo per sviluppare una conoscenza affidabile dei trend (tendenza) dei segnali misurati ed essere capaci di valutare adeguatamente la salute della macchina e determinare le relative soglie di allarme.

Concludendo possiamo affermare che in generale, questa politica ha bisogno di tempo per poter essere implementata in un determinato contesto impiantistico, perché le attività che la contraddistinguono – individuazione di segnali premonitori del degrado, identificazione dei livelli di allerta e di allarme, analisi della tendenza dei segnali monitorati – sono attività che risultano efficaci ed efficienti solo passato un certo periodo di assestamento. Pertanto inizialmente, non si riescono a cogliere a pieno i benefici derivanti dalla adozione di questa politica.

La manutenzione preventiva, di cui fanno parte la manutenzione *ciclica*, quella *su condizione* e quella *predittiva*, svolge un ruolo determinante nel contenere il **tasso di guasto**. I componenti vengono ispezionati e/o revisionati prima che avvenga il cedimento, pertanto il tasso di guasto tende a scendere sotto a quello ottenibile con la manutenzione correttiva attestandosi teoricamente ai livelli standard.

Inoltre sottolineiamo che l'approccio manutentivo preventivo risulta in generale conveniente in presenza di macchinari critici, per i quali l'accidentalità del guasto abbia conseguenze importanti per la sicurezza o impatti in maniera rilevante in termini di mancata produzione/servizio o scarsa qualità dei prodotti.

Il principale beneficio che si avverte utilizzando questo tipo di manutenzione è l'aumento della disponibilità del sistema, infatti prevenendo l'insorgere di un guasto che è già sotto osservazione è possibile eseguire in *mascheratura*, cioè mentre la macchina è in movimento, attività preliminari quali diagnosi e organizzazione dell'intervento manutentivo (ad esempio selezionare il team di competenze, approvvigionare i ricambi, le attrezzature e gli strumenti ecc.), abbattendo in questo modo sensibilmente i tempi di fermo macchina e quindi aumentare la disponibilità

D'altra parte sono da valutare attentamente i costi degli interventi preventivi, che possono risultare eccessivi a causa di una pianificazione delle frequenze troppo prudente rispetto a quanto richiesto dall'effettivo processo di degrado

del sistema. In questo senso la Manutenzione predittiva e su condizione è quella che promette il miglior rapporto tra margini di miglioramento per la disponibilità e costi totali. Questa politica permette infatti, come già detto, di programmare solamente gli interventi richiesti sulla base del reale stato di deterioramento di un'entità, evitando così di eseguire con eccessivo anticipo interventi non richiesti, come avviene nel caso della preventiva ciclica.

1.5.6. Manutenzione Migliorativa

La manutenzione migliorativa è l' *“insieme delle azioni di miglioramento o di piccola modifica che non incrementano il valore patrimoniale dell'entità”* (UNI 10147).

La manutenzione migliorativa, chiamata anche proattiva, non è una politica manutentiva vera e propria, ma piuttosto un insieme di norme organizzative e gestionali che consentono di migliorare le prestazioni del sistema manutenzione nel suo complesso, attraverso strategie di intervento che integrano le normali politiche manutentive. Essenzialmente, mette in pratica i principi del miglioramento continuo con l'obiettivo di aumentare affidabilità e manutenibilità di un sistema, attraverso una serie di azioni mirate a correggere quelle condizioni che possono condurre al degrado funzionale dello stesso.

La principale differenza con la manutenzione preventiva sta nel fatto che la migliorativa pone sotto osservazione un sistema e i suoi elementi non per monitorare e valutare l'entità di un guasto incipiente, ma si propone invece di individuare ed eliminare le cause primarie che originino il guasto, attraverso la riprogettazione di uno o più componenti (in toto o in parte) o la rimodulazione del loro impiego. Quindi lo scopo è l'identificazione delle cause di guasto e riprogettazione per rimuoverle. In un certo senso la

migliorativa conduce il sistema verso una configurazione priva di guasti, e quindi, paradossalmente, senza necessità di manutenzione.

Ma è sul piano economico che questo approccio perde i colpi, infatti gli investimenti necessari per riconfigurare un sistema risultano spesso troppo ingenti rispetto ai benefici ottenibili o finanziariamente non adeguati (generalmente il pay-back period è ritenuto troppo lungo). Per fortuna, grazie anche all'evoluzione e all'arricchimento che sta subendo la funzione Manutenzione, in grado oramai di collaborare sinergicamente con ogni altra funzione, l'approccio migliorativo appare destinato a superare i propri limiti, attraverso una collocazione non in fase di esercizio, ma di progettazione del sistema, quando il costo per la realizzazione degli interventi migliorativi (modifiche derivanti dalla manutenzione migliorativa) è considerevolmente inferiore.

I punti di forza sono:

- alcune azioni possono essere intraprese con bassi costi ed alta efficacia;
- problemi ricorrenti possono essere definitivamente rimossi.

I punti di debolezza sono invece:

- le cause primarie di guasti possono essere di difficile individuazione;
- vaste azioni di riprogettazione possono essere molto costose con lunghi periodi di fermo macchina;
- i risultati previsti non sono sempre raggiunti.

1.5.7. Manutenzione su opportunità

La **manutenzione su opportunità** è la politica di effettuare gli interventi di manutenzione e/o sostituzione di alcuni componenti (anche se non arrivati a fine vita) in corrispondenza di un arresto delle macchine o del processo produttivo, dovuto ad interventi di manutenzione correttiva o preventiva. Si

tratta, insomma, di approfittare dei tempi di fermata programmati o indotti da guasti per effettuare altre operazioni di ispezione o manutenzione oltre a quelle programmate o comunque necessarie. In un impianto complesso la possibilità di effettuare la manutenzione su opportunità va attentamente valutata sulla base di diversi parametri: costi e tempi di fermata e di setup, disponibilità di risorse della manutenzione, tempi necessari ad effettuare la manutenzione, vita utile residua dei componenti su cui effettuare la manutenzione su opportunità, ecc. Ad esempio, tanto più alto è il costo di fermata e di riavvio del sistema, tanto più conveniente sarà la sostituzione di componenti non ancora in guasto, anche se questo comporta la riduzione della vita utile degli stessi.

1.6 Strategia di scelta della politica di manutenzione più opportuna

Scegliere una politica di manutenzione non significa escludere tutte le altre, dato che comunque il guasto può sempre accadere e che, in ogni caso, per i diversi componenti di un'entità si possono prevedere politiche di manutenzione diverse.

La scelta delle politiche di manutenzione è orientata alla definizione del Piano di Manutenzione Produttiva, il quale si pone come obiettivo la determinazione del giusto mix di politiche di manutenzione da assegnare a ciascuna entità e la migliore ripartizione delle risorse manutentive (risorse umane, tecnologiche ed economiche).

Non esiste in assoluto una politica migliore dell'altra; esiste invece una metodologia valida per individuare razionalmente l'approccio operativo più adatto, in base agli obiettivi specifici che sono stati definiti. Scegliere, quindi,

una politica di Manutenzione significa stabilire a priori quali interventi dovranno essere fatti, su quali *entità* e con quali modalità; avendo preso piena coscienza di quale sia lo stato in cui ogni *entità* è in grado di eseguire la funzione richiesta, quali siano le azioni che possono influenzare detto stato e solo dopo aver valutato in maniera comparata i costi e i benefici di ogni scenario possibile. Allo scopo è indispensabile avere un quadro chiaro ed esauriente dell'*entità* da mantenere e dei caratteri salienti di ogni politica. I motivi che spingono verso l'uno o l'altro tipo sono di natura tecnologica (per aumentare l'affidabilità delle macchine) o di natura economica (calcolare l'ottimo tra curva dei costi della manutenzione e curva delle perdite).

In generale quando si acquista un nuovo impianto, di solito il fornitore consegna il manuale di manutenzione, ma all'inizio ha poco senso fare manutenzione preventiva. La prima e fondamentale cosa da fare su un nuovo impianto è la raccolta dei dati: tale fase è molto delicata, in quanto è la base su cui poi si svilupperà la scelta della politica di manutenzione da adottare e la progettazione del piano di manutenzione produttiva.

Nella pratica per scegliere la politica manutentiva più opportuna sono stati creati dei grafici, diagrammi di flusso e delle tabelle guida (empiriche) più o meno specifiche. Ad esempio, il grafico che segue (fig. 1.8), fornisce un criterio di prima approssimazione sulla scelta della politica di manutenzione più adatta in relazione ai fattori gravità e frequenza del guasto.

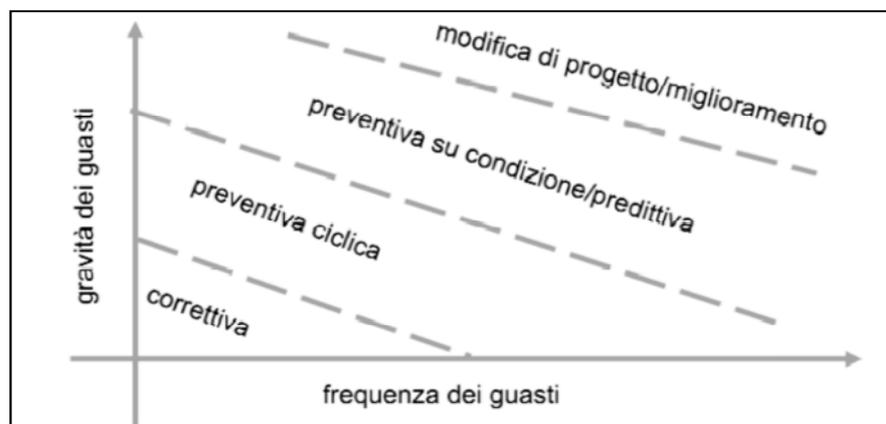


Fig. 1.8: Scelta delle politiche di manutenzione in funzione di fattori rilevanti

E' chiaro che quanto maggiori sono i due parametri, tanto più risulterà conveniente investire in politiche manutentive sofisticate e costose, fino al limite di dover rivedere il progetto del prodotto/processo. In particolare:

- in caso di guasti caratterizzati da bassa frequenza e bassa gravità è sufficiente una politica di manutenzione correttiva;
- all'aumentare della frequenza e della gravità del guasto, diventa conveniente implementare una politica di manutenzione preventiva ciclica;
- in caso di guasti caratterizzati da alta frequenza e alta gravità è bene ricorrere alla manutenzione preventiva su condizione/predittiva;
- per valori di gravità e frequenza ancora più alti, è necessario, laddove è possibile, effettuare delle modifiche di progetto.

I principali criteri che devono essere tenuti in considerazione nella stesura delle logiche decisionali sono i seguenti:

- Criticità del componente o della linea distinguendo se è critico ai fini della sicurezza, della protezione ambientale o della produttività: in genere si distingue la criticità in termini di sicurezza/ambiente rispetto alla criticità sulla produttività/investimento in quanto la criticità sulla sicurezza ed il rispetto dell'ambiente non si possono derogare; si deve quindi intervenire con politiche preventive programmate o su condizione: gli aspetti di produttività/investimenti sono più elastici e possono essere affrontati in termini di costi-benefici, valutando se il beneficio derivante dalla possibilità di prevenire il guasto ricompensa le spese derivanti da approcci manutentivi preventivi; i componenti non critici, salvo casi in cui l'approccio preventivo è a basso costo, possono essere mantenuti con politiche correttive.
- Vincoli di legge, assicurativi o di garanzia: di norma i fornitori di apparecchiature impongono ispezioni o sostituzioni periodiche programmate senza le quali scadono le garanzie; le norme stesse

richiedono tale approccio (ad esempio la taratura periodica delle valvole di sicurezza) e spesso anche le compagnie di assicurazione vincolano il premio alle politiche di manutenzione adottate.

- Applicabilità dal punto di vista tecnico, di politiche su condizione: la manutenzione su condizione è la più vantaggiosa, ma purtroppo non è sempre applicabile per mancanza di un segnale debole “affidabile” in grado di garantire sempre il riconoscimento del guasto imminente oppure, pur essendo disponibile, il segnale debole precede di poco il guasto non consentendo alla manutenzione di organizzare in modo adeguato l'intervento; in questi casi se il componente è critico si dovrà ricorrere alla preventiva programmata, altrimenti si lascia il componente in correttiva.
- Costi degli interventi preventivi: per i guasti non critici solo in termini produttivi, un elemento di giudizio per la scelta della politica ottimale è il costo aggiuntivo derivante dagli interventi preventivi; in caso di Manutenzione Preventiva Programmata il costo deriva dall'impegno a revisionare e sostituire parti ben prima che queste arrivino in prossimità della condizione di guasto, d'altro canto come affermato precedentemente la preventiva permette di snellire i magazzini ricambi. Per quanto riguarda la Preventiva su condizione rimane il vantaggio per la gestione dei magazzini, si evitano gli smontaggi inutili, ma si deve valutare attentamente l'investimento necessario per installare i sistemi e le procedure di monitoraggio.
- Problematiche organizzative connesse alle politiche correttive: la politica correttiva è quella più facile da attuare, ma richiede notevole flessibilità delle squadre e la capacità di operare in emergenza; richiede inoltre un magazzino ben fornito onde evitare ritardi logistici sulle riparazioni. Comunque tale politica deve essere sempre meno utilizzata, anche se non può essere del tutto abbandonata, perché anche

una pianificazione ottimale non può essere in grado di evitare tutti i guasti; inoltre la correttiva è la più vantaggiosa per i componenti non critici.

La norma UNI 10366, invece, suggerisce il seguente diagramma di flusso (fig. 1.9) per scegliere la politica di manutenzione che meglio si adatta a una certa modalità di guasto. Per tale scelta è determinante una serie di fattori tra cui: il grado di criticità della macchina, l'impatto e la probabilità del guasto, l'esistenza di un segnale debole monitorizzabile (cioè di un segnale indicativo della stata di degrado della macchina), la presenza di raccomandazioni da parte del fornitore o da normativa, la possibilità di prevedere la durata della vita della macchina.

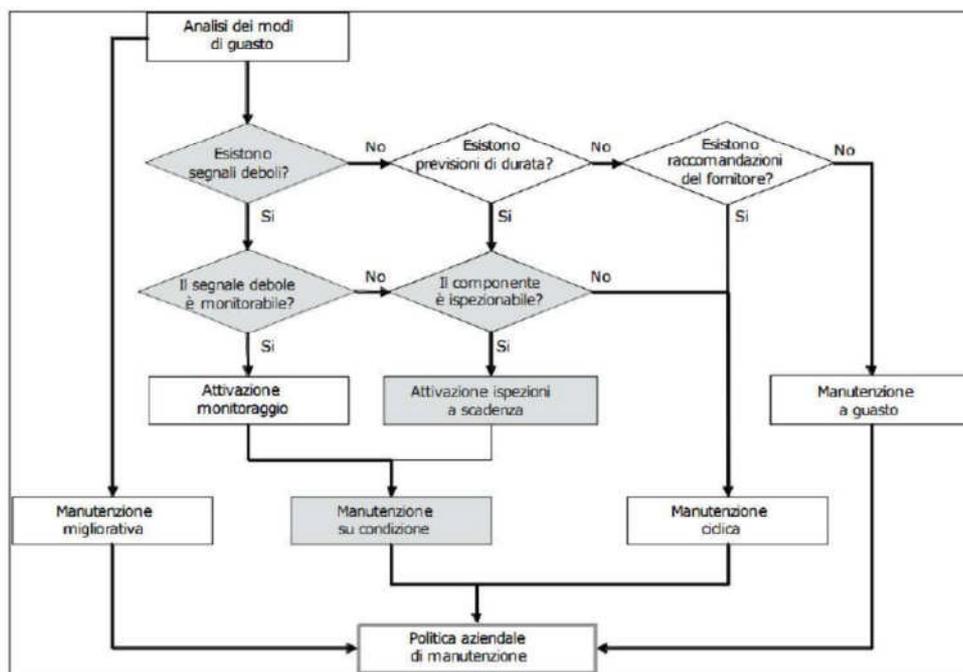


Fig. 1.9: Diagramma di flusso per la definizione della politica di manutenzione

Di seguito si fornisce una breve spiegazione su come leggere il diagramma di flusso per la definizione della politica di manutenzione. I passi decisionali che lo caratterizzano sono i seguenti:

1. S'effettua, in primo luogo, una analisi dei modi di guasto della macchina/componente.
2. Ci si domanda se vi è un segnale debole utilizzabile come sintomo del progresso del degrado di funzionamento.
3. Se così è, è necessario domandarsi se esiste la possibilità di monitorare nel tempo il segnale debole.
4. Se la risposta al punto 3 è positiva, allora vi è la possibilità di implementare una politica di manutenzione su condizione/predittiva.
5. Nel caso in cui il segnale debole esista, ma non sia monitorizzabile (ovvero non è possibile effettuare una valutazione chiara e affidabile nel tempo dello stato di degrado della macchina) ci si chiede se esiste almeno una previsione sulla vita utile del componente.
6. Se la risposta al punto 5 è sì, allora si hanno due alternative:
 - a. Attivare una serie d'ispezioni programmate a intervalli fissi di tempo (strumentali e non), in modo da tornare al punto 4 (manutenzione su condizione/predittiva);
 - b. Implementare una politica di manutenzione preventiva ciclica, eseguendo le sostituzioni a intervalli costanti oppure a età costante.
7. Quando non vi è, né un segnale debole monitorabile, né una previsione sulla vita utile del componente, le alternative sono due:
 - a. Far fede alle raccomandazioni del fornitore o delle normative;
 - b. Passare a una politica di manutenzione correttiva. In tal caso, l'unica contromisura possibile sarebbe il cercare di avere a scorta tutti i componenti soggetti a guasto e strutturare la manutenzione in modo da intervenire in tempi rapidi all'occorrenza dell'evento di guasto.

Scegliere, quindi, una politica di manutenzione non significa escludere tutte le altre, dato che comunque il guasto può sempre accadere, infatti allo stato

attuale l'applicazione di una manutenzione preventiva pura non consente di "liberarsi" della componente correttiva, con la quale si deve necessariamente convivere per affrontare quella quota di guasti accidentali, anche gravi, che si manifesta inevitabilmente, e anche perché in ogni caso, per i diversi componenti di un'entità si possono prevedere politiche di manutenzione diverse.

Quindi scegliere la politica di manutenzione più opportuna significa determinare il giusto mix (combinazione) di politiche di manutenzione da assegnare alle responsabilità organizzative ed alle risorse disponibili e tale mix nel suo insieme, costituisce la politica aziendale di manutenzione.

In conclusione bisogna sottolineare che la scelta della politica di manutenzione (mix di politiche) richiede criteri di progettazione della manutenzione improntati alla logica della minimizzazione del costo globale di manutenzione (costi propri + costi indotti), cioè il mix da attuare per ogni componente del sistema viene scelto con lo scopo di minimizzare il costo globale di manutenzione.

1.7 Ingegneria di Manutenzione

Nell'evoluzione industriale, la manutenzione ha assunto straordinaria importanza, incidendo in termini sempre più significativi sulla competitività industriale, attraverso la ricerca di una più stretta collaborazione tra le parti coinvolte nel processo produttivo. La moderna visione dell'organizzazione industriale, obbligata dall'elevata competitività del contesto in cui si trova ad operare a livelli di performance sempre maggiori, tende ad identificare la manutenzione non più come una funzione aziendale accessoria alla produzione, che interviene dopo il manifestarsi del guasto, ma come una sua parte integrante, volta a migliorare le prestazioni complessive dei sistemi

produttivi. In quest'ottica di sempre maggiore integrazione interfunzionale si inseriscono le motivazioni che portano all'approccio della manutenzione produttiva.

Il Total Productive Maintenance (TPM) è un sistema di gestione della manutenzione che cerca di realizzare l'integrazione tra la produzione e la manutenzione, attraverso la condivisione degli obiettivi e la collaborazione di tutte le persone coinvolte direttamente nel processo produttivo.

In questo contesto si colloca l'Ingegneria di Manutenzione che rappresenta l'unità organizzativa responsabile della progettazione, del controllo e del miglioramento continuo del Sistema Manutenzione.

In particolare l'Ingegneria di Manutenzione deve svolgere in particolare i seguenti compiti:

- **Progettare/Ingegnerizzare il sistema manutenzione**, questa attività si esplica definendo sia le politiche manutentive più adatte allo stato degli impianti e all'organizzazione produttiva, avvalendosi anche di metodologie scientifiche quali la FMECA, che le logiche di gestione dei ricambi, promuovendone la standardizzazione.
- **Controllare i parametri tecnici ed economici della manutenzione** ovvero effettuare una misura e un monitoraggio attivo delle performance manutentive, questa attività si esplica attraverso l'analisi dei dati di guasto per individuare eventuali criticità, l'applicazione dei piani di manutenzione preventiva, il trend del costo globale, i risultati ottenuti in seguito a modifiche degli impianti e quant'altro e gestendo al meglio i contratti di manutenzione. In particolare l'Ingegneria di Manutenzione esegue una continua analisi dei guasti per scegliere la priorità di intervento dal punto di vista della progettazione e programmazione della manutenzione; inoltre tiene sotto controllo continuo l'efficacia e l'efficienza dei piani di manutenzione adottati. Per espletare tale attività è necessario disporre di un sistema informativo della manutenzione (CMMS – Computerized

Maintenance Management System) di cui deve curare la progettazione, lo sviluppo, l'implementazione e la gestione.

- **Migliorare la disponibilità degli impianti** mediante soluzioni di manutenzione migliorativa (miglioramento continuo) e l'applicazione di nuove metodologie atte ad aumentare l'efficienza e l'efficacia degli interventi manutentivi (ad esempio come lo SMED nel caso si voglia intervenire sui tempi di setup) e inoltre coinvolgendo anche il personale di produzione per sviluppare l'automanutenzione degli impianti in modo da ridurre i tempi di attesa di intervento. Tutto ciò deve essere svolto senza trascurare l'aspetto igiene, sicurezza e ambiente previsti in termini di legge.

Inoltre l'Ingegneria di Manutenzione è chiamata a collaborare nella progettazione di nuovi impianti ed a promuovere lo sviluppo delle competenze professionali del personale manutentivo e nel caso venga scelto di rivolgersi all'esterno per l'esecuzione di servizi di manutenzione specifici, essa dovrà anche gestire i contratti di manutenzione terziarizzata.

L'Ingegneria di Manutenzione deve dunque ricoprire un ruolo attivo di controllo e miglioramento del servizio di manutenzione; deve a tal fine coinvolgere a necessità le funzioni aziendali: Produzione, Qualità, Sicurezza, Acquisti, Ufficio Personale, Progettazione, Controllo di Gestione nel processo di miglioramento delle performance di efficacia ed efficienza secondo un approccio assolutamente di processo, non funzionale, stimolando collaborazione interfunzionale, team working e condivisione di obiettivi. Essa si presenta, quindi, come una soluzione organizzativa e non come una funzione aziendale, estremamente efficace nel migliorare le performance di stabilimento rispetto ai pilastri competitivi Tempi, Costi, Volumi, Qualità, Sicurezza e Ambiente.

Quindi si può concludere che l'Ingegneria di Manutenzione è caratterizzata da una elevata complessità ed interdisciplinarietà e pertanto richiede un'equipe composta da professionisti ed operatori di diversa origine ed

esperienza. Il reclutamento però di professionisti dotati delle competenze richieste per lo sviluppo dell'Ingegneria di Manutenzione è difficile da attuare, poiché gran parte dei manager mancano per lo più di sensibilità nei riguardi dell'Ingegneria di Manutenzione, ritenendo che la manutenzione altro non sia che un costo necessario e quindi difficilmente privilegiano investimenti e spese per favorire lo sviluppo di questa unità organizzativa .

Però è bene sottolineare che le nuove esigenze scaturite dal mutato scenario industriale sono da un lato la necessità di rendere la manutenzione una funzione efficace ed efficiente, dall'altro trasformarla in un centro di profitto a tutti gli effetti. Pertanto all'interno di ogni organizzazione è fondamentale ed auspicabile anche lo sviluppo di un'unità di Ingegneria di Manutenzione, infatti la manutenzione non dovrebbe soltanto occuparsi delle attività esecutive della gestione di manutenzione tradizionale, ma dovrebbe occuparsi anche e soprattutto della manutenzione migliorativa (o proattiva) cioè dovrebbe perseguire il miglioramento continuo, che rientra appunto tra i compiti dell' Ingegneria di Manutenzione.

Capitolo 2: TOTAL PRODUCTIVE MAINTENANCE

INTRODUZIONE

Nell' evoluzione industriale, la manutenzione ha assunto straordinaria importanza, incidendo in termini sempre più significativi sulla competitività industriale, attraverso la ricerca di una più stretta collaborazione tra le parti coinvolte nel processo produttivo. La moderna visione dell'organizzazione industriale, obbligata dall'elevata competitività del contesto in cui si trova ad operare a livelli di performance sempre maggiori, tende ad identificare la manutenzione non più come una funzione aziendale accessoria alla

produzione, che interviene dopo il manifestarsi del guasto, ma come una sua parte integrante, volta a migliorare le prestazioni complessive dei sistemi produttivi. In quest'ottica di sempre maggiore integrazione interfunzionale si inseriscono le motivazioni che portano all'approccio della manutenzione produttiva.

Il Total Productive Maintenance (TPM) è un sistema di gestione della manutenzione che cerca di realizzare l'integrazione tra la produzione e la manutenzione, attraverso la condivisione degli obiettivi e la collaborazione di tutte le persone coinvolte direttamente nel processo produttivo.

Definito dalla Norma UNI 10147 come “Insieme di azioni volte alla prevenzione, al miglioramento continuo e al trasferimento di funzioni elementari di manutenzione al conduttore dell'entità, avvalendosi del rilevamento di dati e della diagnostica sull'entità da mantenere”, il TPM si colloca all'interno di una profonda innovazione culturale industriale in corso, dove la manutenzione da attività semplicemente riparativa sta assumendo i connotati di “servizio” indispensabile per programmare e garantire nel tempo il mantenimento della qualità.

La tecnica TPM richiama il Total Quality Management (TQM) in molti aspetti, quali:

- la necessità dell'impegno e del supporto del top management;
- la motivazione e la responsabilizzazione dei dipendenti (sono chiamati ad effettuare essi stessi azioni manutentive);
- l'adozione di un'ottica di lungo periodo, in quanto l'implementazione del TPM, così come del TQM, richiede più di un anno.

L'obiettivo principale del TPM è quello di ridurre al minimo le fermate degli impianti aumentandone la disponibilità ed allo stesso tempo le prestazioni; fra gli scopi vi è inoltre l'eliminazione di ogni tipo di perdita (uno dei motti di questo approccio è infatti “zero perdite, zero difetti, zero incidenti, zero guasti”), l'aumento della vita operativa delle macchine e l'aumento dell'efficienza del sistema produttivo.

In pratica, questo nuovo approccio combina il metodo americano della manutenzione preventiva con quello giapponese del controllo totale di qualità ed il coinvolgimento degli operatori a qualsiasi livello aziendale. Il risultato che ne scaturisce è un sistema innovativo per la manutenzione delle macchine che elimina i guasti e le microfermate, promuove gruppi autonomi di manutenzione attraverso attività di ispezione giornaliera e migliora la qualità e l'efficienza del sistema produttivo.

Nelle compagnie dove questo sistema è già stato adottato ha portato ad ottimi risultati, tra cui una riduzione dei guasti e delle rotture sulle macchine, una forte diminuzione dei tempi di set-up, di aggiustamento e delle microfermate, una riduzione delle giacenze di parti di ricambio, il miglioramento del posto di lavoro, l'aumento delle conoscenze e della professionalità degli operatori di linea e dei manutentori, nonché una riduzione dei difetti di qualità sui prodotti finiti, degli incidenti sul posto di lavoro ed un forte aumento della produttività e dell'efficienza dei reparti produttivi.

2.1 Il TPM nell'ottica della Lean Production

Il termine "Lean Production", che tradotto significa "Fabbrica Snella", descrive una filosofia che incorpora un insieme di strumenti e tecniche da utilizzarsi nei processi aziendali per ottimizzare il tempo, le risorse umane, le attività, la produttività, e nello stesso tempo per migliorare il livello qualitativo dei prodotti e servizi al cliente.

Un'azienda che produca con i criteri della "produzione snella" produce di più, con le risorse che ha a disposizione ed elimina sistematicamente tutte le attività che non creano valore aggiunto. In altri termini, produrre i beni ed i servizi usando il minimo quantitativo di tutto: costi, tempo, spazio, risorse umane e finanziarie, ottenendo in questo modo i seguenti benefici:

- riduzione dei tempi ciclo,
- riduzione degli inventari, materie prime e prodotto finito,
- riduzione dei semilavorati in fabbricazione,
- riduzione dei costi di produzione,
- aumento della potenzialità produttiva dell'azienda,
- miglioramento del tempo di consegna,
- aumento delle vendite,
- aumento della produttività,
- miglioramento della qualità,
- profitti in crescita,
- aumento della sicurezza e della tutela degli operatori e dei clienti,
- ambiente di lavoro sicuro, ordinato, pulito ed efficiente,
- incremento della qualità del prodotto fornito.

La Lean Production si fonda sul concetto di “Lean-thinking”, un modo di ragionare teso ad accrescere la flessibilità dell'impresa attraverso un ripensamento dell'intero flusso di creazione del valore, dalla progettazione fino alla gestione degli ordini.

Il cardine del pensiero snello è rappresentato dalla continua ricerca ed eliminazione degli sprechi allo scopo di creare un flusso produttivo e d'informazione che fluisca, senza accumuli o intoppi, attraverso tutta l'azienda. La tensione verso la perfezione (intesa come un asintoto) attraverso il miglioramento continuo rappresenta una vera sfida per le aziende snelle.

La struttura organizzativa caratteristica della Fabbrica Snella è unanimemente considerata il modello di eccellenza per i moderni sistemi produttivi. L'unità

operativa elementare, detta anche minifabbrica, che caratterizza la fabbrica snella è la cellula base dove trovano applicazione i principi organizzativi e le linee guida di questa concezione, riassumibili in:

- gestione per processi;
- struttura produttiva piatta;
- polivalenza dei ruoli operativi (allargamento e arricchimento delle mansioni);
- cultura del lavoro in team;
- adozione delle tecniche produttive giapponesi (TQM, TPM, JIT, ecc.);
- adozione del Kaizen (miglioramento continuo e sistematico).

La Lean Production, in quanto sistema integrato con altri (qualità, economico finanziario, etc.), parte dall'alto con obiettivi tipici di business plan, per tramutarsi in progetti specifici di miglioramento, con focus in particolare sulla produzione e l'erogazione del prodotto/servizio. Di fatto, applicare un sistema Lean Production non si discosta molto dall'applicare un sistema di gestione per la qualità: gli obiettivi a livello di business vengono tramutati in azioni specifiche per i processi al fine di ridurre se non eliminare 7 categorie di sprechi:



Figura 2.1 – Le 7 categorie di sprechi in ottica Lean Production.

Tra gli sprechi che si possono riscontrare in una tipica realtà produttiva del settore metalmeccanico si possono elencare i seguenti:

- Il guasto occasionale o il non corretto funzionamento di una macchina.
- La difficoltà nel trovare subito il materiale o l'attrezzo che serve.
- La mancanza di materiale che determina il fermo cella.
- Il prelievo di materiale da una posizione poco sicura e difficilmente accessibile.
- Il non saper cosa fare, ed il non avere istruzioni su come fare un'operazione.
- Il non riuscire a trovare un materiale, un attrezzo, un mezzo di trasporto perché qualcuno l'ha preso ma non so dove sia.

La Lean Production deve quindi comprendere l'intero sistema di realizzazione del prodotto o servizio, gestendo i processi relativi al cliente, la progettazione e sviluppo, la produzione, la manutenzione e tutta la catena di approvvigionamento (Supply Chain Management).

2.2 Gli strumenti della Lean Production

Molti degli strumenti e metodi alla base della Lean Production sono stati ereditati dalle esperienze degli anni '80 effettuate dalle aziende eccellenti giapponesi, in particolare modo da Toyota. Fra di essi assumono un ruolo chiave nell'ottica di una riduzione continua degli sprechi i seguenti metodi:

- CELLULAR MANUFACTURING
- HEIJUNKA
- JIT: Just In Time

- KAIZEN
- KANBAN/SISTEMA "PULL"
- METODO delle "5S" - Seiri (selezionare e eliminare); Seiton (mettere in ordine utensili, strumenti e materiali); Seiso: (pulire); Seiketsu (definire lo standard); Shitsuke (disciplina, mantenere e migliorare gli standard)
- POKA-YOKE
- SMED - Single Minute Exchange of Die
- TAKT TIME
- TPM - Total Productive Maintenance.

2.3 Origine ed affermazione del Total Productive Maintenance

Sviluppato in Toyota per rendere le proprie macchine estremamente efficienti e poter attuare il Just In Time mediante la tecnica pull, il TPM è oggi usata in tutto il mondo da ogni azienda che voglia aumentare la capacità dei propri mezzi e attuare una produzione di tipo "lean".

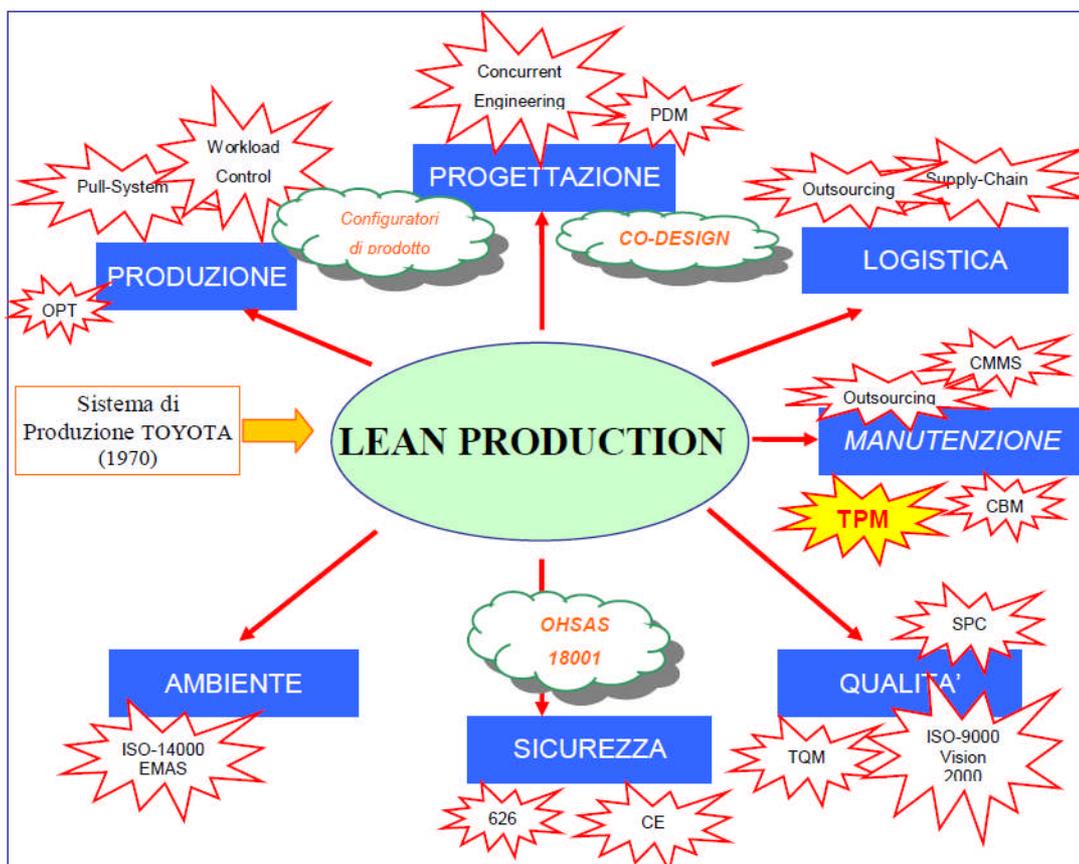


Figura 2.2- Origine del TPM.

L'esigenza di minimizzare le perdite e di ridurre il costo del ciclo di vita di un impianto ha portato al superamento della contrapposizione fra le funzioni (progettazione, produzione, manutenzione) ed alla suddivisione e condivisione delle responsabilità.

Si sviluppa l'idea che una corretta gestione della manutenzione possa non soltanto ridurre i costi ma generare profitto.

Questo nuovo modo di intendere il rapporto tra manutenzione e produzione ha avuto come diretta conseguenza un cambiamento a livello organizzativo: a tutta l'azienda, dai vertici fino all'operatore di linea, è infatti richiesto di partecipare alla conservazione, al corretto utilizzo ed al miglioramento delle macchine e dell'ambiente di lavoro.

L'affermarsi di questa nuovo modo di pensare ha fatto sì che potesse emergere ed affermarsi la filosofia del Total Productive Maintenance, risultato degli studi di Seichii Nakajima, pubblicati in Giappone nel 1971 dopo lunghi anni trascorsi ad analizzare ed approfondire le tematiche connesse all'integrazione tra manutenzione e produzione in realtà manifatturiere americane ed europee.

Il TPM ha infatti come intento principale quello di superare le tradizionali divisioni fra manutenzione e produzione, per ottenere un sistema integrato dove gli operatori di produzioni sono direttamente responsabili del mantenimento delle corrette condizioni di funzionamento degli impianti presso cui si trovano a svolgere il proprio lavoro, attraverso alcune semplici attività di manutenzione autonoma.

Questa attribuzione di responsabilità deriva dal fatto che sono gli operatori a conoscere meglio di chiunque altro lo stato di salute delle macchine, avendo a che fare con quest'ultime per gran parte della propria giornata lavorativa.

La manutenzione non si esaurisce più, quindi, nel singolo intervento operativo e occasionale, bensì l'obiettivo è portare al minimo le emergenze e gli interventi manutentivi non programmati.

Il TPM tenta di seppellire i principi di Adam Smith sulla divisione del lavoro. Il vecchio "adagio" comincia a diventare rapidamente obsoleto, per essere rimpiazzato dal "motto":

“Siamo TUTTI responsabili delle nostre macchine e del VALORE che esse contribuiscono a generare”

Nel suo schema strutturale tradizionale, il TPM coinvolge tutti i livelli delle funzioni principali aziendali, in primo luogo la Produzione, la Manutenzione, e l'Engineering/Ufficio Tecnico Impianti. Come tale, il TPM è una disciplina orientata all'integrazione.

Siamo quindi di fronte ad una realtà che ha trasformato la manutenzione tradizionale, di stile tipicamente americano (Productive/preventive

Maintenance), in una politica di stile giapponese fondata sulla attività dei piccoli gruppi, che coinvolge in maniera trasversale tutti i livelli aziendali, dal vertice fino al personale di prima linea (Figura 2.3).

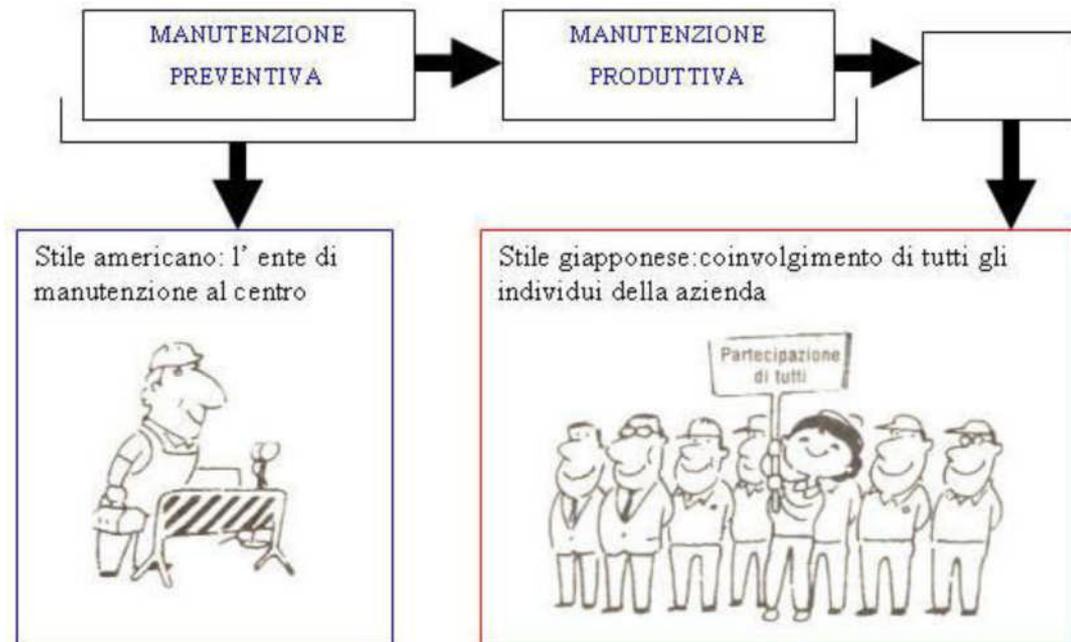


Figura 2.3- Dall'approccio americano si passa all'approccio giapponese

Il Total Production Maintenance scaturisce da una politica aziendale tesa a:

- sostenere la prevenzione,
- potenziare il monitoraggio impiantistico,
- proporre il miglioramento continuo della qualità del prodotto coinvolgendo gli operatori che fino ad oggi si ritengono estranei al processo di manutenzione , ma che invece ora sono coinvolti in prima persona nel processo di miglioramento dell'intervento manutentivo.

Analizzando nello specifico il significato di TPM, Total Productive Maintenance – manutenzione produttiva totale, possiamo individuare due elementi chiave nella sua nomenclatura che ci permettono di fornire una prima panoramica più specifica della strategia in analisi.

- ❖ Per manutenzione produttiva s'intende quella tipologia di manutenzione focalizzata sulla manutenibilità e affidabilità delle macchine nonché sulla riduzione dei costi di manutenzione. Obiettivo è di aumentare la produttività di un'impresa riducendo i costi totali dei macchinari lungo tutto il suo ciclo vita, dalla progettazione alla fabbricazione, alla sua operatività e manutenzione, nonché le perdite legate al suo degrado.
- ❖ L'aggettivo "totale" si riferisce a quattro elementi:
 - ❖ L'efficienza totale: l'efficienza economica, di profittabilità e delle macchine (OEE). Tale elemento include pertanto aspetti di produttività, costi, qualità, sviluppo e sicurezza.
 - ❖ La manutenzione totale, ovvero la manutenzione di tutti i macchinari durante il loro intero ciclo di vita. Ciò include politiche di manutenzione preventiva nonché di miglioramento della manutenibilità.
 - ❖ La partecipazione totale, ovvero partecipazione di tutte le risorse all'interno dell'azienda anche mediante le attività in piccoli gruppi di lavoro.
 - ❖ Il coinvolgimento totale, ovvero il coinvolgimento di tutte le funzioni aziendali, in primo luogo attraverso un rapporto sinergico tra manutenzione e produzione per un miglioramento continuo della qualità, dell'efficienza operativa, della produttività e della sicurezza.

Tutte le attività del TPM possono essere ricondotte a cinque strategie principali definite dal JIPM (Japan Institute of Plan Management):

Massimizzare l'efficienza complessiva degli impianti attraverso la loro ottimizzazione, la loro disponibilità, performance, efficienza e qualità del prodotto.

- Definire una politica di manutenzione preventiva e predittiva (manutenzione basata su dati statistici) che copra l'intero ciclo vita dell'impianto.
- Coinvolgere tutte le funzioni che interagiscono con gli impianti produttivi (pianificazione, gestione, manutenzione,...).
- Coinvolgimento di tutti i dipendenti dal top management agli operatori.
- Promuovere il miglioramento della manutenzione attraverso attività in piccoli gruppi.

2.4 I campi d'azione del TPM

I campi d'azione del TPM si articolano su due piani diversi, organizzativo e tecnologico.

Sul piano organizzativo l'obiettivo è il trasferimento all'interno del processo produttivo di tutte le responsabilità e quindi anche quelle relative alle prestazioni dei mezzi di lavoro e alla loro manutenzione. In particolare il TPM stimola il processo di appropriazione della gestione della macchina da parte del conduttore o macchinista.

Sul piano tecnologico l'obiettivo è il miglioramento della capacità della macchina di lavorare in qualità. Si agisce quindi sul miglioramento contestuale della disponibilità e della qualità e conseguente riduzione degli scarti, si punta cioè sull'ingegnerizzazione della manutenzione.

Occorre tener presente che negli ultimi anni i macchinari e gli impianti industriali hanno raggiunto un livello di complessità e di automazione molto elevato, di conseguenza anche i capitali investiti sono cresciuti in pari misura obbligando le aziende ad impegni finanziari molto gravosi e prolungati nel tempo. Risulta quindi necessario fare in modo che l'impianto, una volta che è stato programmato per una certa produzione, non sia interessato da fermate, sia per guasti, sia per difetti o qualsiasi altro motivo. E' intuitivo infatti capire come le fermate abbiano conseguenze pesantissime sui costi. La definizione dei campi d'azione del TPM mostra l'ampio spettro di interesse di questo innovativo approccio che spazia dall'officina agli uffici, dall'arricchimento professionale del personale alla salvaguardia della sua salute e sicurezza.

In passato era sufficiente basarsi sui servizi della manutenzione, che faceva di tutto, oltre alle normali riparazioni, dallo stringere un bullone lento a modificare le logiche di un computer industriale. Oggi il perfetto funzionamento di un centro di lavoro, proprio a causa della maggiore complessità, dipende da un numero molto maggiore di parametri, non tutti necessariamente tecnici o rigorosamente di manutenzione. E' quindi essenziale riuscire a creare una mentalità per cui siano gli operatori a doversi prendere cura della loro macchina e per fare questo è necessario che tutto il personale collabori in questo sforzo.

Il TPM ha quindi per finalità l'incremento della produzione attraverso la massimizzazione dell'efficienza dei macchinari perseguita attraverso la partecipazione e la motivazione di tutti i dipendenti, ottenendo in tal modo un miglioramento della soddisfazione e del morale dei dipendenti (fig. 2.3)



Figura 2.3 - Migliorare i processi attraverso il miglioramento delle persone.

Le realtà produttive sono un concentrato di perdite dovute alla mentalità ed al comportamento delle persone che vi lavorano, a cominciare dal vertice aziendale fino al personale di prima linea. Per creare un'inversione di tendenza si rende necessario innanzitutto cambiare la mentalità delle persone e solo allora si può pensare a un miglioramento strutturale degli impianti ed ottenere la riduzione delle perdite. Proprio grazie al miglioramento delle persone e degli impianti sarà possibile migliorare le aziende e renderle capaci di affrontare tutti i cambiamenti che i nuovi scenari di mercato gli impongono.

2.5 Il tempio del TPM

Il TPM può essere rappresentata come un tempio (Figura 2.4), alla cui base troviamo l'analisi delle perdite e i cui pilastri, in numero di otto, rappresentano i principi base di tale tecnica.

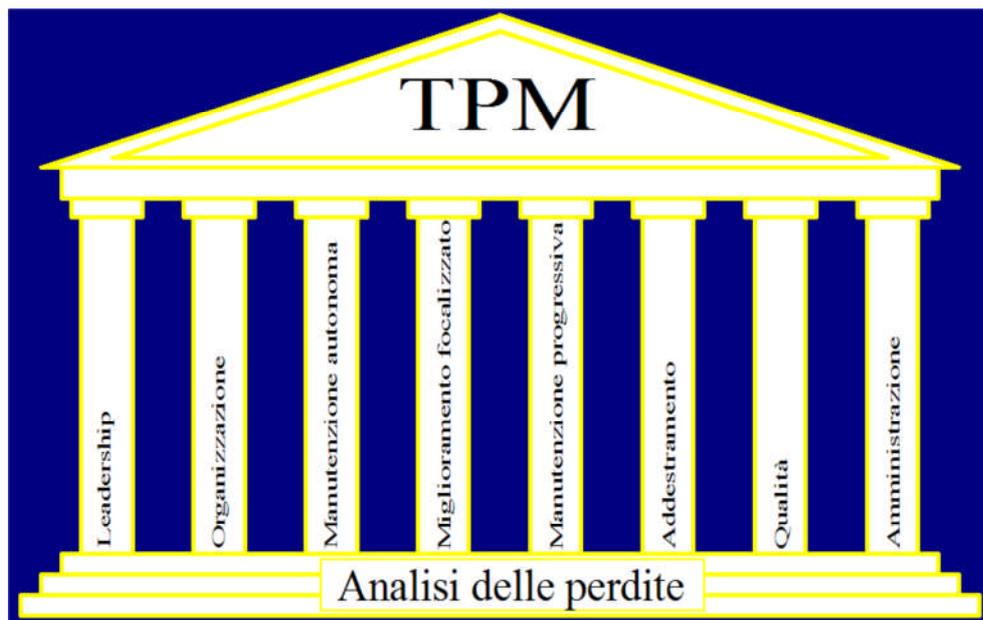


Figura 2.4 : i Pilastri del TPM

2.6 Gli 8 pilastri del TPM

Di seguito vengono illustrati gli 8 principi base della metodologia TPM.

2.6.1 I Pilastro - Leadership

L'implementazione del TPM richiede l'azione diretta e continua del middle management, pronto a raccogliere le criticità dal campo ed a fornire sia aiuti diretti che valori guida, ma anche fermo nel richiedere coerenza e disciplina. Se il leader non insiste ogni giorno per conseguire il miglioramento ed il rispetto degli standard fissati, se le politiche non vengono mantenute, gli operatori non credono all'impegno dell'azienda e non cambiano atteggiamento. Il Management deve quindi essere capace di fornire gli stimoli e le motivazioni necessari a tutto il resto del personale. Anche se è snella e ben dimensionata, un'azienda deve avere una mente che la guida. Oggi non ci si riferisce più al solo vertice aziendale, ma ad una combinazione

di intelligenza, miglioramento ed innovazione individuali cui partecipano tutti i dipendenti dell'azienda all'interno di un sistema di obiettivi ambiziosi.

2.6.2 Il Pilastro - Organizzazione

A livello organizzativo il TPM richiede la creazione di team che ne supportino l'implementazione. Il primo passo è quello di designare un TPM coordinator con il compito di educare i dipendenti ed iniziarli ai principi del TPM.

Successivamente vengono creati team autonomi: operatori, personale di manutenzione, supervisori di reparto, manager devono essere inclusi nel team. È necessario individuare una squadra non improvvisata ma opportunamente dimensionata e motivata, un' unita "operativa" focalizzata su un obiettivo comune, una mission chiara, dove la consapevolezza dei tempi e dei costi devono essere chiari e non presunti e soprattutto condivisi. Ovvero, un team dove ogni persona si sente direttamente coinvolta nel processo ed è incentivata a fare del suo meglio per contribuire al successo della squadra.

Il TPM coordinator guida il team finché i membri non familiarizzano con il processo e non emerge spontaneamente un team leader.

Il team di lavoro ha la responsabilità di:

- definire con precisione i problemi,
- dettagliare la lista di azioni correttive,
- eseguire il processo correttivo.

Il TPM richiede inoltre la creazione dell'"information factory" e l'applicazione dei concetti di TPM al sistema informativo aziendale, in modo da ottimizzare i flussi e rendere il TPM trasversale e capillare.

2.6.3 III Pilastro – Manutenzione Autonoma (Autonomous Maintenance)

La manutenzione autonoma, nota anche con il termine automanutenzione, è uno degli aspetti principali e di vera innovazione portati dal TPM e può essere definita come il complesso delle attività di manutenzione e conduzione svolte dal personale di produzione.

Il concetto chiave dell'automanutenzione è di far "crescere" gli operatori macchina, ed incrementare il loro know-how ed abilità assegnando loro l'esecuzione di attività base di manutenzione (pulizia "intelligente", lubrificazione, serraggi, piccole riparazioni, settaggi elementari, ispezioni programmate, ecc.). In tal modo, gli operatori imparano a "conoscere" bene le macchine, e sono presto in grado di individuare segnali anche deboli di "logorio" ed "usura", fin dagli stadi iniziali. Il che assicura interventi manutentivi più tempestivi e previene la crescita ed il propagarsi del deterioramento.

Attraverso una corretta implementazione di tale approccio è possibile:

- misurare il degrado, attraverso sistematiche ispezioni giornalieri ed il controllo delle condizioni operative;
- prevenire il degrado, attraverso una corretta gestione delle anomalie ed una sistematica esecuzione di azioni pulizia, lubrificazione, serraggi e regolazioni minori;
- rimediare al degrado, rilevando le anomalie prontamente, studiandone le opportune contromisure, ed eseguendo piccole riparazioni preventive.

Si deve quindi fare un salto di qualità rispetto al passato: la cura degli impianti non deve essere più solo compito dei manutentori, in quanto tale prassi rende difficile l'eliminazione tempestiva dei guasti e dei difetti. Con il

TPM, invece, i guasti e i difetti possono essere eliminati mediante la manutenzione autonoma, svolta dagli operatori che sono a contatto quotidiano con gli impianti.

La parola d'ordine per gli operatori deve essere quindi "Prendersi cura personalmente dei propri impianti", diventando protagonisti sul lavoro.

Obiettivi della manutenzione autonoma

La missione dei reparti produttivi consiste nel fabbricare prodotti di buona qualità in modo economico e veloce, in modo da massimizzare la produttività e l'efficienza dell'impianto; di conseguenza uno degli aspetti più critici per il perseguimento di tali obiettivi è l'individuazione tempestiva delle anomalie a cui sono soggetti gli impianti, e la successiva risoluzione delle stesse.

Il deterioramento delle macchine è il risultato della composizione di due fattori congiunti:

- deterioramento naturale;
- deterioramento forzato (cattiva gestione/uso).

Conseguentemente, gli obiettivi che ci si prefigge con l'implementazione di un programma di manutenzione autonoma sono quelli di:

- prevenire il deterioramento forzato delle macchine e rallentare quello naturale attraverso controlli e piccoli interventi di manutenzione giornalieri;
- riportare la macchine al loro stato ideale mediante la sostituzione dei componenti deteriorati;
- stabilire le condizioni necessarie a mantenere le macchine in buon stato.

Attività tipiche

Svolgere attività di manutenzione autonoma significa prendersi cura personalmente delle macchine, partendo dalla pulizia della postazione di lavoro, per arrivare all'esecuzione di ispezioni di alcuni componenti, riparazioni di semplice esecuzione, lubrificazione della parti in movimento, sostituzioni di componenti, monitoraggio dello stato di salute, ecc.

Tali attività di manutenzione giornaliera di controllo ed eliminazione delle fonti di contaminazione, finalizzate ad arrestare il deterioramento forzato, sono affidate agli operatori di linea. Infatti, nessuno più di loro è ne conosce meglio le condizioni di funzionamento ed è in grado di percepirne i segnali, spesso deboli, premonitori di un guasto imminente.

La manutenzione autonoma si traduce quindi nelle attività:

- pulizia delle attrezzature per assicurarne il corretto stato di funzionamento e facilitarne l'individuazione delle anomalie (5S);
- lubrificazione e l'ingrassaggio degli elementi meccanici per evitarne o ritardarne l'usura e ridurre le perdite di energia;
- ispezione quotidiana dei propri impianti (Visual Control);
- visite sistematiche per regolazioni, riavvitamento dei bulloni, piccoli interventi, ecc.;
- riparazioni e sostituzioni di componenti guasti o difettosi;
- controllo delle tolleranze e delle condizioni di funzionamento.

Ruolo della formazione

Spesso gli stessi operatori non sono sufficientemente motivati a scoprire, prevenire, riportare gli inconvenienti di macchine e impianti. Non si sentono abbastanza preparati dal punto di vista tecnico e tendono a subire piuttosto che a dominare i fenomeni quotidiani che si verificano nei reparti di produzione.

Per far fronte a queste problematiche occorre formare operatori di produzione esperti di impianti, capaci, se insorgono problemi relativi agli impianti nel proprio reparto, di fronteggiare l'emergenza e ripristinare il più velocemente possibile la produzione. Affinché ciò sia possibile occorre la volontà della leadership di:

- formare operatori che siano esperti di impianti e macchinari, capaci di scoprire le anomalie, risolverle e ripristinare le normali condizioni di funzionamento;
- far comprendere l'importanza delle pulizie come mezzo di ispezione e di prevenzione delle anomalie dei macchinari;
- dare indicazioni per realizzare migliorare impianti e attrezzature;
- gestire il problema della lubrificazione in fabbrica;
- stimolare l'attività di gruppi di miglioramento e la loro formazione.

Similmente occorrerà riconsiderare il rapporto tra i temi di crescita professionale, sia in termini di capacità di ispezione e diagnostica che di capacità tecniche, e gli attuali criteri di organizzazione del lavoro operaio, che sanciscono attualmente una netta divisione e parcellizzazione dei compiti tra gli operatori di produzione ed manutentori, inquadrandone in maniera rigida le mansioni e le fasce retributive.

È necessario rendersi conto che il differenziale competitivo è generato dagli uomini che operano in azienda, ecco quindi che il TPM, come tutte le attività che provengono dall'oriente, si indirizza proprio sulla crescita continua delle competenze/capacità delle persone che operano nella fabbrica, sulla quali bisogna investire in termini di formazione e crescita professionale.

2.6.4 IV Pilastro - Miglioramento Focalizzato (Focused Improvement)

Il IV pilastro del TPM centra la sua attenzione sull'analisi delle perdite e sulla corretta individuazione delle cause.

I responsabili della manutenzione autonoma dovranno far ricorso al miglioramento focalizzato ogni qualvolta avranno a che fare con perdite croniche, le cui cause siano difficilmente identificabili.

I concetti fondamentali su cui si basa questa tipologia di approccio alla manutenzione sono i seguenti:

- semplificazione dei processi (eliminare gli sprechi energetici);
- semplificazione delle macchine (ridurre il lavoro giornaliero di ispezione e lubrificazione);
- semplificazione dell'impianto (ridurre i costi di fermata e le ore necessarie per effettuare le riparazioni);
- individuazione delle criticità più elevate e soluzione di un problema alla volta (logica dei piccoli passi consolidati);
- miglioramento continuo, secondo il ciclo virtuoso del Plan – Do – Check - Act.

Il miglioramento focalizzato (Focused Improvement, FI) rappresenta il pilastro cardine per l'effettiva implementazione del TPM in quanto consente di semplificare il processo e l'impianto (fino a livello di parte di macchina) favorendone la comprensione dei problemi da parte delle persone.

La difficoltà maggiore che si incontra durante l'applicazione del FI consiste nel fatto che le persone coinvolte si chiedono quale possa essere la differenza tra le attività quotidiane di manutenzione autonoma e quelle del miglioramento focalizzato. Il punto chiave è il seguente: le attività di manutenzione autonoma non sempre permettono di conseguire gli obiettivi prefissati (mancanza di fondi e risorse, di tempo, di competenze da parte degli operatori) e di eliminare i problemi incontrati. È necessario allora intervenire in modo sistematico e strutturato per evitare che l'implementazione del TPM si areni drasticamente. In sintesi quindi, la differenza principale che distingue il FI dalla AM è costituita proprio dalla formazione del team di esperti preposti allo studio ed all'eliminazione dei

problemi: il team dovrebbe essere composto da tutti i rappresentanti delle funzioni coinvolte nel programma di miglioramento (ingegneri di produzione, di manutenzione, di progettazione, amministrativi).

Lo scopo fondamentale del FI è quello di proporre soluzioni valide per l'eliminazione o la riduzione delle 6 principali fonti di perdita presenti ("six big losses"); Il metodo adottato è quello di indagare direttamente gli input (4 M's: men, machines, materials, methods) della produzione per individuare le possibili cause di problemi e/o difetti. Così facendo, il FI permette di realizzare i cosiddetti "6 major results":

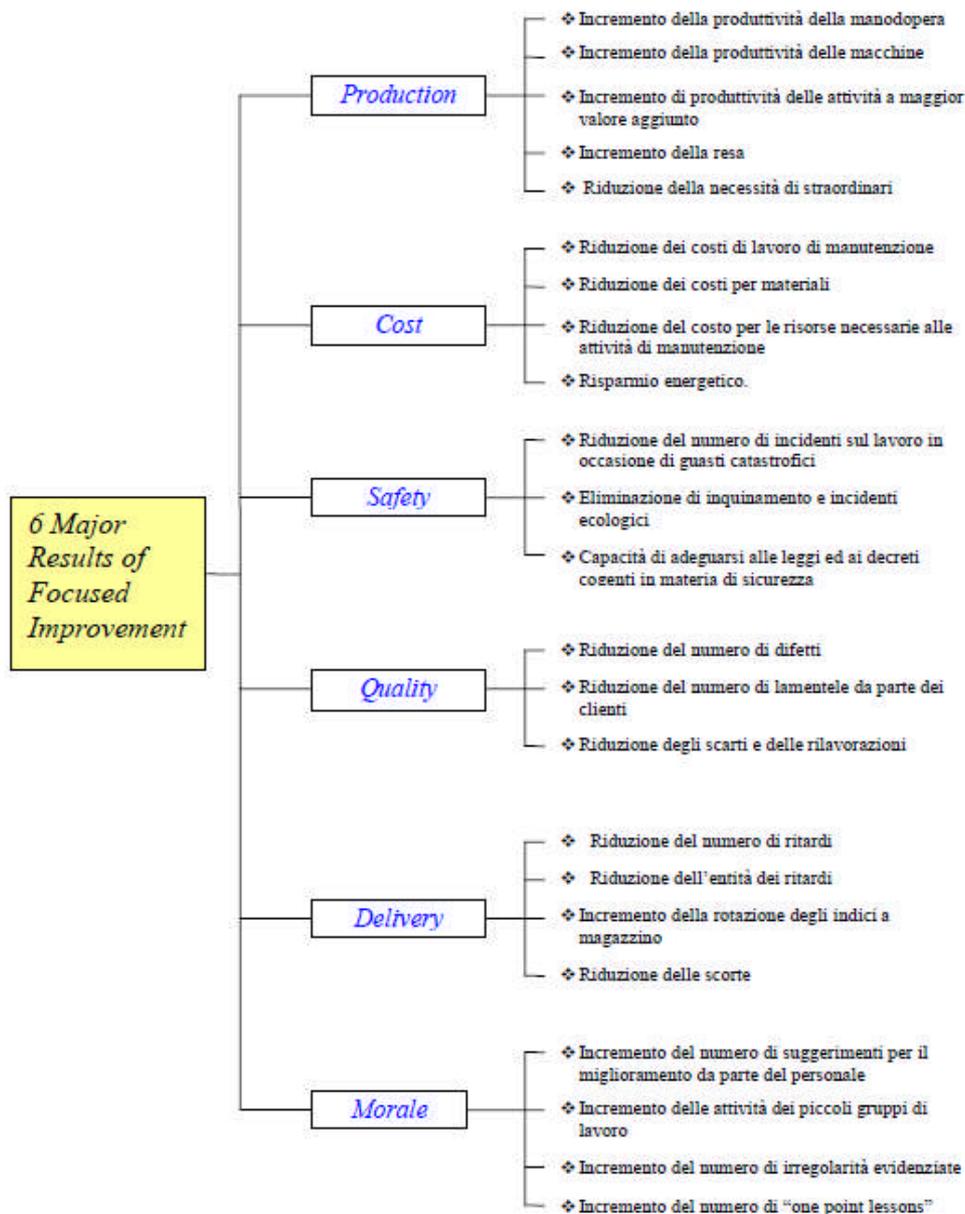


Figura 2.5 - I "6 Major Results" del Miglioramento Focalizzato

Uno dei problemi che potrebbero insorgere durante la fase di implementazione del FI è quello di un eccessivo impegno nelle sole attività di miglioramento focalizzato, a scapito delle attività di manutenzione ordinaria e del supporto necessario ai piccoli gruppi di lavoro presenti in azienda.

Il team preposto alla realizzazione del Miglioramento Focalizzato ha come obiettivi principali:

- l'annullamento di tutti i difetti, senza tralasciare i difetti di minore rilevanza;
- l'identificazione e la standardizzazione delle condizioni operative ottimali;
- quello di correggere in modo esaustivo tutti le deficienze individuate, indipendentemente dalla loro apparente importanza.

La procedura ottimale di implementazione del FI può essere riassunta nei punti fondamentali:

1. Scelta dell'obiettivo e formazione di un team apposito
2. Comprensione della situazione iniziale
3. Identificazione ed eliminazione delle anomalie
4. Analisi delle cause
5. Pianificazione del miglioramento
6. Implementazione del Miglioramento Focalizzato
7. Controllo dei risultati
8. Consolidamento dei risultati

Prima di procedere all'attuazione del Miglioramento Focalizzato, il team preposto dovrebbe assicurarsi di avere completato alcune attività basilari:

1. Comprensione completa della filosofia alla base del FI.
2. Comprensione delle tipologie di perdite che possono essere incontrate e delle logiche di funzionamento del processo e delle macchine.
3. Raccolta ed analisi dei dati relativi a guasti, perdite, difetti.
4. Definizione scrupolosa dello stato ottimale di funzionamento di un equipaggiamento e dei passi necessari per ristabilire le condizioni standard.
5. Comprensione delle tecniche e delle metodologie necessarie per ridurre guasti e difetti.

6. Acquisizione della capacità di comprendere “visivamente” il funzionamento del processo e delle macchine.
7. Tecniche analitiche utilizzate nel Miglioramento Focalizzato

Nel tentativo di rimuovere tutti i difetti, durante l’attuazione del miglioramento focalizzato si dovrebbe fare ricorso a tutte le tecniche conosciute in materia di manutenzione, scegliendo la più opportuna in funzione del caso specifico da affrontare.

Alcune di queste tecniche sono:

- PM Analysis: Si tratta di una tecnica deduttiva per analizzare fenomeni come guasti o difetti di un processo in termini dei principi fisici che li sottendono, evidenziando i meccanismi e le loro relazioni con i quattro parametri di input (4M’s). E’ particolarmente adatta per affrontare le perdite croniche, e particolarmente efficace se utilizzata per affrontare problemi che nascono da una grande varietà di cause complesse e strettamente interrelate, che non sono risolvibili con altri metodi o che richiederebbero troppo tempo se affrontate in modo tradizionale. Tale tecnica viene implementata dopo che si sono affrontati i problemi con altre tecniche e si sono ridotte le occorrenze dei difetti al 5-10%.
- Know-why (o why-why) analysis: metodo utilizzato a seguito di un’analisi causa-effetto per ricercare ed individuare i “perché” degli eventi, in maniera tale da individuare le possibili alternative risolutorie ai problemi emersi risalendo a ritroso lungo la catena causale.
- Fault Tree Analysis (FTA) o Analisi dell’Albero dei Guasti: metodo di analisi di tipo deduttivo che partendo da un’analisi “generale” e complessiva del tipo di guasto (o evento indesiderato sul sistema), arriva ad individuare i guasti sui componenti. La FTA permette, in modo grafico e logico, di collegare fra loro i guasti dei componenti di

un sistema. Lo scopo principale, non è però quello di individuare le cause dei guasti (scopo tipico invece della FMECA) bensì, partendo da un guasto sul sistema (Evento indesiderato), di metterlo in relazione funzionale con i guasti sui componenti (Eventi base). L'Evento indesiderato rappresenta il guasto relativo al sistema funzionale sotto esame, e può essere combinazione di numerose cause: esso avrà, cioè, un numero n di eventi che lo precedono e lo determinano ma nessun evento che lo succede. Il presentarsi simultaneo di guasti degli elementi funzionali che portano all'evento indesiderato definiscono la combinazione di cause. L'FTA è un metodo dalle applicazioni più varie: può essere usato sia preventivamente (approccio consigliato), oltre che per identificare le cause di non conformità già rilevate.

- Failure Mode Effects and Criticality Analysis (FMECA): L'acronimo FMECA identifica l'Analisi delle modalità, degli effetti e delle criticità dei guasti, ovvero una metodologia introdotta dalle normative militari USA-MIL, come strumento che consente di ricavare con efficacia i componenti critici dei sistemi. La FMECA è una metodologia operativa svolta in gruppi di lavoro e viene impiegata con successo nella progettazione di nuovi impianti e macchine, in quanto fornisce come prodotto il manuale di uso e manutenzione e la relativa lista dei ricambi strategici. Una volta infatti individuati i "componenti critici" e analizzate le loro "modalità di guasto", le politiche di manutenzione possono essere oggettivamente determinate. Il Gruppo di lavoro che realizza la FMECA deve essere composto da personale con diversi livelli di professionalità e con specializzazioni differenti a seconda della tipologia dell'impianto in oggetto, scelti fra coloro che presentano una conoscenza dell'impianto più approfondita. Obiettivo principale della FMECA è quello di fornire uno strumento analitico (oggettivo) per indirizzare in modo ottimale le risorse manutentive

disponibili previste dal Piano di Manutenzione Produttiva tra manutenzione correttiva a guasto, preventiva programmata, preventiva su condizione e migliorativa.

- Industrial Engineering (IE);
- 7 strumenti di Ishikawa (Quality Control Tools, QCT).

Nell'uso di questi strumenti è necessario tenere sempre presente la locazione del problema, l'oggetto dell'analisi e il fenomeno associato.

2.6.5 V Pilastro – Manutenzione Progressiva

Si parla di manutenzione progressiva quando si riesce a realizzare un'integrazione delle politiche di gestione per ottimizzare l'efficienza e l'efficacia delle attività manutentive.

Lo scopo è quello di definire un mix ottimale di manutenzione correttiva, programmata e predittiva, in maniera tale da ridurre il numero di guasti, i costi di gestione della manutenzione, l'MTBF e l'MTTR.

La realizzazione di questa forma evoluta di manutenzione richiede il miglioramento delle macchine, con l'applicazione della manutenzione autonoma e delle procedure di miglioramento focalizzato e con la gestione opportuna della manutenzione programmata e di quella su condizione; richiede un miglioramento delle tecnologie e delle competenze, prevedendo, ad esempio, sistemi di diagnostica e sistemi informativi di manutenzione, nuovi sistemi di ispezione e corsi di formazione del personale.

La manutenzione programmata ha poi il compito di stabilire e mantenere in condizioni ottimali attrezzature e processo. All'interno di un programma di sviluppo TPM, la manutenzione programmata rappresenta la metodica attività di costruzione e miglioramento continuo di un efficace ed efficiente sistema di gestione della manutenzione.

Uno dei fattori di successo della manutenzione programmata è il coordinamento con le attività della manutenzione autonoma svolte dai reparti produttivi. È importante che siano stabiliti standard che chiariscano i flussi, i compiti ed i tempi di realizzazione.

Affinché la manutenzione programmata sia applicata con successo è indispensabile prima di tutto riportare le macchine alle condizioni di base. È evidente che, se le condizioni di base non sono rispettate, si assiste al fenomeno dell'usura forzata e non è possibile definire intervalli corretti di sostituzione, per cui l'intero sistema di manutenzione programmata risulterebbe inutile.

I passi e le attività previste per la corretta implementazione della manutenzione progressiva sono riassunti nella tabella di seguito riportata.

FASI	ATTIVITA'
<p><i>Step 1</i> Valutare le macchine e capire la situazione attuale</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Preparare le schede macchina. - Valutare le macchine: stabilire i criteri di valutazione, dare una priorità alle macchine. - Definire un rank per guasti. - Capire la situazione: severità dei guasti, frequenze, costi, ecc. - Creare un insieme di indicatori e metodi di misura dei risultati.
<p><i>Step 2</i> Opporsi al deterioramento e correggere le debolezze.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Stabilire le condizioni base, opporsi al deterioramento ed abolire le cause di deterioramento forzato (supportare la manutenzione autonoma). - Condurre attività di miglioramento focalizzato per correggere i punti deboli ed aumentare il ciclo di vita. - Prevenire il ricorrere dei guasti maggiori.
<p><i>Step 3</i> Costruire un sistema di gestione delle informazioni computerizzato.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Costruire un sistema di gestione dei dati di guasto. - Costruire un sistema di gestione della manutenzione. - Costruire un sistema di gestione del budget di manutenzione. - Costruire un sistema di controllo delle parti di ricambio, disegni e dati tecnici.
<p><i>Step 4</i> Costruire un sistema di manutenzione periodica.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Preparare una manutenzione periodica. - Preparare un diagramma di flusso per il sistema di manutenzione periodica. - Migliorare gli standard
<p><i>Step 5</i> Costruire un sistema di manutenzione predittiva.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Introdurre dispositivi diagnostici. - Preparare un diagramma di flusso per il sistema di manutenzione predittiva. - Selezionare le macchine e componenti per la manutenzione predittiva ed estenderla gradualmente. - Sviluppare macchine e tecnologie di diagnosi
<p><i>Step 6</i> Valutare il sistema di manutenzione progressiva.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Valutare i miglioramenti di affidabilità: numero guasti e stop minori, MTBF.. - Valutare i miglioramenti di manutenibilità: numero di manutenzioni periodiche e predittive, MTTR. - Valutare i risparmi economici.

Tabella 2.6– I 6 step della manutenzione progressiva.

2.6.6 VI Pilastro - Addestramento

Una corretta ed efficace implementazione del TPM necessita di personale istruito, motivato e partecipe agli avvenimenti aziendali, in grado di attuare in modo efficiente ed efficace le azioni previste dal piano di introduzione e sviluppo del TPM. In tal senso assume un ruolo fondamentale

L'addestramento del personale, che deve essere svolto in modo rigoroso e sistematico.

Prima di ogni altra cosa occorre definire il livello di istruzione del personale.

Per riuscire in ciò si è soliti utilizzare lo schema "4 skill levels":

- Mancanza di competenze teoriche e pratiche;
- Mancanza di competenze pratiche;
- Mancanza di competenze teoriche;
- Possesso di entrambe le competenze

Dopodiché è opportuno indirizzare il processo formativo verso la creazione di figure professionali "multiskilled" ed estremamente competenti, che abbiano le capacità di:

- diagnosi,
- problem finding,
- problem solving,
- intervento,
- migliorare il servizio,
- lavorare in gruppo.

L'addestramento dovrebbe essere un mezzo per creare stimoli e motivazione e per fidelizzare il personale, rendendolo partecipe della missione dell'azienda.

Infine, bisogna favorire la creazione di un ambiente di lavoro in cui sia diffuso il concetto di "auto-addestramento": il personale dovrebbe trovare gli stimoli per accrescere il proprio bagaglio culturale e per apprendere nuove e più elevate competenze. Solo personale istruito e motivato può infatti mettere in atto in modo efficiente ed efficace le azioni previste dal TPM.

2.6.7 VII Pilastro – Qualità

Una corretta gestione della manutenzione si riflette inevitabilmente in un incremento della qualità del prodotto. La produzione infatti dipende dalla disponibilità e dalle condizioni operative delle macchine, per cui il controllo e l'accurata manutenzione di queste ultime possono incrementare il livello di qualità dei prodotti che vi vengono lavorati.

Gestire la manutenzione in un'ottica di qualità, significa operare in modo da prevenire problemi e difetti attraverso la corretta gestione dei processi e delle attrezzature. Dato che essa dipende generalmente da quattro fattori - uomini, materiali, macchine e metodi – affinché si ottengano i risultati desiderati dall'implementazione di questo pilastro, è necessario aver già correttamente sviluppato i pilastri della manutenzione autonoma, dell'addestramento, della manutenzione progressiva e del miglioramento focalizzato.

2.6.8 VIII Pilastro – Amministrazione

Il compito fondamentale del sistema amministrativo è quello di creare dei team di sviluppo del TPM e interfacciare i vari gruppi.

Implementando al contempo il pilastro del miglioramento focalizzato è possibile incrementare l'efficienza delle attività di riorganizzazione e ridurre le problematiche tipiche (ad esempio, a differenza della produzione, per l'amministrazione è difficile quantificare gli effetti delle attività di miglioramento ed i risultati ottenuti).

Le attività fondamentali che il sistema amministrativo è chiamato ad assolvere sono:

- motivare e sostenere i team di implementazione del TPM;
- supportare il management e diffondere la strategia aziendale;
- raccogliere dati;

- processare i dati;
- distribuire informazioni.

2.7 L'analisi delle perdite: l'OEE e le Six Big Losses

Adottare un approccio alla gestione della manutenzione orientato ai principi del Total Productive Maintenance significa imporsi come obiettivi principali:

- la riduzione delle perdite e la massimizzazione dell'efficienza degli impianti e delle attrezzature (Overall Equipment Efficiency);
- la diffusione di una metodologia di manutenzione estesa a tutta l'organizzazione basata sulla manutenzione preventiva-predittiva (manutenzione costruita su dati statistici);
- l'integrazione fra produzione e manutenzione, con lo scopo di condividere gli obiettivi di produttività e qualità;
- la promozione e la diffusione di gruppi autonomi di manutenzione al fine di migliorare le attività di manutenzione.

In quest'ottica s'inserisce la definizione ufficiale data dallo Japanese Institute of Plant Maintenance, secondo cui il TPM è un'insieme di procedure, tecniche e pratiche organizzative atte a:

- Massimizzare la performance totale delle macchine;
- Stabilire un sistema di manutenzione che copra l'intero ciclo di vita delle macchine;
- Coinvolgere al 100% il personale aziendale nelle varie attività;
- Promuovere la formazione di piccoli gruppi autonomi e fortemente motivati per lo svolgimento di attività manutentive;

- Costruire una “corporation” che massimizzi l’efficienza dei sistemi produttivi.

Il TPM abbraccia la filosofia “Zero Difetti – Zero Perdite – Zero Guasti”: in conformità a tale filosofia gli obiettivi del TPM vertono sull’eliminazione totale dei guasti e delle cause che li originano, dal momento che il verificarsi di una rottura o di un difetto provoca una diminuzione dello standard di funzionamento di una macchina o di un componente, con conseguente riduzione delle performance e dell’efficienza produttiva.

I guasti improvvisi che comportano la fermata dell’impianto, rappresentano “guasti con perdita totale delle funzionalità” (functionloss failures), mentre quelli che ne causano il deterioramento, ma non il blocco sono detti “guasti con riduzione delle potenzialità” (function-reduction failures).

Spesso si ha la tendenza a preoccuparsi dei guasti evidenti, ma il vero problema è costituito dai piccoli difetti, quali sporco, allentamento dei bulloni, mancanza di lubrificazione, abrasioni, che possono sembrare inizialmente insignificanti ma che causano il lento e continuo deterioramento delle macchine. Perciò è importante evidenziare i vizi nascosti e, una volta individuati, intervenire in modo da ripristinare le condizioni ottimali.

Per raggiungere l’obiettivo “Zero Guasti”, il modello giapponese prevede alcune contromisure basilari che devono essere recepite e fatte proprie dal sistema aziendale nel suo complesso:

- tenere sotto controllo le condizioni di base per il funzionamento dell’impianto (ad esempio lubrificazione, pulizia, corretto serraggio di bulloni e viti);
- rispettare le procedure operative di funzionamento dell’impianto;
- intervenire sulle parti deteriorate in modo da ripristinare la completa funzionalità;
- ridurre i punti deboli derivanti da una cattiva progettazione;

- migliorare la capacità del personale addetto alla produzione e alla manutenzione.

Per raggiungere invece l'obiettivo "zero perdite" è necessario evidenziare tutti i difetti e le loro cause, ossia effettuare la cosiddetta "analisi delle perdite". E' possibile individuare 6 contromisure di base per cercare di raggiungere tale obiettivo:

- 1. Eliminazione del deterioramento forzato mediante il ristabilimento delle condizioni operative di base.
- 2. Eliminazione del deterioramento forzato utilizzando procedure operative conformi alle specifiche di progetto degli equipaggiamenti.
- 3. Attuazione della manutenzione correttiva per riportare le macchine alle loro condizioni originali.
- 4. Riprogettazione dei processi.
- 5. Allungamento della vita utile delle macchine eliminando le debolezze del progetto iniziale (manutenzione proattiva).
- 6. Eliminazione dei guasti improvvisi migliorando le competenze del personale e la pianificazione della manutenzione.
-

Per attuare in maniera corretta questa nuova metodologia di gestione della manutenzione e fare in modo che le risorse siano sfruttate in maniera ottima, attraverso un miglioramento continuo, è necessario individuare opportuni indici di prestazione che possano rendere chiara la situazione di partenza e i miglioramenti dovuti alle varie azioni che l'azienda ha intrapreso.

L'indice più significativo per quantificare lo stato attuale della gestione della manutenzione e dell'efficacia delle soluzioni proposte è costituito dall'Overall Equipment Effectiveness (OEE). Questo indice, come si nota dalla sua definizione, che può essere tradotta in italiano in "Efficacia Totale dell'Impianto", a differenza di molti altri non prende in considerazione la sola efficienza degli impianti produttivi, intesa come rapporto tra ciò che viene

prodotto e ciò che sarebbe possibile realizzare, ma ne va a misurare l'efficacia, ampliando l'analisi e tenendo conto anche della qualità del prodotto e della disponibilità della macchina stessa.

La performance globale di un componente, di un equipaggiamento o di un intero impianto è governata dalla contemporanea presenza di tre fattori:

- la Disponibilità (A)
- la Performance (P)
- la Qualità (Q)

L'OEE è calcolato come prodotto dei tre fattori: $D \times P \times Q$

Si può subito notare come per avere un elevato valore di OEE sia necessario che tutti e tre gli indici siano alti, a significare che solo un impianto in cui tutte le risorse siano sfruttate in maniera ottimale può raggiungere elevate prestazioni in termini di Overall Equipment Effectiveness.

Particolarmente significativo è far notare come un incremento dell' 1% dell'OEE produca una riduzione del 10% dei costi diretti di manutenzione.

Da osservare inoltre che l'OEE è un indice di efficacia dell'impianto, quindi va a considerare esclusivamente le perdite interne ad esso. In particolare nel calcolo dell'OEE si tiene conto di quelle che si definiscono le "Six Big Losses":

Guasti

Una delle cause principali di perdita di disponibilità è data dai guasti che si presentano sugli impianti. Le macchine sono costituite da parti in movimento e svariati subsistemi nei quali ogni componente meccanico può deteriorarsi o rompersi e, soltanto quando è stato riparato il guasto o sostituita la parte, si può riprendere la produzione.

Molto spesso le cause di guasto generano segnali d'allarme prima che la macchina si rompa, per cui attraverso una corretta applicazione della

manutenzione autonoma, e possibilmente della manutenzione predittiva, sarebbe possibile individuare le anomalie prima che queste degenerino nella rottura o nella fermata dell'impianto. Tali segnali d'allarme possono essere suddivisi sulla base della frequenza di accadimento in due tipologie:

- sporadici, a loro volta classificabili in improvvisi, catastrofici o generalmente semplici da correggere;
- frequenti.

Set-up e Aggiustamenti

Lo scenario produttivo attuale prevede un'elevata differenziazione e la produzione di lotti di piccole dimensioni che determinano più volte al mese o anche più volte al giorno cambi di tipologia di prodotti. Cambiando la tipologia di prodotti bisogna sostituire anche gli utensili, gli stampi, le attrezzature e tutti quegli strumenti necessari alla produzione. Il tempo perso per il cambio degli utensili e dei materiali costituisce la perdita per attrezzaggio. Molto spesso questo tempo può aumentare a causa della pulizia della macchina, di piccoli aggiustamenti compiuti per garantire una qualità stabile al prodotto o dalla ricerca d'utensili, parti o persone che possono essere utili per far ripartire la produzione. Le perdite di disponibilità sono quindi derivanti da set-up ed aggiustamenti lunghi e difficoltosi, e nelle aziende con produzioni altamente differenziate possono generare inefficienze molto elevate.

Riduzioni di Velocità

Le macchine spesso funzionano ad una velocità più bassa di quella per cui sono state progettate. Questo avviene per cercare di mantenere stabile lo standard qualitativo dei prodotti che escono dalla macchina; ma in altri casi è proprio la persona a non porsi il problema di verificare quale sia il limite ottimale di sfruttamento delle macchine e i cicli di lavorazione sono definiti dagli operatori sulla base di "velocità di comodo" e non dall'ufficio tecnico

sulla base delle potenzialità tecniche della macchina stessa. Spesso la velocità per cui una macchina è stata concepita non è nota agli operatori e le lavorazioni sono eseguite sempre alla stessa velocità indipendentemente dalle loro caratteristiche.

Idle Time – Fermate Minori

Malfunzionamenti temporanei e di lieve entità non sono considerati come guasti, anche se si ripetono con frequenze molto elevate e costringono gli operatori ad interrompere spesso le attività produttive. Spesso se ne rileva una forte presenza nelle linee automatiche, dove può accadere che i componenti di un prodotto ostacolino il nastro trasportatore oppure che i sensori rilevino la presenza di corpi estranei e fermino la macchina (spesso si tratta di segnali errati, dovuti a sporco, polvere, ecc.). Tali eventi sono trattati come piccoli fastidi, ma in realtà rappresentano una delle perdite maggiormente critica per tutti gli impianti. Tra questo tipo di fermate vanno considerate anche le fermate compiute dall'operatore per le pause non definite da contratto.

Difetti di Qualità

I prodotti che non presentano le caratteristiche chieste dal cliente rappresentano evidentemente delle perdite. Un prodotto che invece è scartato subito dopo che è stato realizzato rappresenta una perdita di tempo, energia e materiale, in quanto generalmente prima di gettarlo, viene destinato ad una rilavorazione. Spesso i difetti di qualità derivano da una cattiva programmazione dei cicli di lavoro e non da reali problemi riscontrati sulle macchine; è pertanto doveroso prestare molta attenzione durante la fase di progettazione dei cicli da parte del personale tecnico ed una rigorosa esecuzione di questi da parte degli operatori di produzione.

Perdite d'avviamento o Start-up loss

Molte macchine impiegano un certo tempo prima di raggiungere le giuste condizioni operative. Variazioni ambientali, come temperatura ed umidità, possono rendere problematico l'avviamento e determinare prestazioni non idonee e disomogenee; variazioni nelle caratteristiche fisiche e chimiche delle parti di ricambio, dei liquidi refrigeranti o lubrificanti possono determinare differenze significative nella qualità del prodotto e nella velocità di lavorazione. Se durante questo periodo la macchina produce pezzi di qualità è opportuno considerare l'avviamento come riduttivo della disponibilità, in caso contrario come riduttivo della qualità. Anche se molte aziende non distinguono tra pezzi difettosi o che necessitano rilavorazioni, realizzati con le giuste condizioni operative, da quelli non conformi realizzati in avviamento, una tale distinzione risulta opportuna per valutare eventuali problemi riscontrati in tale fase.

Generalmente, i valori di OEE misurati dalle aziende prima dell'adozione del Total Productive Maintenance sono molto bassi, oscillando dal 50% al 60%; ciò significa che le aziende operano sfruttando metà della loro capacità produttiva. L'obiettivo da perseguire relativamente all'OEE è quello di massimizzare l'efficienza mediante la definizione delle relazioni ottimali tra le persone e gli strumenti di lavoro, ed attraverso l'eliminazione delle sei fondamentali fonti di perdita (Six Big Losses), le quali incidono sui tre fattori che determinano il valore dell'OEE.

2.8 Fasi per una corretta implementazione del TPM

Affinché l'implementazione del Total Productive Maintenance produca i risultati desiderati, occorre sviluppare un programma che generalmente si articola in 4 fasi:

1. Studio di Fattibilità,
2. Pianificazione,
3. Implementazione,
4. Consolidamento.

Da sottolineare il fatto che tale metodologia, così come in generale tutte le filosofie importate dall'oriente, prevede un approccio per piccoli passi, per cui l'iter indicato si applica a partire da una macchina (nel caso dell'industria di processo) o da una linea (nel caso dell'industria meccanica) particolarmente critica, estendendo in seguito i risultati raggiunti a tutto il sistema produttivo aziendale.

La Tabella 2.7 riporta gli step che necessariamente occorre seguire per una corretta applicazione di ciascuna delle 4 fasi, le quali, se regolarmente implementate, permettono di introdurre e sviluppare correttamente il TPM in qualsiasi azienda.

Come è possibile osservare il Programma per l'implementazione del TPM deve essere dettagliato, poiché le azioni da intraprendere occorre siano pianificate in modo molto preciso, sia in termini temporali, che di risorse (umane, tecniche ed economiche) necessarie. Una delle caratteristiche di spicco del TPM è, infatti, l'estrema sistematicità e metodicità del modo di procedere: un simile approccio, se la formulazione del programma è realizzata con cura, ha il vantaggio di evitare modifiche e correzioni che rallentano il percorso di realizzazione.

FASE	STEP
STUDIO DI FATTIBILITA'	Raccogliere i dati per prendere le decisioni
	Analizzare impianti e macchine (Analisi delle Perdite)
	Analizzare le caratteristiche del personale disponibile
	Analizzare il rapporto costo/benefici (ROI)
	Progettare alternative di sviluppo
PIANIFICAZIONE	Annuncio formale del progetto TPM (predisporre lavagne riportanti il programma di introduzione del TPM e gli obiettivi, nonché i risultati a cui passo dopo passo si perviene)
	Creare l'organizzazione per il TPM (TPM Coordinator, team di supporto)
	Addestrare e istruire il personale (definizione di piani di formazione e addestramento focalizzati – One Point Lesson)
	Definire e sviluppare la Vision, le Politiche e gli Obiettivi del TPM
	Sviluppare i Piani Operativi per l'implementazione del TPM (Master Plan)
	Assegnare le responsabilità delegando e rendendo autonomo il personale (Chi, Cosa, Come, Quando, Perché)
IMPLEMENTAZIONE	Implementare il Programma Pilota (avviare la Manutenzione Autonoma, il Miglioramento Focalizzato e la Manutenzione Progressiva)
	Proseguire mediante interventi focalizzati (piccoli passi consolidati tesi all'eliminazione del 75% delle fermate ed al raggiungimento del 30% degli obiettivi del programma pilota)
	Rinnovare gli studi di fattibilità e gli obiettivi
	Gestire accuratamente i processi
	Implementare tutti i pilastri del TPM (eliminazione del 90-95% delle fermate e raggiungimento del 60-70% dei risultati)
CONSOLIDAMENTO	Quantificare i risultati
	Standardizzare metodi e procedure ed estendere le metodologie a tutte le macchine
	Arricchire il bagaglio di competenze e conoscenze del personale
	Proporre e ricercare obiettivi sempre più importanti
	Cercare di ottenere una certificazione relativa al sistema TPM implementato

Tabella 2.7– Programma per l'implementazione del TPM.

Capitolo 3: TEORIA DELL’AFFIDABILITÀ

3.1 - Definizioni e parametri affidabilistici

Per descrivere compiutamente e approfonditamente la politiche manutentive, è necessario introdurre alcune definizioni e alcuni parametri che derivano dalla “Teoria dell'affidabilità”.

La disciplina nota con il nome di affidabilità e stata sviluppata con lo scopo di fornire metodi per valutare se un prodotto o un servizio sarà funzionante per la durata in cui l’utente lo richiederà. Questi metodi consistono in tecniche per determinare cosa potrebbe non funzionare, come si possa prevenire il guasto e, nel caso in cui il guasto si verifichi, quali siano gli interventi più adatti a ripristinare rapidamente il funzionamento e limitare le conseguenze.

La definizione più completa è quella che indica l’affidabilità di un elemento/sistema come la probabilità che l’elemento/sistema:

- a. eseguirà una specifica funzione
- b. sotto specifiche condizioni operative ed ambientali
- c. ad un dato istante e/o per un prefissato intervallo di tempo

La teoria dell'affidabilità è una materia molto vasta; di seguito verrà trattata in maniera semplificata analizzando gli aspetti inerenti la manutenzione.

In generale si indica con il termine guasto la “cessazione dell’attività di un dispositivo ad adempiere alla funzione richiesta”, ovvero una variazione delle prestazioni del dispositivo che lo renda inservibile per l’uso al quale esso era destinato. In questi termini risulta guasto anche un dispositivo che non esegue correttamente la funzione per la quale è stato progettato.

ESEMPIO Una stampante che non stampa e certamente guasta, ma si può ritenere guasta anche una stampante che stampa i caratteri deformandoli o sporcando i fogli (qualità).

In questo senso possiamo distinguere:

- d. *guasti parziali*: determinano una variazione delle prestazioni del dispositivo tale da non compromettere del tutto il funzionamento (degrado delle prestazioni o perdita di qualità del prodotto);
- e. *guasti totali*: causano una variazione delle prestazioni del dispositivo tale da impedirne del tutto il funzionamento;
- f. *guasti intermittenti*: dovuti ad una successione casuale di periodi di guasto e di periodi di funzionamento, senza che ci sia alcun intervento di manutenzione (esempio tipico il blocco di funzionamento di un computer che riprende a funzionare dopo che viene spento e riacceso).

Occorre precisare che la condizione di guasto si riferisce in generale al solo dispositivo preso in esame: se tale dispositivo è inserito in un sistema più complesso, il suo guasto può anche non causare il guasto dell'intero sistema, pur avendo effetti negativi sulla sua affidabilità.

ESEMPIO Un guasto meccanico al motore rende inservibile un'automobile mentre se si guasta il tachimetro l'automobile continua a funzionare, anche se non riusciamo a sapere a che velocità stiamo procedendo.

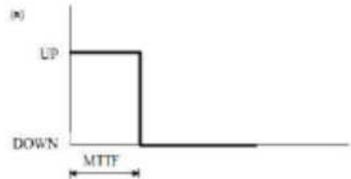
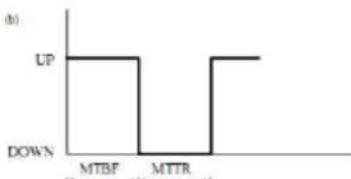
Anche in questo caso possiamo allora distinguere:

- g. *guasti di primaria importanza*: quelli che riducono la funzionalità dell'intero sistema del quale fanno parte;
- h. *guasti di secondaria importanza*: quelli che non riducono la funzionalità dell'intero sistema del quale fanno parte.

Ancora più gravi dei guasti di primaria importanza sono quei guasti che rappresentano un rischio per l'incolumità delle persone e che possiamo quindi definire guasti critici.

I componenti possono essere suddivisi in due categorie:

- i. riparabili (soggetti a cicli di funzionamento, rottura, funzionamento)
- j. non riparabili (soggetti a sostituzione in seguito a un guasto)

Componente	Terminologia I	Terminologia II
Non riparabile		
Riparabile		

Siccome tutti i componenti fino al primo guasto subiscono lo stesso ciclo, possiamo considerare i componenti riparabili come componenti non riparabili e applicare le medesime formule senza introdurre errori considerevoli.

Per semplificare la trattazione si impongono le due seguenti ipotesi:

- k. Il componente presenta solo due stati possibili: di funzionamento e non funzionamento;
- l. Il passaggio da uno stato all'altro avviene istantaneamente.

3.2. Definizioni

3.2.1. Il Guasto

Nello studio delle attività manutentive il fenomeno oggetto di studi statistici e probabilistici è il guasto, il quale è definito dalla normativa (norma UNI EN 13306) come “la cessazione dell’attitudine di un’entità a eseguire la funzione richiesta”.

Il guasto determina quindi, come conseguenza del suo accadimento, l’inabilità dell’entità ad eseguire la funzione cui è preposta. In questi termini risulta guasto anche un’entità che non esegue correttamente la funzione per la quale è stata progettata, infatti è bene precisare che per guasto non si intende unicamente il collasso totale e complessivo del funzionamento dell’entità, ad esempio una stampante che non stampa è certamente guasta, ma si può ritenere guasta anche una stampante che stampa i caratteri deformandoli o sporcando i fogli (qualità).

Occorre precisare che la condizione di guasto si riferisce in generale al solo componente preso in esame: se tale componente è inserito in un sistema più complesso, il suo guasto può anche non causare il guasto dell’intero sistema, pur avendo effetti negativi sulla sua affidabilità, ad esempio un guasto meccanico al motore rende inservibile un’automobile mentre se si guasta il tachimetro l’automobile continua a funzionare, anche se non riusciamo a sapere a che velocità stiamo procedendo.

3.2.2 L’Affidabilità

La normativa (norma UNI EN 13306) definisce l’Affidabilità come “l’attitudine di un’entità a svolgere la funzione richiesta in date condizioni, durante un intervallo di tempo stabilito”.

In altre parole l’Affidabilità (in inglese Reliability) non è nient’altro che la probabilità che la suddetta entità funzioni correttamente nel modo richiesto senza guastarsi in un intervallo di tempo assegnato, ovviamente fissate le condizioni operative o di impiego a cui è sottoposto e le condizioni ambientali in cui opera.

Da ciò si deduce che, affinché l’affidabilità di un’entità sia determinabile, è necessario:

- che sia fissato in modo univoco il criterio (C) per giudicare se un’entità è funzionante o non funzionante;
- che le condizioni ambientali (A) e d’impiego siano stabilite e mantenute costanti nel periodo di tempo considerato;
- che sia definito l’intervallo di tempo t (tempo di missione) durante il quale si vuole che l’entità si trovi in stato operativo cioè che funzioni.

L’affidabilità, indicata con R, risulta in generale funzione di tre variabili:

$$R = R(C,A,t)$$

Fissate le prime due condizioni, l’affidabilità di un’entità diventa funzione solo del tempo:

$$R = R(t)$$

Infatti se si parla di affidabilità, il fattore di cui bisogna sempre tener conto è sicuramente l’intervallo di tempo t detto tempo di funzionamento o durata di missione ovvero il tempo durante il quale si richiede che l’entità sia effettivamente funzionante. Pertanto una definizione di affidabilità non può prescindere dal far riferimento ad uno specificato tempo di missione.

E’ bene sottolineare che il tempo t non è il tempo solare e quindi non misura l’età reale dell’entità, pertanto detto ciò è chiaro che l’istante $t = 0$ non coincide con l’inizio dell’utilizzazione dell’entità, bensì con l’inizio della sua missione. Inoltre il termine tempo è da intendersi in senso abbastanza lato, infatti tale termine è usato come sinonimo di durata comunque sia essa misurata: in chilometri, in numero di giri o effettivamente in ore.

In generale l'affidabilità esprime la permanenza della qualità di un'entità nel tempo, infatti un'entità è affidabile se conserva nel tempo la qualità e quindi funziona correttamente senza guastarsi, ad esempio un'affidabilità di 0.8 significa che l'entità ha la probabilità del 80% di funzionare correttamente senza guastarsi, mentre il 20% di non funzionare correttamente. Quindi l'affidabilità non è una grandezza deterministica ma una probabilità che, come una variabile aleatoria, può essere valutata solo in termini probabilistici; essa non fornisce quindi la certezza che un guasto si verifichi o meno, ma applicata in modo sistematico su un sistema, ci dà risultati di notevole utilità sui quali è possibile basare importanti decisioni sulle modalità di funzionamento di un impianto.

3.3 Grandezze affidabilistiche

In ambito manutentivo è bene sottolineare che il concetto di affidabilità è strettamente legato a quello di funzionamento, ovvero di non funzionamento, e pertanto al processo di rottura o guasto di una generica entità (componente o sistema). Questo processo dipende da numerosi fattori, molti dei quali non controllabili, uno di essi è proprio il tempo che intercorre dall'inizio dell'operatività dell'entità fino al suo guasto (cessazione della sua funzione), il quale viene chiamato tempo al guasto o tempo di vita.

Dal momento che non si è in grado di sapere con certezze l'istante di tempo in cui un'entità può guastarsi ovvero l'istante in cui un'entità passa dallo stato di corretto funzionamento a quello di avaria o malfunzionamento, il tempo al guasto non è una grandezza deterministica ma casuale, pertanto viene considerata come una variabile aleatoria.

Indicato con T la variabile aleatoria tempo al guasto possiamo definire le 4 grandezze affidabilistiche:

- densità di probabilità di guasto;

- inaffidabilità;
- affidabilità;
- tasso di guasto.

La densità di probabilità di guasto (o densità di probabilità del tempo al guasto) o anche distribuzione della probabilità di guasto (pdf - probability density function) è definita come quella funzione $f(t)$ tale che la probabilità infinitesima che il componente si guasti al tempo t o in un suo intorno infinitesimo dt è pari a $f(t)dt$. Infatti $f(t)dt$ è la probabilità che il guasto si verifichi fra l'istante t e l'istante $(t+dt)$ cioè nell'intervallo $(t, t+dt]$.

Analiticamente:

$$f(t) = \lim_{dt \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + dt)}{dt}$$

Graficamente, la *funzione densità di probabilità* di guasto $f(t)$ presenta un andamento del tipo in fig. 2.1.

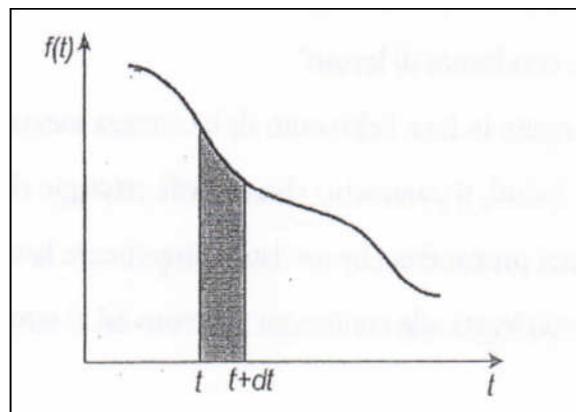


Fig. 2.1: Densità di probabilità di guasto

Per questa funzione vale la ben nota condizione di normalizzazione:

$$\int_0^{\infty} f(t) dt = 1$$

La quale esprime il fatto che la probabilità che si verifichi un guasto in un tempo operativo infinito è pari all'unità, che equivale a dire che un qualunque

componente ha la certezza di guastarsi se fatto lavorare indefinitamente, cioè prima o poi tende a guastarsi.

Una volta che si conosce il concetto di densità di probabilità di guasto $f(t)$, si può calcolare, attraverso la sua integrazione nel tempo, la funzione di distribuzione cumulata della probabilità di guasto o semplicemente probabilità cumulata di guasto o inaffidabilità.

La probabilità di guasto o l'inaffidabilità $F(t)$ è la probabilità che il componente si guasti prima del tempo t , analiticamente è pari all'integrale tra 0 e T della distribuzione di probabilità:

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(t)dt \Rightarrow \text{Inaffidabilità}$$

Graficamente, l'inaffidabilità o la probabilità cumulata di guasto al tempo t è l'area sottesa dalla funzione $f(t)$ tra l'istante iniziale ($t = 0$) e l'istante finale t nel quale si desidera calcolare $F(t)$.

Invece l'Affidabilità $R(t)$, detta anche probabilità di successo o di sopravvivenza al tempo t è la probabilità che il componente sia ancora funzionante al tempo t o che esso non si guasti fino al tempo t , essa si ottiene come complemento a 1 della probabilità cumulata di guasto o inaffidabilità al tempo t . Analiticamente è data dalla seguente relazione:

$$R(t) = P(T > t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt = \int_t^\infty f(t)dt$$

Quando si parla di affidabilità e di inaffidabilità lo si fa in riferimento ad uno specifico tempo di missione o di funzionamento t (tempo durante il quale è richiesto il funzionamento dell'entità).

Notiamo che all'inizio della missione, il componente è perfettamente funzionante pertanto all'istante $t = 0$ l'affidabilità è pari ad 1, mentre dopo un tempo infinito il componente ha la certezza di guastarsi, pertanto in $t = \infty$ l'inaffidabilità è pari ad uno. Quindi valgono le seguenti relazioni:

$$F(t = 0) = 0 ; R(t = 0) = 1 \quad \text{e} \quad F(t = \infty) = 1 ; R(t = \infty) = 0$$

Infine, va introdotto il tasso (o rateo) di guasto il quale rappresenta il parametro più utilizzato nello studio di affidabilità di un'entità, infatti la sua importanza si deve al fatto che permette di valutare, in un certo campione di componenti, come cambia la probabilità che un componente si guasti all'aumentare del tempo di utilizzo. Praticamente il tasso di guasto è quel parametro che consente di caratterizzare o quantificare la propensione al guasto di un'entità sopravvissuta fino ad un determinato istante di tempo. A differenza dell'inaffidabilità $F(t)$ e dell'affidabilità $R(t)$ le quali sono delle probabilità (e pertanto dei numeri compresi tra zero e uno), il tasso di guasto è invece una velocità o frequenza di guasto, ha quindi come dimensione il reciproco del tempo e si misura comunemente in "guasti per unità di tempo" (per esempio guasti/anno), infatti può essere interpretato come il numero di guasti nell'unità di tempo riferito però ai componenti ancora funzionanti in t . Il tasso di guasto è definito come quella funzione $\lambda(t)$ tale che la probabilità infinitesima che il componente si guasti al tempo t o in un suo intorno infinitesimo dt è pari a $\lambda(t)dt$, nell'ipotesi che in t sia ancora funzionante. Infatti $\lambda(t)dt$ esprime la probabilità che il componente, ancora funzionante al tempo t , si guasti nell'intervallo $(t, t+dt]$.

Analiticamente:

$$\lambda(t) = \lim_{dt \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + dt | T > t)}{dt}$$

Il numeratore di questa espressione rappresenta la probabilità di avere un guasto in intervallo dt immediatamente successivo all'istante t , condizionata al fatto che il componente sia ancora funzionante al tempo t .

Inoltre è bene sottolineare che le formule di $f(t)$ e $\lambda(t)$ sono molto simili, quasi identiche, però hanno significati diversi. La differenza sta nel fatto che la funzione $f(t)$ si basa sulla totalità della popolazione dei componenti, invece la funzione $\lambda(t)$ solo sulla popolazione residua, cioè sui soli componenti sopravvissuti fino al tempo t , infatti si noti che la probabilità che definisce il tasso di guasto è una probabilità condizionata cioè condizionata

dal fatto che il componente rimasto in buono stato fino al tempo t , si guasti nell'unità di tempo immediatamente successiva cioè nell'intervallo $(t, t+dt)$.

Dal punto di vista operativo per determinare il tasso di guasto si utilizza il Teorema di Bayes (sulla probabilità condizionata), per cui:

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

da cui si ottiene che l'affidabilità $R(t)$ di un componente è pari al rapporto fra la sua densità di probabilità di guasto $f(t)$ ed il suo tasso di guasto $\lambda(t)$:

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

Per rendere più operativa la formula di Bayes, bisogna tener presente che la densità di probabilità di guasto $f(t)$ è la derivata della funzione di inaffidabilità o la derivata cambiata di segno dell'affidabilità:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{d[1 - R(t)]}{dt} = \frac{-dR(t)}{dt}$$

Sostituendo si ha

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \Rightarrow f(t) = \lambda(t)R(t) = \frac{-dR(t)}{dt} \Rightarrow \lambda(t)dt = \frac{-dR(t)}{R(t)}$$

Integrando e risolvendo :

$$\int_0^t \lambda(t)dt = - \int_0^t \frac{dR(t)}{R(t)} = - [\ln(R(t)) - \ln(R(0))]]$$

Considerando che $R(0) = 1 \rightarrow \ln(R(0)) = \ln(1) = 0$ si ha :

$$\int_0^t \lambda(t)dt = - \ln(R(t))$$

Elevando quindi ad esponente entrambi i membri si ha:

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

Tale relazione rappresenta la legge generale, che consente di calcolare la funzione di affidabilità $R(t)$ partendo dalla conoscenza, o quanto meno dall'ipotesi di conoscenza, del tasso di guasto $\lambda(t)$ della famiglia dei componenti di interesse.

Infine, con pochi ulteriori passaggi analitici, si possono ottenere le altre due funzioni affidabilistiche :

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

$$f(t) = \lambda(t) \cdot R(t) = \lambda(t) \cdot e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

Quindi è evidente che il tasso di guasto rappresenta la grandezza fondamentale ai fini dello studio dell'affidabilità di un componente o di un sistema, infatti partendo dalla conoscenza del tasso di guasto $\lambda(t)$ possiamo ricavare le funzioni affidabilistiche $f(t)$, $F(t)$ e $R(t)$ le cui espressioni hanno una validità generale nello studio dell'affidabilità.

3.4 Descrizione della vita dei componenti

Stabilite le relazioni fondamentali tra le grandezze affidabilistiche è possibile studiare il comportamento a guasto dei componenti durante la loro vita operativa o di esercizio.

In generale la frequenza con cui i componenti si guastano nel corso della loro vita operativa, può essere rappresentata dall'andamento del tasso di guasto $\lambda(t)$, il quale tende, a cambiare con il tempo, il che equivale a dire come cambia nel tempo la propensione dei componenti sopravvissuti a guastarsi. Infatti ribadiamo che il tasso di guasto $\lambda(t)$ caratterizza la propensione al guasto di un componente sopravvissuto fino ad un determinato istante di tempo.

In particolare l'andamento tipico del tasso di guasto dei componenti meccanici ed elettromeccanici varia nel corso della vita operativa del componente come illustrato nella curva a “vasca da bagno” presentata nella fig. 3.2

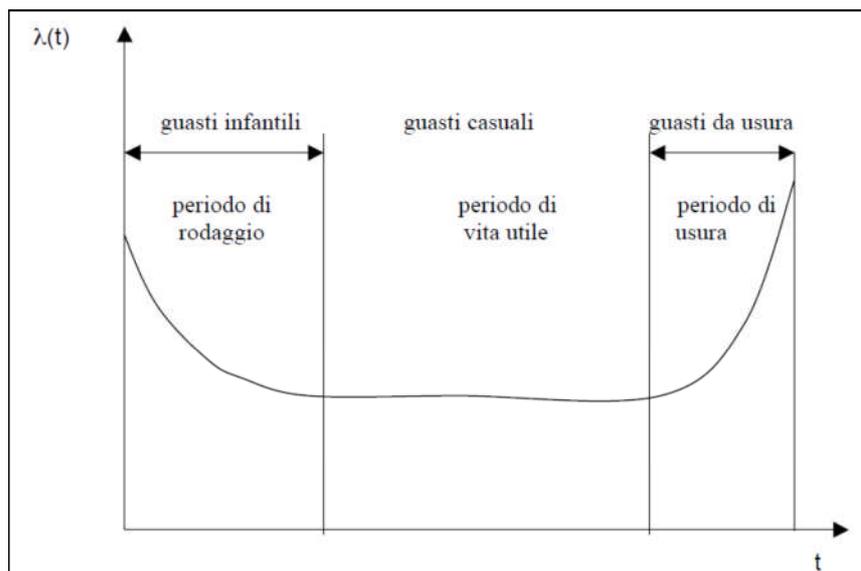


Fig. 3.2: Tasso di guasto: andamento a “vasca da bagno”

Dalla figura si vede che tutto l’intervallo di tempo è diviso in tre periodi che caratterizzano tre distinte fasi della vita operativa del componente (infanzia, maturità e vecchiaia) in corrispondenza delle quali abbiamo tre diverse tipologie di guasto:

I. Guasti Infantili

In questa fase, riferita all’infanzia del componente, il tasso di guasto inizialmente è elevato, (elevata propensione al guasto), però poi decresce molto rapidamente, fino a stabilizzarsi a un valore quasi costante, questo perché si manifestano guasti per lo più riconducibili a difetti di progetto, di fabbricazione o di installazione o a difettosità dei materiali, i quali però tendono a scomparire con l’aumentare dell’età di funzionamento del componente, che può variare da poche decine ad alcune centinaia di ore, per questo motivo, questa fase è detta anche di rodaggio o di mortalità infantile.

II. Guasti Casuali

In questa fase, riferita alla vita utile o maturità del componente, il tasso di guasto è praticamente costante o approssimativamente costante (cioè la propensione al guasto non cambia con l’aumento

della vita operativa del componente), infatti in questa fase il tasso di guasto raggiunge il suo valore più basso, che rimane costante per l'intera fase, perché i guasti sono per lo più casuali o dovuti ad errori operativi. Inoltre questa fase è detta anche di funzionamento normale.

III. Guasti per usura

In questa fase, riferita alla vecchiaia del componente, il tasso di guasto cresce notevolmente nel tempo (cioè cresce con l'aumentare della vita operativa del componente) questo perché i guasti sono dovuti principalmente all'usura, al degrado, alla fatica e quindi allo sfruttamento del componente. Infatti, quando un componente arriva alla fine della sua vita utile, iniziano a manifestarsi malfunzionamenti, dovuti proprio al fenomeno dell'invecchiamento, che ne aumentano la propensione al guasto, proprio perché un componente è progettato per durare una certa vita utile e non di più. Per evitare questa tipologia di guasto si ricorre a un ricambio preventivo della popolazione che comporta però il ritorno dell'insorgenza dei guasti di tipo infantile.

Possiamo quindi affermare che le fasi di vita di un componente sono ben visibili nell'andamento del tasso di guasto e data la forma particolare, il diagramma a “vasca da bagno” consente di visualizzare in modo chiaro la precedente classificazione di guasti cioè infantili, casuali e per usura, però è bene sottolineare che durante il periodo di rodaggio i guasti di tipo casuale si sovrappongono ai guasti infantili; allo stesso modo, nel periodo finale dei guasti per usura, a questi si sovrappongono ancora i guasti di tipo casuale.

Inoltre dobbiamo osservare che la curva a vasca da bagno non ha valore universale. Infatti, esistono componenti per i quali il periodo di rodaggio è nullo (per esempio, nel caso in cui un controllo di accettazione rigoroso elimina tutti i componenti non conformi), ed altri che praticamente non invecchiano mai ed inoltre possiamo anche dire che, per la grande

maggioranza dei componenti esiste un lungo periodo nel quale il tasso di guasto è praticamente costante.

In conclusione possiamo affermare che in genere l'analisi dell'affidabilità si basa proprio sullo studio dell'andamento del tasso di guasto, infatti dalla conoscenza di tale andamento è possibile definire o modificare la politica di manutenzione, in particolare gli interventi di manutenzione preventiva per la sostituzione di un componente vengono disposti all'inizio della fase di usura.

3.5 Modelli di Affidabilità

Ricordiamo che la funzione affidabilità $R(t)$ di un'entità è definita dalla seguente relazione:

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

Tale relazione dovrebbe consentire, in linea teorica, di calcolare l'affidabilità $R(t)$ partendo dalla conoscenza del tasso di guasto $\lambda(t)$, però è bene sottolineare che anche nell'ipotesi di conoscere l'andamento di $\lambda(t)$, in alcune occasioni non sarà comunque possibile valutare $R(t)$ in forma analitica, secondo la relazione scritta sopra.

Quindi per risolvere tale problema, esistono, nella letteratura dell'ingegneria di affidabilità, molti modelli o distribuzioni (cioè delle forme analitiche tipiche) che si prestano a descrivere l'affidabilità per diversi tipi di componenti. Ovviamente occorre identificare tra di esse, quelle che meglio possano descrivere l'andamento del tasso di guasto e dell'affidabilità del componente (oggetto di studio) lungo le varie fasi operative, cioè per ognuna delle tre fasi di vita del componente è necessario individuare i modelli teorici che descrivano meglio l'andamento delle funzioni: $\lambda(t)$, $f(t)$, $F(t)$ e $R(t)$; ricordiamo inoltre che nota almeno una di esse, le altre si derivano dalle

relazioni generali presentate precedentemente, risultando in questo modo intercambiabili.

E' bene sottolineare che conoscere il modello o la distribuzione di affidabilità di un'entità (ad esempio di un componente o di una macchina) è fondamentale per poter prendere decisioni preventive sulle politiche che devono essere adottate per la sua manutenzione.

I principali modelli di affidabilità (o distribuzioni di probabilità) impiegati in ambito manutentivo sono:

- Modello Esponenziale;
- Modello Weibull.

3.5.1. Modello Esponenziale

Il modello (o la distribuzione) esponenziale è il modello più semplice e più noto tra i modelli affidabilistici.

Tale modello può essere utilizzato solamente per calcolare l'affidabilità di un componente durante la fase di vita utile, dove il tasso di guasto può essere considerato costante, cioè nel caso in cui i guasti sono legati a fenomeni casuali o accidentali. Ciò è dovuto principalmente al fatto che questa distribuzione riassume il comportamento tipico dell'accadimento di fenomeni completamente aleatori, cioè quelli le cui cause sono totalmente accidentali.

Quindi nel caso particolare in cui il tasso di guasto $\lambda(t)$ si mantiene costante nel tempo, il quale lo si indica semplicemente con λ , la funzione affidabilità può essere espressa come segue:

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

essa rappresenta la più semplice funzione o distribuzione di affidabilità, in quanto è definita da un solo parametro cioè dal tasso di guasto $\lambda = \text{cost.}$ e viene detta distribuzione (o funzione) esponenziale negativa. Un tasso di

guasto costante corrisponde, quindi, a una funzione affidabilità che decresce esponenzialmente con “velocità” pari a λ .

Si dice che la variabile aleatoria tempo al guasto T segue una distribuzione di esponenziale di parametro λ e si scrive: $T \sim \text{Exp}(\lambda)$.

A partire dalla funzione affidabilità si ottiene la funzione inaffidabilità o probabilità di guasto al tempo t , la quale viene rappresentata dalla seguente relazione:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

mentre la funzione densità di probabilità di guasto è rappresentata dalla seguente relazione:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lambda \cdot R(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}$$

Si rappresenta di seguito l’andamento qualitativo dell’affidabilità e della probabilità di guasto (inaffidabilità) in caso di distribuzione esponenziale (fig. 3.3):

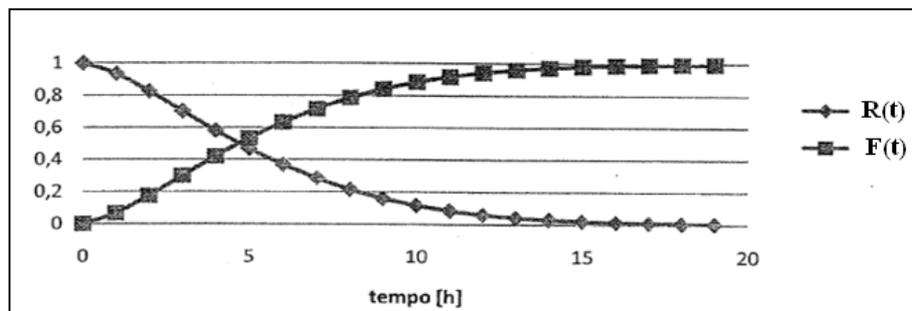


Fig. 3.3: Affidabilità e Inaffidabilità in caso di distribuzione esponenziale

Inoltre è bene sottolineare che il tasso di guasto costante implica che non c’è un istante di tempo più probabile in cui il componente si possa rompere. In altre parole la velocità di rottura non dipende dal tempo: il guasto è un processo puramente casuale (o alla Poisson). Infatti nella fase di vita utile il componente ha un comportamento indipendente dalla sua storia precedente, diciamo quindi che questo è il caso di componenti caratterizzati dalla cosiddetta proprietà di non memoria dal punto di vista affidabilistico.

Infine si può affermare che il modello o la distribuzione esponenziale risulta molto utile per descrivere il comportamento dei componenti elettronici, però con buona approssimazione può essere utilizzato anche per i componenti meccanici ed elettromeccanici.

3.5.2 Modello di Weibull

Il modello o la distribuzione di Weibull prende il nome dall'ingegnere svedese Walodi Weibull che alla fine degli anni trenta pervenne alla sua formulazione studiando le modalità di guasto di materiali metallici per effetto del fenomeno della fatica.

La distribuzione di Weibull, grazie alla sua duttilità (o alla sua grande capacità di adattamento) può essere utilizzata per modellare tutte le fasi del ciclo di vita di una entità, quindi può essere usata per descrivere l'affidabilità di un'entità sia durante la fase dei guasti infantili, sia durante la vita utile e sia durante la fase dei guasti per usura, ciò si ottiene semplicemente variando i valori dei parametri caratteristici della distribuzione. E' bene sottolineare che tale caratteristica la rende la più popolare tra le funzioni analitiche che approssimano la legge di affidabilità di un'entità, infatti attualmente, la distribuzione di Weibull è la distribuzione più utilizzata per descrivere l'affidabilità di un'entità.

Il modello o la distribuzione di Weibull, che può essere visto come una generalizzazione del modello esponenziale, è caratterizzata da due parametri α e β positivi e assume la seguente forma:

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

A partire dalla funzione affidabilità si ottiene la funzione inaffidabilità o probabilità di guasto al tempo t , la quale viene rappresentata dalla seguente forma:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$$

mentre la funzione densità di probabilità di guasto è rappresentata dalla seguente relazione:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lambda(t) \cdot R(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$$

Ed infine il tasso di guasto è rappresentata dalla seguente relazione:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1}$$

Si dice che la variabile aleatoria tempo al guasto T segue una distribuzione di Weibull con parametro α e β e si scrive: $T \sim W(\alpha, \beta)$.

Il parametro α è detto parametro di scala o anche vita caratteristica del componente, ha la dimensione di un tempo, infatti esso rappresenta il tempo del ciclo di vita di un componente entro cui lo stesso si sarà guastato con probabilità del 63,2%. (Ad esempio se $\alpha = 100$ ore, allora l'istante in cui ci si aspetta che il componente si sia guastato con il 63,2% di probabilità è pari a 100 ore).

Mentre il parametro β è un numero puro o adimensionale ed è detto parametro di forma del modello di Weibull, questo perché variando questo parametro, varia la forma della funzione densità di probabilità. Infatti al variare del parametro β , la funzione $f(t)$ può assumere forme completamente diverse come si vede in fig. 3.4. In particolare se

- $\beta \leq 1$ la funzione è monotona decrescente;
- $\beta > 1$ prima cresce e poi decresce.

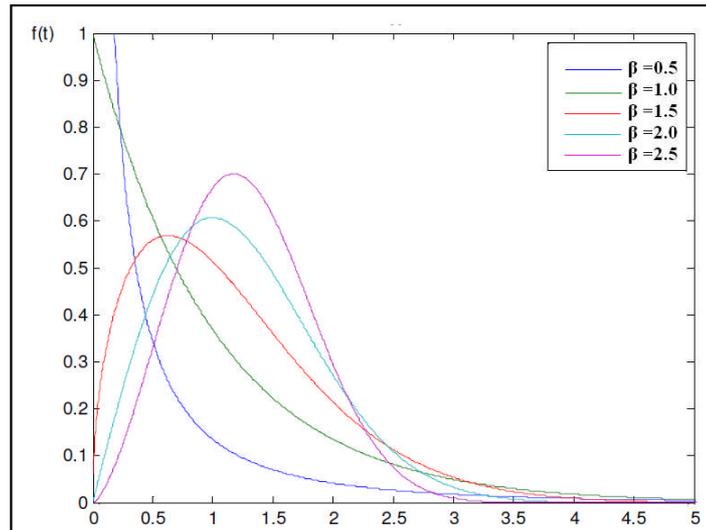


Fig. 3.4: Densità di probabilità di guasto nel modello di Weibull al variare di β

Proprio quest'ultima caratteristica consente di adottare la distribuzione di Weibull per rappresentare diversi andamenti dell'affidabilità semplicemente modificando il parametro di forma β come si vede in fig. 3.5, infatti la combinazione dei valori dei parametri α e β conduce a diverse forme della curva di affidabilità di Weibull.

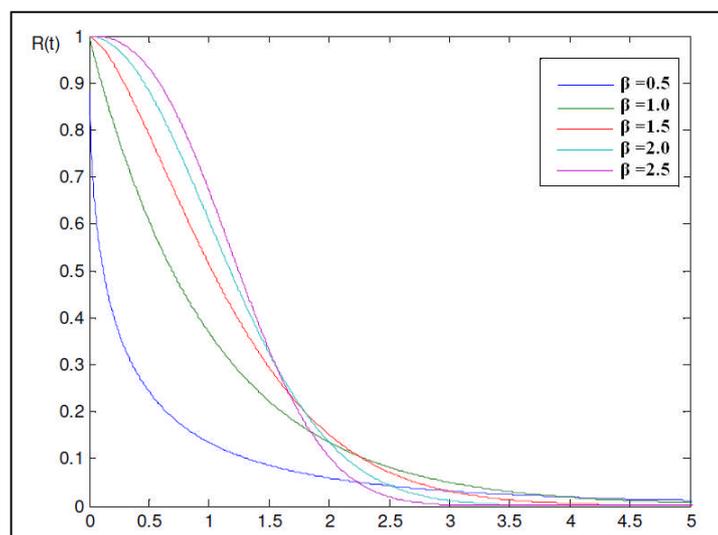


Fig. 3.5: Funzione affidabilità nel modello di Weibull al variare di β

Esempio: La vita di un condensatore è rappresentata da una distribuzione di Weibull con $\alpha = 100.000$ ore e $\beta = 0,5$. Dopo un anno di servizio (8760 ore) la probabilità di guasto è:

$$F(8760) = 1 - e^{-\left(\frac{8760}{100000}\right)^{0.5}} = 0.26 = 26\% \Rightarrow R(8760) = 74\%$$

Inoltre è interessante notare che con questo modello possiamo, descrivere tutte e tre tratti della “curva a vasca da bagno”, ossia con un’unica funzione, semplicemente variando il parametro di forma β , si possono rappresentare gli andamenti della propensione al guasto (tasso di guasto) che caratterizzano le tre fasi della vita operativa di una generica entità (fig. 3.6). Infatti se assumiamo un $\beta < 1$ possiamo descrivere la fase iniziale della vita di un componente ($\lambda(t)$ decrescente, andamento dovuto alla presenza nella popolazione di componenti affetti da difetti di fabbricazione). Ponendo $\beta = 1$ si ottiene il modello esponenziale, ($\lambda(t)$ costante), che come detto, può essere utilizzato per descrivere la fase di vita utile o dei guasti casuali. Mentre assumendo un valore di $\beta > 1$ possiamo descrivere la terza parte della curva a vasca da bagno, quella a $\lambda(t)$ crescente, che interpreta l’invecchiamento e/o l’usura del componente. Si osservi che queste fasi non possono essere descritte contemporaneamente in quanto a β si può assegnare un solo valore per volta.

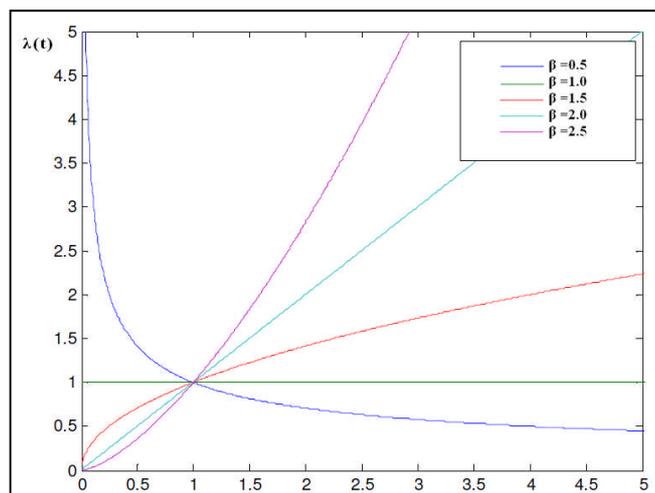


Fig. 3.6: Tasso di guasto nel modello di Weibull al variare di β

Inoltre l’espressione della funzione $R(t)$ secondo la distribuzione di Weibull:

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

può essere ricondotta all'equazione di una retta attraverso un procedimento analitico che si basa sull' eseguire due volte il logaritmo della stessa. Si tratta di una proprietà che è utile quando, si cercheranno i parametri della funzione di Weibull che meglio approssima i dati di guasto.

Riportiamo tale procedimento analitico, quindi ricordando che

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$$

Facendo il reciproco di entrambi i membri:

$$\frac{1}{1 - F(t)} = e^{\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$$

Facendo il logaritmo di entrambi i membri:

$$\ln\left\{\frac{1}{1 - F(t)}\right\} = \left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta$$

Facendo il logaritmo di entrambi i membri una seconda volta:

$$\ln\left\{\ln\left(\frac{1}{1 - F(t)}\right)\right\} = \ln\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta$$

Sfruttando le proprietà dei logaritmi può essere scritta nella forma:

$$\ln\left\{\ln\left(\frac{1}{1 - F(t)}\right)\right\} = \beta \ln(t) - \beta \ln(\alpha)$$

Per comodità, si ricorre alle seguenti sostituzioni:

$$y = \ln\left\{\ln\left(\frac{1}{1 - F(t)}\right)\right\}$$

$$b = -\beta \ln(\alpha) \Leftrightarrow \alpha = e^{\frac{-b}{\beta}}$$

$$x = \ln(t)$$

$$a = \beta$$

Si ottiene così l'equazione di una retta, $y = ax + b$ con pendenza pari a β

3.5.2.1 Procedimento per ottenere la distribuzione di Weibull di un'entità

Nel presente paragrafo si entra più nel merito per comprendere il procedimento per ottenere la distribuzione di Weibull di un'entità. Come di consueto per realizzare qualsiasi studio di affidabilità è necessario conoscere, in primo luogo, il registro storico dei guasti (cioè quel tabulato nel quale si registra l'istante d'inizio e fine del guasto, evidenziando la durata del periodo di avaria e di riparazione).

Si supponga di aver ottenuto dal questo, un campione contenente i tempi al guasto di un'entità (componente o macchina). Per ottenere la distribuzione di Weibull di un'entità è necessario conoscere i valori dei parametri caratteristici della distribuzione ovvero il valore del parametro di scala (o vita caratteristica) α e il valore del parametro forma β . Per stimare tali valori, possono essere utilizzati sia il metodo della massima verosimiglianza che però è un metodo prettamente matematico e sia il metodo grafico che consiste nel costruire la cosiddetta carte di probabilità di Weibull, che risulta invece il metodo più utilizzato nella pratica. Infatti è bene sottolineare che i metodi grafici sono più utilizzati, in quanto permettono di determinare quale distribuzione "fitta" meglio i dati di guasto. Essi si basano sulla funzione di ripartizione cumulativa che si vuole riconoscere nei dati e usano assi tali che, quando questi dati effettivamente provengono da una popolazione con legge simile alla funzione di ripartizione, si distribuiscono lungo una linea retta, quindi la tecnica usata è quella della regressione.

I passi seguiti per utilizzare il metodo grafico delle carte di probabilità sono:

1. Ordinamento in senso crescente dei dati di guasto relativi al campione esaminato;
2. Stima della probabilità cumulata di guasto $F(t)$ relativa al campione di dati. In questo caso si ricorre a delle tecniche di approssimazione, efficaci anche in caso di campioni di dati molto piccoli. Il metodo

utilizzato si basa su opportuni stimatori matematici quali le formule di Bernard:

$$\hat{F}_1 = \frac{i - 0.3}{n + 0.4}$$

Dove i è l'ordine cronologico del guasto, n è la dimensione del campione, e \hat{F}_1 è il valore stimato di $F(t)$. Studi precedenti hanno dimostrato che la tale formula garantisce una buona qualità per l'approssimazione analitica.

3. con i valori stimati di $F(t)$ si procede a calcolare e disegnare, sulla carta probabilistica di Weibull, in scala doppio-logaritmica, i punti:

$$\left(\ln \left\{ \ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) \right\}, \ln(t) \right)$$

4. Si prosegue, facendo ricorso al metodo di regressione lineare , trovando, l'equazione della retta che meglio approssima suddetti punti. A partire dall'espressione di questa retta, che non è altro che un altro modo di scrivere la distribuzione di Weibull, si possono poi dedurre i valori dei parametri α e β che definiscono la distribuzione di Weibull.

Una volta che si conoscono i valori dei parametri α e β si conosce l'andamento dell'affidabilità $R(t)$ e delle altre funzioni affidabilistiche, $\lambda(t)$, $f(t)$, $F(t)$ e quindi, il comportamento stesso del componente a guasto.

3.6 Parametri di affidabilità

La misura dell'affidabilità avviene, di norma, mediante la quantificazione del tasso di guasto λ oppure tramite una serie di parametri, detti parametri di affidabilità, che permettono di misurare la cosiddetta "affidabilità effettiva", cioè la propensione di un'entità al buon funzionamento.

Il parametro di affidabilità maggiormente utilizzato è la vita media o tempo medio di funzionamento di un'entità, che per definizione è il valore atteso, se

esiste, del suo tempo di buon funzionamento o in termini più statistici non è altro che il valore atteso della variabile aleatoria tempo al guasto T, cioè:

$$\mu = E[T] = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt$$

Pertanto in linea di principio potremmo dire che quanto più elevata è la vita media tanto più affidabile tende ad essere un'entità.

E' bene sottolineare che ai fini dello studio dell'Affidabilità, le entità sono distinte in riparabili - se a seguito del guasto può essere riportata, tramite un intervento di manutenzione, alla sua originale funzionalità – e non riparabili.

Nel caso di entità non riparabili la vita media o tempo medio di buon funzionamento è detto MTTF (Mean Time To Failure), è rappresenta il tempo medio al guasto, ovvero il tempo medio registrato su una popolazione di entità per giungere al guasto in un predeterminato periodo.

Invece nel caso di entità riparabili vita media o tempo medio di buon funzionamento è detto MTBF (Mean Time Between Failure) è rappresenta il tempo medio tra due guasti successivi, ovvero il tempo medio che intercorre tra la fine di un guasto precedente (quando cioè l'entità risulta riparata) e l'inizio di un nuovo guasto. In generale questo parametro affidabilistico ha una rilevanza fondamentale nelle applicazioni pratiche in quanto fornisce una stima del tempo intercorrente tra due guasti successivi e quindi rappresenta un indicatore essenziale per stabilire le politiche manutentive di un'entità (sistemi e componenti).

Si sottolinea che se dopo ogni riparazione, l'entità torna “come nuova” allora l'MTBF coincide con l'MTTF cioè $MTBF = MTTF$ e pertanto analiticamente si definiscono nello stesso modo:

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

Ricordando che

$$f(t) = \frac{-dR(t)}{dt}$$

Si ha

$$MTBF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = - \int_0^{\infty} t \cdot \frac{dR(t)}{dt} dt$$

Integrando per parti si ottiene

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

Graficamente, quindi, la vita media (MTBF) è data dall'area sottesa dalle curve $R(t)$.

Infine nel caso particolare in cui $\lambda(t)$ è costante nel tempo, si ottiene che l'MTBF è l'inverso del tasso di guasto:

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$$

Abbiamo così ottenuto una relazione semplice e diretta che lega un valore λ tipicamente analitico e progettuale, con un parametro operativo quale è il MTBF.

Pertanto in questi casi sarà sufficiente calcolare la vita media dei componenti per sapere tutto circa la loro funzione affidabilità.

3.7 Affidabilità di un sistema

Un sistema è definito come una unità costituita da più componenti, ciascuno con una propria identità funzionale, che concorrono al buon funzionamento e al compimento della missione del sistema stesso.

Poiché , quindi ogni componenti contribuisce a realizzare il funzionamento del sistema complessivo con un certo livello di affidabilità, si presenta il problema della stima dell'affidabilità dell'intero sistema. L'affidabilità dei sistemi può essere calcolata partendo da suoi sottosistemi o componenti;

Dal punto di vista affidabilistico il funzionamento di un sistema può essere raffigurato graficamente con uno o più schemi a blocchi (Reliability Block Diagram, RBD) opportunamente interconnessi dove ogni blocco rappresenta un sottosistema o un componente. Questi schemi in generale non corrispondono con la dislocazione fisica dei singoli componenti ma servono a visualizzare la dipendenza logica intercorrente tra il guasto del sistema e il guasto di un sottosistema o componente. Pertanto il collegamento fra i componenti deve essere visto solo dal punto di vista dell'affidabilità e quindi può differire dal collegamento fisico.

I sistemi possono essere classificati in due grandi categorie:

- **Sistemi in serie o sistemi non ridondanti;**
- **Sistemi in parallelo o sistemi ridondanti.**

3.7.1. Sistema in serie

Due (o più) componenti sono connessi in serie se il guasto di un singolo componente genera il guasto o il blocco di tutto il sistema. Pertanto un sistema di tipo serie si dice funzionante se e solo se tutti i suoi elementi o sottosistemi svolgono la funzione richiesta che ne caratterizza l'uso.

Una connessione in serie può essere rappresentata attraverso il seguente schema di flusso (fig. 3.7) :

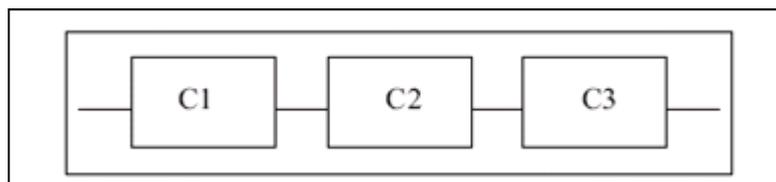


Fig. 3.7: Sistema in serie

Data la definizione di connessione in serie, l'affidabilità del sistema risulta essere:

$$\begin{aligned} R_s(t) &= P(x_1, x_2, \dots, x_n) = \\ &= P(x_1) \cdot P(x_2 | x_1) \cdot P(x_3 | x_1 x_2) \cdot \dots \cdot P(x_n | x_1 x_2 \dots x_{n-1}) \end{aligned}$$

La quale esprime il fatto che la probabilità di funzionamento del sistema è legata alla probabilità di funzionamento di un componente condizionata al funzionamento di tutti gli altri.

Se si formula l'ipotesi di guasti ad accadimento statisticamente indipendente, cioè il guasto di un componente non influenza il comportamento dell'altro, la probabilità che il sistema funzioni è data dalla probabilità che tutti i componenti in serie funzionino.

Quindi, indicato con $i = 1, 2, \dots, n$ i componenti del sistema, si dimostra che l'affidabilità del sistema al tempo t è data dal prodotto delle affidabilità di tutti i componenti al tempo t .

$$R_s(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot \dots \cdot R_n(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t)$$

Ricordando che

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

Possiamo scrivere che

$$\begin{aligned} R_s(t) &= e^{-\int_0^t \lambda_s(t) dt} = \prod_{i=1}^n R_i(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\int_0^t \lambda_i(t) dt} = \\ &= e^{-\int_0^t \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) dt} \Rightarrow \lambda_s(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) \end{aligned}$$

Da cui si evince che il tasso di guasto del sistema è pari alla sommatoria dei tassi di guasto di tutti i componenti, quindi :

$$\lambda_s(t) = \lambda_1(t) + \lambda_2(t) + \dots + \lambda_n(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t)$$

Nel caso in cui il **tasso di guasto** $\lambda(t)$ è costante nel tempo ($\lambda(t) = \text{cost} = \lambda$) allora possiamo scrivere che:

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

$$R_s(t) = e^{-\lambda_s \cdot t} = e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot t}$$

$$MTBF_s = \frac{1}{\lambda_s} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{MTBF_i}}$$

Da ciò si evince che il tasso di guasto del sistema è più elevato di quello dei singoli componenti e, di conseguenza, il MTBF è minore di quello dei componenti.

Infine è bene sottolineare che siccome ogni misura di affidabilità è un numero minore o uguale a 1, il prodotto risulta essere minore di tutti i suoi fattori, pertanto l'affidabilità del sistema è minore della più piccola affidabilità dei componenti. Quindi in un sistema serie l'affidabilità può essere incrementata agendo sul componente meno affidabile.

Nel caso di un sistema costituito da n componenti identici in serie, la cui affidabilità è descritta da una Weibull di parametri α e β allora l'affidabilità dell'intero sistema, è descritta ancora da una Weibull, di parametri:

$$\beta \text{ e } \alpha_{tot} = \frac{\alpha}{n^{\frac{1}{\beta}}}$$

Pertanto l'affidabilità del sistema totale è:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha_{tot}}\right)^\beta}$$

3.7.2 Sistemi in parallelo o ridondanti

Due o più componenti sono connessi in parallelo se, per garantire la funzionalità del sistema è sufficiente almeno un solo componente attivo in funzionamento, cioè se si guasta un componente il sistema non si guasta cioè ad esempio la macchina continua a funzionare, invece si guasta se tutti si guastano o si rompono.

Praticamente i sistemi ridondanti o in parallelo sono quei sistemi nei quali alcune funzioni vengono moltiplicate (duplicate, triplicate, ecc..), con lo scopo di ottenere una migliore affidabilità. Di contro, a parità di prestazioni funzionali, un sistema ridondante presenta una maggiore complessità e un maggiore costo.

I sistemi ridondanti possono essere di tre tipi:

1. sistemi a **ridondanza totale**;
2. sistemi a **ridondanza parziale**;
3. sistemi a **ridondanza in attesa** o **stand by**.

I sistemi a **ridondanza totale**, sono i tipici sistemi in parallelo, nei quali i componenti operano in parallelo e contemporaneamente, ma il sistema può funzionare a pieno regime anche se ne lavora uno solo, od un certo numero di essi, in quanto ognuno di essi svolge la stessa funzione pertanto in essi un solo componente è in grado di supportare l'intero carico del sistema.

Una connessione in parallelo a ridondanza totale può essere rappresentata attraverso il seguente schema di flusso (fig. 3.8) :

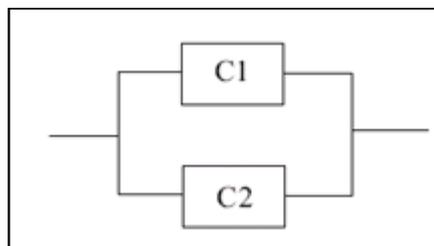


Fig. 3.8: Sistema parallelo a ridondanza attiva

Formulando anche in questo caso l'ipotesi di guasti ad accadimento statisticamente indipendente (il guasto di un componente non dipende dal guasto degli altri), è possibile calcolare facilmente la probabilità che il sistema non funzioni come prodotto delle probabilità di non funzionamento (inaffidabilità) di tutti i componenti, mentre l'affidabilità viene calcolata come complemento a 1 della probabilità di non funzionamento.

In questo caso il calcolo dell'affidabilità del sistema in parallelo si calcola come segue:

$$\begin{aligned} R_s(t) &= P(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = 1 - P(\bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot \dots \cdot \bar{x}_n) \\ &= 1 - \prod_{i=1}^n F_i(t) \end{aligned}$$

dove, $F_i(t)$ è la probabilità di guasto (inaffidabilità) dell'componente i -esimo. Quindi la produttoria delle probabilità di guasto dei singoli componenti rappresenta la probabilità di guasto del sistema. Di conseguenza il suo complemento a 1 ne rappresenta la probabilità di funzionamento.

In particolare indicato con $i = 1, 2, \dots, n$ i componenti del sistema, si dimostra che:

L'inaffidabilità è pari al prodotto delle inaffidabilità dei componenti (dato che il sistema è guasto quando sono inutilizzabili tutti i componenti):

$$\begin{aligned} F_s(t) &= F_1(t) \cdot F_2(t) \cdot \dots \cdot F_n(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t) \Rightarrow \\ &\Rightarrow 1 - R_s(t) = \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \end{aligned}$$

Mentre l'affidabilità si ricava come complemento ad 1 dell'inaffidabilità:

$$R_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] = 1 - \prod_{i=1}^n F_i(t)$$

E' facile notare che l'affidabilità di un sistema cresce all'aumentare di n , cioè del numero dei componenti, in quanto decresce $\prod_{i=1}^n F_i(t)$.

Ovviamente a fronte di un incremento di affidabilità si ha, per questo tipo di sistema, un incremento sia dei costi di iniziali che quelli di manutenzione, oltre che un incremento della complessità costruttiva.

I sistemi a **ridondanza parziale**, sono quei sistemi nei quali un gruppo di elementi è in grado di sopportare il carico del sistema, cioè in essi esistono alcuni componenti, che risultano necessario per il funzionamento del sistema, pertanto l'affidabilità è garantita esclusivamente da questi componenti e risulta pari a:

$$R_s(t) = P(r \leq j \leq n) = \sum_{j=r}^n \binom{n}{j} R^j (1 - R)^{n-j}$$

Dove:

R_s : affidabilità del sistema parzialmente ridondato per un tempo t determinato;

n : numero di componenti del sistema;

r : numero di componenti necessari al funzionamento;

$\binom{n}{j}$: coefficiente binomiale, la cui espressione è: $\binom{n}{j} = \frac{n!}{j!(n-j)!}$

Infine i sistemi a **ridondanza in attesa** o **stand by** sono caratterizzati dal fatto che durante il funzionamento alcuni componenti rimangono in stand by, praticamente fungono da riserva e solo in caso di guasto, grazie ad un opportuno commutatore, entrano in funzione.

Una connessione in parallelo a ridondanza in attesa può essere rappresentata attraverso il seguente schema di flusso (fig. 3.9):

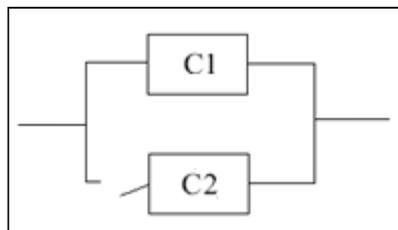


Fig. 3.9: Sistema in parallelo a ridondanza in attesa o stand by

3.8 Disponibilità e Manutenibilità

Nella teoria dell'affidabilità oltre al concetto di **affidabilità** vero e proprio, rientrano anche i concetti di **disponibilità** e **manutenibilità** di un'entità e in particolare di un componente o di un sistema; è bene sottolineare che la conoscenza di questi tre grandezze, permette di impostare la miglior politica manutentiva e tutte le scelte gestionali correlate (sostituzioni, rinnovi, livello scorte ricambi, ecc.).

La **disponibilità** (Availability) di un'entità è definita dalla normativa (UNI EN 13306) come *“l'attitudine di un'entità ad essere in grado di svolgere una funzione richiesta, in determinate condizioni, in un istante o in un intervallo di tempo, con il presupposto che siano fornite le risorse necessarie”*

In altri termini la disponibilità è la capacità di un componente o di un sistema ad un certo istante di svolgere correttamente la propria funzione, indipendentemente dal fatto che possa essersi guastato in precedenza e supponendo che siano assicurati i mezzi esterni eventualmente necessari.

La **disponibilità** è un parametro molto significativo in quanto misura l'efficacia della Manutenzione ed è strettamente legata non solo all'**affidabilità** di un'entità, cioè alla probabilità di funzionare ad un certo istante, ma anche al **manutenibilità**, cioè agli aspetti manutentivi, infatti tiene conto non solo della *frequenza dei guasti*, ma anche della *rapidità delle successive riparazioni*.

La **manutenibilità** di un'entità è definita dalla normativa (UNI 9910) come *“l'attitudine di un'entità, in assegnate condizioni di utilizzazione, a essere mantenuta o riportata in uno stato nel quale essa può svolgere la funzione richiesta, quando la manutenzione è eseguita nelle condizioni date, con procedure e mezzi prescritti”*

In altri termini la **manutenibilità** è la capacità di un componente o di un sistema **ad essere mantenuto** in un prefissato periodo di tempo, cioè ad

essere riportata, attraverso gli interventi di manutenzione, nella condizione di poter continuare a svolgere la propria funzione.

La manutenibilità è misurata dal **Mean Time To Repair (MTTR)**, ovvero il tempo medio necessario per ripristinare la piena funzionalità dell'entità cioè per effettuare un intervento di manutenzione.

Esso comprende, generalmente:

- il tempo per l'identificazione del guasto o tempo di diagnosi;
- il tempo per lo smontaggio dell'entità;
- il tempo per la riparazione o per la sostituzione;
- il tempo per il rimontaggio e per il controllo.

Per comprendere meglio il legame tra *disponibilità*, *affidabilità* e *manutenibilità* è utile approfondire lo studio del processo *funzionamento – guasto – riparazione* di un'entità (fig. 3.10).

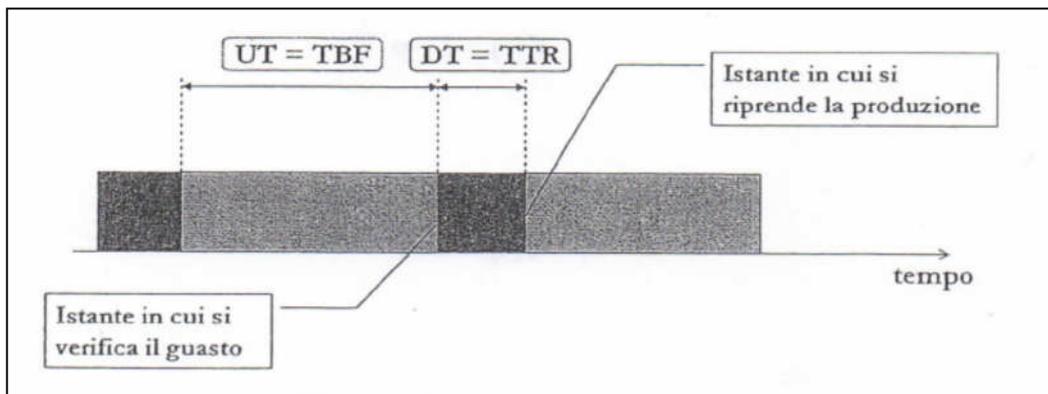


Fig. 3.10: *UpTime e DownTime*

Nel diagramma sono riportati i tempi di funzionamento (UT = UpTime) in grigio chiaro e quelli di non funzionamento (DT = DownTime) in grigio scuro. Premesso ciò è chiaro che la disponibilità di un'entità (A) è calcolata (in percentuale) come rapporto tra il tempo totale in cui il bene è disponibile a lavorare (quindi al netto dei tempi di fermo dovuti a guasti) o tempo di

effettivo funzionamento, UpTime (UT), e il tempo totale di funzionamento o tempo totale di missione, UpTime (UT) + DownTime (DT):

$$A = \frac{UT}{UT + DT}$$

L'UpTime (UT) è pari al TBF (Time Between Failure), cioè il tempo tra un guasto e il successivo che è legato all'affidabilità, mentre il DownTime (DT) è pari al TTR (Time To Repair), cioè il tempo necessario a rimettere in esercizio l'impianto legato alla manutenibilità. Date queste definizioni segue, quindi, che la disponibilità di un'entità (A) può avere anche la seguente espressione:

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Pertanto possiamo anche affermare che l'affidabilità con l'MTBF e la manutenibilità con l'MTTR *quantificano* la disponibilità di un'entità.

In conclusione sottolineiamo che uno degli obiettivi principali della manutenzione è di operare lungo tutto il ciclo di vita di un'entità e in particolare di un componente o di un sistema, per **migliorare continuamente** la sua **disponibilità**, e quindi per fare ciò, bisogna nello stesso tempo, **migliorare l'affidabilità** dell'entità sia in fase di progettazione che in fase di esercizio, ad esempio individuando i possibili punti critici su cui intervenire per evitare guasti, **migliorare la manutenibilità**, ed inoltre **migliorare anche la logistica della manutenzione**, cioè migliorare le competenze tecnico-gestionali del personale, le procedure operative, i mezzi di intervento e i sistemi informativi perché è proprio la logistica che determina il fermo dell'entità per poter ad esempio individuare il guasto, trasmettere l'informazione, chiamare la squadra di intervento, diagnosticare il guasto, trovare i ricambi, riparare o eventualmente sostituire e infine rimettere in marcia l'entità, verificando che tutto funziona regolarmente.

Capitolo 4: MODELLI DI OTTIMIZZAZIONE DELLE POLITICHE DI MANUTENZIONE

INTRODUZIONE

L'obiettivo di questo capitolo è presentare modelli che possano essere utilizzati per ottimizzare le decisioni relative alla sostituzione di entità di un impianto. L'interesse in questa tematica è motivato dal fatto che la sostituzione preventiva dei componenti critici è una metodologia molto comune per migliorare l'affidabilità di un sistema, evitando guasti costosi e nello stesso tempo aumentare la disponibilità del sistema, ovvero abbassando il numero d'interventi correttivi a guasto. A tal proposito è necessario essere capaci di identificare quali sono i componenti che dovrebbero essere sostituiti e quali, invece, dovrebbero funzionare fino a guasto.

4.1 Modelli di ottimizzazione delle politiche preventive di sostituzione

In questo paragrafo vengono illustrati alcuni modelli, presenti in letteratura, che possano essere utilizzati per rispondere, una volta che si decide che un determinato componente deve essere sottoposto a sostituzione preventiva, giacché critico, alla seguente domanda: **qual è il tempo ottimo a cui operare la sostituzione che minimizza il costo totale o globale di manutenzione?**

Come si vede in fig. 4.1, il costo totale o globale di manutenzione, fondamentalmente si compone di due addendi: il costo per gli interventi correttivi e quello delle azioni preventive.

Intuitivamente si capisce come all'aumentare del numero di sostituzioni o interventi di manutenzione preventiva (oppure al ridursi della scadenza o del tempo fra due sostituzioni o interventi preventivi successivi) si avrà un effetto doppio:

1. la riduzione del numero di guasti, e di conseguenza la diminuzione del costo di correttivo (benefici);
2. l'aumento del carico preventivo con il conseguente aumento del costo relativo (costi).

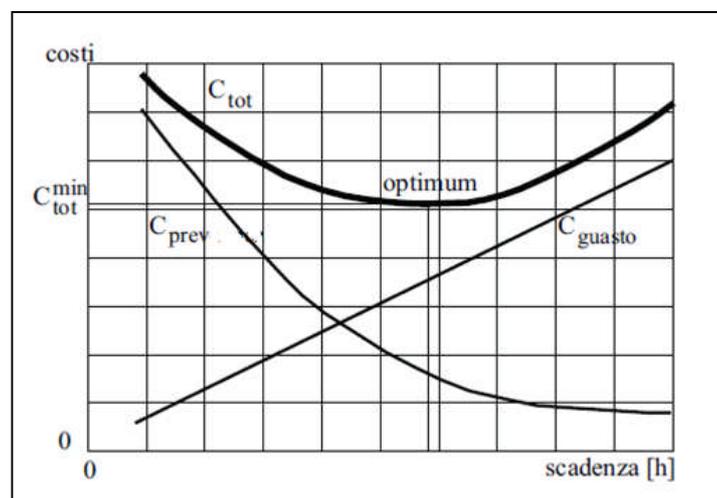


Fig. 4.1: Ottimizzazione del costo di manutenzione

Visto che l'andamento dei due termini è in controtendenza, il problema dell'ottimizzazione della scadenza fra due interventi preventivi successivi si riconduce alla determinazione del miglior compromesso tra benefici e costi e come si vede in fig. 4.1, vale a dire alla situazione che presenta il minimo costo totale.

I modelli di ottimizzazione, presenti in letteratura, per determinare quando realizzare la sostituzione e quindi per determinare la frequenza del intervento preventivo, tale da minimizzare il costo totale, sono principalmente:

- **modelli di sostituzione totale;**
- **modelli di sostituzione parziale.**

Prima di passare a trattare tali modelli con più dettaglio, si riporta una breve sintesi di tutte le ipotesi comuni su cui si basano:

1. una macchina può trovarsi solo in due possibili stati, correttamente funzionante o in avaria, e tale condizione sia sempre determinabile;
2. il tasso di guasto del sistema è continuo e strettamente crescente;
3. il guasto s'identifica nel momento stesso in cui si verifica;
4. la sostituzione si realizza nel momento stesso in cui il guasto viene segnalato;
5. i tempi di sostituzione, che sia correttiva o preventiva, sono trascurabili;
6. il costo della sostituzione deve essere più grande dopo il guasto dello stesso;
7. i costi di manutenzione preventiva e correttiva non cambiano da una sostituzione all'altra.

4.1.1. Modelli di sostituzione totale

I modelli di sostituzione totale sono applicati a sistemi completi, dove la sostituzione si realizza in seguito all'accadimento di un guasto (sostituzione correttiva SC) oppure dopo aver funzionato durante un periodo di tempo

determinato (sostituzione preventiva SP). La sostituzione preventiva potrà essere eseguita secondo due politiche alternative classiche:

1. **Sostituzione preventiva a intervalli costanti;**
2. **Sostituzione preventiva basata sull'età.**

Dove tanto la SP come la SC consiste nella sostituzione del sistema completo.

4.1.1.1. Sostituzione preventiva totale a intervalli costanti

Con l'obiettivo di ridurre il numero di guasti, si può ricorrere alla sostituzione preventiva a intervalli costanti. Questa politica di manutenzione prevede che la sostituzione possa realizzarsi una volta che accada il guasto (sostituzione correttiva SC) oppure all'esaurirsi di un intervallo di tempo di lunghezza costante che chiameremo t_p (sostituzione preventiva SP). Per questa politica di manutenzione, l'intervallo di tempo t_p che separa due SP consecutive, rappresenta anche la lunghezza di un ciclo di sostituzione totale. Si assume inoltre che la realizzazione di una SP esattamente come una SC riporta il tasso di guasto del sistema, chiamato λ , al suo valore iniziale $\lambda(t=0)$. Questo ci dice che il tasso di guasto non cambia dopo la sostituzione, in altre parole, il tasso di guasto ha sempre lo stesso comportamento evidenziato dalla funzione continua $\lambda(t)$. L'ipotesi è che le entità di ricambio abbiano lo stesso tasso di guasto delle entità che vanno a sostituire (tutte le entità hanno lo stesso *pattern* di guasto).

Il problema da risolvere, quindi, è di determinare l'intervallo di tempo ottimo (che rimarrà costante per tutta la politica di manutenzione) tra due SP consecutive, in modo che il costo totale previsto per unità di tempo sia minimo. Questo intervallo di tempo viene chiamato $t_{p,opt}$.

Per modellare il processo di sostituzione a intervalli costanti (fig. 4.2) si utilizzerà la seguente notazione:

- C_p : costo della sostituzione preventiva (SP)
- C_c : costo della sostituzione correttiva (SC)
- t_p : tempo a cui realizzare la SP (passate t_p unità di tempo si realizza la SP)
- $N_p(t_p)$: numero di sostituzioni preventive attese nell'intervallo t_p
- $N_c(t_p)$: numero di guasti atteso nell'intervallo t_p
- $f(t)$: densità della probabilità di guasto del sistema in funzione del tempo
- $F(t)$: distribuzione cumulata della probabilità di guasto del sistema in funzione del tempo
- $R(t)$: affidabilità del sistema in funzione del tempo
- $\lambda(t)$: tasso di guasto del sistema in funzione del tempo
- CTA : costo totale di manutenzione per unità di tempo

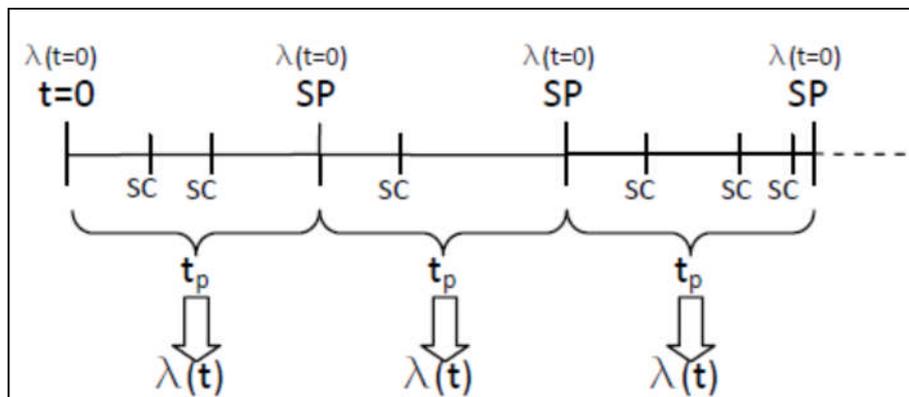


Fig. 4.2: Evoluzione del sistema con sostituzione preventiva a intervalli costanti

Il costo totale atteso di sostituzione per unità di tempo, CTA , è dato dalla seguente formula:

$$CTA = \frac{\text{costo totale atteso in un ciclo di sostituzione totale}}{\text{lunghezza di un ciclo di sostituzione totale}}$$

Como già detto anteriormente, la lunghezza del ciclo di sostituzione è data dall'intervallo t_p che intercorre tra due interventi di SP. Di conseguenza, il costo totale atteso in un ciclo di sostituzione si calcola secondo la formula:

$$\begin{aligned} & \text{Costo totale atteso in un ciclo di sostituzione totale} \\ & = C_c * N_c(t_p) + C_p * N_p(t_p) \end{aligned}$$

Dato che, all'interno di un ciclo di sostituzione, $N_p(t_p)$, è uguale a uno, si ha che:

$$\begin{aligned} & \text{Costo totale atteso in un ciclo di sostituzione totale} \\ & = C_c * N_c(t_p) + C_p \end{aligned}$$

E, di conseguenza, il costo totale atteso di manutenzione per unità di tempo CTA vale:

$$CTA = \frac{C_c * N_c(t_p) + C_p}{t_p}$$

Obiettivo del modello: trovare il valore di $t_p \in (0, T_{max})$ che minimizza CTA , dove T_{max} è la massima durata possibile di un ciclo di sostituzione.

Si tratta pertanto di un problema di ottimizzazione del costo di manutenzione nel quale la variabile indipendente t_p può assumere dei valori compresi nell'intervallo limite $(0, T_{max})$. Il limite inferiore è chiaramente zero, mentre il limite superiore, T_{max} , salvo che non ci siano restrizioni dovute a particolari condizioni dell'installazione da mantenere, dipenderà dalla base dati a disposizione.

4.1.1.2. Sostituzione preventiva totale basata sull'età

Nella politica di sostituzione totale basata sull'età, la sostituzione preventiva (SP) si realizza quando il sistema raggiunge una determinata età fissa, t_p , a partire dall'ultimo intervento cui è stato sottoposto, che si tratti di una sostituzione correttiva (SC) o una SP. Questo significa che, se il sistema si guasta, si realizza la SC e la prossima SP si pone t_p unità di tempo più avanti. Attenzione che questo non significa che la lunghezza del ciclo di sostituzione è uguale a t_p , come nel caso precedente. Infatti, si deve considerare che, per ogni guasto, si pone a zero il conteggio del tempo che manca al prossimo intervento preventivo. Di conseguenza, la lunghezza del ciclo di sostituzione sarà pari a t_p , in caso di assenza di guasto, mentre sarà minore in caso di accadimento del guasto. Come per il modello precedente, si suppone inoltre che la realizzazione di una SP, così come una SC, restituisce il tasso di guasto del sistema al suo valore iniziale, $\lambda(t=0)$, senza cambiare il suo *pattern* (le unità di ricambio hanno lo stesso tasso di guasto delle unità che vanno a sostituire). Con quanto appena detto, si può concludere che, in questo modello, ci sono due cicli di operazione: un ciclo determinato dalle unità che raggiungono l'età di manutenzione preventiva (t_p), e un altro determinato dalle unità che cessano di funzionare a causa di un guasto, che accade prima della sostituzione preventiva. Questi due possibili cicli sono illustrati nella fig. 4.3.

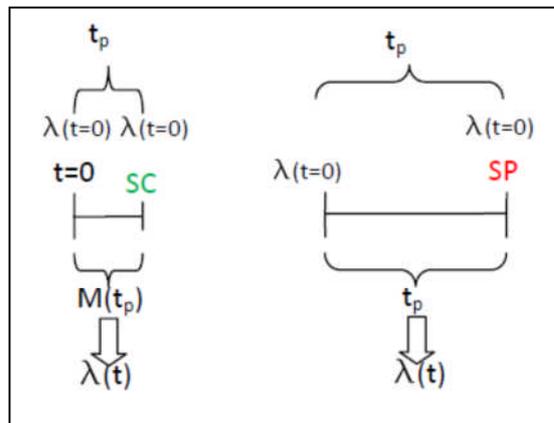


Fig. 4.3: Possibili cicli di sostituzione

Il problema da risolvere consiste nel determinare l'intervallo di tempo ottimo (che si manterrà costante per tutta la politica di manutenzione) tra due interventi qualsiasi consecutivi (SP→SP o SC→SP), in modo che il costo totale atteso di manutenzione per unità di tempo sia minimo. A tale intervallo di tempo si dà il nome $t_{p,opt}$. Per modellare il processo di sostituzione basata sull'età (fig. 4.4), si utilizzerà la seguente notazione:

- C_p : costo della sostituzione preventiva (SP)
- C_c : costo della sostituzione correttiva (SC)
- t_p : tempo a cui realizzare la SP (passate t_p unità de tempo dall'ultimo intervento di manutenzione, realizzo la SP)
- $f(t)$: densità di probabilità di guasto del sistema in funzione del tempo
- $F(t)$: distribuzione cumulata della probabilità di guasto del sistema in funzione del tempo
- $R(t)$: affidabilità del sistema in funzione del tempo
- $M(t_p)$: lunghezza attesa del ciclo di guasto (SC)
- CTA : costo totale atteso di manutenzione per unità di tempo

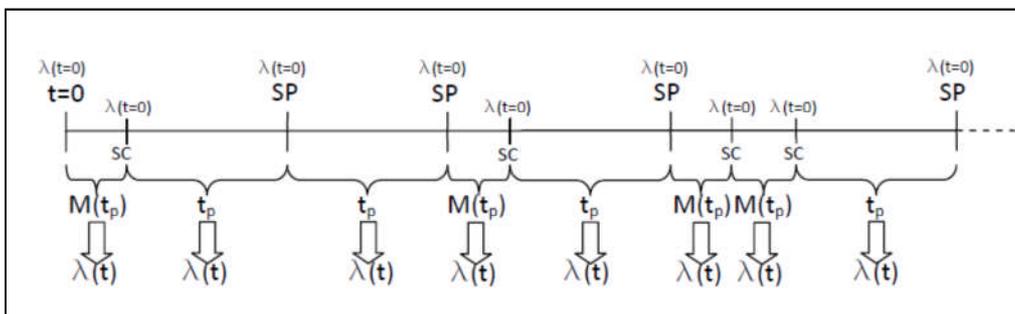


Fig. 4.4: Evoluzione del sistema con sostituzione preventiva basata sull'età

Per ottenere il costo totale atteso di manutenzione per unità di tempo CTA si utilizzerà la seguente formula:

$$CTA = \frac{\text{costo totale atteso in un ciclo di sostituzione totale}}{\text{lunghezza di un ciclo di sostituzione totale}}$$

Per calcolare il costo totale atteso nel ciclo di sostituzione, è necessario prendere in considerazione che, il sistema, nel corso di un ciclo di manutenzione, potrebbe trovarsi in una delle seguenti situazioni:

1. Raggiunge la SP, cosa che succede con probabilità $R(t_p)$;
2. Si guasta prima, cosa che succede con probabilità $F(t_p)$.

In altre parole, in ogni ciclo di sostituzione si avrà o una sostituzione correttiva o una preventiva. Pertanto il costo totale atteso per un ciclo di sostituzione è:

$$\begin{aligned} & \text{Costo totale atteso in un ciclo di sostituzione totale} \\ & = C_p * R(t_p) + C_c * F(t_p) \end{aligned}$$

La lunghezza del ciclo di sostituzione, invece, è data da:

$$\text{lunghezza del ciclo di sostituzione} = t_p * R(t_p) + M(t_p) * F(t_p)$$

Dove:

- t_p : lunghezza del ciclo di SP;
- $R(t_p)$: probabilità attesa del ciclo preventivo;
- $M(t_p)$: lunghezza attesa del ciclo di guasto;
- $F(t_p)$: probabilità attesa del ciclo di guasto.

Le definizioni di $F(t_p)$, $R(t_p)$ e $M(t_p)$ sono ricavabili utilizzando le nozioni della teoria dell'affidabilità.

$$F(t_p) = \int_0^{t_p} f(t) dt; \quad R(t_p) = 1 - F(t_p); \quad M_j(T_i) = \frac{\int_0^{t_p} t * f(t) dt}{F(t_p)}$$

Inoltre, affinché il modello funzioni, è necessario aggiungere la seguente condizione, per definizione stessa di inaffidabilità:

$$F(t_p) = \int_0^{t_p} f(t) dt \leq 1, \quad \forall t_p$$

Questa condizione impone che, in ogni ciclo di guasto, non accada più di un guasto.

Osservazione: nell'ipotesi di effettuare solo manutenzione preventiva (non si verificano guasti, $R(t_p) = 1$), la lunghezza del ciclo di sostituzione è pari a t_p , mentre nell'ipotesi di effettuare solo manutenzione correttiva ($F(t_p) = 1$), la lunghezza del ciclo di sostituzione è pari a $M(t_p)$.

Effettuando le suddette sostituzioni, il costo totale di manutenzione atteso per unità di tempo vale:

$$CTA = \frac{C_p * R(t_p) + C_c * F(t_p)}{t_p * R(t_p) + M(t_p) * F(t_p)}$$

Obiettivo del modello: trovare il valore di t_p all'interno dell'intervallo $(0, T_{max}]$ che minimizza $CTA(t_p)$, dove T_{max} è la massima durata possibile di un ciclo di sostituzione.

È ancora un problema di ottimizzazione del costo di manutenzione in funzione della variabile indipendente t_p .

La condizione $F(t_p) = \int_0^{t_p} f(t) dt \leq 1, \forall t_p$, impone che il valore di T_{max} sia uguale a quel valore di tempo \bar{t} tale che $F(\bar{t}) = 1$.

4.1.2. Modelli di sostituzione parziale

Questi modelli sono un'estensione dei modelli di sostituzione totale. La loro formulazione è basata sull'idea che nella maggior parte dei casi non è necessaria una sostituzione preventiva totale (SPT) per riportare il sistema ad

adeguate condizioni di esercizio, ma è sufficiente la sostituzione preventiva parziale (SPP) di alcuni dei suoi componenti .

Analizzando la possibilità di realizzare una SPP, è necessario prendere in considerazione che, dopo un certo numero di SPP, queste diventano più costose di una SPT, pertanto, un ciclo di manutenzione di m operazioni preventive, sarà composto da $m-1$ SPP, seguite da una SPT.

In caso di guasto del sistema prima che raggiunga la SPP, si realizzeranno degli **interventi di tipo correttivo** che potranno essere di due tipologie:

- a) **Riparazioni minime**, cioè interventi che non modificano in alcun modo il tasso di guasto;
- b) **Interventi correttivi di sostituzione**, che non solo riportano il tasso di guasto al valore iniziale, ma ne modificano anche l'andamento (pattern).

4.1.2.1. Sostituzioni preventive parziali e riparazioni minime

In questo modello, per ogni ciclo di manutenzione, vengono eseguiti m interventi preventivi. I primi $m-1$ interventi sono di tipo SPP (sostituzione preventiva parziale), mentre l'ultima è una SPT (sostituzione preventiva totale). Pertanto, il ciclo di manutenzione inizia con un sistema nuovo e termina, dopo m intervalli, con la SPT, in seguito alla quale inizierà un nuovo ciclo di manutenzione (fig.4.5).

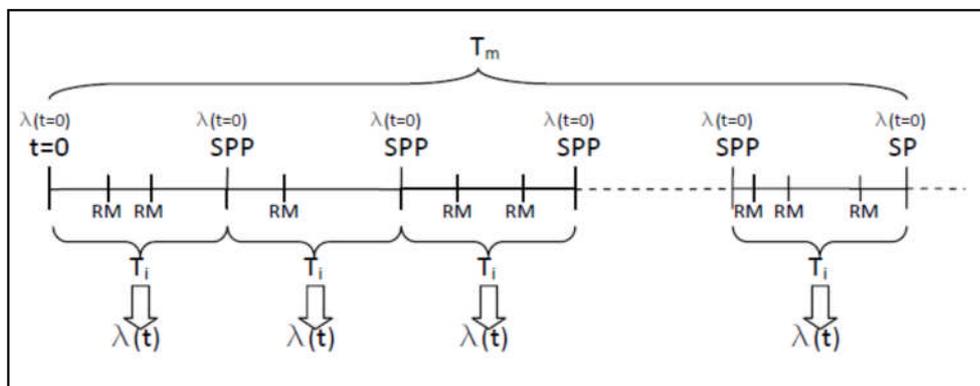


Fig. 4.5: Evoluzione del sistema con sostituzione preventiva parziale e riparazioni minime

La particolarità di questo modello di sostituzione parziale è che le SPP non solo reinizializzano il tasso di guasto, ma anche cambiano il suo andamento (*pattern*): dopo ogni SPP, il sistema viene restituito al valore iniziale di un nuovo tasso di guasto.

Si supponga allora di avere m funzioni continue $\lambda_1(t), \lambda_2(t), \dots, \lambda_m(t)$, che, in forma compatta, possono essere scritte come $\lambda_j(t)$, $j = 1, 2, \dots, m$.

In questo modello, ogni volta che si effettua una SPP, il tasso di guasto $\lambda(t)$ cambia e passa da $\lambda_j(t)$ a $\lambda_{j+1}(t)$, poiché la sostituzione porta il sistema al valore iniziale, ma di un nuovo tasso di guasto ($\lambda_1(t=0), \lambda_2(t=0), \dots, \lambda_m(t=0)$).

La SPT, invece, operando come nei casi di sostituzione totale, riporta il sistema allo stato di "*as good as new*", nel senso che, dopo la SPT, si passa da $\lambda_m(t)$ a $\lambda_1(t)$ (la serie di valori $\lambda_1(t), \lambda_2(t), \dots, \lambda_m(t)$ ricomincia).

L'ipotesi è quindi che, in caso d'interventi preventivi di piccolo calibro (SPP, cioè sostituzione di uno o alcuni componenti del sistema), il *pattern* del tasso di guasto si modifichi mentre, nel caso di sostituzione preventiva dell'intero sistema (SPT), il *pattern* del tasso di guasto ritorni al comportamento tipico di un sistema nuovo, $\lambda_1(t)$.

Questo comportamento può essere spiegato ipotizzando che, con una sostituzione parziale, non si riesce a ripristinare lo stesso comportamento a guasto per il sistema (ad esempio, perché i componenti sostituiti sono diversi dagli originali, oppure l'intervento parziale viene eseguito in breve tempo e senza accurati controlli, oppure ancora le attrezzature di supporto non sono sufficientemente adeguate,...), cosa che invece si ottiene sostituendo il sistema per intero (quindi con SPT).

Tra due interventi preventivi consecutivi di qualsiasi tipo (SPP→SPP o SPT→SPP o SPP→SPT), l'intervallo intercorso è fisso e vale T_i , il che significa che le SPP verranno effettuate negli istanti $T_i, 2T_i, 3T_i, \dots$. Da ciò si deriva che, per m interventi preventivi si avranno m intervalli T_i di ampiezza

uguale, e quindi, la lunghezza del ciclo di manutenzione preventiva (o ciclo di sostituzione totale) sarà uguale a $T_m = m * T_i$.

In caso di guasto, si realizza una riparazione minima (RM), che può anche essere più economica rispetto a una SPP, ma non influenza il tasso di guasto del sistema, cioè, non lo riporta al suo valore originale.

Il problema da risolvere consiste quindi nel determinare l'intervallo di tempo ottimo $T_{i,opt}$ e il numero d'interventi preventivi ottimo m_{opt} , tale che il costo totale di manutenzione atteso per unità di tempo sia minimo.

Per modellare il processo di sostituzione preventiva parziale e riparazioni minime si utilizzerà la seguente notazione:

- C_{pp} : costo della sostituzione preventiva parziale (SPP)
- C_{pt} : costo della sostituzione preventiva totale (SPT)
- C_{rm} : costo della riparazione minima in seguito al guasto (RM)
- T_i : tempo a cui realizzare la SP (passate T_i unità di tempo dall'ultimo intervento preventivo si effettua la SP)
- T_m : durata di un ciclo di manutenzione preventiva (o ciclo di sostituzione totale)
- $\lambda(t)$: tasso di guasto del sistema in funzione del tempo
- $N_{c,j}(T_i)$: numero di guasti atteso nel j -esimo intervallo T_i
- $N_c(T_m)$: numero di guasti atteso nel corso del ciclo di sostituzione totale
- CTE : costo totale di manutenzione atteso per unità di tempo

Per calcolare il costo totale atteso di manutenzione per unità di tempo $CTA (m, T_i)$, la formula da utilizzare è sempre quella introdotta per i modelli di sostituzione totale, vale a dire:

$$CTA = \frac{\text{costo totale atteso in un ciclo di sostituzione totale}}{\text{lunghezza di un ciclo di sostituzione totale}}$$

Il costo totale atteso in un ciclo di sostituzione totale si calcola secondo la formula:

Costo totale atteso in un ciclo di sostituzione totale =

$$= C_{pp} * N_{pp} + C_{pt} * N_{pt} + C_{rm} * N_{rm}$$

Dove:

- N_{pp} : è il numero di SPP atteso nel ciclo di sostituzione totale;
- N_{pt} : è il numero di SPT atteso nel ciclo di sostituzione totale;
- N_{rm} : è il numero di RM atteso nel ciclo di sostituzione totale.

In un ciclo di sostituzione totale si avranno:

- I. $N_{pp} = m - 1$;
- II. $N_{pt} = 1$;
- III. $N_{rm} = N_c(T_m)$, con $N_c(T_m)$, che è il numero di guasti atteso nel corso del ciclo di sostituzione totale.

Di conseguenza, il costo totale atteso in un ciclo di sostituzione totale vale:

Costo totale atteso in un ciclo di sostituzione totale =

$$= (m - 1) * C_{pp} + C_{pt} + C_{rm} * N_c(T_m)$$

Il valore del numero di guasti atteso nel corso del ciclo di sostituzione totale, $N_c(T_m)$, si ottiene sommando i guasti attesi, $N_{c,j}(T_i)$ in ciascuno degli m intervalli T_i che compongono il ciclo stesso:

$$N_c(T_m) = \sum_{j=1}^m N_{c,j}(T_i)$$

Avendo supposto che, eseguendo la SPP (ossia al passare di ogni intervallo T_i), il tasso di guasto cambia di pattern e viene restituito al suo valore iniziale, ogni valore $N_{c,j}(T_i)$ sarà dato da:

$$N_{c,j}(T_i) = \int_0^{T_i} \lambda_j(t) dt$$

Osservazione: per questo modello non vi è bisogno di nessuna condizione aggiuntiva del tipo: $\int_0^{T_i} \lambda_j(t) dt \leq 1$. Infatti, in un intervallo di sostituzione preventiva parziale (T_i) si può avere più di un guasto, dato che i guasti

vengono riparati attraverso interventi minimi che non influenzano il tasso di guasto.

Pertanto $N_c(T_m)$ vale:

$$\begin{aligned} N_c(T_m) &= \sum_{j=1}^m N_{c,j}(T_i) = \sum_{j=1}^m \int_0^{T_i} \lambda_j(t) dt = \\ &= \int_0^{T_i} \lambda_1(t) dt + \int_0^{T_i} \lambda_2(t) dt + \dots + \int_0^{T_i} \lambda_m(t) dt \end{aligned}$$

Dato che il ciclo di sostituzione totale si estende per $T_m = m * T_i$ unità di tempo (con m che è il numero d'interventi preventivi), il costo totale atteso di manutenzione per unità di tempo, CTA , vale:

$$\begin{aligned} CTA(T_m) &= CTA(m, T_i) = \\ &= \frac{(m-1) * C_{pp} + C_{pt} + C_{rm} * N_c(T_m)}{T_m} = \\ &= \frac{(m-1) * C_{pp} + C_{pt} + C_{rm} * \sum_{j=1}^m \int_0^{T_i} \lambda_j(t) dt}{m * T_i} \end{aligned}$$

Obiettivo del modello: trovare il valore di T_m che minimizza $CTA(T_m)$. Dato che T_m si può esprimere in funzione del prodotto $m * T_i$, l'obiettivo del modello equivale alla ricerca dei valori $m \in [1, K]$ e $T_i \in (0, T_{max}]$, che minimizzano $CTA(m, T_i)$, dove T_{max} è la massima durata possibile dell'intervallo T_i che separa due SPP, mentre K è il numero totale di funzioni $\lambda_m(t)$, di cui si dispone nel database. In conclusione, T_{max} non ha lo stesso significato che ha nei modelli di sostituzione totale visti in precedenza.

Si tratta chiaramente di un problema di ottimizzazione del costo di manutenzione in funzione delle variabili indipendenti m e T_i . È opportuno sottolineare che il valore di T_{max} non è sottoposto ad alcun tipo di restrizione, in quanto si è supposto che si può avere più di un guasto nel corso di un intervallo di SPP (T_i).

4.1.2.2. Sostituzioni preventive parziali e interventi correttivi

In questo modello si vanno a realizzare m interventi di sostituzione per ciascun ciclo di manutenzione, di cui le prime $m-1$ sono sostituzioni parziali (SP), mentre *l'ultima* è una sostituzione totale (ST). Il ciclo di manutenzione inizia, quindi, con un sistema nuovo e termina dopo m sostituzioni con una ST, dopo la quale inizierà un nuovo ciclo di manutenzione (fig. 4.6).

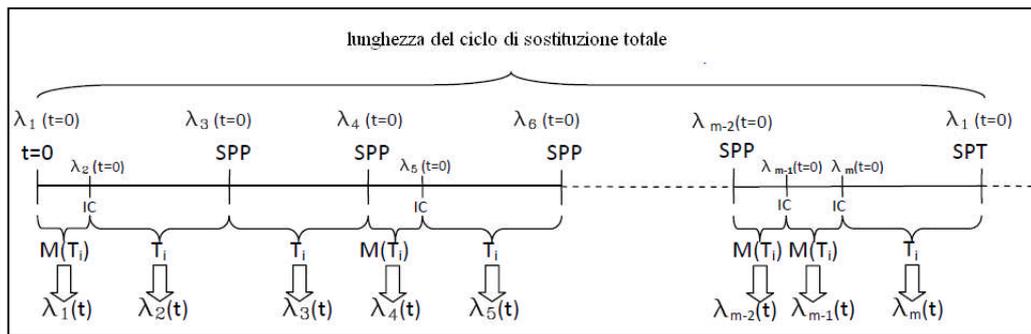


Fig. 4.6: Evoluzione del sistema con sostituzioni preventive e correttive parziali

Tali sostituzioni hanno le seguenti caratteristiche:

- La SP resetta il tasso di guasto e inoltre cambia il suo andamento (pattern): dopo ogni SP, il sistema viene riportato al valore iniziale di un nuovo tasso di guasto. Assumendo quindi di avere m funzioni continue $\lambda_1(t), \lambda_2(t), \dots, \lambda_m(t)$, ogni volta che si effettua una SP, il tasso di guasto $\lambda(t)$ cambia e passa da $\lambda_j(t)$ a $\lambda_{j+1}(t)$, poiché la sostituzione porta il sistema al valore iniziale, però di un nuovo tasso di guasto, $\lambda_1(t=0), \lambda_2(t=0), \dots, \lambda_m(t=0)$.
- La ST restituisce il sistema allo stato di "as good as new", nel senso che, dopo che la ST, si passa da $\lambda_m(t)$ a $\lambda_1(t)$ (la serie di valori $\lambda_1(t), \lambda_2(t), \dots, \lambda_m(t)$ ricomincia).

Entrambi i tipi di sostituzione (ST e SP) possono essere preventive o correttive. La sostituzione correttiva viene eseguita in caso di guasto del sistema, mentre si procede alla sostituzione preventiva quando il sistema

raggiunge l'età fissa T_i , che è l'intervallo di tempo intercorso dall'ultimo intervento che ha ripristinato il tasso di guasto del sistema, che si tratti di una sostituzione preventiva o una sostituzione correttiva (quella che accade per prima). Supponendo che, in un ciclo di sostituzione totale ci sono X guasti, il totale m di interventi di manutenzione sarà dato da:

- 1) X sostituzioni correttive parziali (SCP);
- 2) $m - X - 1$ sostituzioni preventive parziali (SPP);
- 3) Una sostituzione preventiva totale (SPT) o una sostituzione correttiva totale (SCT), a seconda che l'ultimo intervento sia dovuto al concludersi del intervallo T_i o causato da un guasto.

Per questo modello la durata del ciclo di sostituzione totale non è uguale a $T_m = m \cdot T_i$, come nel caso precedente. Infatti, si deve considerare che, per ogni guasto, si azzerava il conteggio del tempo rimanente per il prossimo intervento preventivo, a causa del fatto che, questa volta sì che la riparazione in seguito al guasto riporta zero il tasso di guasto. In particolare, si può dimostrare che la lunghezza del ciclo di sostituzione totale è sempre $\leq m \cdot T_i$, raggiungendo questo valore solo nel caso non si verifici nessun guasto nel corso del ciclo di sostituzione totale.

Il problema da risolvere consiste nel determinare l'intervallo di tempo ottimo $T_{i,opt}$ e il numero ottimo d'interventi preventivi parziali $(m - X - 1)_{opt}$, tali che il costo totale di manutenzione atteso per unità di tempo sia minimo.

Nella scelta della migliore politica di manutenzione sarà fondamentale considerare che:

- a) Il costo di SP di un sistema che si è guastato (SCP) è spesso superiore al costo della SP prima della rottura (SPP);
- b) Il costo della SCT è più alto del costo della SPT;
- c) Il costo della SPT è più alto del costo della SPP.

Per modellare il processo di sostituzione preventiva parziale e interventi correttivi si utilizzerà la seguente notazione:

- C_{pp} : costo della sostituzione preventiva parziale (SPP)

- C_{pt} : costo della sostituzione preventiva totale (SPT)
- C_{icp} : costo della sostituzione correttiva parziale (SCP)
- C_{ici} : costo della sostituzione correttiva totale (SCT)
- T_i : tempo a cui realizzare SP (passate T_i unità di tempo dall'ultimo intervento preventivo o correttivo, realizzo la SP)
- T_m : durata di un ciclo di manutenzione preventiva (o ciclo di sostituzione totale)
- $f(t)$: densità della probabilità di guasto del sistema in funzione del tempo
- $F(t)$: distribuzione cumulata della probabilità di guasto del sistema in funzione del tempo
- $R(t)$: affidabilità del sistema in funzione del tempo
- CTA : costo totale atteso di manutenzione per unità di tempo
- $M_j(T_i)$: lunghezza attesa del ciclo di guasto nel j -esimo intervallo T_i
- $M(T_m)$: lunghezza attesa del ciclo di guasto nel corso del ciclo di sostituzione totale

Per ottenere il costo totale atteso di manutenzione per unità di tempo, CTA , la formula da utilizzare è sempre la stessa, ovvero:

$$CTA = \frac{\text{costo totale atteso in un ciclo di sostituzione totale}}{\text{lunghezza di un ciclo di sostituzione totale}}$$

Pertanto, si devono stabilire i valori di:

- Costo totale atteso in un ciclo di sostituzione totale;
- Lunghezza di un ciclo di sostituzione totale.

Si parte **dal costo totale atteso in un ciclo di sostituzione totale**. A tal proposito, si consideri per prima cosa ciò che succede nel caso si realizzi solo la j -esima sostituzione parziale (SP). Il sistema può, o raggiungere la SPP, che accade con probabilità $R_j(T_i)$, oppure guastarsi prima e essere sottoposto

a una sostituzione correttiva parziale, che accade invece con probabilità $F_j(T_i)$.

Di conseguenza il *costo di manutenzione atteso nel caso di realizzare una sola SP* è:

$$\begin{aligned} & \textbf{costo di manutenzione atteso per la } j \textbf{ - esima SP} \\ & = C_{pp} * R_j(T_i) + C_{icp} * F_j(T_i) \end{aligned}$$

Dove, secondo le definizioni di $F(t)$ (distribuzione cumulata della probabilità di guasto del sistema in funzione del tempo) e $R(t)$ (affidabilità del sistema in funzione del tempo), si ha che:

$$F_j(T_i) = \int_0^{T_i} f_j(t) dt, \quad R_j(T_i) = 1 - F_j(T_i)$$

Se si suppone che il costo della sostituzione parziale (SP) di un sistema che si è guastato (C_{icp}) è più alto che il costo della sostituzione preventiva parziale prima del guasto (C_{pp}), si può definire un *costo extra dell'intervento correttivo* come segue:

$$C_{icp} = C_{eicp} + C_{pp} \rightarrow C_{eicp} = C_{icp} - C_{pp}$$

Sostituendo C_{icp} nell'espressione del costo atteso per la *j-esima SP* si ha:

$$\begin{aligned} & \textbf{costo di manutenzione atteso per la } j \textbf{ - esima SP} = \\ & = C_{pp} * R_j(T_i) + C_{ic} * F_j(T_i) = \\ & = C_{pp} * R_j(T_i) + (C_{eicp} + C_{pp}) * F_j(T_i) = \\ & = C_{pp} * (R_j(T_i) + F_j(T_i)) + C_{eicp} * F_j(T_i) = \\ & = C_{pp} + C_{eicp} * F_j(T_i) \end{aligned}$$

Se ora si considera tutte le *m-1 SP* si ha:

$$\begin{aligned} & \textbf{costo di manutenzione atteso per la } (m - 1) \textbf{ SP} = \\ & = \sum_{j=1}^{m-1} C_{pp} + C_{eicp} * F_j(T_i) = (m - 1)C_{pp} + \sum_{j=1}^{m-1} C_{eicp} * F_j(T_i) \end{aligned}$$

Per calcolare il costo atteso di manutenzione in un ciclo di sostituzione totale,

manca da prendere in considerazione *il costo relazionato con la sostituzione totale (ST)*.

In tal senso, vale esattamente quanto visto per le sostituzioni parziali: il sistema raggiungerà la ST con probabilità $R_m(T_i)$, o si guasterà prima, con probabilità $F_m(T_i)$.

Risulta quindi che il *costo di manutenzione atteso nel caso de realizzare solo la ST* vale

$$\begin{aligned} & \textbf{costo di manutenzione atteso per la ST} \\ & = C_{pt} * R_m(T_i) + C_{ict} * F_m(T_i) \end{aligned}$$

Se si suppone che il costo della sostituzione totale di un sistema che si è guastato (C_{ict}) è più alto che il costo della sostituzione preventiva totale prima del guasto (C_{pt}), si può definire un *costo extra dell'intervento correttivo* come segue:

$$C_{ict} = C_{eict} + C_{pt} \rightarrow C_{eict} = C_{ict} - C_{pt}$$

Sostituendo C_{ict} nell'espressione del costo atteso per la ST si ha:

$$\begin{aligned} & \textbf{costo di manutenzione atteso per la ST} = \\ & = C_{pt} * R_m(T_i) + C_{ict} * F_m(T_i) = \\ & = C_{pt} * R_m(T_i) + (C_{eict} + C_{pt}) * F_m(T_i) = \\ & = C_{pt} * (R_m(T_i) + F_m(T_i)) + C_{eict} * F_m(T_i) = \\ & = C_{pt} + C_{eict} * F_m(T_i) \end{aligned}$$

Prendendo in considerazione tutto ciò che si è appena visto, il **costo totale atteso in un ciclo di sostituzione totale** vale:

$$\begin{aligned} & \textbf{Costo totale atteso in un ciclo di sostituzione totale} = \\ & = \left\{ (m - 1)C_{pp} + \sum_{j=1}^{m-1} C_{eicp} * F_j(T_i) \right\} + \{C_{pt} + C_{eict} * F_m(T_i)\} \end{aligned}$$

Ricordando la definizione della distribuzione cumulata della probabilità di guasto $F(t)$, la sommatoria $\sum_{j=1}^{m-1} F_j(T_i)$ si può esprimere come segue:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{m-1} F_j(T_i) &= \sum_{j=1}^{m-1} \int_0^{T_i} f_j(t) dt \\ &= \int_0^{T_i} f_1(t) dt + \int_0^{T_i} f_2(t) dt + \dots + \int_0^{T_i} f_{m-1}(t) dt \end{aligned}$$

Per il calcolo **della lunghezza del ciclo di sostituzione totale**, si ricorda che entrambi gli interventi preventivi e correttivi restaurano il valore iniziale del tasso di guasto e reinizializzano il conteggio di T_i .

La **distanza media tra due interventi di manutenzione** di qualsiasi tipo è data dalla somma di:

- Il prodotto tra la lunghezza del ciclo di preventiva (T_i) per la probabilità che lo stesso accada ($R_j(T_i)$):

$$T_i * R_j(T_i)$$

- Il prodotto tra la lunghezza del ciclo di guasto ($M_j(T_i)$) per la probabilità che lo stesso accada ($F_j(T_i)$):

$$M_j(T_i) * F_j(T_i)$$

Cioè:

distanza media tra due interventi di manutenzione

$$= T_i * R_j(T_i) + M_j(T_i) * F_j(T_i)$$

Dove $F_j(T_i)$, $R_j(T_i)$ e $M_j(T_i)$ valgono secondo le loro definizioni:

$$F_j(T_i) = \int_0^{T_i} f_j(t) dt, \quad R_j(T_i) = 1 - F_j(T_i), \quad M_j(T_i) = \frac{\int_0^{T_i} t * f_j(t) dt}{F_j(T_i)}$$

Dato che ogni **ciclo di sostituzione totale** è caratterizzato da m interventi di manutenzione, **la sua lunghezza** è data dalla sommatoria:

lunghezza del ciclo di sostituzione totale =

$$= \sum_{j=1}^m T_i * R_j(T_i) + M_j(T_i) * F_j(T_i)$$

Osservazione: nell'ipotesi che si effettui solo manutenzione preventiva (non ci sono guasti $R_j(T_i) = 1, \forall i$), la lunghezza del ciclo di sostituzione totale sarebbe pari a $T_m = m * T_i$, mentre nell'ipotesi che si effettui solo manutenzione correttiva ($F_j(T_i) = 1, \forall i$), la lunghezza del ciclo di sostituzione totale sarebbe pari a $\sum_{j=1}^m M_j(T_i)$.

Affinché il modello funzioni correttamente, è necessario aggiungere la seguente condizioni:

$$F_j(T_i) = \int_0^{T_i} f_j(t) dt \leq 1, \quad \forall T_i, \forall j$$

Questa condizione avverte, sulla necessità che, in ogni ciclo di guasto, non accada più di un guasto.

A questo punto, il costo totale atteso di manutenzione per unità di tempo **CTA** vale:

$$CTA(m, T_i) = \frac{\{(m - 1)C_{pp} + \sum_{j=1}^{m-1} C_{eicp} * F_j(T_i)\} + \{C_{pt} + C_{eict} * F_m(T_i)\}}{\sum_{j=1}^m T_i * R_j(T_i) + M_j(T_i) * F_j(T_i)}$$

Obiettivo del modello: trovare i valori $m \in [1, K]$ e $T_i \in (0, T_{max}]$, che minimizzano **CTE**(m, T_i).

Si tratta di un problema di ottimizzazione in funzione delle variabili indipendenti m e T_i , dove:

- Il numero d'interventi di manutenzione, m , può variare da 1 a K (con K che è il numero totale di funzioni $\lambda_m(t)$ di cui si dispone nel database);

- L'intervallo a cui realizzare la SPP, T_i , può assumere valori all'interno dell'intervallo $(0, T_{max}]$ (con T_{max} che è la massima durata possibile dell'intervallo T_i , che separa due SPP). La condizione $F_j(T_i) = \int_0^{T_i} f_j(t) dt \leq 1, \forall T_i, \forall j$, impone che il valore di T_{max} sia il minimo tra i valori di tempo $\bar{t}_j, j=1, \dots, m$, in cui le m funzioni $\lambda_j(t)$, sono poste uguali all'unità.

4.2 Modello di ottimizzazione delle politiche manutentive sotto revisione di fine lotto.

Questo modello è stato proposto per ottimizzare la politica di manutenzione, ovvero il mix delle politiche manutentive adottata per una macchina o sistema che produce lotti di lunghezza differenti (espressi in Km).

In questo modello, per ogni ciclo di manutenzione, la cui durata coincide con la lunghezza di un lotto di produzione, vengono eseguiti m **interventi preventivi di revisione o controllo**, i primi $m-1$ sono detti **controlli intermedi (CI)** mentre l'ultimo è detto **controllo pre-partenza (CP)**. In caso di guasto, invece, si realizza un **intervento di manutenzione correttiva** o a guasto (G), permettendo al sistema di continuare a svolgere la sua funzione. Pertanto, il **ciclo di manutenzione** inizia con un sistema la cui affidabilità tende al 100% e termina, dopo m intervalli, con un **controllo pre-partenza (CP)**, riportando nuovamente l'affidabilità del sistema ad un valore tendente al 100%, in seguito alla quale inizierà un nuovo ciclo di manutenzione, come si vede in fig.4.7.

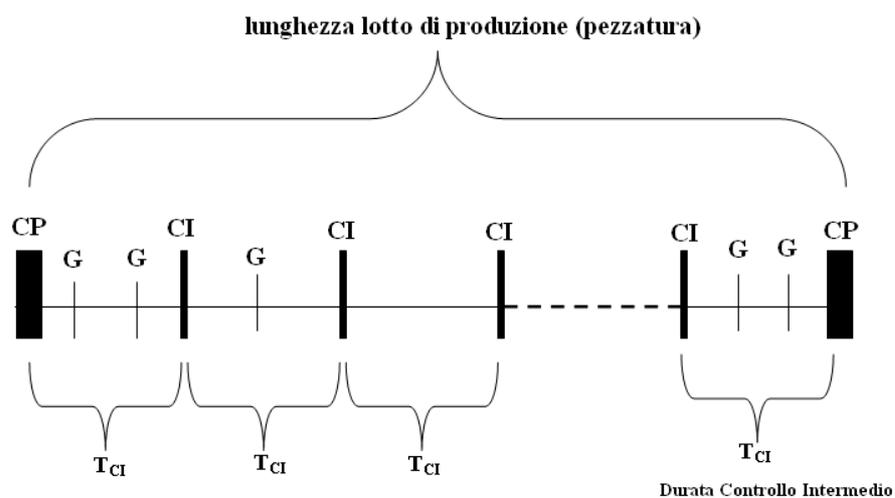


Fig. 4.7: Evoluzione del sistema con revisioni preventive

Il problema manutentivo da risolvere consiste nel migliorare la disponibilità operativa della macchina ovvero nel ridurre il numero di interventi a guasto evitando, così guasti costosi, al fine di ottenere una riduzione dei costi totali di manutenzione. Questo può essere ottenuto migliorando l'affidabilità aggregata della macchina, ovvero la propensione al buon funzionamento nell'intervallo relativo alla produzione di un lotto, attraverso un potenziamento dei controlli preventivi, il cui scopo è appunto migliorare l'affidabilità.

Per modellare questo problema di manutenzione si utilizzerà la seguente notazione:

t : tempo o durata di missione (espressa in Km);

$\lambda(t)$: tasso di guasto del sistema in funzione di t ;

$f(t)$: densità della probabilità di guasto del sistema in funzione t ;

$F(t)$: inaffidabilità (probabilità cumulata di guasto) del sistema in funzione t ;

$R(t)$: affidabilità del sistema in funzione t ;

α : fattore di scala della distribuzione di Weibull o vita caratteristica del componente (espressa in Km);

β : fattore di forma della distribuzione di Weibull del componente;

T_{LP} : durata ciclo di manutenzione (espresso in Km) ovvero la lunghezza di un lotto di produzione,;

T_{CI} : durata (espressa in Km) tra 2 controlli intermedi o tra un controllo intermedio e un controllo pre-partenza;

n : numero componenti del sistema;

n_{CI} : numero componenti sostituiti durante un controllo intermedio(CI) o controllo prepartenza (CP) ;

N_{CI} : numero controlli intermedi (CI);

N_{MG} : numero di fermate per guasto in un ciclo di manutenzione, (che coincide con il numero totale di componenti sostituiti);

CT : costo totale di manutenzione in un ciclo di manutenzione (lotto produzione);

C_{MG} : costo di manutenzione correttiva o a guasto (G);

C_{CI} : costo di manutenzione (controllo) intermedia (CI);

C_{CP} : costo di manutenzione (controllo) prepartenza(CP);

C_C : costo unitario del componente;

Il modello proposto, vale sotto le seguenti ipotesi:

- Che le funzioni affidabilistiche, $R(t)$, $F(t)$, $f(t)$ e $\lambda(t)$ del componente si distribuisca secondo una distribuzione di Weibull del tipo:

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

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lambda(t) \cdot R(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1}$$

Dove

- $\beta < 1$ se in fase di mortalità infantile o di rodaggio;
- $\beta = 1$ se in fase di vita utile o dei guasti casuali;
- $\beta > 1$ se in fase di usura o di invecchiamento;
- Che prima di iniziare la lavorazione (o lotto di produzione) ci sia una fase di rodaggio grazie alla quale si prevengono i guasti infantili, per cui si considerano solo i casi in cui $\beta \geq 1$.
- Che il sistema è costituito da n componenti identici in serie, per cui se l'affidabilità dei componenti è descritta da una Weibull di parametri α e β allora l'affidabilità dell'intero sistema, è descritta ancora da una Weibull, di parametri α_{tot} e β :

$$\beta \text{ e } \alpha_{tot} = \frac{\alpha}{n^{\frac{1}{\beta}}} \Rightarrow R_s(t) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha_{tot}}\right)^\beta}$$

- Che il tasso di guasto del sistema totale, $\lambda_s(t)$, sia funzione dei tassi di guasto degli n componenti che costituiscono il sistema, $\lambda_i(t)$ con $i = 1, 2, \dots, n$.
- Che in ogni intervento di manutenzione a guasto si sostituisce un solo componente.
- Che il costo relativo al fermo produzione per un intervento di manutenzione a guasto (relativo alla sostituzione di un componente) è molto maggiore del costo del singolo componente sostituito in un intervento di manutenzione intermedia

$$C_{MG} \gg C_{C(CI)}$$

- Che ci sia un vincolo da parte del cliente sull'intervallo tra due interventi di controllo.

Sotto queste ipotesi il modello ci permette di minimizzare la seguente funzione obiettivo:

$$CT = C_{MG} * N_{MG} + C_{CI} * N_{CI} + C_{CP}$$

ovvero il costo totale di manutenzione relativo ad un ciclo di manutenzione di durata T_{LP} (lunghezza lotto produzione);

dove:

$$C_{MG} = (T_{int} * C_{opp} * V_{prod}) + (N_{operai} * T_{int} * C_{orario\ lavoro}) + C_C$$

$$C_{CI}(= C_{CP}) = (n_{CI} * C_C) + (N_{operai} * T_{int} * C_{orario\ lavoro})$$

$$+ (C_{stop} * T_{int} * V_{prod})$$

dove:

T_{int} = tempo dell'intervento (ovviamente è diverso nei diversi tipi di manutenzione, nel CP è maggiore);

$C_{orario\ lavoro}$ = Costo per un ora di lavoro operaio;

N_{operai} = numero degli operatori impiegati nell'intervento;

C_{opp} = Costo opportunità per mancata produzione in un intervento a guasto;

C_{stop} = Costo opportunità associato al fermo per i controlli intermedi e prepartenza;

V_{prod} = velocità di produzione oraria della macchina.

Tale obiettivo ovvero la minimizzazione del costo totale di manutenzione relativo ad un ciclo di manutenzione di durata T_{LP} (lunghezza lotto produzione) è perseguibile riducendo il numero di fermate per guasti, N_{MG} , aumentando, così, l'affidabilità aggregata del sistema, nell'intervallo (ciclo di manutenzione) T_{LP} considerato che è pari a:

AFFIDABILITA' AGGREGATA =

$$\begin{aligned}
 &= \int_0^{T_{CI(1)}} \mathbf{R}_{[CP \leftrightarrow CI_1]}(\mathbf{t}) dt + \int_{T_{CI(1)}}^{T_{CI(2)}} \mathbf{R}_{[CI(1) \leftrightarrow CI(2)]}(\mathbf{t}) dt + \dots \\
 &\dots + \int_{T_{CI(i-1)}}^{T_{CI(i)}} \mathbf{R}_{[CI(i-1) \leftrightarrow CI(i)]}(\mathbf{t}) dt + \dots + \int_{T_{CI(N_{CI})}}^{T_{LP}} \mathbf{R}_{[CI(N_{CI}) \leftrightarrow CP]}(\mathbf{t}) dt
 \end{aligned}$$

Graficamente l'affidabilità aggregata del sistema totale è la somma delle aree sottese alle curve di affidabilità del sistema tra 2 controlli (CP ↔ CI, CI ↔ CI, CI ↔ CP).

Infatti, in linea di principio, è coerente ritenere che all'aumentare dell'affidabilità aggregata del sistema complessivo, aumenta la sua disponibilità operativa, e quindi diminuisce la probabilità di guasto dei componenti che lo costituiscono.

Capitolo 5: LO STATO DELL'ARTE

5.1. Maintenance Literature Review

Il tema della manutenzione è stato trattato in letteratura da numerosissimi autori.

Esso abbraccia i più svariati settori e può essere preso in considerazione sotto molteplici aspetti. Per tale motivo è stato condotto un approfondito studio delle fonti scientifiche che ha previsto la scelta di articoli riguardanti la manutenzione preventiva ed in particolare quelli finalizzati all'ottimizzazione delle attività di manutenzione. Viene di seguito riportata la loro catalogazione in ordine cronologico (al fine di evidenziare gli sviluppi del tema nel corso degli anni e l'eventuale nascita di nuove problematiche e/o orizzonti di sviluppo), la sintesi delle caratteristiche essenziali di ciascuno studio in una tabella riassuntiva (in modo da avere un'idea immediata dei parametri maggiormente considerati dagli autori) e la selezione dei principali lavori in gruppi omogenei ed affini.

Nello specifico, la Tabella 5.1 riassume l'ampia bibliografia in materia di gestione e ottimizzazione della manutenzione, che è stata consultata e posta alla base del presente lavoro. In essa è possibile osservare la seguente suddivisione:

- ✓ Le righe riportano ciascun articolo, indicato con il numero del riferimento bibliografico, per un totale di 165 articoli selezionati;

- ✓ Le colonne riportano le caratteristiche essenziali delle fonti bibliografiche:
 - Numero della citazione nella bibliografia;
 - Anno;
 - Ottimizzazione della Manutenzione effettuata in base a parametri quali costi, sicurezza, affidabilità e/o disponibilità;
 - Metodo di ottimizzazione utilizzato (software, simulazione, algoritmi genetici, modelli matematici, analitici, statistici);
 - Sviluppo teorico/concettuale del modello utilizzato o della metodologia adoperata;
 - Utilizzo di Performance Indicators;
 - Approfondimento di nozioni teoriche riguardanti la manutenzione;
 - Rassegna dello stato dell'arte;
 - Presentazione di Case Study;
 - Analisi grafica dello studio presentato;

- ✓ Le celle contengono un pallino in corrispondenza della presenza della caratteristica per quel dato articolo.

Tabella 5.1: *Principali caratteristiche delle fonti bibliografiche*

Numero Riferimento Bibliografico	Anno	Parametri di Ottimizzazione della Manutenzione			Metodo di Ottimizzazione utilizzato				Sviluppo Modello Concettuale/ Metodologia	Utilizzo di Performance Indicators	Nozioni Teoriche di Manutenzione	Rassegna dello Stato dell'Arte	Presentazione Caso/i Studio	Analisi Grafica dello Studio Presentato
		Costi	Sicurezza	Affidabilità e/o Disponibilità	Utilizzo di Software	Metodi di Simulazione	Algoritmi Genetici	Modelli Matematici/ Analitici/ Statistici						
1	1993										•		•	
2	1995	•	•	•	•	•							•	
3	1995										•		•	
4	1995	•						•						•
5	1995										•	•		
6	1996	•	•	•				•				•	•	•
7	1997							•			•			
8	1997					•					•	•	•	•
9	1997										•			
10	1997			•							•			
11	1998	•	•			•						•	•	
12	1998	•		•	•			•				•	•	•
13	1998	•						•				•		

Numero Riferimento Bibliografico	Anno	Parametri di Ottimizzazione della Manutenzione			Metodo di Ottimizzazione utilizzato				Sviluppo Modello Concettuale/ Metodologia	Utilizzo di Performance Indicators	Nozioni Teoriche di Manutenzione	Rassegna dello Stato dell'Arte	Presentazione Caso/i Studio	Analisi Grafica dello Studio Presentato
		Costi	Sicurezza	Affidabilità e/o Disponibilità	Utilizzo di Software	Metodi di Simulazione	Algoritmi Genetici	Modelli Matematici/ Analitici/ Statistici						
14	1999	•	•	•	•			•				•	•	
15	1999	•	•	•		•						•	•	
16	1999	•		•				•				•		
17	1999										•			
18	1999							•			•	•		
19	1999	•	•	•				•					•	•
20	1999	•						•			•	•	•	•
21	2000	•						•				•	•	•
22	2000	•						•	•					•
23	2000			•				•					•	•
24	2000							•		•				
25	2000	•	•					•				•	•	•
26	2000	•		•	•	•						•	•	•
27	2000			•	•	•						•	•	•

Numero Riferimento Bibliografico	Anno	Parametri di Ottimizzazione della Manutenzione			Metodo di Ottimizzazione utilizzato				Sviluppo Modello Concettuale/ Metodologia	Utilizzo di Performance Indicators	Nozioni Teoriche di Manutenzione	Rassegna dello Stato dell'Arte	Presentazione Caso/i Studio	Analisi Grafica dello Studio Presentato
		Costi	Sicurezza	Affidabilità e/o Disponibilità	Utilizzo di Software	Metodi di Simulazione	Algoritmi Genetici	Modelli Matematici/ Analitici/ Statistici						
28	2000					•			•	•	•	•	•	
29	2001	•	•	•			•				•	•	•	
30	2001	•		•	•			•				•		
31	2001							•		•	•			
32	2001	•	•	•						•	•	•		
33	2002			•				•						
34	2002		•		•						•		•	
35	2002	•		•	•	•					•		•	
36	2002							•	•	•	•			
37	2002							•	•	•	•			
38	2003				•			•			•	•	•	
39	2003							•	•	•	•			
40	2003		•					•			•	•		
41	2003	•		•	•			•			•	•	•	

Numero Riferimento Bibliografico	Anno	Parametri di Ottimizzazione della Manutenzione			Metodo di Ottimizzazione utilizzato				Sviluppo Modello Concettuale/ Metodologia	Utilizzo di Performance Indicators	Nozioni Teoriche di Manutenzione	Rassegna dello Stato dell'Arte	Presentazione Caso/i Studio	Analisi Grafica dello Studio Presentato
		Costi	Sicurezza	Affidabilità e/o Disponibilità	Utilizzo di Software	Metodi di Simulazione	Algoritmi Genetici	Modelli Matematici/ Analitici/ Statistici						
42	2003	•						•				•	•	
43	2004								•			•	•	•
44	2004								•		•			
45	2004	•	•	•				•					•	•
46	2004	•	•					•				•	•	•
47	2004		•		•			•				•	•	•
48	2004			•				•			•	•	•	•
49	2004			•		•		•					•	•
50	2004							•					•	•
51	2004							•			•		•	•
52	2004	•	•					•				•	•	
53	2005		•					•				•	•	
54	2005	•							•				•	•
55	2005							•	•					

Numero Riferimento Bibliografico	Anno	Parametri di Ottimizzazione della Manutenzione			Metodo di Ottimizzazione utilizzato				Sviluppo Modello Concettuale/ Metodologia	Utilizzo di Performance Indicators	Nozioni Teoriche di Manutenzione	Rassegna dello Stato dell'Arte	Presentazione Caso/i Studio	Analisi Grafica dello Studio Presentato
		Costi	Sicurezza	Affidabilità e/o Disponibilità	Utilizzo di Software	Metodi di Simulazione	Algoritmi Genetici	Modelli Matematici/ Analitici/ Statistici						
56	2005								•		•		•	
57	2005	•						•		•			•	•
58	2006	•							•		•	•		
59	2006			•					•	•				
60	2006			•		•		•				•	•	•
61	2006							•				•		
62	2006	•	•	•				•	•			•	•	•
63	2006	•		•			•	•				•	•	•
64	2006	•	•	•				•				•		•
65	2006		•					•				•	•	
66	2006							•	•			•	•	•
67	2006							•		•			•	
68	2006			•				•		•			•	•
69	2006	•	•			•							•	•

Numero Riferimento Bibliografico	Anno	Parametri di Ottimizzazione della Manutenzione			Metodo di Ottimizzazione utilizzato				Sviluppo Modello Concettuale/ Metodologia	Utilizzo di Performance Indicators	Nozioni Teoriche di Manutenzione	Rassegna dello Stato dell'Arte	Presentazione Caso/i Studio	Analisi Grafica dello Studio Presentato
		Costi	Sicurezza	Affidabilità e/o Disponibilità	Utilizzo di Software	Metodi di Simulazione	Algoritmi Genetici	Modelli Matematici/ Analitici/ Statistici						
70	2006									•	•			
71	2007		•							•	•			
72	2007						•				•	•		
73	2007									•	•			
74	2007		•	•			•	•				•	•	
75	2007							•	•	•	•	•	•	
76	2007	•						•				•	•	
77	2008							•		•	•			
78	2008	•		•			•	•				•	•	
79	2008	•			•			•			•	•		
80	2008							•		•	•	•	•	
81	2008									•	•			
82	2009							•		•		•	•	
83	2009							•	•			•	•	

Numero Riferimento Bibliografico	Anno	Parametri di Ottimizzazione della Manutenzione			Metodo di Ottimizzazione utilizzato				Sviluppo Modello Concettuale/ Metodologia	Utilizzo di Performance Indicators	Nozioni Teoriche di Manutenzione	Rassegna dello Stato dell'Arte	Presentazione Caso/i Studio	Analisi Grafica dello Studio Presentato
		Costi	Sicurezza	Affidabilità e/o Disponibilità	Utilizzo di Software	Metodi di Simulazione	Algoritmi Genetici	Modelli Matematici/ Analitici/ Statistici						
84	2009	•						•						
85	2009	•	•					•				•	•	•
86	2009		•			•		•					•	
87	2009	•		•				•				•		•
88	2009								•	•				
89	2009							•				•		
90	2009							•	•	•		•	•	•
91	2009											•	•	•
92	2009							•					•	
93	2009							•				•	•	•
94	2009	•						•					•	
95	2009							•				•	•	•
96	2009							•		•				
97	2010	•	•	•	•		•						•	

Numero Riferimento Bibliografico	Anno	Parametri di Ottimizzazione della Manutenzione			Metodo di Ottimizzazione utilizzato				Sviluppo Modello Concettuale/ Metodologia	Utilizzo di Performance Indicators	Nozioni Teoriche di Manutenzione	Rassegna dello Stato dell'Arte	Presentazione Caso/i Studio	Analisi Grafica dello Studio Presentato
		Costi	Sicurezza	Affidabilità e/o Disponibilità	Utilizzo di Software	Metodi di Simulazione	Algoritmi Genetici	Modelli Matematici/ Analitici/ Statistici						
98	2010	•					•	•					•	•
99	2010							•		•			•	•
100	2010	•						•						
101	2010							•		•				•
102	2010				•			•				•	•	
103	2010	•						•				•		
104	2010	•	•					•				•	•	
105	2010	•		•				•	•				•	•
106	2010							•				•	•	•
107	2011											•	•	
108	2011		•	•				•						
109	2011									•		•		
110	2011		•			•						•		
111	2011			•				•		•		•		

Numero Riferimento Bibliografico	Anno	Parametri di Ottimizzazione della Manutenzione			Metodo di Ottimizzazione utilizzato				Sviluppo Modello Concettuale/ Metodologia	Utilizzo di Performance Indicators	Nozioni Teoriche di Manutenzione	Rassegna dello Stato dell'Arte	Presentazione Caso/i Studio	Analisi Grafica dello Studio Presentato
		Costi	Sicurezza	Affidabilità e/o Disponibilità	Utilizzo di Software	Metodi di Simulazione	Algoritmi Genetici	Modelli Matematici/ Analitici/ Statistici						
112	2011							•				•	•	•
113	2011								•			•	•	•
114	2011	•						•				•	•	•
115	2011			•	•		•	•		•		•		
116	2011											•	•	•
117	2012							•				•		
118	2012			•				•			•	•	•	
119	2012		•					•		•	•	•	•	
120	2012			•					•			•	•	•
121	2012									•	•		•	
122	2012							•				•	•	
123	2012									•	•			
124	2012								•		•	•		
125	2012							•	•			•	•	•

Numero Riferimento Bibliografico	Anno	Parametri di Ottimizzazione della Manutenzione			Metodo di Ottimizzazione utilizzato				Sviluppo Modello Concettuale/ Metodologia	Utilizzo di Performance Indicators	Nozioni Teoriche di Manutenzione	Rassegna dello Stato dell'Arte	Presentazione Caso/i Studio	Analisi Grafica dello Studio Presentato
		Costi	Sicurezza	Affidabilità e/o Disponibilità	Utilizzo di Software	Metodi di Simulazione	Algoritmi Genetici	Modelli Matematici/ Analitici/ Statistici						
126	2012		•					•					•	
127	2012	•						•			•			
128	2013							•				•		
129	2013	•						•					•	•
130	2013	•				•		•				•	•	•
131	2013							•					•	
132	2013	•				•				•			•	•
133	2013		•							•				
134	2013				•	•						•	•	•
135	2013					•		•					•	•
136	2013			•				•			•			
137	2013							•					•	•
138	2013				•								•	
139	2013				•						•			

Numero Riferimento Bibliografico	Anno	Parametri di Ottimizzazione della Manutenzione			Metodo di Ottimizzazione utilizzato				Sviluppo Modello Concettuale/ Metodologia	Utilizzo di Performance Indicators	Nozioni Teoriche di Manutenzione	Rassegna dello Stato dell'Arte	Presentazione Caso/i Studio	Analisi Grafica dello Studio Presentato
		Costi	Sicurezza	Affidabilità e/o Disponibilità	Utilizzo di Software	Metodi di Simulazione	Algoritmi Genetici	Modelli Matematici/ Analitici/ Statistici						
140	2013		•						•	•		•		
141	2013						•	•	•	•				
142	2013							•		•		•		
143	2013	•						•	•	•				
144	2013			•			•			•				
145	2013							•				•		
146	2013							•			•	•		
147	2013	•						•	•	•				
148	2013				•			•		•				
149	2013				•			•		•		•	•	
150	2013	•		•		•	•				•		•	
151	2013			•		•	•					•	•	
152	2013				•	•	•				•		•	
153	2013					•	•	•				•	•	

Numero Riferimento Bibliografico	Anno	Parametri di Ottimizzazione della Manutenzione			Metodo di Ottimizzazione utilizzato				Sviluppo Modello Concettuale/ Metodologia	Utilizzo di Performance Indicators	Nozioni Teoriche di Manutenzione	Rassegna dello Stato dell'Arte	Presentazione Caso/i Studio	Analisi Grafica dello Studio Presentato
		Costi	Sicurezza	Affidabilità e/o Disponibilità	Utilizzo di Software	Metodi di Simulazione	Algoritmi Genetici	Modelli Matematici/ Analitici/ Statistici						
154	2013	•		•				•					•	•
155	2013	•		•				•					•	•
156	2013	•						•					•	•
157	2013							•		•	•			
158	2014	•			•	•		•						•
159	2014	•						•				•	•	•
160	2014	•	•			•			•	•	•			
161	2014	•						•				•	•	•
162	2014	•						•				•		•
163	2014	•			•	•		•		•	•			•
164	2014			•		•		•					•	•
165	2014		•							•	•			•

5.2. Principali modelli e metodi di ottimizzazione

5.2.1. Introduzione

Lo stato dell'arte in materia di ottimizzazione della manutenzione consiste in tutta una serie di modelli e metodi volti a determinare le strategie manutentive più opportune. I risultati degli studi condotti in materia evidenziano una forte dipendenza dei risultati dalla particolare realtà produttiva di volta in volta considerata. Da questa dipendono infatti molti elementi alla base del processo di ottimizzazione, in particolare il peso, l'importanza da attribuire a variabili fondamentali quali sicurezza, costi affidabilità e disponibilità.

5.2.2. Ottimizzazione applicata a sistemi semplici

Al fine di aggirare la complessità propria di sistemi articolati, quali sono gli impianti industriali, molti studi si limitano a considerare sistemi suddivisibili in appena pochi componenti [47]. Ciò ovviamente ne spinge i risultati verso una dimensione teorica e scarsamente applicabile ai casi concreti, governati da una complessità generalmente molto spinta.

In sostanza, questo approccio prevede di individuare, all'interno del sistema da ottimizzare, pochi sistemi semplici e di modellarne probabilisticamente il comportamento in termini ad esempio di sicurezza ed affidabilità. Viene spesso considerata, attraverso un opportuno indice probabilistico, anche la possibilità che l'intervento manutentivo non giunga a buon fine [98].

Ai fini del processo di ottimizzazione vero e proprio, vengono valutate le conseguenze, in termini di rischio, interruzione della produzione e costo,

delle varie tipologie di guasto cui possono incorrere i vari componenti considerati.

5.2.3. Ottimizzazione applicata a sistemi complessi

I moderni sistemi produttivi sono sistemi molto complessi, costituiti da un gran numero di componenti strettamente interconnessi fra loro dal punto di vista funzionale e non solo. La gamma di guasti/incidenti che possono presentarsi è quindi molto ampia e può essere prevista, modellata e quindi anche contrastata solo attraverso complessi modelli e metodi di simulazione.

L'obiettivo resta sempre la definizione di una politica di manutenzione che sia ottimale in termini dei parametri chiave – quali ad esempio la sicurezza – ma anche rispettosa di esigenze in termini di costi ed affidabilità. Il modello di rappresentazione del sistema deve quindi contenere una variabile che, in qualche modo, sia rappresentativa del piano di manutenzione adottato e, in funzione di questa, restituire un valore che sia univocamente associabile ad una certa cifra di rischio. In questo modo risulta possibile, impostata la cifra di rischio ritenuta accettabile, trovare un piano di manutenzione idoneo. Ad esempio, con riferimento alla sicurezza (parametro sempre più considerato dagli studiosi soprattutto nei lavori più recenti), esistono vari modi per quantificare numericamente la cifra di rischio.

Particolarmente interessante è quello proposto da J. K. Vaurio [37], che consiste nel ritenere che “l’ottimizzazione in termini di rischio sia equivalente alla minimizzazione del tempo medio di indisponibilità”.

In questo modo il processo di ottimizzazione si incentra sull’espressione di tale tempo in funzione di una variabile che sia rappresentativa del piano manutentivo adottato. Si tratta di una metodologia di notevole efficacia, in quanto in grado di ottimizzare la manutenzione, perseguendo contemporaneamente obiettivi in termini di sicurezza e disponibilità.

La variabile rappresentativa del piano di manutenzione seguito viene infatti identificata col semplice intervallo di tempo che intercorre fra due interventi manutentivi successivi.

E' così possibile trovare un piano di manutenzione che garantisca idonei livelli di sicurezza, ma che allo stesso tempo non comporti interruzioni della produzione eccessivamente frequenti, per consentire controlli ed interventi manutentivi.

Da sottolineare che la struttura della funzione che lega il tempo medio di indisponibilità (tempo di indisponibilità fratto tempo totale) con la cadenza T degli interventi manutentivi, nonché i valori assunti dai vari parametri in essa presenti, dipendono dalla particolare politica manutentiva che si intende adottare. Ad esempio una manutenzione di impronta preventiva e migliorativa garantisce, a parità di cadenza degli interventi, maggiore sicurezza ed affidabilità, rispetto ad una esclusivamente incidentale e correttiva, ma maggiori costi legati agli interventi.

Resta appunto il problema dei costi. Questo può essere sintetizzato in una funzione in cui il costo viene espresso sempre in funzione dell'intervallo temporale T che intercorre fra due interventi manutentivi successivi. Questa funzione risulterà minimizzata in corrispondenza di un valore di T nè troppo grande (si avrebbe infatti un incremento dei costi legati alle conseguenze dei guasti) nè troppo piccolo (in tal caso i costi subirebbero un aumento causato dalle spese di manutenzione e dalle perdite di produttività causate dalle continue interruzioni). Nel primo caso si avrebbe infatti un incremento dei costi legati alle conseguenze dei guasti, resi frequenti dalla sporadicità degli interventi manutentivi. Nel secondo si verificherebbe invece un aumento delle spese di manutenzione, nonché una riduzione della produttività dell'impianto e quindi delle vendite.

Numerosi studi condotti in materia [37, 104] hanno evidenziato che, a prescindere dalla particolare realtà produttiva di volta in volta considerata, la cadenza ottimale T degli intervalli manutentivi ottimizzata sulla base dei

costi risulta tendenzialmente superiore rispetto a quella ottimizzata sulla base della sicurezza. In sostanza quindi, i due ottimi non coincidono e risulta pertanto necessario trovare una soluzione intermedia, che tenga conto di entrambi. La soluzione più convincente, in quanto maggiormente tutelante la sicurezza dei lavoratori, è certamente quella proposta da J. K. Vaurio [37], secondo cui, per la determinazione della cadenza T, è necessario partire da un livello minimo di sicurezza ritenuto accettabile e ricavare da questo l'intervallo T ed i costi ad esso associati. Qualora il budget aziendale non sia sufficiente a sostenere tali costi, risulta indispensabile ripensare la strategia manutentiva, in modo che questa restituisca soluzioni soddisfacenti e compatibili in termini economici e di sicurezza (ad esempio provando a sostituire una manutenzione correttiva con una migliorativa e così via).

5.2.4. L'uso di algoritmi genetici

Il lavoro di J. K. Vaurio di cui si è parlato in precedenza [37], così come quello di molti altri studiosi [132] consiste, sostanzialmente, nello sforzo di descrivere in termini lineari il legame che c'è fra manutenzione e probabilità/frequenza con cui si verificano guasti ed altri eventi sfavorevoli.

La complessità di queste relazioni ha spinto tuttavia molti studiosi a ricorrere ad "algoritmi genetici" [98], [81,109], [87], [59, 61, 64], [70, 80], [113], [133, 150].

Gli algoritmi genetici sono infatti algoritmi di analisi dei dati applicabili alla risoluzione di un'ampia varietà di problemi d'ottimizzazione, non indicati per gli algoritmi classici, compresi quelli in cui la funzione obiettivo è discontinua, non derivabile, stocastica o fortemente non lineare.

Un tipico algoritmo genetico parte da un certo numero di possibili soluzioni (individui) chiamate popolazione e provvede a farle evolvere nel corso dell'esecuzione: a ciascuna iterazione, esso opera una selezione di individui

della popolazione corrente, impiegandoli per generare nuovi elementi della popolazione stessa, che andranno a sostituire un pari numero d'individui già presenti, e a costituire in tal modo una nuova popolazione per l'iterazione (o generazione) seguente. Tale successione di generazioni evolve verso una soluzione ottimale del problema assegnato.

La loro evoluzione viene ottenuta attraverso una parziale ricombinazione delle soluzioni (ogni individuo trasmette parte del suo patrimonio genetico ai propri discendenti) e l'introduzione di mutazioni casuali nella popolazione di partenza (sporadicamente, quindi, nascono individui con caratteristiche non comprese tra quelle presenti nel corredo genetico della specie originaria).

Finita la fase di evoluzione, la popolazione delle soluzioni viene analizzata e vengono tenute solo le soluzioni che meglio risolvono il problema: gli individui con le qualità più adatte all'ambiente in cui si trovano hanno quindi maggiori possibilità di sopravvivere e riprodursi. Queste soluzioni subiranno una nuova fase di evoluzione e così via.

Alla fine ci si aspetta di trovare una popolazione di soluzioni che riescano a risolvere adeguatamente il problema posto. Non vi è modo di decidere a priori se l'algoritmo sarà effettivamente in grado di trovare una soluzione accettabile.

Gli algoritmi genetici rappresentano quindi un potentissimo strumento per ottimizzare le strategie di manutenzione di una qualunque e per quanto complessa realtà produttiva, tenendo conto dell'enorme mole di dati e vincoli che hanno influenza in questo tipo di problema.

Particolarmente interessante in tal senso è il lavoro pubblicato da S. Martorell, A. Sanchez, S. Carlos e V. Serradell [81], in cui si fa riferimento all'ottimizzazione della manutenzione considerando la sicurezza sul lavoro, ma anche progettazione, layout, collaudi, ecc. Viene inoltre affrontato il problema prima considerando ed ottimizzando uno alla volta questi aspetti e poi impostando un unico problema di ottimizzazione multi obiettivo. Entrambi gli approcci vengono affrontati tramite il ricorso ad algoritmi

genetici, pervenendo a risultati differenti. L'applicazione ad una realtà concreta, rappresentata da un sistema di pressurizzazione dell'acqua, mostra la migliore efficacia dell'approccio multi obiettivo, dimostrando così l'efficienza degli algoritmi genetici, nel gestire problemi complessi e dipendenti da un gran numero di variabili (quali sono appunto i problemi di ottimizzazione della manutenzione).

Nel lavoro di Nabil Nahas, Abdelhakim Khatab, Daoud Ait-Kadi, Mustapha Nourelfath [113], gli algoritmi genetici vengono utilizzati nel caso di sistemi più complessi in ausilio a tecniche tradizionali, al fine di migliorarne i risultati in termini di ottimizzazione. Più in dettaglio, in questo studio viene inizialmente affrontato e risolto il problema di ottimizzazione della manutenzione preventiva per sistemi multi - stato (MSS) con il metodo di ottimizzazione della manutenzione preventiva imperfetta per sistemi multi - stato di Levitin e Lisnianski, trovando una sequenza ottimale delle azioni di manutenzione che riduca al minimo i costi di manutenzione, fornendo al contempo il livello di affidabilità del sistema desiderato. I risultati ottenuti vengono poi ripresi utilizzando un algoritmo genetico (GENITOR), che viene confrontato con il metodo iniziale utilizzando degli esempi di riferimento. Dal confronto emerge un miglioramento delle prestazioni e dunque delle soluzioni (con costi minimi) per 8 istanze su 10.

5.2.5. Il ricorso a metodi di simulazione

Nei problemi di ottimizzazione in materia di manutenzione, spesso ci si trova di fronte a situazioni in cui si ha bisogno di conoscere la probabilità di un certo evento (ad esempio un guasto), ma le variabili che lo condizionano sono troppe e non è possibile svolgere i calcoli analitici. In tali situazioni si fa ricorso a metodi di campionamento simulato, cioè si simula la situazione nella quale si vuole calcolare la probabilità di questo certo evento.

Il metodo di simulazione più utilizzato in questo campo, come emerge dall'ampia ricerca bibliografica posta alla base di questo lavoro, risulta certamente essere la simulazione Monte Carlo [104], [61, 62], [70]. Si tratta di una simulazione stocastica, che si attua riproducendo il meccanismo preso in esame, sostituendo alla valutazione analitica l'osservazione empirica del fenomeno e traendo da questa le informazioni non rilevabili per via analitica. Ad esempio, la frequenza osservata di un certo evento costituisce una valutazione della probabilità di quell'evento (a patto che il campionamento sia stato simulato per un consistente numero di volte). Il metodo si basa inoltre su un algoritmo che genera una serie di numeri tra loro non correlati, che seguono la distribuzione di probabilità che si suppone abbia il fenomeno da indagare.

La simulazione Monte Carlo calcola una serie di realizzazioni possibili del fenomeno in esame, con il peso proprio della probabilità di tale evenienza, cercando di esplorare in modo denso tutto lo spazio dei parametri del fenomeno. Una volta calcolato questo campione casuale, la simulazione esegue delle "misure" delle grandezze di interesse su tale campione. La simulazione Monte Carlo è ben eseguita se il valore medio di queste misure sulle realizzazioni del sistema converge al valore vero.

Da un altro punto di vista le simulazioni Monte Carlo non sono altro che una tecnica numerica per calcolare integrali.

Un importante vantaggio di questo metodo è rappresentato dal fatto che è possibile modificare a piacimento i parametri che determinano l'andamento della simulazione, il che permette di aggiornare la simulazione in base ai continui cambiamenti cui è inevitabilmente soggetto il sistema preso in esame.

Viene così sviluppato un modello stocastico di funzionamento dell'impianto dal punto di vista della sua affidabilità/disponibilità, ovvero della rottura / riparazione / manutenzione dei suoi componenti e valutato in termini di costi e ricavi. La flessibilità del metodo Monte Carlo permette di comprendere

alcuni aspetti pratici, come il deterioramento delle riparazioni effettuate, l'invecchiamento, le sequenze di manutenzione periodica necessarie, il numero di squadre di riparazione necessario per diversi tipi di interventi di riparazione (meccanica, elettronica, idraulica, ecc), le differenti priorità da attribuire alle varie componenti.

5.2.6. L'uso combinato di algoritmi genetici e simulazione Monte Carlo

Dai numerosi studi presi in considerazione, emerge come l'approccio rappresentato dal metodo Monte Carlo sia particolarmente efficiente nel trattare sistemi complessi e stocasticamente variabili quali sono gli impianti industriali. Tuttavia ogni medaglia ha il suo rovescio: fanno notare alcuni studiosi [61, 62, 70] come il problema della simulazione Monte Carlo sia il fatto che i tempi di calcolo non siano sufficientemente brevi per gestire l'enorme mole di dati inerenti i problemi oggetto di studio.

Al fine di mantenere i tempi di calcolo entro limiti ragionevoli, possono essere considerati ed esaminati solo pochi valori per ogni variabile di controllo. Ciò rischia di impedire il conseguimento di un panorama completo di tutto lo spazio di ricerca, probabilmente portando soltanto ad ottimizzazioni parziali.

Per risolvere questo problema, questi studiosi propongono, per la ricerca dell'ottimo in termini di strategia di manutenzione, l'uso combinato di simulazione Monte Carlo ed algoritmi genetici. In particolare, la simulazione Monte Carlo permette di considerare diversi aspetti rilevanti del funzionamento degli impianti, che gli algoritmi genetici non sarebbero in grado di cogliere (priorità, deterioramenti, invecchiamenti, ecc.).

Ai suddetti algoritmi è altresì demandato il compito di ottimizzare una funzione che al suo interno contiene aspetti economici e di sicurezza

dell'impianto e che viene ad essere definita proprio grazie al ricorso alla simulazione Monte Carlo.

5.2.7. Manutenzione e Sicurezza

Come si è accennato in precedenza, il tema della manutenzione abbraccia svariati settori e risulta strettamente correlato a parametri chiave nella vita aziendale. Nello specifico, dallo studio della letteratura è emerso un legame strategico significativo dell'ottimizzazione della manutenzione con la sicurezza nei luoghi di lavoro. Ad esempio, molti studi [104], [120,41] hanno affrontato il problema della pianificazione delle attività di manutenzione su strutture che, per quelle che sono le loro caratteristiche e/o l'ambiente in cui si trovano, sono soggette ad un continuo e progressivo deterioramento. In questi casi riveste un'importanza fondamentale il problema della sicurezza e può essere garantita negli anni solo attraverso un opportuno piano di manutenzione. Dalla letteratura emerge come i modelli di strategie di manutenzione proposti siano sostanzialmente tre: manutenzione età - dipendente, manutenzione di blocco e manutenzione basata su controllo e riparazione. La prima tende a privilegiare la sicurezza attraverso interventi di manutenzione preventiva, cadenzati sulla base di opportune previsioni. La manutenzione in blocco prevede che un componente venga riparato solo dopo aver subito un guasto. Trascorso un certo intervallo di tempo abbastanza ampio, tutti i componenti che nel frattempo non hanno subito guasti vengono comunque sottoposti a revisione. Infine la manutenzione basata su controllo e riparazione è, fra le tre, quella con la maggiore efficienza in termini economici, ma che offre le minori garanzie in termini di sicurezza. Essa prevede infatti di intervenire su un componente solo ed esclusivamente dopo che questo abbia subito un guasto.

Il ricorso a metodi di simulazione (il metodo Monte Carlo in particolare) permette di confrontare questi tre diversi approcci, mostrando in maniera evidente come quello età - dipendente sia il più efficiente in termini di sicurezza, ma allo stesso tempo comporti costi tutto sommato accettabili (anche se superiori a quelli associati agli altri due approcci).

Ancora, uno studio [41] del 1996 presenta una metodologia di modellazione tecnico-economica che può essere applicata all'ottimizzazione della progettazione e della manutenzione di strutture offshore di grandi dimensioni sulla base di un'analisi sulla sicurezza. La metodologia proposta riunisce obiettivi di minimizzazione sia dei costi che dei rischi nell'ambito del processo di progettazione ma anche e soprattutto di definizione delle strategie manutentive, attraverso la costruzione di un modello tecnico-economico. Le tecniche "Multiple Objective Decision Making" (MODM) vengono poi utilizzate per sottoporre a verifica il modello costruito. I risultati prodotti possono assistere i progettisti nello sviluppo di efficienti progetti che tengano conto dei rischi, delle loro possibili conseguenze, dei costi di manutenzione, dei costi di riparazione, di revisione e di progettazione.

Alle centrali nucleari invece [87], [49, 80] vengono richiesti, dai proprietari delle centrali stesse, dalle autorità di regolamentazione e dall'opinione pubblica in generale, sempre più elevati livelli prestazionali e di sicurezza. La manutenzione svolge un ruolo importante nel conseguire tale obiettivo; dunque, molti studi sono stati condotti al fine di migliorarne l'efficacia. Un punto in comune tra questi programmi è la necessità di valutare in che modo la manutenzione influisce sulle prestazioni e sulla sicurezza delle centrali nucleari. Anche in questo caso, l'approccio più utilizzato è quello offerto da metodi di simulazione [49], anche se non mancano studi basati sul ricorso ad algoritmi genetici [87], [80] o su entrambi [69].

Un settore in cui la manutenzione riveste un'importanza sempre crescente è sicuramente quello petrolchimico. La crescente complessità delle installazioni e delle attività petrolifere e del gas [82, 121], insieme alla

crescente sensibilizzazione dell'opinione pubblica verso la necessità di garantire più elevati livelli di sicurezza, ha messo una forte pressione sui progettisti e sugli operatori circa la necessità di trovare soluzioni innovative per garantire la sicurezza oltre che garantire una gestione economicamente redditizia. Controlli e manutenzione basati sul rischio aiutano a trovare soluzioni di questo tipo. Basti pensare che proprio carenze manutentive hanno determinato il recente disastro della piattaforma petrolifera Deepwater Horizon.

Le metodologie impiegate per una manutenzione basata sul rischio (e non solo) comprendono software sia commerciali che “fatti in casa” (specifici per singoli impianti). Le tecniche con il software producono risultati molto diversi, sollevando serie preoccupazioni. Un recente studio condotto dalla British Health and Safety Laboratory ha confermato la mancanza di un approccio coerente e l'ampia variazione nei risultati degli studi condotti da diverse agenzie in questo delicato settore. Recenti studi condotti in materia hanno comunque evidenziato come una strategia di manutenzione basata sui rischi (RBM) sia di gran lunga la più efficiente nello sviluppo di un piano di manutenzione efficace in termini sia finanziari che di sicurezza in un impianto petrolchimico.

Infine, uno studio del 2010 [139] presenta un modello per indagare l'associazione della frequenza degli infortuni durante una tempesta di neve con le condizioni del fondo stradale, la visibilità ed altri fattori che influenzano la guida. I risultati ottenuti sono la premessa da applicare per la valutazione di diverse strategie di manutenzione, utilizzando la sicurezza come parametro di valutazione. In quest'ottica, tale ricerca presenta un Indice di Superficie Stradale inteso come una misura surrogata dell'attrito comunemente ottenuto con le varie condizioni e caratteristiche del manto stradale. Il metodo proposto utilizza ed integra i dati offerti da varie fonti, come il tempo, osservazioni sullo stato del manto stradale, entità del traffico e frequenza degli incidenti.

Gli ottimi risultati ottenuti dimostrano innanzitutto che l'Indice di condizione del manto stradale è statisticamente significativo, in quanto fortemente influenzante il verificarsi degli incidenti. Questo permette al metodo in questione di mostrare la stretta relazione fra sicurezza e condizione del manto stradale, consentendo così di quantificare e confrontare i benefici sulla sicurezza di strategie e metodi di manutenzione alternativi.

Capitolo 6: APPLICAZIONE DEL MODELLO

INTRODUZIONE

Il modello implementato in questo lavoro di tesi è stato applicato su una linea di produzione critica dello stabilimento di Pozzuoli della Prysmian S.p.A., società operante nella produzione ed installazione di cavi per trasmissione di energie elettrica e telecomunicazioni.

6.1 Il Gruppo Prysmian

Il Gruppo Prysmian è il leader mondiale nel settore dei cavi e sistemi ad elevata tecnologia per il trasporto di energia e per le telecomunicazioni. Con oltre 130 anni di esperienza, un fatturato di circa 8 miliardi di euro nel 2012, il Gruppo Prysmian vanta una solida presenza nei mercati tecnologicamente avanzati e offre la più ampia gamma di prodotti, servizi, tecnologie e know-how.

Il logo del gruppo è rappresentato in fig. 6.1:



Fig. 6.1: Logo del Gruppo Prysmian

Il Gruppo Prysmian è attivo nello **sviluppo, progettazione, produzione, fornitura e installazione** di un'ampia gamma di cavi per le più varie applicazioni nei settori dell'energia e delle telecomunicazioni.

Nel **settore dell'energia**, il Gruppo Prysmian opera nel business dei cavi e sistemi terrestri e sottomarini per la trasmissione di energia, cavi speciali per applicazioni in diversi settori industriali e cavi di media e bassa tensione per le costruzioni edili e le infrastrutture.

Nelle **telecomunicazioni**, il Gruppo produce cavi e accessori per la trasmissione di voce, video e dati, con un'offerta completa di fibra ottica, cavi ottici e in rame e sistemi di connettività.

Prysmian è costantemente focalizzata sull'**innovazione** dei propri prodotti, sul **miglioramento del customer service** e sull'ulteriore **espansione** in alcuni mercati geografici in rapida crescita.

I servizi ad alto valore aggiunto offerti da Prysmian sono:

- Progettazione di prodotti e sistemi basati sulle specifiche esigenze dei clienti.
- Esecuzione di progetti “chiavi in mano” per i quali il Gruppo offre servizi di coordinamento e di gestione dei progetti.
- Installazione e manutenzione preventiva, principalmente nel business cavi e sistemi energia.

Attraverso i due business, *Cavi e Sistemi Energia* e *Cavi e Sistemi per Telecomunicazione*, il Gruppo Prysmian vanta una presenza globale in 50 Paesi, con 91 stabilimenti, 17 Centri di Ricerca & Sviluppo in Europa, negli Stati Uniti e in Sud America (fig. 6.2) e circa 2000 dipendenti.

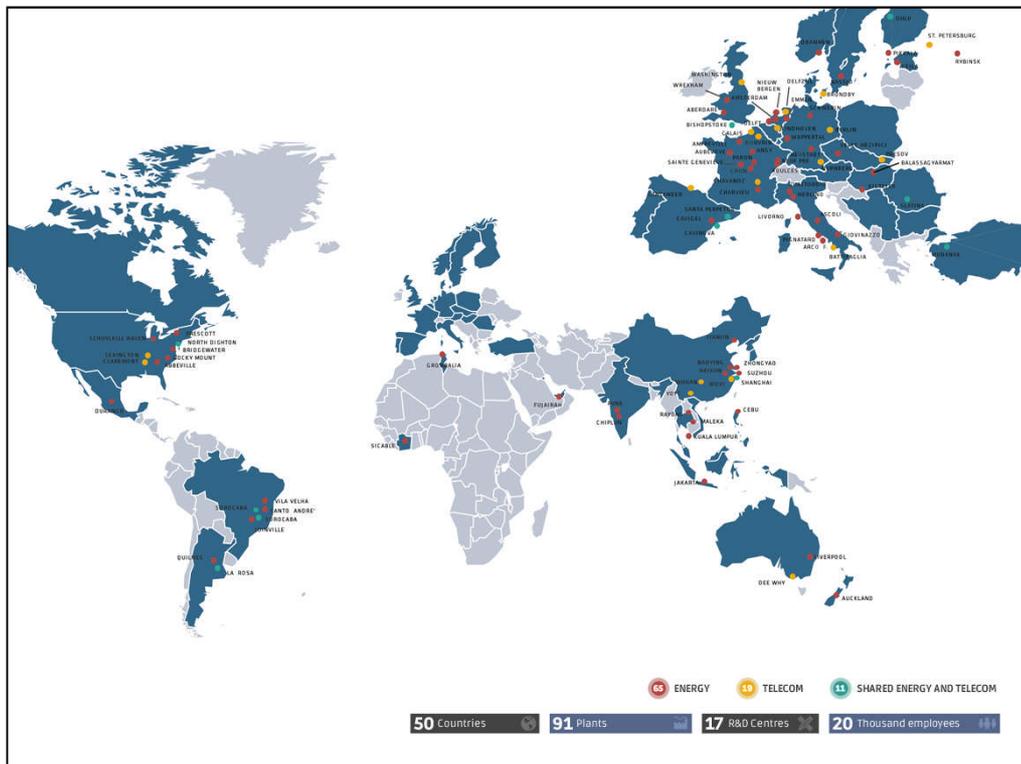


Fig. 6.2: Presenza nel mondo del Gruppo Prysmian

La storia di Prysmian (già *Pirelli Cavi e Sistemi*) affonda le radici in quella del Gruppo Pirelli.

Nel **1872 Giovanni Battista Pirelli**, ingegnere ventiquattrenne, costituisce a Milano la Pirelli & C., dando vita al primo stabilimento per la produzione di articoli in gomma.

Pochi anni dopo la nascita della Pirelli & C., prendono il via le attività di Pirelli Cavi e Sistemi, cioè prende avvio il processo di diversificazione, con la produzione di conduttori isolati per telegrafia (**1879**).

Dal 1879 al 1988: espansione globale e crescita

Fin dalla prima produzione di cavi telegrafici isolati nel **1879**, tutta la storia dei cavi va di pari passo con l'evoluzione dell'azienda conosciuta oggi come Prysmian, ma nata come Società Cavi Pirelli

1886: Viene aperto a La Spezia uno stabilimento dedicato alla produzione di cavi sottomarini per le telecomunicazioni. Viene installata una linea telegrafica sul fondo del Mar Rosso.

1902: Inizia lo sviluppo territoriale dell'azienda, con la costruzione in Spagna del primo stabilimento all'estero. Seguono l'apertura di nuovi stabilimenti produttivi in Gran Bretagna (1914), Argentina (1917) e in Brasile (1929).

1925: Pirelli Cavi e Sistemi sbarca in America con la posa di 5.150 km di cavo telegrafico sottomarino transatlantico per collegare l'Italia con le due Americhe. Seguono, negli anni successivi, l'installazione di cavi a New York e a Chicago, l'espansione in Brasile, il collegamento transoceanico dell'Africa settentrionale con il Brasile e l'avvio della produzione di cavi in Canada.

1950: Il Ministero delle Poste italiano commissiona a Pirelli Cavi e Sistemi la fornitura dei cavi per la rete telefonica interurbana e per la comunicazione televisiva. Inoltre, il Gruppo ottiene l'appalto per il ripristino della linea telefonica sottomarina tra Italia e Brasile.

1982: Il Gruppo Pirelli è il primo in Italia, e precisamente a Battipaglia, a produrre fibre ottiche per telecomunicazioni e trasmissione dati grazie a una joint venture con il Gruppo STET

Dal 1988 al 2001: la crescita attraverso fusioni, acquisizioni e rilevazioni.

Con l'obiettivo di ampliare l'offerta, acquisire specifici know-how, rafforzare la propria presenza a livello internazionale e realizzare economie di scala, l'azienda dà il via ad una mirata "campagna acquisizioni". Pirelli Cavi e Sistemi acquista le attività nel settore cavi energia di Siemens AG, BICC e Metal Manufacturers Ltd e due stabilimenti NKF.

Dal 2001 al 2004: la ristrutturazione.

Dopo lo scoppio della "bolla tecnologica", viene avviato un radicale processo di ristrutturazione che porta la società ad acquisire un'organizzazione più snella, flessibile ed efficiente.

2005: la nascita di Prysmian Cables & Systems.

Pirelli cede le attività **Cavi e Sistemi Energia e Telecomunicazioni a Goldman Sachs** e la nuova società prende il nome di **Prysmian**, nome che rimanda alle idee di luce, analisi, brillantezza e perfezione della figura geometrica, sinonimi cioè di eccellenza, ricerca e affidabilità.

2007: la quotazione in borsa.

Il 3 maggio Prysmian diventa una società quotata alla Borsa di Milano, segmento Blue Chip.

Dal 2007 al 2010: La chiara strategia di Prysmian

Il punto centrale nella crescita di Prysmian è stata una chiara strategia di investimento sia in opportunità di business ad alta tecnologia per la crescita organica che in acquisizioni in Paesi con un forte potenziale di crescita:

- **2007:** Acquisizione di International Wire & Cable Company Limited (IWC) in Nuova Zelanda;
- **2008:** Acquisizione della produttrice di cavi tedesca Facab-Lynen;
- **2009:** Acquisizione della produttrice di cavi russa Rybinsk Electrocabel;

- **2010:** Jv con Ravin Cables Ltd, una delle aziende indiane leader nel settore della produzione di cavi.

2010: Prysmian diventa una "public company".

Il Gruppo Prysmian diventa una vera società pubblica incentrata sulla creazione di valore per tutti i suoi interlocutori.

2011: Acquisizione dell'olandese Draka, finalizzata alla creazione di un leader globale nel settore della produzione di cavi per l'energia e le telecomunicazioni.

Il business Cavi e Sistemi Energia rappresenta per Prysmian il settore principale in termini di fatturato. In questo mercato, Prysmian è uno dei principali operatori a livello globale.

Prysmian progetta, produce, distribuisce ed installa una vasta gamma di cavi e sistemi per la trasmissione e distribuzione di elettricità a bassa, media, alta e altissima tensione, per applicazioni sia terrestri che sottomarine e per speciali applicazioni industriali, corredati da un ampio range di accessori. In fig. 6.3 riportiamo la macro-struttura di una cavo per la trasmissione di energia.

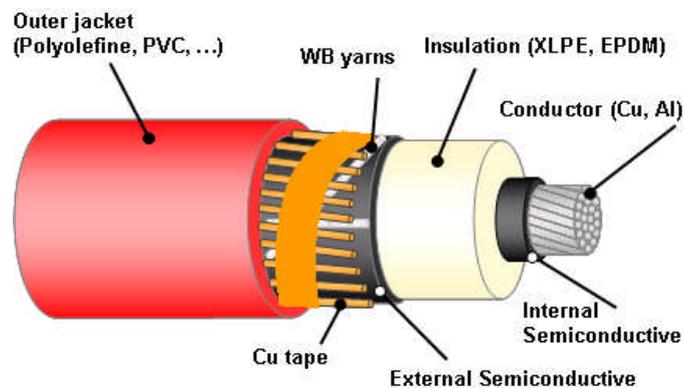


Fig. 6.3: Macro-struttura di una cavo per la trasmissione di energia

In particolare offre i seguenti prodotti:

- **Sistemi terrestri per la trasmissione di energia.** Prysmian progetta, produce e installa cavi e sistemi ad alta e altissima tensione per la trasmissione di energia direttamente dalle centrali elettriche alle reti di distribuzione primaria. Questa area di business è focalizzata principalmente sulla realizzazione di soluzioni “chiavi in mano”, **personalizzate per soddisfare le esigenze dei clienti**, che rappresentano in genere prodotti a maggiore valore aggiunto. I prodotti di questa area di business includono cavi isolati con carta impregnata di olio o miscela utilizzati per tensioni fino a 1100 kV e cavi con isolante a base di polimeri estrusi per tensioni inferiori ai 500 kV. I prodotti per la trasmissione di energia ad altissima e ad alta tensione di Prysmian sono altamente personalizzati e hanno un **elevato contenuto tecnologico**. Quest’area di business offre inoltre ai propri Clienti **servizi di installazione e di post-installazione**, nonché servizi di **gestione e di manutenzione delle reti**, tra cui il monitoraggio della performance della rete, la riparazione e la manutenzione dei cavi di interconnessione e i servizi di emergenza, tra cui il ripristino in caso di danneggiamenti.
- **Sistemi sottomarini per la trasmissione e la distribuzione di energia.** Prysmian progetta, produce e installa sistemi sottomarini “chiavi in mano” per la trasmissione e per la distribuzione di energia che sono utilizzati in tutto in mondo. Il Gruppo, avvalendosi di specifiche tecnologie per la trasmissione e la distribuzione di energia in ambiente sottomarino, ha sviluppato cavi ed accessori con tecnologia di proprietà esclusiva che possono essere installati fino ad una profondità di 2.000 metri. L’offerta di prodotti all’interno di questa linea di business comprende diverse tipologie di isolamento: cavi ad isolante stratificato costituito da carta impregnata da olio o miscela per collegamenti fino a 500 kV in corrente alternata e

continua; cavi con isolante polimerico estruso per collegamenti fino a 400 kV in corrente alternata e 200 kV in corrente continua.

L'installazione, la progettazione e i servizi prestati rivestono una particolare importanza nell'ambito di questa area di business.

- **Cavi e sistemi per la distribuzione di energia.** Si tratta di cavi e sistemi a media tensione per il collegamento di immobili industriali e/o civili alle reti di distribuzione primaria e cavi e sistemi a bassa tensione per la distribuzione di energia e il cablaggio degli edifici. Tutti i prodotti Prysmian di questa area di business sono conformi agli **standard internazionali per quanto riguarda la capacità di isolamento, resistenza al fuoco, le emissioni di fumi e il contenuto di alogeni.**
- **Componenti di rete.** Giunti e terminazioni per cavi a bassa, media, alta e altissima tensione, accessori per collegare i cavi tra loro e con altri equipaggiamenti di rete adatti per applicazioni industriali, edilizie e infrastrutturali, e per applicazioni per la trasmissione e distribuzione di energia. In particolare, i componenti di rete utilizzati nelle applicazioni ad alta tensione sono progettati sulla base delle specifiche esigenze dei clienti

La Prysmian è seconda al mondo nel mercato dei cavi in fibra ottica e protagonista nella produzione e vendita di cavi per telecomunicazioni sia in fibra ottica sia in rame adatti a tutti i tipi di applicazioni per la trasmissione di voce, video e dati, inoltre essa produce anche componenti e accessori di connettività. In fig. 6.4 riportiamo la macro-struttura di una cavo fibra ottica per le telecomunicazioni.

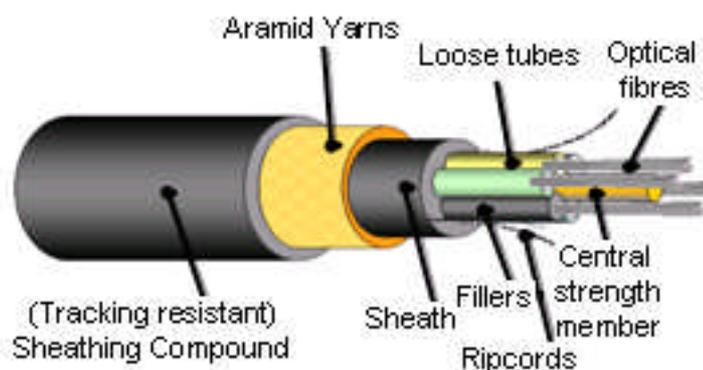


Fig. 6.4: Macro-struttura di un cavo in fibra ottica

Il portafoglio di prodotti di Prysmian comprende:

- **Una completa gamma di cavi ottici** per ogni tipo di applicazione - reti di accesso, reti metropolitane e reti a lunga distanza - tra cui Fibre To The Home (FTTH/FTTx). Il portafoglio prodotti comprende cavi ottici aventi una capacità compresa tra 1 e 1728 fibre per cavo. I cavi sono progettati per garantire la massima utilizzazione delle tubazioni interrate. Sono progettati anche per l'esposizione alla fiamma diretta e all'installazione in ambienti acquatici grazie a tecniche di produzione quali lo spillamento delle fibre (cavi **Rapier**) e l'isolamento (cavi **AirBag**). Per le applicazioni aeree Prysmian produce cavi **OPGW** e **OPPC**, cavi contenenti fibra ottica e che conducono anche energia. L'offerta è completata dal **sistema d'installazione Blown Fibre Sirocco** - tecnica grazie alla quale le fibre ottiche vengono soffiate all'interno di microtubi pre-installati -, molto utilizzato nelle reti di accesso "ultimo miglio" perchè consentono un rapido spiegamento dei sistemi FTTH. Una ulteriore tecnologia FTTH recentemente sviluppata da Prysmian è la **Quickdr@w**. Nella produzione di fibre ottiche Prysmian ha la capacità di utilizzare tutte le tre migliori tecnologie di produzione disponibili sul mercato: la **OVD** (Outside Vapor Deposition), la **MCVD** (Modified Chemical Vapor Deposition) e la **VAD** (Vapor Axial Deposition).

- **Cavi in rame per le soluzioni di cablaggio interrate e aeree** di edifici residenziali e commerciali. I cavi sono progettati per alta trasmissione, basse interferenze e compatibilità elettromagnetica e corrispondenti alle principali specifiche internazionali. Prysmian è in grado di offrire cavi con prestazioni particolari, quali l'assenza di emissioni alogene, bassa emissione di fumi e gas tossici e non propagazione degli incendi. Il portafoglio prodotti comprende una vasta gamma di cavi in rame con capacità diverse (da 2 a 2400 coppie), tra cui i cavi xDSL per l'accesso alla banda larga;
- Una vasta gamma di **prodotti di connettività passiva** sotto il marchio **OAsys®**. Questi prodotti soddisfano tutte le necessità di gestione dei cavi indipendentemente dal tipo di rete comprese le installazioni aeree e sotterranee. Prysmian è all'avanguardia anche nella progettazione e nello sviluppo di prodotti pensati specificamente per le applicazioni FTTH.

6.1.1 Clienti e progetti

L'ampia e diversificata distribuzione geografica consente a Prysmian di rispondere alle richieste ed esigenze dei suoi Clienti e del mercato con la massima rapidità e accuratezza.

Prysmian è una realtà di riferimento nel settore dei cavi ed è partner di alcuni tra i principali operatori mondiali nell'energia e nelle telecomunicazioni come: **Aker, Alstom, Bharti, British Telecom, E.On, Elektroskandia, Eletropaulo, Endesa, Enel, Fegime & Imelco, Snamprogetti, France Telecom, National Grid/Transco, Hagemeyer, Idee, Iberdrola, Nevada Power, SNCF, Petrobras, Peugeot-Citroen, Powergrid, R&M Electrical Group, Rexel, RFI, RTE/EDF, Rural Electric Supply, RWE, Siemens, Sonepar, Stn Schiffselektrik, Telefonica Brazil, Telefonica Chile, Telstra,**

Telus, Terna, Turk Telecom, Valeo, Verizon, Wampfler, Western Power, Yazaki, Zpmc.

Negli ultimi anni Prysmian è stata coinvolta in alcuni dei più importanti collegamenti in tutto il mondo, per un totale che supera i 30 progetti. Tra questi, il collegamento **tra l'Italia e la Grecia**, il **BassLink** (tra gli stati australiani di Tasmania e Victoria), il collegamento **tra Spagna e Marocco** e il **Neptune**, un collegamento sottomarino chiave per la trasmissione di energia tra il New Jersey e Long Island (New York) consegnato nel 2007, il **SA.PE.I**, il collegamento sottomarino a 1000MW ad alta tensione in corrente continua (HVDC) tra la Sardegna e l'Italia continentale, (al momento il più lungo (435 Km) e il più profondo (1640 m) al mondo) e il progetto GG CIA tra Arabia Saudita e Bahrain.

Nel settore dei collegamenti energia terrestri ad alta e altissima tensione, il Gruppo ha contribuito alla realizzazione delle **reti di trasmissione di alcune delle più importanti città del mondo**, tra le quali New York, Londra, Parigi, Madrid, Singapore, Hong Kong, Buenos Aires, Milano e Roma.

Nel settore Telecomunicazioni, Prysmian ha recentemente portato avanti diversi importanti progetti, ad esempio negli Stati Uniti, dove è stata selezionata tra i partner principali per lo sviluppo dell'infrastruttura **Fibre To The Home di Verizon**. Dal 2003 Prysmian fornisce una quantità significativa dei cavi richiesti da Verizon, tra cui gli ultimi ritrovati nella tecnologia delle fibre ottiche. Attualmente Verizon sta costruendo la più larga rete di Fiber To The Home in America settentrionale permettendogli di erogare servizi di banda larga ad alta velocità ai propri clienti.

Il Gruppo è costantemente impegnato nel continuo miglioramento del customer service, fornendo ai propri clienti un numero sempre maggiore di servizi logistici e di assistenza tra cui il monitoraggio periodico dell'efficienza dei cavi e dei sistemi installati, nonché di manutenzione e di emergenza.

6.1.2 Ricerca & Sviluppo

Prysmian da sempre affida alla Ricerca & Sviluppo un ruolo di **rilevanza strategica** per la gestione e lo sviluppo del proprio business. Il Gruppo può contare su **17 centri di Ricerca e Sviluppo** (tra cui in Italia, Francia, UK, Germania, Spagna, Stati Uniti, America Latina ecc.) con quartier generale a Milano; consolidati **rapporti di collaborazione con importanti centri universitari e di ricerca** (tra cui il Politecnico di Milano e il CNR); **400 professionisti dedicati; oltre 3.000 brevetti** tra concessi e depositati. Negli ultimi due anni, le spese complessive in R&S sono aumentate del **2% annuo**. Gli obiettivi della funzione di Ricerca & Sviluppo di Prysmian si sintetizzano, quindi, **nell'individuazione di prodotti e tecnologie innovative, nell'introduzione sul mercato di nuovi prodotti** e servizi in grado di ampliare la gamma di offerta e **nella riduzione dei costi di produzione**.

La qualità dei prodotti Prysmian è **assicurata tramite uno stretto monitoraggio di tutte le fasi del processo produttivo, dall'approvvigionamento delle materie prime fino alla consegna del prodotto finito**, mediante un articolato sistema di controllo per ogni specifica fase del ciclo.

Nell'ambito dell'approvvigionamento delle materie prime, i controlli riguardano la **selezione dei fornitori e la verifica della qualità delle singole forniture**, che devono essere accompagnate da appositi certificati che ne dimostrino la rispondenza agli standard stabiliti in fase contrattuale.

6.1.3 La nave posacavi Giulio Verne: una nave unica al mondo

Per supportare le attività nell'ambito sottomarino Prysmian può, infine, contare sulla proprietà della nave posacavi **Giulio Verne** (fig. 6.5), una tra le

poche al mondo con le necessarie tecnologie avanzate per operare fino ad una profondità di 2.000 metri anche in avverse condizioni atmosferiche. Questo apporta un notevole vantaggio competitivo nel settore, altamente specializzato, dell'industria dei cavi.



Fig. 6.5: *La nave posacavi Giulio Verne*

Costruita nel 1983 nei cantieri coreani della Hyundai appositamente per la Pirelli General inglese per una posa di cavi nel Canale della Manica. Viene acquistata nel 1988.

I numeri:

- 125 metri di lunghezza
- 7.500 tonnellate di peso
- 31 metri di larghezza

Le prestazioni:

- Dal 1988 sono 60 i viaggi compiuti in tutti gli oceani.
- 5.800 km di cavi per telecomunicazioni posati sui fondali marini
- 1.800 km di cavi per trasporto di elettricità posati sui fondali marini.

Tra i record della Giulio Verne si ricordano il collegamento delle centrali elettriche della Grecia con la Puglia ad una profondità, record a quel tempo, di 1 km, la posa di un cavo ad alta tensione di 300 km tra l'Australia e l'isola di Tasmania, uno a fibre ottiche tra la Spagna e il Marocco e uno di 250 km tra la Gran Bretagna e l'Olanda.

6.2 Lo stabilimento di Arco Felice (Pozzuoli)

Nello stabilimento di Arco Felice - Pozzuoli (NA) (fig. 5.6), il Gruppo Prysmian produce attraverso la società **Prysmian PowerLink** srl (già *Pirelli Cavi e Sistemi*) cavi sottomarini, impiegati per la realizzazione dei più grandi collegamenti esistenti al mondo.



Fig. 6.6: Stabilimento di Arco Felice di Prysmian PowerLink srl

L'impianto di Arco Felice è considerato uno dei più all'avanguardia nel settore dei cavi sottomarini. Applicazioni tipiche dei cavi sottomarini:

- Trasporto energia elettrica alle isole.
- Attraversamento di fiumi o laghi.
- Trasporto energia elettrica a piattaforme off-shore

Lo stabilimento di Arco Felice opera, nel settore dei cavi sottomarini dal **1962**, anno in cui è iniziata la costruzione del cavo sottomarino **SA.CO.I.** (**SARdegna- COrsica-Italia, 1965**). Da allora, altre significative esperienze sono state portate a termine con successo superando difficoltà tecnologiche relative alla costruzione di cavi a tensioni sempre più elevate e idonei a superare profondità di posa sempre maggiori. Basti ricordare i cavi per l'isola di **Vancouver** (British Columbia, **1984**), il cavo **NYPA** (New York Power Authority, **1991**), il cavo **Italia - Grecia** (**1993**), il cavo **SA.PEI** (**SARdegna- PENisola Italiana, 2007 ÷ 2009**), il cavo **Messina II** (**2011 ÷ 2012**).

In fig. 6.7 si riporta l'organigramma dello stabilimento di Arco Felice:

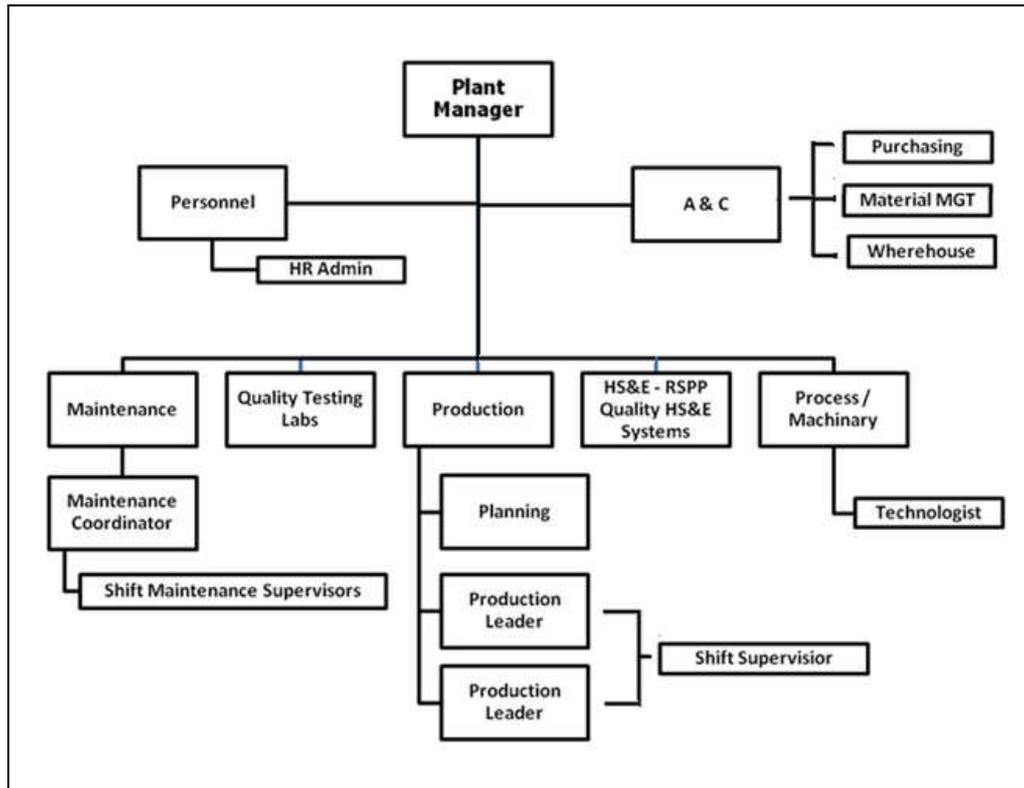


Fig. 6.7: Organigramma dello stabilimento di Arco Felice

Nello stabilimento vengono prodotte le seguenti tipologie di cavi sottomarini:

- **cavi con isolamento stratificato;**
- **cavi ad isolamento estruso (o con isolamento solido).**

6.2.1 Cavi con isolamento stratificato

I cavi con isolamento stratificato si distinguono in:

- cavi in carta ad olio fluido (fig. 6.8);
- cavi in carta impregnati con miscela (fig. 6.9);



Fig.6.8: Cavi in carta ad olio fluido



Fig. 6.9: Cavi in carta impregnati con miscela

I **cavi in carta impregnati con miscela** sono ottenuti tramite continue fasciature di carta (materiale isolante) fino ad arrivare allo spessore desiderato. In seguito la spessore di carta viene impregnato di particolari miscele o oli di base minerale ad alta viscosità per riuscire a riempire i vuoti (vuoti) d'aria che certamente si sono formati durante la fasciatura, rendendo il comportamento dielettrico dell'isolamento migliore.

I **cavi in carta ad olio fluido** sono realizzati per spingersi su grande potenze a parità di tensioni in quanto l'olio facente da vettore termico all'interno del conduttore cavo riesce ad asportare l'energia dispersa per effetto joule. La tecnica di costruzione è identica a quella dei cavi a miscela, però in questo caso vengono utilizzati miscele di oli a bassa viscosità per impregnare la carta usata per l'isolamento stratificato e quindi come nel caso precedente per riuscire a riempire i vuoti (vuoti) d'aria. Infatti la presenza di vuoti fa sì che in essi si originino scariche parziali causando una progressiva distruzione del dielettrico cioè del materiale isolante. Quindi l'impregnamento serve per evitare il più possibile la presenza di vuoti d'aria e quindi zone con minor rigidità dielettrica e soggette di conseguenza a ionizzazione con scariche parziali. La rigidità dielettrica determina il limite massimo di tensione sopportabile da un cavo elettrico, essa è definita come il valore limite di

campo elettrico, espresso comunemente in kV/mm (kilovolt su millimetro), oltre il quale si produce una conduzione di elettricità (scarica elettrica) attraverso il materiale dielettrico. Se il campo elettrico supera tale valore, gli atomi o le molecole del materiale subiscono un processo di ionizzazione a valanga, che provoca un arco elettrico attraverso il materiale. A causa del calore e della pressione provocati dalla ionizzazione improvvisa il materiale subisce, se solido, alterazioni permanenti: può perforarsi, fessurarsi o anche prendere fuoco. Il risultato ottenuto, eseguendo l'impregnamento, deve essere il più possibile omogeneo nello spazio in modo che il campo elettrico si ripartisca in maniera uniforme, con legge logaritmica essendo la configurazione cilindrica. Quindi eseguendo correttamente l'impregnamento si ottiene un cavo senza scariche parziali e termicamente stabile per una data tensione. La stabilità termica del cavo significa la capacità dell'isolante di adattarsi ai cambiamenti termici a cui è inevitabilmente sottoposto durante l'esercizio, così da non formare vacuoli d'aria tali da dare origine a processi di ionizzazione, anche con gli alti valori di campo elettrico che si hanno lavorando con alte tensioni.

Per quanto riguarda la carta e quindi il materiale isolante attualmente usato per l'isolamento stratificato non è più la semplice carta di cellulosa utilizzata in passato, ma è costituito da **Carta PPL** (Paper Polypropylene Laminate) (fig. 6.10)

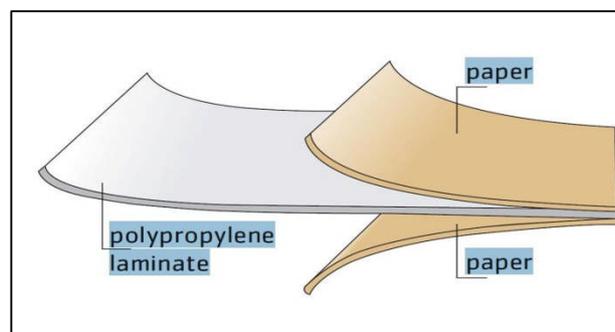


Fig. 6.10: Carta PPL

L'isolamento è costituito da strati alternati di carta e polipropilene ed attraverso questa struttura è possibile ottenere un aumento della rigidità dielettrica complessiva. Inoltre si è ottenuto un migliore comportamento termico permettendo di aumentare la temperatura di esercizio traendo vantaggio sulla potenza da trasmettere oppure a parità di potenza diminuire la sezione utile del conduttore. Infatti i cavi isolati in PPL sono indicati per collegamenti ad altissime tensioni e grandi potenze.

6.2.2 Cavi ad isolamento estruso (o ad isolamento solido)

I **cavi ad isolamento estruso** sono cavi in cui un solo strato isolante (insieme a schermo interno ed esterno) viene depositato sul conduttore per estrusione. Vengono poi applicati ulteriori strati di materiale metallico e isolante per migliorare fundamentalmente le proprietà meccaniche.

Questa tecnologia è più semplice da realizzare e **comporta anche costi di investimento minori** rispetto alla precedente.

Come materiale isolante si utilizzano **polimeri termoplastici** (plastiche sintetiche). Tra i polimeri, quello maggiormente utilizzato è il **polietilene reticolato (XLPE- cross linked polyethylene)**, perché tra le sue caratteristiche peculiari assume importanza la termoelasticità, infatti grazie a ciò è stato possibile raggiungere funzionamenti ottimali a temperature elevate (90°C piuttosto che 70°C).

Infatti il cavo, una volta dimensionato elettricamente, dovrà essere verificato termicamente. Quindi onde evitare il rapido decadimento delle caratteristiche elettriche e meccaniche l'isolamento tramite polimeri in nessun caso dovrà superare le temperature massime previste.

Praticamente è stato dimostrato che i cavi con isolamento reticolato possono arrivare ad una temperatura di 90°C mentre i cavi con isolamento termoplastico possono arrivare a temperatura di 70°C, quindi ciò ha fatto sì

che le altre varianti di isolamento termoplastico sono state sostituite, a livello mondiale, proprio dall'XLPE.

Osserviamo che la reazione dei polimeri (reticolati) con sistemi perossidici (es.: perossido) produce i seguenti prodotti di decomposizione : metano, acetofenone, alcool cumilico, che rimangono disciolti / intrappolati nell'isolante.

Quindi onde evitare che si possono verificare i seguenti problemi cioè:

- si possono verificare esplosioni e sfiammature durante l'installazione e confezione di giunti;
- si possono avere pressioni di gas sotto le guaine e negli accessori anche di alcuni bar (con i rischi conseguenti);
- la pressione del gas intrappolato nell'isolante potrebbe mascherare alcuni difetti, come la presenza di vacuoli, non evidenziandoli alle prove di accettazione in corrente alternata ed alle scariche parziali;
- se il cavo è per c.c., la presenza di acetofenone ed alcool cumilico ne influenzerebbe negativamente le caratteristiche elettriche;

dopo l'operazione d'isolamento, le anime devono essere sottoposte ad una **fase di degasaggio**, cioè bisogna eliminare i gas prodotti.

Il degasaggio si verifica in modo naturale in aria a temperatura ambiente, ma i tempi sono molto lunghi, per questo motivo viene effettuato a mezzo di trattamento termico accelerato in stufa o vasca.

Fra i prodotti di decomposizione il **metano** è il più pericoloso: la quantità di metano presente nel polimero reticolato dipende dalla quantità di perossido utilizzato. L'impianto di trattamento (stufa o vasca) deve tenere conto che il metano può esplodere se si raggiunge la concentrazione del 4,5% in aria: occorre quindi, per motivi di sicurezza, restare sempre al di sotto di tale valore. Il tempo del trattamento dipende dal tipo di cavo, dal materiale isolante e dalla temperatura di trattamento.

In conclusione, un trattamento di degasaggio, effettuato rispettando rigorosamente i tempi e le temperature calcolate e le procedure, consente di

ottenere un basso contenuto residuo dei prodotti di decomposizione al termine del trattamento stesso.

I cavi estrusi possono essere:

- unipolari (per medie, alte e altissime tensioni)
- tripolari (per basse o medie tensioni)

Nella struttura unipolare (fig. 6.11) ad una fase corrisponde un cavo, con un conduttore centrale che porta la corrente.

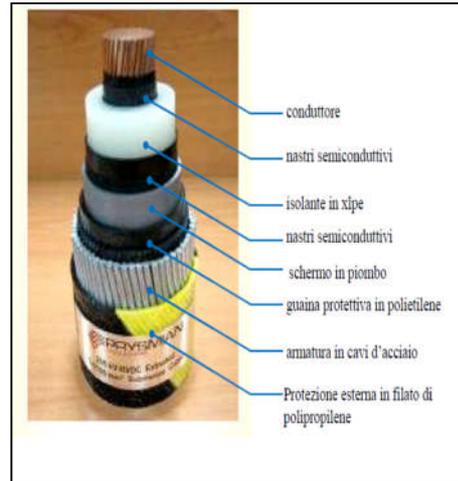


Fig. 6.11: Cavo estruso unipolare in **XLPE**

6.3 Reparti produttivi

Nello stabilimento di ArcoFelice, la produzione dei cavi sottomarini viene effettuata in 3 reparti, denominati:

- SACOI
- SAPEI
- ESTRUSI

In fig. 6.12 riportiamo il layout dello stabilimento

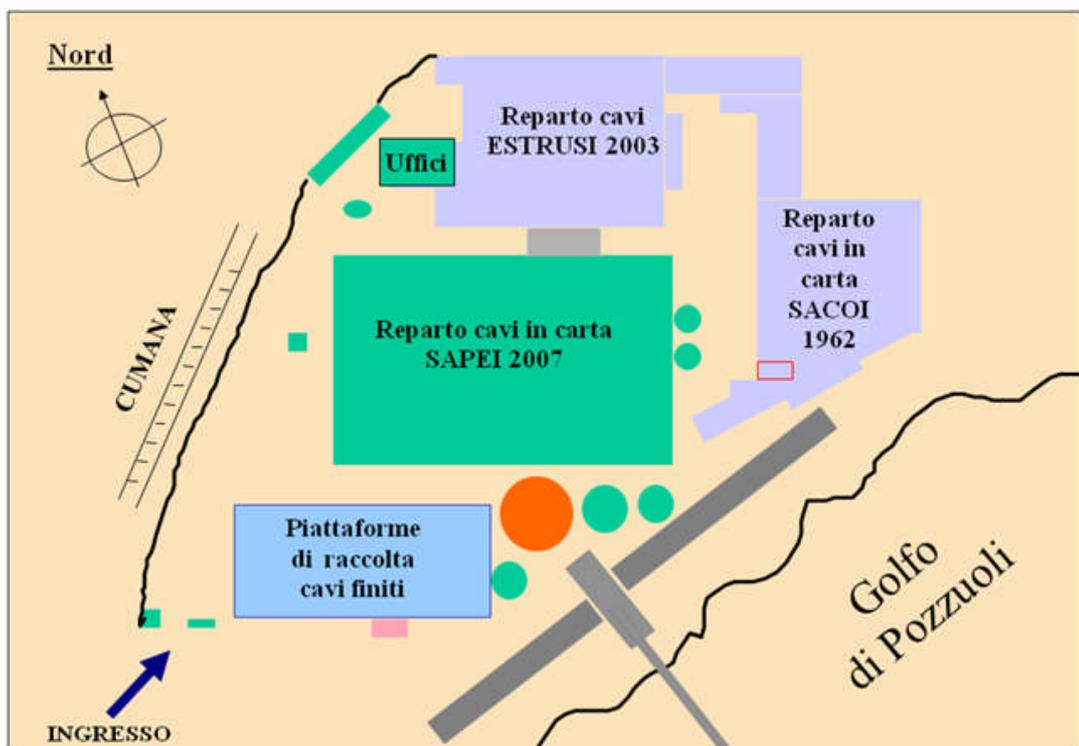


Fig. 6.12: Layout dello stabilimento

Nel reparto **SACOI** e nel reparto **SAPEI** viene realizzato lo stesso prodotto cioè **cavi con isolamento stratificato in carta**, in particolare:

- Cavi in carta ad olio fluido
- Cavi in carta impregnati con miscela

Il Reparto **SACOI** è chiamato in questo modo, proprio perchè rappresenta il 1° reparto costruito nel 1962, per la produzione del cavo sottomarino (in carta a miscela) chiamato appunto SA.CO.I. (**S**ardegna-**C**orsica-**I**talia). Tale cavo, ancora in funzione, connette la Sardegna con l'Italia attraverso la Corsica.

Dati tecnici cavo SA.CO.I

Tensione	200 kV c.c.
Potenza	300 MVA
Lunghezza	119 km
Anno di installazione	1965

Il Reparto **SAPEI** è chiamato in questo modo, perché è stato allestito nel **2007**, per la produzione del cavo sottomarino (in carta a miscela) chiamato appunto SA.PEI. (**S**ardegna- **P**enisola **I**taliana). Esso collega la stazione elettrica di Fiume Santo (SS) e la stazione elettrica di Latina.

Il cavo SA.PE.I. (fig. 6.13) è, con i suoi 750 milioni di euro di investimento, la più importante infrastruttura elettrica mai realizzata in Italia. Esso rientra di diritto nel “Guinness dei Primati” per i record che può vantare in termini di:

- **lunghezza** (è l'interconnessione più lunga mai realizzata da un unico fornitore e la seconda più lunga in assoluto)
- **potenza trasmessa** (1000 MW)
- **massima profondità di posa raggiunta** (oltre 1600 metri)

Dati tecnici cavo SA.PEI

Tensione	500 kV c.c.
Potenza	1000 MW
Lunghezza	435 km
profondità	1640 m

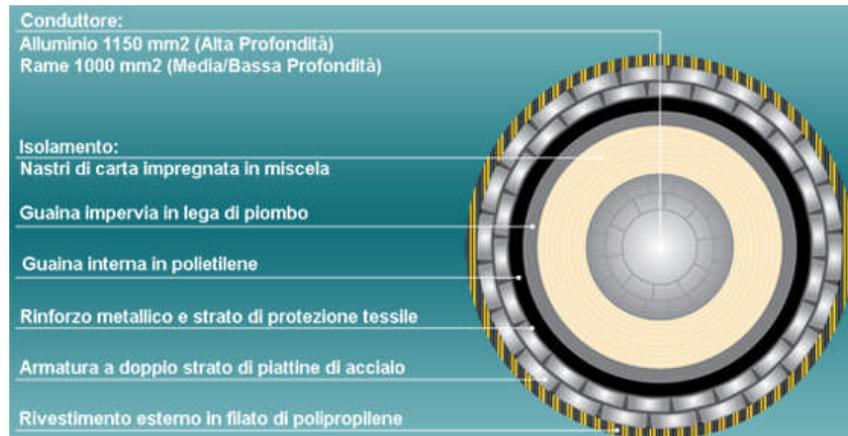


Fig. 6.13: Cavo SA.PE.I.

Mentre nel reparto **ESTRUSI**, allestito nel **2003**, vengono prodotti **cavi ad isolamento estruso o ad isolamento solido**.

6.4 Flusso produttivo cavo in carta o con isolamento stratificato

Nei reparti **SACOI** e **SAPEI** poiché la tipologia di cavo prodotto è lo stesso (*cavo in carta o con isolamento stratificato*) segue che le fasi del processo produttivo e quindi il **flusso produttivo** (schematizzato in fig. 6.14) è sostanzialmente lo stesso e di conseguenza anche le macchine:

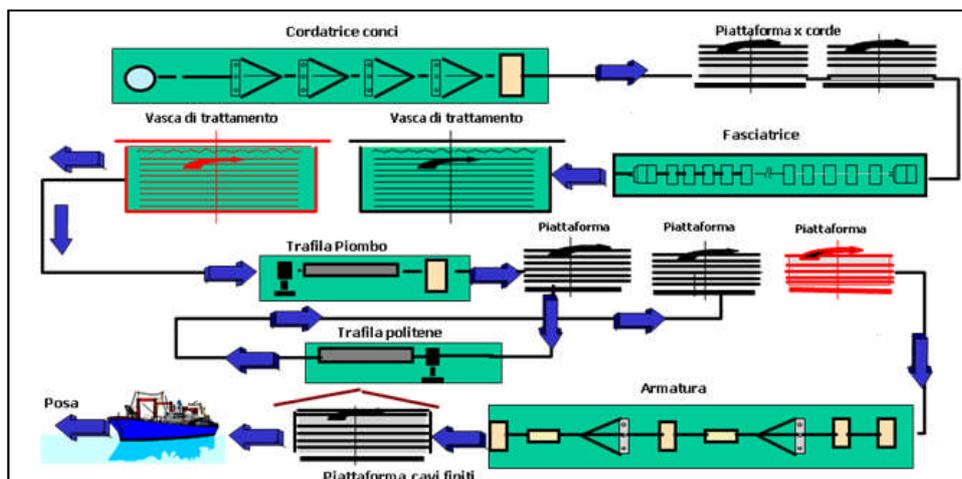


Fig. 6.14: Flusso produttivo cavi in carta (reparto SACOI)

Di seguito descriviamo brevemente le fasi del processo produttivo per realizzare un cavo sottomarino in carta:

1. **Cordatura;**
2. **Fasciatura;**
3. **Trattamento:** impregnamento con olio fluido o miscela;
4. **Estrusione Piombo;**
5. **Estrusione Polietilene o Politene – PE** (cavi a miscela) o **Frettaggio** (cavi a olio fluido);
6. **Armatura.**

1. Cordatura

In questa fase lo scopo della lavorazione è la costruzione della corda, cioè del conduttore che può essere di rame o alluminio. La macchina che esegue la lavorazione è la **cordatrice conci** (fig. 6.15).



Fig. 6.15: *Cordatrice conci*

2. Fasciatura

In questa fase lo scopo della lavorazione è l'applicazione sulla corda del pacchetto isolante (carta PPL). La macchina che esegue la lavorazione è la **fasciatrice in carta** (fig. 6.16) ed è posta all'interno di una sala condizionata.



Fig. 6.16: *Fasciatrice in carta*

3. Trattamento / Impregnamento

Per eseguire il trattamento il cavo una volta fasciato viene posto in vasche dette appunto di trattamento o impregnamento (fig. 6.17). In questa fase lo scopo della lavorazione è riuscire a riempire, attraverso olio fluido o miscela,



Fig. 6.17: Vasche di trattamento

i vuoti (vuoti) d'aria che certamente si sono formati nella fasciatura. Infatti la presenza di vuoti fa sì che in essi si possono durante originare scariche elettriche parziali causando una progressiva distruzione del dielettrico cioè del materiale isolante e quindi creando danni al cavo.

La lavorazione si divide in due fasi, la prima detta **Essiccamento** in cui il cavo fasciato viene riscaldato fino ad una data temperatura sotto vuoto con lo scopo di togliere tutta l'acqua presente nel pacchetto isolante. Nella seconda fase **Impregnamento** avviene il riempimento della carta (+ la corda se è cava) di olio fluido o miscela. Questo trattamento dura un determinato periodo di tempo. Eseguendo correttamente questo trattamento si ottiene un cavo senza scariche parziali e termicamente stabile per una data tensione.

4. Estrusione Piombo

In questa fase lo scopo della lavorazione è applicare una guaina di Piombo sul pacchetto isolante impregnato. La guaina di piombo viene estrusa direttamente sul cavo sotto forma di tubo continuo. All'uscita dalla trafilatura il tubo viene



Fig. 6.18: Trafila piombo

subito raffreddato in modo da evitare stress termici al cavo La macchina che esegue la lavorazione è la **trafila piombo** (fig. 6.18).

5. Estrusione Polietilene o Politene - PE

In questa fase lo scopo della lavorazione è applicare sulla guaina piombo, una guaina di polietilene come protezione, in particolare dalla corrosione ciò nel caso di **cavi a miscela**. La macchina che esegue la lavorazione è la **trafila politene** (fig. 6.19).



Fig. 6.19: Trafila politene

Invece nel caso di cavi a **olio fluido** l' estrusione di politene è sostituita dal **frettaggio**, il cui scopo è applicare una blindatura con nastri metallici (bronzo, acciaio inox) con lo scopo di contenere la deformazione della guaina di Piombo sotto pressione di olio fluido.

6. Armatura

In questa fase lo scopo della lavorazione è applicare un'armatura esterna a fili o piattine generalmente di acciaio di protezione del cavo. Infine il cavo armato è rivestito con un rivestimento esterno in filato di polipropilene. La macchina che esegue la lavorazione è l'**armatrice** (fig. 6.19).



Fig.6.19: Armatrice

6.5 Flusso produttivo cavi estrusi o ad isolamento estruso

Il flusso produttivo, e quindi le fasi del processo produttivo per realizzare un cavo estruso, è schematizzato di seguito in fig. 6.20.

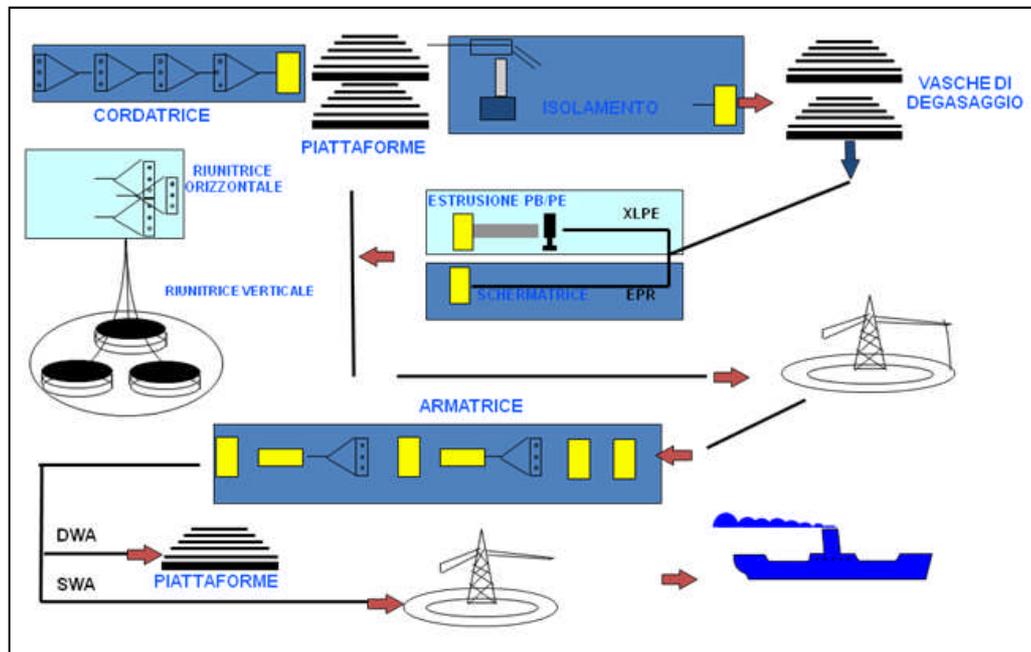


Fig. 6.20: *flusso produttivo cavi estrusi – Reparto ESTRUSI*

Di seguito descriviamo brevemente le fasi del processo produttivo per realizzare un cavo sottomarino ad isolamento estruso:

1. **Cordatura;**
2. **Isolamento in Catenaria;**
3. **Degasaggio;**
4. **Estrusione Piombo;**
5. **Estrusione Polietilene - PE;**
6. **Armatura.**

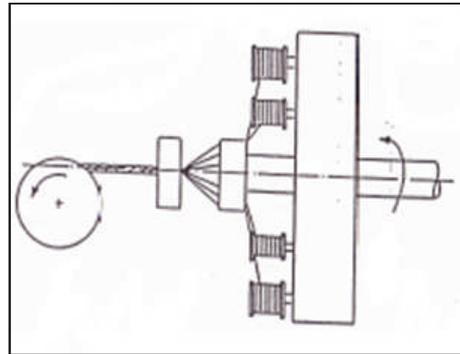
1. Cordatura

In questa fase lo scopo della lavorazione è la costruzione della corda, cioè del conduttore. La macchina che esegue la lavorazione è la **cordatrice a 91 fili** (fig.6.21).



Fig.6.21: Cordatrice a 91 fili

Le bobine costituenti i fili elementari sono disposte lungo la periferia di un disco rotante (gabbia); i fili che si svolgono sono costretti a passare entro un anello (filiera) e di qui la corda già formata viene avvolta su un tamburo (volano) che con la sua rotazione provoca l'avanzamento del conduttore.



2. Isolamento in Catenaria

La catenaria (fig. 6.22) è così chiamata per la configurazione assunta dal cavo durante il processo.

In questa fase lo scopo della lavorazione è applicare, per estrusione, sul conduttore un solo strato isolante (insieme a schermo interno ed esterno), praticamente attraverso l'**estrusore** viene depositato sul conduttore lo strato di isolante che è un **polimero** (plastica sintetica).



Fig. 6.22: Catenaria

Tra i polimeri, quello maggiormente utilizzato è il **polietilene reticolato (XLPE- cross linked polyethylene)**, perché tra le sue caratteristiche peculiari assume importanza la termoelasticità, infatti grazie a ciò è stato possibile raggiungere funzionamenti ottimali a temperature elevate (90°C piuttosto che 70°C). Infatti poiché il cavo, una volta dimensionato elettricamente, dovrà essere verificato termicamente, è stato dimostrato che i cavi con isolamento reticolato possono arrivare ad una temperatura di 90° senza subire il rapido decadimento delle caratteristiche elettriche e meccaniche.

L'**estrusore** si compone fondamentalmente di una vite (o più) che ruota all'interno di un corpo cilindrico termostato in funzione del tipo di materiale da processare e del prodotto da realizzare.

3. Degasaggio

In questa fase lo scopo della lavorazione è eliminare i prodotti di decomposizione (gas) : metano, acetofenone, alcool cumilico, che rimangono disciolti/intrappolati nell'isolante durante l'operazione d'isolamento a causa della reazione dei polimeri (reticolati) con sistemi perossidici (es.: perossido). Questo processo detto **di degasaggio** si rende necessario onde evitare una serie di problematiche che si potrebbero verificare. (*vedere cavi ad isolamento estruso*).

In generale il processo di degasaggio viene effettuato attraverso un trattamento termico accelerato in vasca detta appunto **vasca di degasaggio** (fig. 6.23), al fine di consentire il più possibile l'**evacuazione dei gas** presenti nell'isolante.



Fig. 6.23: *Vasca di degasaggio*

Il tempo del trattamento dipende dal tipo di cavo, dal materiale isolante (XLPE, ERP) e dalla temperatura di trattamento.

Oggi il tempo di degasaggio di un cavo sottomarino in vasca può quindi essere calcolato volta per volta col programma recentemente sviluppato dal Dipartimento Ricerca & Sviluppo (DRS) che tiene conto di tutti i parametri che possono variare a seconda del tipo e lunghezza del cavo.

Un trattamento di degasaggio, effettuato conformemente ai risultati del programma di calcolo, ottimizza i tempi di processo necessari per ottenere un basso contenuto residuo dei prodotti di decomposizione al termine del trattamento stesso.

4. Estrusione Piombo

In questa fase lo scopo della lavorazione è applicare una guaina di piombo sull'isolante ad estrusione solida. La guaina di piombo viene estrusa direttamente sul cavo sotto forma di tubo continuo.



Fig. 6.24: *Trafila piombo*

All'uscita dalla trafilatura il tubo è subito raffreddato in modo da evitare stress termici al cavo. La macchina che esegue la lavorazione è la **trafila piombo** (fig. 6.24).

Estrusione Polietilene - PE

In questa fase lo scopo della lavorazione è applicare sulla guaina piombo, una guaina di polietilene come protezione, in particolare dalla corrosione. La macchina che esegue la lavorazione è la **trafila polietilene** (fig. 6.25).



Fig. 6.25: *Trafila polietilene*

6. Armatura

In questa fase lo scopo della lavorazione è applicare un'armatura esterna a fili o piattine generalmente di acciaio di protezione del cavo. Infine il cavo armato è rivestito con un rivestimento esterno in filato di



Fig.6.26: *Armatrice*

polipropilene. La macchina che esegue la lavorazione è l'**armatrice** (fig. 6.26).

Infine nel caso in cui bisogna realizzare una **struttura tripolare**, cioè un cavo costituito da tre conduttori, prima dell'armatura, i tre conduttori vengono riuniti attraverso la **riunitrice** (fig. 6.27) orizzontale o verticale, dopodiché



Fig. 6.27: *Riunitrice*

si procede con l'armatura, la quale per un cavo sottomarino, è comune a tutte e tre cioè devono essere racchiusi assieme in unica struttura.

6.6. Test Elettrico e collaudo del cavo

Il cavo sia in carta che estruso una volta realizzato, viene sottoposto a un **collaudo finale con test elettrico** (fig. 6.28) cioè viene **testato elettricamente** dai tecnici del laboratorio, presenti nello stabilimento, al fine di verificare T



Fig. 6.28: *Test elettrico*

che il cavo non ha problemi sotto il profilo elettrico, ad esempio non ci sono interruzioni tali da compromettere la sua funzione fondamentale cioè quella di **conduttore di energia elettrica**.

Dopo che i tecnici hanno verificato che il cavo non presente nessun problema dal punto di vista elettrico, allora è pronto per essere consegnato al cliente.

Il trasporto può avvenire sia via mare utilizzando la nave posacavi o su gomma utilizzando camion su i quali il cavo viene avvolto su grosse bobine, ovviamente la modalità di trasporto dipende dal luogo dove il cavo deve essere consegnato.

Normalmente per i cavi sottomarini si utilizza la nave posacavi; l'imbarco (fig. 6.29), infatti, rappresenta l'ultima fase del processo produttivo, il cui scopo è il travaso del cavo finito sulla nave.



Fig. 6.29: *Imbarco*

6.7 Gestione delle attività di manutenzione

L'ente Servizi Tecnici & Manutenzione è chiamato a gestire sia le attività di manutenzione correttiva che quelle di manutenzione preventiva in particolare quella ciclica o programmata. E' bene sottolineare che nello stabilimento di ArcoFelice non si applica la classica politica di manutenzione ciclica caratterizzata da interventi effettuati periodicamente che comportano la sostituzione totale di una determinata macchina o componente della stessa che non si è ancora guastato, con uno nuovo, in modo tale da prevenirne il cedimento incontrollato, ma si applica un particolare tipo di manutenzione ciclica detta **manutenzione di revisione**, ovvero **di ispezione completa e riparazione**, effettuata smontando periodicamente e ispezionando-controllando l'intero impianto/macchina, per riparare o sostituire solamente le parti deteriorate o usurate.

Il processo di **manutenzione correttiva** viene attivato a seguito del rilevamento di un guasto da parte del personale di produzione, il quale dovrà procedere immediatamente alla segnalazione e alla richiesta di intervento all'ente Servizi Tecnici & Manutenzione.

Nel caso in cui il guasto rilevato non comporti un fermo impianto/macchina, l'esecuzione dell'intervento potrà avvenire anche in un secondo momento, cioè viene programmato sulla base di un accordo tra l'ente Produzione e l'ente Servizi Tecnici & Manutenzione. In tal caso prima di procedere alla riparazione del guasto rilevato sarà necessario effettuare una valutazione sia in merito alle competenze e specializzazioni richieste per la sua risoluzione e sia in riferimento alla disponibilità del personale interno di manutenzione. Pertanto nel caso in cui i responsabile dei Servizi Tecnici & Manutenzione ritengono che le competenze e/o le disponibilità del personale interno siano sufficienti, si procederà all'assegnazione degli interventi necessari alle squadre di manutenzione interne allo stabilimento, in caso contrario sarà necessario richiedere l'intervento di ditte esterne specializzate; invece, nel

caso in cui il guasto comporti un fermo impianto/macchina si dovrà procedere alla sua immediata risoluzione onde evitare il blocco della produzione, pertanto in questo caso è richiesto un servizio di **pronto intervento**. Tale servizio è garantito quasi esclusivamente dal personale interno, il cui intervento si rende necessario soprattutto durante i turni di notte e nei giorni festivi, durante i quali le ditte esterne non sono presenti nello stabilimento; invece, nel caso in cui le ditte esterne sono presenti in azienda o sono facilmente reperibili, il pronto intervento viene affidato ad esse, principalmente quando non può essere eseguito dal personale interno perché non disponibile in quanto impegnato in altri interventi o perché non ha le competenze adatte per risolvere quel determinato problema riscontrato.

E' bene sottolineare che quando viene ravvisata la necessità di far intervenire ditte esterne, l'ente Servizi Tecnici & Manutenzione contatta prima di tutto le ditte con cui ha già un contratto di fornitura in essere; questo sia perché si è già a conoscenza del loro modo di operare, sia perché operando giornalmente in azienda conoscono gli impianti e sia perché all'interno dei contratti di manutenzione ordinaria vengono comunque sempre inserite delle specifiche che riguardano gli eventuali interventi di manutenzione straordinaria che potrebbero rendersi necessari durante il periodo di validità del contratto (ad esempio il costo orario straordinario della manodopera, i prezzi dei ricambi e materiali di consumo utilizzati nelle operazioni di manutenzione straordinaria, tempi di esecuzione degli interventi straordinari in base al livello di urgenza, ecc..).

L'ente Servizi Tecnici & Manutenzione, attraverso delle riunioni, si interfaccia giornalmente, con i responsabili delle ditte esterne, che operano nello stabilimento. La suddetta riunione ha i seguenti obiettivi:

- monitorare lo stato di avanzamento dei lavori ad essi affidati;
- affidare nuovi interventi di manutenzione a guasto in merito ad eventuali problematiche riscontrate nel periodo antecedente la riunioni

stessa (ad esempio problemi non risolti dal personale interno durante il turno di notte e/o nei giorni festivi);

- garantire la sicurezza degli impianti e delle persone, ad esempio nel caso in cui due ditte sono chiamate ad operare sullo stesso impianto.

Le uniche macchine, presenti nello stabilimento, per le quali sia le attività di manutenzione correttiva (a guasto) che di manutenzione preventiva (controlli e verifiche programmate) vengono effettuate esclusivamente dal personale interno di manutenzione sono le fasciatrici e le trafilatrici. Questo perché il management ritiene che queste due macchine sono strategiche nel processo produttivo, soprattutto a fini della qualità del cavo prodotto. Per quanto riguarda la fasciatrici, ricordiamo permette di applicare sulla corda cioè sul conduttore il pacchetto isolante cioè un certo spessore di carta PPL, che costituisce l'isolamento stratificato dei cavi. Pertanto è bene sottolineare che migliore è l'applicazione dell'isolamento, migliore è la qualità del cavo prodotto, quindi per questo motivo la fasciatrici deve operare sempre in condizione di massima efficienza, e pertanto la manutenzione deve essere effettuata solo ed esclusivamente dal personale interno in quanto ha le competenze e le specializzazioni richieste per tenere la macchina sempre in perfette condizioni di funzionamento.

Invece per quanto riguarda la trafilatrice piombo, ricordiamo è una macchina continua che permette di applicare sul pacchetto isolante una guaina di piombo. E' bene sottolineare che ai fini della qualità, la guaina di piombo deve essere estrusa direttamente sul cavo sotto forma di tubo continuo e quindi ciò impone che durante la lavorazione non ci deve essere nessun tipo di interruzioni, perché altrimenti il cavo subisce un danno e di conseguenza quella parte che si danneggia deve essere poi asportata mediante un taglio. Ad esempio per evitare interruzioni elettriche, durante la lavorazione, lo stabilimento si scollega dal servizio elettrico nazionale e si collega ai propri

generatori (alimentati a gasolio) mentre l'ente Servizi Tecnici & Manutenzione mette a disposizione un manutentore elettrico 24 ore su 24.

Quindi anche per questa macchina, data la sua importanza strategica, il management preferisce che la manutenzione venga effettuata esclusivamente dal personale interno allo stabilimento.

Infine l'archiviazione dei dati di manutenzione, avviene attraverso un database, realizzato in Access; tale database è stato realizzato per consentire la registrazione dei dati relativi agli interventi di manutenzione sia correttiva che preventiva effettuati sia da personale interno che da personale esterno.

6.8 La fasciatrice per cavi energia in carta

La **fasciatrice**, è una macchina che permette di applicare sulla corda, cioè sul conduttore del cavo, il pacchetto isolante cioè un certo spessore di carta PPL, che costituisce l'isolamento stratificato dei cavi in carta e ricordiamo inoltre che essa è presente sia nel reparto SACOI che nel reparto SAPEI, ovvero nei reparti in cui avviene la produzione dei cavi energia in carta.

6.8.1 Descrizione della macchina fasciatrice

La **fasciatrice** è una macchina composta da **20 teste a fasciare** ed è posta all'interno di una sala condizionata, al fine di avere una percentuale di umidità prossima allo zero.

La sua composizione è stabilita di volta in volta in base all'impiego a cui essa è destinata, per cui il numero delle teste a fasciare possono variare.

Ogni **testa** è una macchina costituita da una incastellatura in ghisa che regge una testa rotante sulla quale sono sistemate le staffe. Precisamente ogni testa è composta da **12 staffe**, tutte uguali fra loro.

Una **staffa** è costituita da una trave in lega leggera sulla quale è montato il disco frenante o **piattello** porta rotoli di carta. Sul tamburo del piattello è fissata la **guarnizione d'attrito** (ferodo), sulla quale striscia il **nastro di acciaio** (fascetta).

Ogni **staffa** è caratterizzata da un **sistema di frenatura meccanica** con cui viene definito la tensionatura o tesatura dei nastri di carta. Praticamente questo sistema o dispositivo a frenatura meccanica funziona da autoregolatore del tiro del nastro di carta che si avvolge sul cavo, cioè lo mantiene ad un valore praticamente costante, pur variando il diametro del rotolo da cui si svolge il nastro di carta.

Nel sistema di frenatura abbiamo una **molla I** che è quella applicata al nastro di acciaio (fascetta) e una **molla II** che è quella applicata al **galoppino** che costituisce l'elemento principale del dispositivo di autoregolazione del tiro del nastro di carta. L'azione combinata di queste due molle determina appunto il tiro sul nastro di carta. Quindi il tiro a cui viene sottoposto il nastro di carta, nel momento che si avvolge sul cavo, dipende dalle caratteristiche delle molle. Le molle danno in media un tiro al valore nominale, che è quello stampigliato sulle molle stesse.

Inoltre su ogni staffa sono presenti **4 rullini**. Praticamente il nastro di carta che si svolge dal rotolo, viene deviato dal primo rullino e passa poi sugli altri tre. Questi ultimi costituiscono l'organo di misura del tiro, il primo di essi ruota su un perno fissato al galoppino, il secondo su uno fissato alla struttura portante ed il terzo sullo scorrevole dell'asta.

Infine su ogni staffa è presente anche un **dispositivo di sicurezza** il quale interviene, provocando l'arresto della fasciatrice, ad esempio quando si rompe il nastro di carta oppure all'esaurimento del rotolo.

6.8.2. Manutenzione della macchina fasciatrice

La fasciatrice è tra le poche macchine presenti nello stabilimento per la quale il management ha ritenuto che sia le attività di manutenzione correttiva o a guasto che di manutenzione preventiva ciclica vengono effettuate esclusivamente dal personale interno di manutenzione, in quanto è il solo ad avere le competenze e le specializzazioni richieste per tenere la macchina sempre in perfette condizioni di funzionamento. Questo perché migliore è l'applicazione dell'isolamento, migliore è la qualità del cavo prodotto, e quindi per questo motivo la fasciatrice deve operare sempre in condizione di massima efficienza.

Inoltre ribadiamo che nello stabilimento di Arco Felice non si applica la classica politica di manutenzione ciclica caratterizzata da interventi effettuati periodicamente che comportano la sostituzione totale di una determinata macchina o componente della stessa che non si è ancora guastato, con uno nuovo, in modo tale da prevenirne il cedimento incontrollato, ma si applica un particolare tipo di manutenzione ciclica detta **manutenzione di revisione**, ovvero **di ispezione completa e riparazione**, effettuata smontando periodicamente e ispezionando-controllando l'intero impianto/macchina, per riparare o sostituire solamente le parti deteriorate o usurate.

Per garantire il corretto funzionamento della fasciatrice, durante la produzione di ogni lotto, cioè durante la fasciatura di una certa pezzatura di cavo prodotto, si rendono necessari tre tipologie di interventi di manutenzione (fig. 5.34):

1. Controllo Prepartenza (CP);
2. Controllo Intermedio (CI);
3. Interventi di manutenzione a guasto (G).

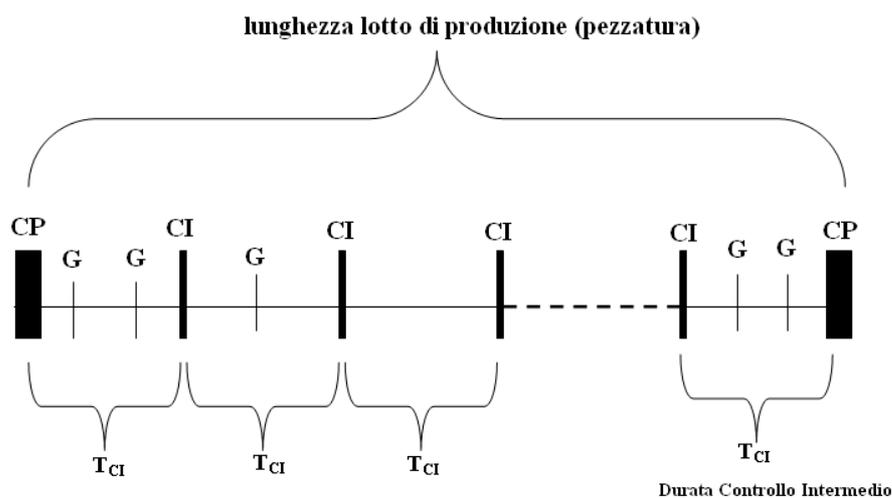


Fig. 6.30: Tipologie di interventi di manutenzione in fasciatrice

6.8.2.1. Controllo Prepartenza

Il Controllo Prepartenza viene effettuato prima di iniziare la produzione del cavo o più precisamente all'inizio di ogni pezzatura o analogamente alla fine della pezzatura precedente, ovviamente ciò dipende dalla vasca di trattamento che in quel momento è disponibile per accogliere il cavo, le cui capacità variano dai 20 a 40 Km.

Si tratta di un controllo molto approfondito il cui scopo è garantire il corretto funzionamento della macchina, ragionando in termini affidabilistici possiamo dire che tale controllo ha lo scopo di ricondurre la macchina ad un livello di affidabilità che tende all'unità cioè allo stato di "as good as new", cioè come nuova e quindi ciò significa che il tasso di guasto della macchina ritorna al valore che possiede quando è nuova.

Tale controllo viene effettuato sulle singole teste a fasciare o più precisamente sulle singole staffe di cui si compone ogni testa e si articola in due fasi:

1. smontaggio e pulizia;
2. controllo tesatura o dei tiri dei nastri di carta.

1) Smontaggio e pulizia

Consiste nelle effettuare le seguenti operazioni sulle singole staffe delle teste a fasciare:

- Smontaggio e pulizia disco frenante (piattello);
- Controllo materiale di attrito (ferodo applicato sul disco);
- Controllo eventuale ovalizzazione del disco;
- Controllo nastro metallico (fascetta);
- Controllo rullini di rinvio del nastro di carta;
- Controllo funzionalità del galoppino;
- Controllo funzionalità del dispositivo di sicurezza.

Se in questa fase si riscontrano problemi, che vanno al di là della semplice pulizia, allora si effettuano interventi meccanici, che possono consistere nella sostituzione di qualche componente. Altrimenti si rimonta il tutto e si passa immediatamente alla fase successiva.

Per il buon funzionamento della macchina è indispensabile una accurata pulizia delle staffe, poiché la presenza di polvere di carta o d'altro in quantità considerevole, può alterare il regolare funzionamento del dispositivo autoregolatore del tiro e la scorrevolezza dei rullini di rinvio del nastro di carta.

2) Controllo tesatura o dei tiri dei nastri di carta

Il controllo tesatura, detto anche taratura, consiste nel controllare i dispositivi autoregolatori del tiro dei nastri di carta ovvero del sistema frenante di tutte le staffe.

Tale controllo viene effettuato, con la collaborazione degli operatori della produzione (capomacchina), utilizzando come strumento il **dinamometro**,

con il quale si misurano i tiri dei nastri di carta che si svolgono dai rotoli montati sui piattelli delle singole staffe, per cui se non si riscontrassero i tiri imposti dalle specifiche del cavo da produrre, si richiede l'intervento dei manutentori meccanici, i quali, attraverso interventi di pulizia, di aggiustaggio, di regolazioni geometriche e/o sostituzioni di uno o più componenti, ripristinano il corretto funzionamento dei dispositivi autoregolatori del tiro ovvero del sistema frenante delle staffe su cui si è riscontrato il problema.

E' bene sottolineare che, la non aderenza tra le superfici di contatto del nastro metallico (fascetta) e della guarnizione di attrito (ferodo) applicata sul piattello (disco frenante) rappresenta la principale causa riscontrata per il non corretto funzionamento del sistema frenante della singola staffa, e ciò si evidenzia in generale attraverso la vibrazione del galoppino che ribadiamo, costituisce l'elemento principale del dispositivo di autoregolazione del tiro del nastro di carta. Infatti adattare fra loro le superfici di contatto della fascetta e del ferodo consente di ottenere un coefficiente di attrito di valore elevato, necessario per regolare il funzionamento della staffa e quindi per garantire il corretto funzionamento del sistema frenante.

6.8.2.2. Controllo Intermedio

Il controllo Intermedio, è stato sempre effettuato, a metà pezzatura, invece ultimamente, per il cavo in produzione a causa delle numerose problematiche riscontrate ai dispositivi autoregolatori del tiro ovvero del sistema frenante, il cliente che ha commissionato il cavo, ha imposto che il controllo intermedio venga effettuato non più a metà pezzatura ma ogni 10 km di cavo fasciato al fine di ottenere una maggiore garanzia sulla qualità del prodotto.

Si tratta di un controllo il cui scopo è garantire il corretto funzionamento dei dispositivi autoregolatori del tiro ovvero del sistema frenante, quindi il controllo intermedio non è altro che il **controllo tesatura o dei tiri dei nastri di carta**. Tale controllo viene effettuato durante la produzione, perché dopo un certo numero di km di funzionamento della macchina, i valori dei tiri dei nastri di carta che si svolgono dai rotoli montati sui piattelli delle singole staffe, possono essere diversi dai valori imposti dalle specifiche del cavo da produrre e ciò va ad incidere sulla qualità del cavo prodotto.

Ragionando in termini affidabilistici, possiamo affermare che dopo un certo numero di ore o di km di funzionamento, l'affidabilità della macchina tende a diminuire e di conseguenza diminuisce anche l'affidabilità dei dispositivi autoregolatori del tiro ovvero del sistema frenante della staffe, pertanto questo controllo si rende necessario per ricondurre la macchina ad un livello di affidabilità accettabile tale da ripristinare i valori dei tiri imposti dalle specifiche del cavo e quindi produrre un cavo di qualità e nello stesso tempo per migliorare la disponibilità della macchina riducendo al minimo di interventi di manutenzione a guasto.

Inoltre è bene sottolineare che tale controllo non riconduce la macchina ad un livello di affidabilità che tende al 100% come avviene nel controllo prepartenza, questo perché tale controllo non prevede lo smontaggio e la pulizia di tutte le teste della fasciatrice, ma solo delle prime teste, per le quali si richiede che funzionino sempre in condizione di massima efficienza al fine di garantire un maggiore qualità dell'isolamento, perché si tratta di quelle teste che avvolgono i primi strati di carta (isolante) cioè quelli che sono più a contatto con la corda di rame (conduttore).

Questo controllo consiste, quindi, nell'effettuare le seguenti operazioni:

- Per le prime teste si procede nello stesso modo del controllo Prepartenza cioè prima si effettua lo **smontaggio e pulizia** e poi il **controllo tesatura** o dei tiri dei nastri di carta per ogni staffa delle teste controllate.

- Per le successive invece viene effettuato solo il **controllo tesatura** per ogni staffa delle teste sottoposte al controllo.

E' bene sottolineare che il controllo intermedio, a differenza del controllo prepartenza, viene effettuato con il cavo in macchina, pertanto gli interventi di manutenzione che si rendono necessari per ripristinare il corretto funzionamento della macchina devono essere effettuati in maniera tale da non danneggiare il cavo, quindi con molta accuratezza.

Tale controllo viene effettuato fermando la produzione, per un tempo sufficiente a controllare tutte le teste.

6.8.2.3. Interventi di manutenzione a guasto

Gli interventi di manutenzione a guasto, si rendono necessari nel momento in cui si verifica un guasto della macchina durante la produzione (fasciatura) del cavo. Praticamente l'operatore della produzione nel caso in cui la macchina si ferma o avverte qualche anomalia telefona al manutentore il quale interviene per effettuare la riparazione.

La causa principale della maggior parte dei fermo macchina è imputabile ad una anomalia del dispositivo autoregolatore del tiro del nastro di carta ovvero del sistema frenante delle staffe su cui si è riscontrato il problema; pertanto nella maggior parte dei casi è richiesto l'intervento dei meccanici, infatti la fasciatrice è una macchina prettamente meccanica per cui gli interventi elettrici rispetto a quelli meccanici sono di gran lunga inferiore.

Nel caso in cui il guasto non è evidente e il fermo macchina è dovuto alla rottura della carta o alla vibrazione del galoppino, le quali rappresentano i principali fermo macchina, bisogna attraverso il dinamometro verificare il corretto funzionamento del dispositivo autoregolatore del tiro ovvero del sistema frenante della staffa su cui si è riscontrato il problema. Se non si riscontrassero i tiri imposti dalle specifiche del cavo da produrre, allora

bisogna intervenire meccanicamente, quindi si procede allo smontaggio della staffa e vengono controllati tutti i componenti. Nel momento in cui si individua il o i componenti che hanno determinato il guasto si procede alla riparazione attraverso un intervento meccanico che può consistere in operazioni di pulitura, di aggiustaggio e/o di sostituzione. Dopodiché si rimonta il tutto, si regola la geometria della staffa, utilizzando come strumento le dime e infine si verifica nuovamente attraverso il dinamometro il corretto funzionamento del sistema frenante. Se il controllo da esito positivo, l'intervento può considerarsi concluso e la produzione può iniziare, altrimenti bisogna ricontrollare il tutto fino a quando non viene risolto il problema.

Invece nel caso in cui il guasto è evidente ad esempio c'è rottura di un dato componente di una staffa, il manutentore effettua direttamente la sostituzione, dopodiché regola se è necessario la geometria della staffa e la produzione può riprendere.

6.9 Raccolta e Analisi dati

Prima di effettuare qualsiasi intervento atto a migliorare il servizio di gestione di manutenzione della macchina oggetto di studio, ovvero la **fasciatrice**, si è deciso inizialmente di fare una campagna di raccolta dati al fine di rilevare quali siano effettivamente le problematiche che interessano questa macchina.

Bisogna premettere che in azienda esiste già un database realizzato in Access da un precedente stagista; tale database è stato realizzato per consentire la registrazione dei dati relativi agli interventi di manutenzione sia correttiva che preventiva effettuati sia dal personale interno che dal personale delle ditte esterne su tutte le macchine presenti in azienda. Però è bene sottolineare che tale database non sempre viene utilizzato e nel caso in cui viene utilizzato presenta alcuni problemi per quanto riguarda l'interpretazione dei dati, questo

perché esso presenta dei campi aperti, in particolare per quanto riguarda sia la *descrizione del problema* che la *descrizione dell'intervento*, infatti essendo campi aperti, il tecnico manutentore descrive a parole sue sia il problema che l'intervento effettuato, pertanto può capitare che lo stesso problema o analogamente lo stesso intervento è descritto in maniera diversa, quindi poiché non c'è uniformità di linguaggio ciò comporta perdite di tempo a chi deve effettuare l'analisi dei dati di guasto, per poter poi avviare eventuali azioni correttive e di miglioramento.

Dopo aver riscontrato tali problematiche, si è deciso pertanto di effettuare la raccolta dei dati di guasto sul campo, in particolare quelli relativi agli interventi meccanici di manutenzione a guasto, tralasciando quelli elettrici, questo anche su indicazione del responsabile della manutenzione, il quale ha affermato che essendo la fasciatrice una macchina prettamente meccanica (infatti la sua costruzione risale agli inizi del 1960) gli interventi elettrici rispetto a quelli meccanici sono di gran lunga inferiore.

Allo scopo è stato opportuno prevedere l'impiego di un modulo, il quale è mostrato nella fig. 6.31.

Tale modulo è stato realizzato grazie alla preziosa collaborazione dei manutentori meccanici, i quali hanno evidenziato le problematiche più ricorrenti che si riscontrano per la macchina fasciatrice. In particolare hanno elencato tutti i possibili **fermi macchina**, le relative **cause** e gli **interventi eseguiti** per ripristinare il corretto funzionamento della macchina in seguito al fermo. Tutti questi elementi sono stati elencati nel modulo, infatti la compilazione è risultata molto semplice, in quanto bastava a fine intervento, barrare con una X sulle problematiche eventualmente riscontrate, e sugli interventi effettivamente eseguiti ovviamente nei casi in cui ciò non era presente nel modulo bisognava comunque annotarlo.

(barrare con una X)

			Modulo Raccolta Guasti FASCIATRICE:				<i>SAPEI</i>	<i>SACOI</i>
			N° STAFFA	N° TESTA	TURNO	MANUTENTORE	DATA	

FERMO MACCHINA (barrare con una X)									
CARTA SPEZZATA	VIBRAZIONE	TIRO	GAP	SICUREZZA FINE PADELLA	PERDITA OLIO	IMPUTABILE ALLA TESTA	<i>ALTRO:</i>		

CAUSA FERMO (barrare con una X)									
DEPOSITO POLVERE o SPORCO	PIATTELLO (PERODO) ROSSO	FASCETTA GRAFFIATA	FASCETTA SPEZZATA	FASCETTA STORTA	PERNO FASCETTA	RULLINO SVITATO	RULLINO BLOCCATO	SALTERELLO BLOCCATO	PROLUNGA STORTA
GALOPPINO BLOCCATO (FUORI GEOMETRIA)	CUSCINETTO INTERNO GALOPPINO BLOCCATO	PERNO GALOPPINO	MOLLA GALOPPINO	MOLLA STAFFA STARATA	REGISTRO TIRANTE LENTO	REGISTRO TIRANTE DEFORMATO	FINE PADELLA ASSENTE	FINE PADELLA BLOCCATO	LINGUETTA DI SGANCIO
ROTTURA LINGUETTA DI SICUREZZA FERMO TESTA		PIV	PARAOILI	<i>ALTRO:</i>					

INTERVENTI EFFETTUATI (barrare con una X)									
PULIZIA FASCETTA	PULIZIA PIATTELLO	SOSTITUZIONE FASCETTA	SOSTITUZIONE PIATTELLO	GEOMETRIA	RODAGGIO	PERNO LENTO FASCETTA	SOSTITUZIONE PERNO FASCETTA	AVVITAMENTO RULLINO	SOSTITUZIONE RULLINO GENERICO
SOSTITUZIONE RULLINO GALOPPINO	SOSTITUZIONE PERNO GALOPPINO	REGOLAZIONE (GEOMETRIA) GALOPPINO	SOSTITUZIONE GALOPPINO	SBLOCCO SALTERELLO	SOSTITUZIONE SALTERELLO	RIFATTA FILETTATURA STAFFA	ORIENTAMENTO TESTA	TARATURA MOLLA GALOPPINO	TARATURA MOLLA STAFFA
REGOLAZIONE REGISTRO TIRANTE	SOSTITUZIONE REGISTRO TIRANTE	REGOLAZIONE PIV	REGISTRAZIONE CATENA PIV	SOSTITUZIONE CATENA PIV	SOSTITUZIONE FINE PADELLA	SOSTITUZIONE LINGUETTA DI SGANCIO	SOSTITUZIONE LINGUETTA DI SICUREZZA FERMO TESTA	SOSTITUZIONE CROCIERA	SOSTITUZIONE PROLUNGA
SOSTITUZIONE GUARNIZIONE PIV	CAMBIO OLIO	<i>ALTRO:</i>							

NOTE (anche sul retro) :

Fig. 6.31: Modulo raccolta dati per la manutenzione a guasto

Questo modulo da un lato è stato visto di buon occhio dai manutentori i quali sono stati molto entusiasti soprattutto per la semplicità di compilazione, dall'altro lato la sua realizzazione ha contribuito a garantire una maggiore uniformità di linguaggio, eliminando perdite di tempo per l'interpretazione dei dati e consentendo quindi di effettuare l'analisi dei dati di guasto in maniera più semplice e veloce.

Mentre per quanto riguarda i dati di guasto relativi agli interventi di manutenzione preventiva, ovvero il **controllo prepartenza** e il **controllo intermedio**, in particolare per quanto riguarda il controllo tesature o dei tiri dei nastri di carta di tutte le staffe di ogni testa, utilizzando come strumento il dinamometro, è bene sottolineare che già esiste un modulo raccolta dati, predisposto dal Controllo Qualità dello stabilimento, su cui una parte è compilata dagli operatori della produzione, per evidenziare o meno la correttezza dei tiri dei nastri di carta, l'altra parte viene compilata dagli operatori della manutenzione nel caso in cui è richiesto il loro intervento per ripristinare il corretto funzionamento dei dispositivi autoregolatori del tiro

ovvero del sistema frenante delle staffe su cui si è riscontrato il problema e quindi in generale il regolare il funzionamento delle staffe e quindi della fasciatrice. Si tratta di un modulo cartaceo che poi viene archiviato dall'ente Produzione.

La raccolta dei dati di guasto è stata condotta sia per la fasciatrice si è deciso di far coincidere il periodo di tale raccolta con l'inizio e la fine di un lotto di produzione cioè con l'inizio e la fine di una generica pezzatura di cavo. Allo scopo, quindi, è stata monitorata una intera campagna di produzione di un lotto realizzato nel periodo tra il mese di marzo ed il mese di maggio del 2013, durante il quale sono stati prodotti circa 23 km di cavo.

Durante questo arco di tempo, sono stati raccolti sia i dati di guasto della manutenzione correttiva che quelli relativi al controllo intermedio, il quale è stato eseguito più o meno a metà pezzatura. Inoltre per completezza sono stati raccolti anche i dati di guasto relativi agli interventi di manutenzione eseguiti prima che inizi ogni lotto di produzione, ovvero i dati del cosiddetto controllo prepartenza e precisamente quello effettuato prima che iniziasse la lavorazione della pezzatura successiva a quella osservata.

I dati relativi alla manutenzione effettuata sulla linea fasciatrice durante il periodo di riferimento saranno riportate sottoforma di tabella, omettendo le diverse problematiche riscontrate con le relative cause, i dati relativi agli interventi effettuati sia durante le attività di manutenzione correttiva che durante le attività di manutenzione programmata (controllo prepartenza e controllo intermedio).

LINEA FASCIATRICE

INTERVENTO	MANUTENZIONE CORRETTIVA	CONTROLLO INTERMEDIO	SET-UP INIZIO PEZZATURA
Geometria	5	36	27
Pulizia fascetta	6	11	0
Pulizia piattello	6	36	41
Regolazione geometria	5	3	0
Rodaggio	0	0	14
Sblocco salterello	2	0	0
Sostituzione fascetta	27	105	210
Sostituzione fine rotolo	3	0	3
Ripristino fascetta	0	2	2
Ripristino galoppino	0	2	0
Sostituzione piattello	20	94	200
Sostituzione rullini	3	3	15
TOTALE INTERVENTI	76	291	511

Lo scopo di questo lavoro di rilevazione consiste nell'individuare quali sono le criticità della macchina, ovvero quali siano le componenti della stessa che hanno un peso, un'importanza maggiore, soprattutto per quel che riguarda l'affidabilità e la disponibilità della macchina fasciatrice. Per l'analisi delle criticità all'interno dell'impianto o per l'individuazione dei componenti critici di una macchina si può ricorrere all'analisi di **Pareto**, che è uno strumento che consente di individuare quella parte minima dei componenti del sistema che è responsabile della maggior parte dei problemi manutentivi. Pertanto nel nostro caso per condurre un'analisi di Pareto, bisogna innanzitutto individuare i principali componenti della macchina e poi il numero degli interventi effettuati su di essi nelle diverse attività di manutenzione (correttiva e programmata) dopodiché possiamo tracciare i cosiddetti diagrammi di Pareto, in cui i dati sono ordinati in senso decrescente cioè da quello che richiede più interventi di manutenzione a quello che ne richiede meno, in questo modo risulta più rapida l'analisi di criticità e quindi è più rapido individuare il componente o i componenti più critici su cui bisogna

concentrarci maggiormente per intraprendere eventuali azioni correttive o di miglioramento.

Di seguito riportiamo per la fasciatrice e per ciascuna tipologia di manutenzione una tabella in cui per ciascun componente è indicato il numero di interventi che sono stati eseguiti su di esso e il relativo diagramma di Pareto (fig. 6.32 e fig. 6.32). Notiamo che in tali diagrammi il numero degli interventi è espresso in percentuale sul totale degli interventi di manutenzioni effettuati nelle diverse attività di manutenzione (correttiva e intermedia).

<u>LINEA FASCIATRICE</u>		
MANUTENZIONE CORRETTIVA		
COMPONENTE	# DI INTERVENTI	% INTERVENTI
Fascetta	27	41,2%
Piattello	20	30,5%
Fine padella	8	12,2%
Galoppino	5	7,6%
Rullini	4	6,1%
Salterello	2	2,3%
TOTALE	66	

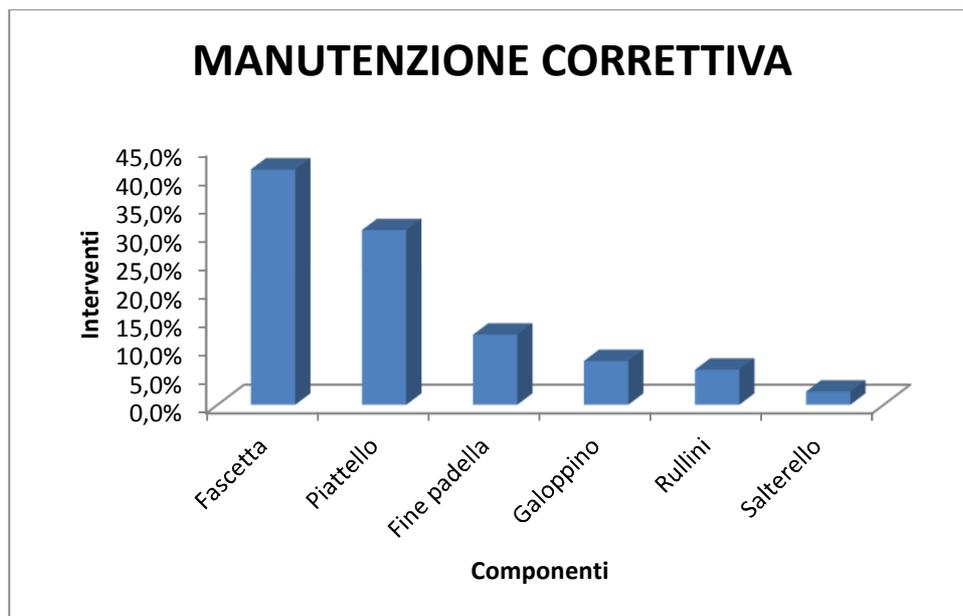


Fig. 6.32: *Diagramma di Pareto manutenzione correttiva*

<u>LINEA FASCIATRICE</u>		
CONTROLLO INTERMEDIO		
COMPONENTE	# DI INTERVENTI	% INTERVENTI
Fascetta	105	49,5%
Piattello	94	44,3%
Galoppino	7	3,3%
Rullini	6	2,8%
TOTALE	212	

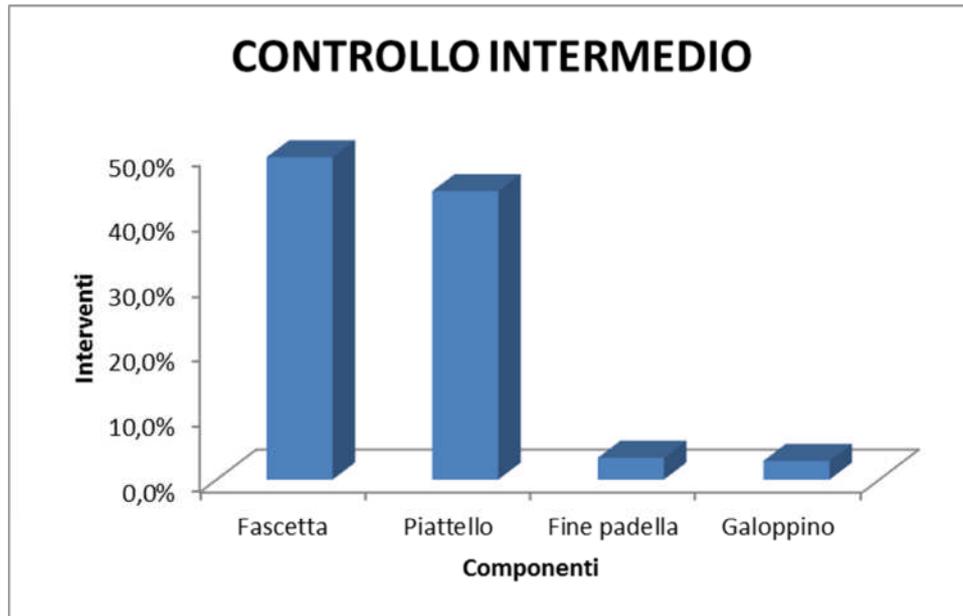


Fig. 6.33: *Diagramma di Pareto controllo intermedio*

In conclusione attraverso l'analisi di Pareto e in particolare osservando i diagrammi è possibile individuare quali sono le criticità della macchina, ovvero quali sono i componenti della stessa più critici. Quindi attraverso questa analisi possiamo affermare che per la fasciatrice, il componenti più critico è la FASCETTA, in quanto, come si evince dai diagrammi, su di essa sono concentrati la quasi totalità degli interventi manutentivi sia quelli della manutenzione correttiva, comportando il maggior numero di fermo macchina e sia quelli della manutenzione programmata, aumentando i relativi tempi. Quindi in generale la criticità di questo componente comporta una riduzione della disponibilità della linea fasciatrice.

6.10 Definizione Problema

Per la definizione del problema manutentivo sono stati analizzati per la fasciatrice, in cui è stata realizzata una pezzatura di 23 Km, sia i dati della manutenzione a guasto e sia quelli del controllo intermedio, ed è stato

evidenziato che nonostante sia stato effettuato un intervento di controllo intermedio, effettuato più o meno a metà pezzatura, ovvero intorno ai 12 Km ed durante il quale sono state sostituite 105 fascette, la macchina per lo stesso problema ovvero per la sostituzione della fascetta si è fermata 27 volte riducendone la sua disponibilità operativa e comportando di conseguenza un elevato costo di mancata produzione.

Pertanto il problema manutentivo da risolvere consiste nel migliorare la disponibilità operativa della macchina ovvero nel ridurre il numero di interventi a guasto evitando, così guasti costosi, infatti si ipotizza che il costo relativo al fermo produzione per un intervento di manutenzione a guasto relativo alla sostituzione di una fascetta è molto maggiore del costo della singola fascetta sostituita in un intervento di manutenzione intermedia. Quindi migliorare la disponibilità al fine di ottenere una riduzione dei costi totali di manutenzione, può essere ottenuto migliorando l'affidabilità aggregata della macchina, ovvero la propensione al buon funzionamento nell'intervallo relativo alla produzione di un lotto, il che a sua volta si può ottenere attraverso un potenziamento dei controlli preventivi, il cui scopo è appunto migliorare l'affidabilità. **Si cercherà di dimostrare, infatti, che il costo totale di manutenzione diminuisce anche se aumenta il numero dei controlli intermedi.**

Quindi si tratta di risolvere un classico problema di ottimizzazione delle politiche di manutenzione.

Però è bene sottolineare che per risolvere tale problema non è possibile utilizzare i modelli di ottimizzazione delle politiche preventive di sostituzione totale e parziale presenti in letteratura, principalmente per tre motivi:

- Il primo motivo riguarda la politica di manutenzione preventiva ciclica adottata, per i modelli presenti in letteratura e in particolare per i modelli di sostituzione totale si fa riferimento alla classica politica di

manutenzione preventiva ciclica caratterizzata da interventi effettuati periodicamente che comportano la sostituzione totale di una determinata macchina o componente della stessa che non si è ancora guastato, con uno nuovo, in modo tale da prevenirne il cedimento incontrollato, invece per la macchina oggetto di studio ovvero la fasciatrice viene adottata un particolare tipo di manutenzione ciclica detta **manutenzione di revisione**, ovvero **di ispezione completa e riparazione**, effettuata smontando periodicamente e ispezionando-controllando l'intero impianto/macchina, per riparare o sostituire solamente le parti deteriorate o usurate.

- Il secondo motivo riguarda il tempo a cui effettuare gli interventi di manutenzione preventiva, infatti entrambi i modelli presenti in letteratura, consentono di determinare qual è il tempo ottimo, a cui effettuare la sostituzione, sia esse totale o parziale, che minimizza i costi totali di manutenzione; invece nel caso in esame, gli interventi di manutenzione preventiva, in particolare il controllo intermedio sono imposti. Il cliente ha, infatti, imposto il controllo intermedio non a metà pezzatura, ma con una frequenza di 10 km al fine di ottenere una maggiore garanzia sulla qualità del prodotto. Infatti se il tiro dei nastri di carta che si svolgono dai rotoli montati sui piattelli delle singole staffe si mantiene costante durante la produzione ovvero al valore definito dalle specifiche del cavo da produrre segue che migliore è l'applicazione dell'isolamento e di conseguenza migliore è la qualità del cavo prodotto.
- Infine il terzo motivo riguarda invece la definizione del ciclo di manutenzione della macchina ovvero quel ciclo che inizia e termina con la macchina in condizione "as good as new" cioè con macchina nuova ovvero con affidabilità pari al 100%. Nei modelli presenti in letteratura il ciclo di manutenzione è definito in funzione del tempo ottimo a cui effettuare la sostituzione, invece nel caso in esame il ciclo

di manutenzione coincide con il lotto di produzione ovvero inizia e finisce con la pezzatura da produrre pertanto è diverso da pezzatura a pezzatura.

Quindi dal momento che i modelli presenti in letteratura non possono essere utilizzati per risolvere il problema manutentivo evidenziato, si è pensato di sviluppare e proporre un *modello matematico ad hoc*, il cui scopo è quello di ottimizzare le politiche manutentive, adottate per la manutenzione della fasciatrice, in modo tale da raggiungere gli obiettivi strategici di una corretta gestione della manutenzione ovvero *miglioramento continuo della disponibilità operativa* della macchina e *contenimento dei costi globali di manutenzione*.

Tale modello partendo da uno studio di affidabilità della macchina fasciatrice in funzione dell'affidabilità del componente critico ovvero della fascetta, consente di definire quando effettuare i controlli intermedi, una volta stabilito il numero, fermo restando che per il vincolo imposto dal cliente, la distanza tra 2 interventi di manutenzione successivi non può eccedere i 10 Km. In particolare per quanto riguarda la definizione del numero dei controlli intermedi da effettuare con le relative durate, è bene sottolineare che dipende dalla lunghezza della pezzatura da realizzare, quindi poiché le pezzature possono avere lunghezze diverse, si utilizza un semplice algoritmo matematico che permette di definire quanti controlli effettuare e le relative durate nel rispetto del vincolo imposto del cliente.

Inoltre permette di calcolare il numero di fascette da sostituire durante tali controlli al fine di riportare la macchina ad un livello di affidabilità accettabile tale da aumentarne la disponibilità ovvero ridurre il numero d'interventi correttivi a guasto, evitando, così guasti costosi e quindi consentendo una riduzione dei costi totali di manutenzione.

6.11 Implementazione del Modello di ottimizzazione delle politiche manutentive sotto revisione di fine lotto

Il modello proposto è implementato facendo ricorso soprattutto alla teoria della affidabilità, infatti individuato il componente critico ovvero la fascetta, si è deciso di effettuare prima uno studio affidabilistico di tale componente al fine di ricavare poi la legge di affidabilità della macchina fasciatrice.

Effettuare, infatti, un'analisi di affidabilità e quindi conoscere la distribuzione di affidabilità di un'entità (ad esempio di un componente o di una macchina) è fondamentale per poter prendere decisioni preventive sulle politiche di manutenzione che devono essere adottate.

Tra i diversi modelli di affidabilità, presenti in letteratura, si è deciso di studiare l'affidabilità utilizzando il modello o la distribuzione di Weibull, in quanto, attualmente essa grazie alla sua duttilità (o alla sua grande capacità di adattamento) può essere utilizzata per modellare tutte le fasi del ciclo di vita di un'entità, quindi può essere usata per descrivere l'affidabilità di un'entità sia durante la fase dei guasti infantili, sia durante la vita utile e sia durante la fase dei guasti per usura, ciò si ottiene semplicemente variando i valori dei parametri caratteristici della distribuzione ovvero il valore del parametro di scala (o vita caratteristica) α e il valore del parametro forma β .

Per ricavare la legge di affidabilità mediante il metodo di Weibull, del componente in esame, ovvero la fascetta, è necessario conoscere i valori dei parametri caratteristici della distribuzione ovvero α e β . Per stimare tali valori, è stato esaminato un campione di 18 componenti con i relativi tempi al guasto (espressi in Km) i cui valori non possono essere rilevati per motivi di riservatezza aziendale.

La stima dei parametri α e β , dopo aver ordinato i dati di guasto in senso crescente, è stata effettuata utilizzando prima il metodo della massima verosimiglianza e poi il metodo grafico della carta di probabilità di Weibull facendo ricorso al metodo della regressione lineare.

I valori dei parametri α e β che definiscono la distribuzione di Weibull, utilizzata per descrivere l'affidabilità del componente a guasto ovvero della fascetta sono :

$$\alpha = 60 \text{ Km} \quad \beta = 3.8$$

Una volta che si conoscono i valori dei parametri α e β si conosce l'andamento dell'affidabilità $R(t)$ e delle altre funzioni affidabilistiche, $\lambda(t)$, $f(t)$, $F(t)$ e quindi, il comportamento stesso del componente a guasto ovvero della fascetta.

Attraverso l'utilizzo del software Matlab si è ricavato l'andamento (fig. 6.34) delle funzioni affidabilistiche ovvero $f(t)$, $\lambda(t)$, $F(t)$, $R(t)$.

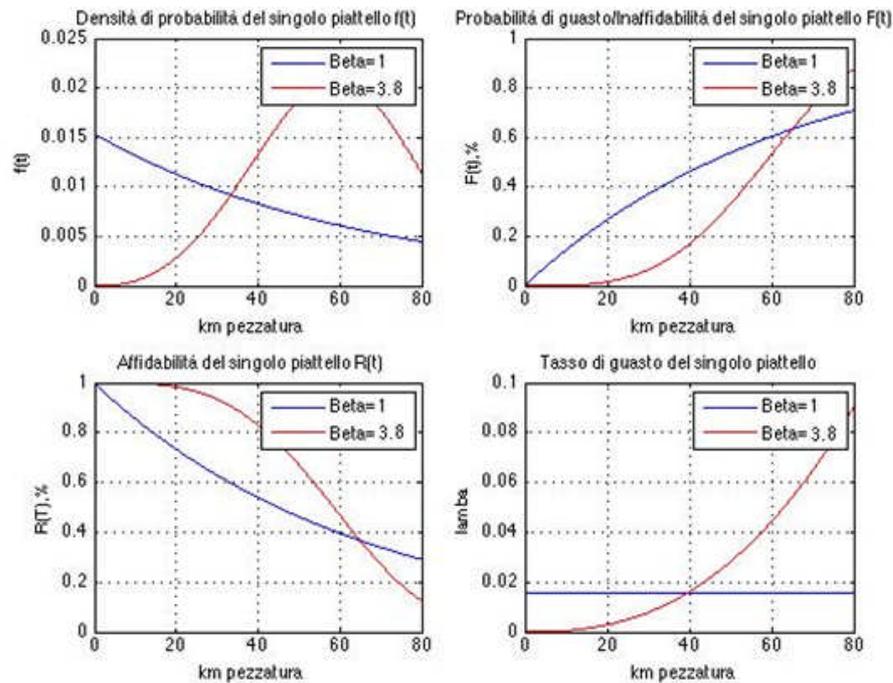


Fig. 6.34 : Andamento $f(t)$, $\lambda(t)$, $F(t)$, $R(t)$ della fascetta

Ricavata la legge di affidabilità del singolo componente possiamo ricavare quella della macchina oggetto di studio ovvero la fasciatrice.

Ricordiamo che la fasciatrice è composta da 20 teste a fasciare e ogni testa è composta da 12 staffe ognuna delle quali è caratterizzata da un dispositivo

autoregolatore del tiro dei nastri di carta ovvero di un sistema frenante di cui fanno parte diversi componenti e in particolare la fascetta; nel periodo di studio considerato, il cavo in produzione prevedeva l'utilizzo di solo 18 delle 20 teste a disposizione della linea fasciatrice. Per questo motivo il numero di fascette prese in esame sono $18 \times 12 = 216$.

Inoltre è bene sottolineare che il guasto anche di una sola fascetta comporta il guasto o il fermo dell'intera fasciatrice, pertanto, dal punto di vista affidabilistico la macchina fasciatrice può essere vista come un sistema composto da 216 componenti identici in serie e quindi come un sistema in serie, per il quale l'affidabilità è data :

$$R_s(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot \dots \cdot R_n(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t)$$

ovvero l'affidabilità del sistema al tempo t è data dal prodotto delle affidabilità di tutti i componenti al tempo t , dove t è la durata o il tempo di missione (nel nostro caso espresso in km) ovvero il tempo durante il quale si richiede che la macchina sia effettivamente funzionante.

Dal momento che si è deciso di studiare l'affidabilità mediante la distribuzione di Weibull, bisogna conoscere i valori dei parametri α e β .

Nel caso di un sistema costituito da n componenti identici in serie, la cui affidabilità è descritta da una Weibull di parametri α e β allora l'affidabilità dell'intero sistema, è descritta ancora da una Weibull, di parametri:

$$\beta \text{ e } \alpha_{tot} = \frac{\alpha}{n^{\frac{1}{\beta}}}$$

Pertanto l'affidabilità del sistema totale è:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha_{tot}}\right)^\beta}$$

Una volta che si conoscono i valori dei parametri α_{tot} e β si conosce l'andamento dell'affidabilità $R(t)$ e delle altre funzioni affidabilistiche, $\lambda(t)$, $f(t)$, $F(t)$ e quindi, il comportamento a guasto della macchina.

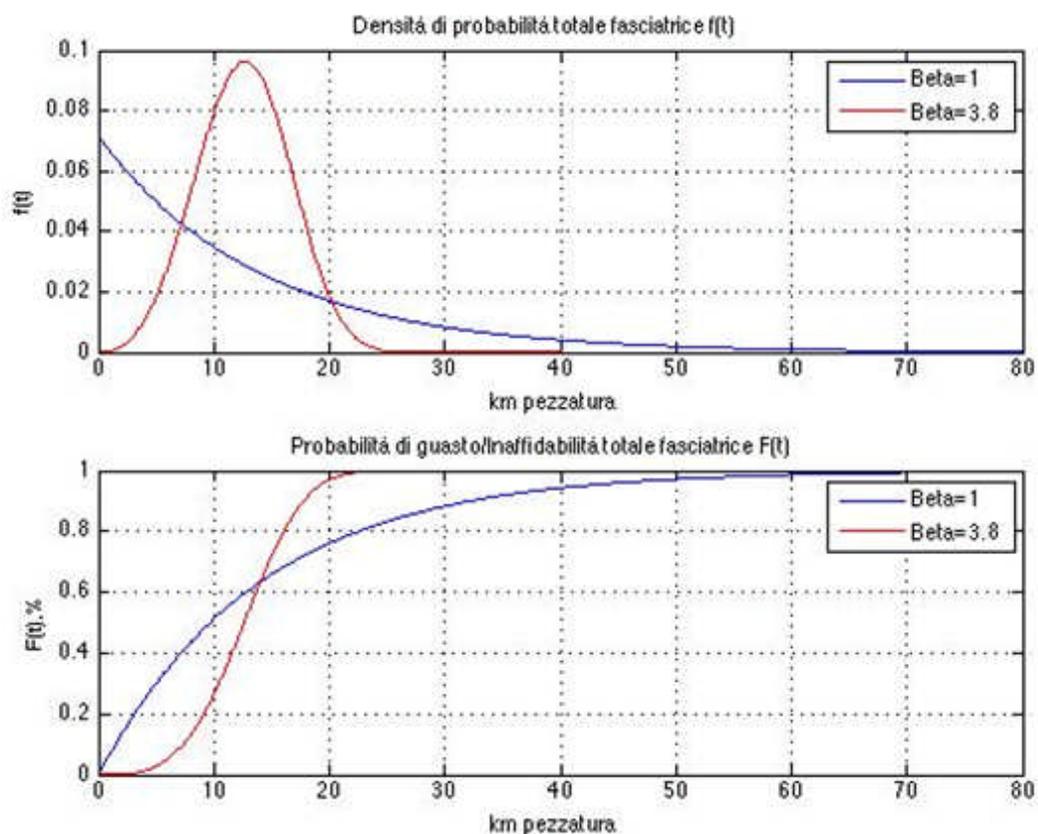


Fig. 6.35 : Andamento $f(t)$, $F(t)$, della fasciatrice

Attraverso matlab si è ricavato l'andamento dell'affidabilità $R(t)$ della macchina fasciatrice nello scenario manutentivo osservato, relativo ad una pezzatura di 23 Km e determinato l'area sottesa alle curve di affidabilità che ricordiamo rappresenta l'affidabilità aggregata ovvero la propensione di una macchina al buon funzionamento nell'intervallo considerato.

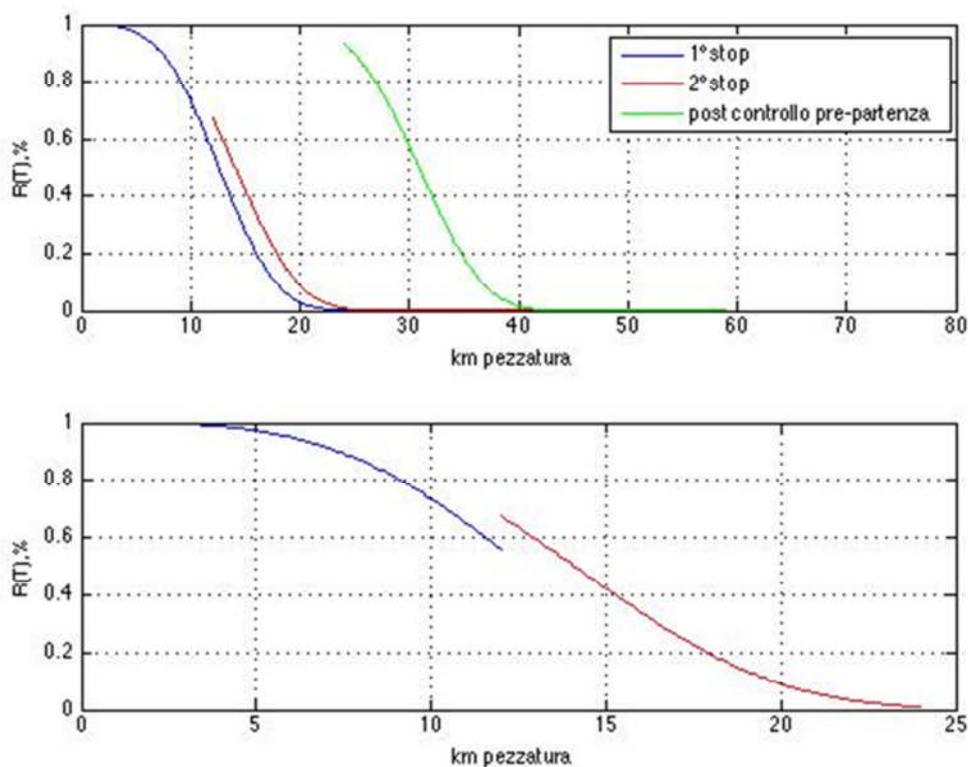


Fig. 6.36 : Politica manutentiva attuale per la fasciatrice

In tale scenario (fig. 6.36), che rappresenta l'attuale politica manutentiva adottata, è stato effettuato un solo controllo intermedio a metà pezzatura ovvero a 11 Km in corrispondenza del quale la macchina aveva una affidabilità di circa il 55% , in tale controllo sono state cambiate 105 fascetta riportando l'affidabilità della macchina ad un valore di circa il 65% e un controllo pre-partenza (per la successiva pezzatura) ovvero a 22 Km in corrispondenza del quale la macchina aveva una affidabilità inferiore al 10%, in tale controllo sono state sostituite 210 fascette riportando l'affidabilità della macchina ad un valore tendente al 100%.

Dopodiché è stata calcolata l'affidabilità aggregata della macchina nel intervallo di funzionamento (0-23 Km) semplicemente sommando le area sottese alle due curve di affidabilità, ottenendo **13,45 Km**.

A questo punto si è deciso di implementare il modello proposto per ricavare un nuovo scenario manutentivo, ovvero una nuova politica di manutenzione da adottare, facendo riferimento sempre alla stessa pezzatura di 23 km realizzata in fasciatrice. Ricordiamo che in primo luogo il modello proposto consente di definire quanti e quando effettuare i controlli intermedi, nel rispetto del vincolo imposto dal cliente, ovvero che la distanza tra 2 interventi di manutenzione successivi non può eccedere i 10 Km. Inoltre permette di calcolare il numero di piattelli da sostituire durante tali controlli al fine di riportare la macchina ad un livello di affidabilità maggiore.

Essendo la pezzatura di 23 Km, utilizzando la formula di calcolo:

$$N_{CI} = \frac{T_{LP}}{10} = \frac{km \text{ pezzatura}}{10} = \frac{23 \text{ Km}}{10} = 2.3 \approx 2$$

si ricava che i controlli intermedi da effettuare sono **2**, e utilizzando l'algoritmo calcoliamo l'istante (espresso in Km) in cui realizzare tali controlli intermedi:

$$23-10=13 \geq 10 \rightarrow T_{CI(1)} = T1 = 10$$

$$(23-10) -10=3 \leq 10 \rightarrow T_{CI(2)} = T2 = 10 + \frac{13}{2} = 10 + 6,5 = 16,5$$

ovvero uno a 10 Km e l'altro a 16,5 Km. Inoltre si considera un ultimo controllo, il controllo pre-partenza (per la successiva pezzatura), effettuato a 23 Km, come nella politica di manutenzione attuale.

Di seguito si riporta l'andamento dell'affidabilità $R(t)$ della macchina fasciatrice nel nuovo scenario manutentivo e l'affidabilità aggregata ovvero la propensione di una macchina al buon funzionamento nell'intervallo considerato.

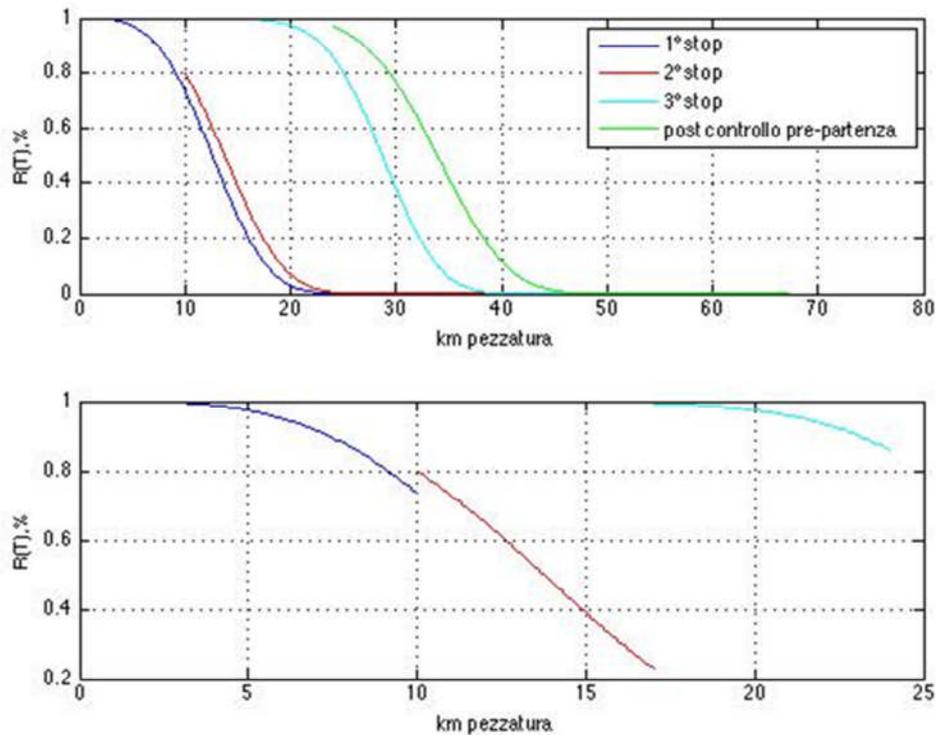


Fig. 6.37 : Politica manutentiva proposta per la fasciatrice

In tale scenario (fig. 6.37), ovvero per la nuova politica di manutenzione implementando il modello proposto, si nota che in corrispondenza del primo controllo effettuato a 10 Km, la macchina ha una affidabilità di circa il 77%, in tale controllo il modello ci dice che devono essere cambiate 56 fascette riportando l'affidabilità della macchina ad un valore di circa l'80%, mentre in corrispondenza del secondo controllo, effettuato a 16,5 Km, la macchina ha una affidabilità di circa il 23%, in tale controllo il modello ci dice che devono essere cambiate 165 fascette riportando l'affidabilità della macchina ad un valore prossima al 100%, infine l'ultimo controllo ovvero il controllo pre-partenza (per la successiva pezzatura) effettuato quindi a 23 Km, la macchina ha una affidabilità di circa il 75%, in tale controllo il modello ci

dice che devono essere cambiate 56 fascette riportando l'affidabilità della macchina ad un valore prossima al 100%.

Dopodiché è stata calcolata l'affidabilità aggregata della macchina nell'intervallo di funzionamento (0-23) semplicemente sommando le area sottese alle tre curve di affidabilità, ottenendo **19.25 Km**.

Mettendo a confronto le affidabilità aggregate della macchina nell'intervallo di funzionamento (0-23) calcolata per i 2 scenari, quello attuale e quello ottenuto implementando il modello manutentivo si è ottenuto un miglioramento del 43%. Analiticamente è dato da:

$$\frac{19.25 - 13.45}{13.45} = 0.43 = \mathbf{43\%}$$

Quindi un miglioramento dell'affidabilità aggregata della macchina si traduce in un miglioramento della disponibilità della macchina e quindi in una riduzione del numero di interventi di manutenzione a guasto, e quindi nel caso in esame in una riduzione del numero di fascette sostituite a guasto, ovvero ad una riduzione del numero di fermo macchina o produzione, pertanto ricordando che il numero di interventi di manutenzione a guasto relativi alla sostituzione della fascetta erano 27, segue che un miglioramento del 43% dell'affidabilità aggregata comporta di avere circa 11 fermate in meno, il cui costo è sicuramente molto maggiore del costo della singola fascetta sostituito in un intervento di controllo preventivo, determinando quindi una riduzione dei costi totali di manutenzione. Infatti ciò è stato dimostrato valutando per entrambe le politiche il relativo costo, utilizzando la seguente relazione:

$$CT = C_{MG} * N_{MG} + C_{CI} * N_{CI} + C_{CP}$$

dove

$$C_{MG} = (T_{int} * C_{opp} * V_{prod}) + (N_{operai} * T_{int} * C_{orario\ lavoro}) + C_C$$

$$C_{CI}(= C_{CP}) = (n_{CI} * C_C) + (N_{operai} * T_{int} * C_{orario\ lavoro}) + (C_{stop} * T_{int} * V_{prod})$$

E' bene sottolineare che per quanto riguarda i costi e i tempi sono stime in parte fornite dai responsabili della manutenzione e in parte effettuando indagini.

Scenario attuale:

un controllo intermedio $\rightarrow N_{CI} = 1$;

un controllo prepartenza;

Numero totale di fascette sostituite a guasto (o fermo) $\rightarrow N_{MG} = 27$;

Numero totale di fascette sostituite nel controllo intermedio $\rightarrow n_{CI} = 105$;

Numero totale di fascette sostituite nel controllo prepartenza $\rightarrow n_{CI} = 210$

Tempo intervento per sostituzione singole a guasto $\rightarrow T_{int} = 1\text{ h}$;

Tempo intervento controlli intermedi e prepartenza $\rightarrow T_{int} = 5\text{ giorni}$;

Velocità della macchina $\rightarrow V_{prod} = 3.1\text{ m/min}$;

Costo orario del lavoro operaio $\rightarrow C_{orario\ lavoro} = 15\text{ €/h}$;

Costo opportunità di mancata produzione $\rightarrow C_{opp} = 50\text{ €}$; (è stato moltiplicato per uno 0,07 per tener conto dei livelli di saturazione)

Costo opportunità associato ai controlli intermedi e prepartenza $\rightarrow C_{stop} = 1\text{ €}$;

Numero operatori in intervento a guasto $\rightarrow N_{operai} = 1$;

Numero operatori nei controlli intermedi e prepartenza $\rightarrow N_{operai} = 3$;

Costo fascetta $\rightarrow C_C = 30\text{ €}$;

Quindi il costo totale manutenzione per lo scenario attuale è pari a **294885,00** €

Scenario ricavato con il modello proposto:

2 controlli intermedi $\rightarrow N_{CI} = 2$;

un controllo prepartenza;

Numero totale di fascette sostituite a guasto $\rightarrow N_{MG} = 16$;

Numero totale di fascette sostituite nel 1° controllo intermedio → $n_{CI} = 56$;

Numero totale di fascette sostituite nel 2° controllo intermedio → $n_{CI} = 165$;

Numero totale di piattelli sostituiti nel controllo prepartenza → $n_{CI} = 56$

I tempi e costi e gli altri parametri sono gli stessi dello scenario attuale.
Quindi il costo totale manutenzione per questo nuovo scenario è pari a **225300,00 €**.

Mettendo a confronto il costo totale delle 2 politiche manutentive attuale e proposta, si osserva che politica manutentiva ricavata con il modello proposto presenta un costo minore e pertanto tale politica permette di ottenere un risparmio del 23%.

Analiticamente

$$\frac{225300,00 - 294885,00}{294885,00} = -0.23 = -\mathbf{23\%}$$

6.12. Analisi dei risultati

Quindi confrontando i risultati ottenuti per entrambi gli scenari, il modello proposto ha comportato una ottimizzazione della politica manutentiva attuale, in quanto determinando un miglioramento del 43% dell'affidabilità aggregata del sistema totale ovvero della fasciatrice si ha un aumento della disponibilità del sistema, ovvero una riduzione degli interventi a guasto, passando da 27 a 16, comportando di conseguenza una riduzione del costo totale di manutenzione ovvero un risparmio del 23%, rispetto al costo della politica di manutenzione attuale.

Gli sviluppi futuri di questo lavoro sono rappresentati dall'applicabilità di questo modello agli altri componenti critici della linea, per poi essere esteso a tutte le altre linee dello stabilimento.

Lo scopo è quello di poter quindi creare per ogni linea di produzione un programma di manutenzione preventiva e ciclica dedicato al fine di minimizzare i costi totali di manutenzione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Luciano Furlanetto, Marco Garetti, Marco Macchi, “*Principi generali di gestione della manutenzione*”.
- [2] Luciano Furlanetto, Marco Garetti, Marco Macchi, “*Ingegneria della manutenzione*”.
- [3] Lorenzo Fedele, Luciano Furlanetto, Daniele Saccardi, “*Progettare e gestire la manutenzione*”.
- [4] Paolo Stefanini, “*Metodi di ricerca e prevenzione dei guasti*”.
- [5] AA.VV., “*Manuale della manutenzione industriale*”.
- [6] UNI EN 13306:2010 “Manutenzione – Terminologia”.
- [7] UNI 10147:2003 “Manutenzione - Termini aggiuntivi alla UNI EN 13306 e definizioni”.
- [8] Appunti del corso di “*Sistemi di Produzione di Beni e Servizi*” tenuto dalla prof.ssa L. C. Santillo.
- [9] Appunti del corso di “*Teoria e Metodi statistici dell’affidabilità*” a cura del Prof. Massimiliano Giorgio.
- [10] Articoli vari della rivista “*Manutenzione*”.
- [11] Articoli vari dell’AIMAN – “*Associazione Italiana di Manutenzione*”.
- [12] Jardine A. K. S., Tsang A. H. C. (2006). “*Maintenance, Replacement and Reliability. Theory and Applications*”. Taylor and Francis, NW.
- [13] Campbell J.D., Jardine A. K. S. (2001). “*Maintenance Excellence. Optimizing Equipment Life Cycle Decisions.*” Marcel Dekker, Inc. New York.
- [14] Barlow R. E., Hunter L. C. (1960). “*Optimum Preventive Maintenance Policies*”.
- [15] Nguyen D. G., Murthy D. N. P. (1981). “*Optimal Preventive Maintenance Policies for Repairable Systems*”.

- [16] Gertsbakh IB. “*Models of preventive maintenance*”. Amsterdam: North-Holland; 1977.
- [17] Nakagawa T. “*Periodic inspection policy with preventive maintenance*”
Naval Res Logist Quart 1984;31:33–40.
- [18] Tsai YT, Wang KS, Tsai LC, “*A study of availability centered preventive maintenance for multi-component systems*”, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 84, pp 261-270, 2004
- [19] Lie CH, Chun YH, “*An algorithm for preventive maintenance policy*”,
IEEE Transactions on Reliability, pp 71-75. 1986
- [20] J. J. McCall, “*Maintenance policies for stochastically failing equipment: a survey*,” *Manage. Sci.*, vol. 11, no. 5, pp. 493–524, 1965.
- [21] W. P. Pierskalla and J. A. Voelker, “*A survey of maintenance models: the control and surveillance of deteriorating systems*,” *Nav. Res. Logist. Quarter.*, vol. 23, no. 3, pp. 353–388, 1976.
- [22] S. Osaki and T. Nakagawa, “*Bibliography for reliability and availability of stochastic systems*,” *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 25, no. 4, pp. 284–287, 1976.
- [23] Y. S. Sherif and M. L. Smith, “*Optimal maintenance models for systems subject to failure—a review*,” *Nav. Res. Logist. Quarter.*, vol. 28, no. 1, pp. 47–74, 1981.
- [24] C. Valdez-Flores, “*Survey of preventive maintenance models for stochastically deteriorating single-unit systems*,” *Nav. Res. Logist.*, vol.36, no. 4, pp. 419–446, 1989.
- [25] D. I. Cho and M. Parlar, “*A survey of maintenance model for multi-unit systems*,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 51, no. 1, pp. 1–23, 1991.
- [26] R. Dekker, “*Application of maintenance optimization models: a review and analysis*,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 51, no. 3, pp. 229–240, 1996.
- [27] J. C. Bean, J. R. Birge, J. Mittenthal, and C. E. Noon, “*Match-up scheduling with multiple resources, release dates and disruptions*,”
Oper. Res., vol. 39, no. 3, pp. 470–483, 1991.

- [28] S. Sridhar, “*Determination of aggregate preventive maintenance programs using production schedules,*” *Comput. Industrial Eng.*, vol. 14, no. 2, pp. 193–200, 1988.
- [29] E. Sanmarti, A. Espuna, and L. Puigjaner, “*Effects of equipment failure uncertainty in batch production scheduling,*” *Comput. Chem. Eng.*, vol. 19, pp. S565–S570, 1995.
- [30] C. M. Kelly, C. T. Mosier, and F. Mahmoodi, “*Impact of maintenance policies on the performance of manufacturing cells,*” *Int. J. Production Res.*, vol. 35, no. 3, pp. 767–787, 1997.
- [31] N. Mannur and J. B. Addagatla, “*Heuristic algorithms for solving earliness-tardiness scheduling problem with machine vacations,*” *Comput. Industrial Eng.*, vol. 25, no. 1–4, pp. 255–258, 1993.
- [32] L. Weinstein and C.-H. Chung, “*Integrating maintenance and production decisions in a hierarchical production planning environment,*” *Comput. Oper. Res.*, vol. 26, no. 10, pp. 1059–1074, 1999.
- [33] D. I. Cho, P. L. Abad, and M. Parlar, “*Optimal production and maintenance decisions when a system experiences age-dependent deterioration,*” *Optimal Control Applications and Methods*, vol. 14, no. 3, pp. 153–167, 1993.
- [34] J. Ashayeri, A. Teelen, and W. Selen, “*A production and maintenance planning model for the process industry,*” *Int. J. Production Res.*, vol. 34, no. 12, pp. 3311–3326, 1996.
- [35] Bris R, Chatelet E, Yalaoui F, “*New method to minimize the preventive maintenance cost of series–parallel systems*”, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 82, pp 247-255, 2003
- [36] Richard H. Rooley, *Building services: maintenance systems and policies*, 1993.

- [37] Vaurio JK., Optimization of test and maintenance intervals based on risk and costs, *Reliability Engineering and System Safety*, 49 (1995) 23–36.
- [38] IB Hipkin, AG Lockett, A Study of Maintenance Technology Implementation, *Omega, Int. J. Mgmt Sci.* Vol. 23, No. I, pp. 79-88, 1995.
- [39] Rommert Dekker, Integrating optimisation, priority setting, planning and combining of maintenance activities, *European Journal of Operational Research* 82 (1995) 225-240.
- [40] M. Ben-Daya, S.O. Duffuaa, Maintenance and quality: the missing link, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 1 No. 1, 1995, pp. 20-26.
- [41] Wang J., Yang JB., Sen P., Ruxton T., Safety based design and maintenance optimisation of large marine engineering system,. *Applied Ocean Research* 18 (1996) 13-27.
- [42] Jens O. Riis, James T. Luxhøj, Uffe Thorsteinsson, Situational maintenance model, *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 14 No. 4, 1997, p. 349-366.
- [43] Mehmet Savsar, Simulation analysis of maintenance policies in just-in-time production systems, *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 17 No. 3, 1997, pp. 256-266.
- [44] Yoshitsugu Kimura, Maintenance tribology: its significance and activity in Japan, *Wear* 207 (1997) 63–66.
- [45] Benjamin S. Blanchard, An enhanced approach for implementing total productive maintenance in the manufacturing environment, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 3 No. 2, 1997, pp. 69-80.
- [46] Duthie JC, Robertson MI, Clayton AM, Lidbury DPG., Risk-based approaches to ageing and maintenance management, *Nucl Eng Des* 1998; 184:27–38.

- [47] Billinton R, e Pan J., Optimal maintenance scheduling in a two identical component parallel redundant system, *Reliab Eng Syst Saf* 1998; 59:309–16.
- [48] Hans Lofsten, Measuring maintenance performance- in search for a maintenance productivity index, *Int. J. Production Economics* 63 (1998) 47-58.
- [49] Martorell S., Sanchez A., Munoz A., Pitarch JL., Serradell V., Roldan J., The use of maintenance indicators to evaluate the effects of maintenance programs on NPP performance and safety, *Reliability Engineering and System Safety*, 65 (1999) 85–94.
- [50] Duncan Brewer H., Canady KS., Probabilistic safety assessment support for the maintenance rule at Duke Power Company, *Reliability Engineering and System Safety* 63 (1999) 243-249.
- [51] Dijkhuizen G, Heijden M., Preventive maintenance and the interval availability distribution of an unreliable production system, *Reliab Eng Syst Saf* 1999; 66:13–27.
- [52] Liliane Pintelon, Niek Du Preez, Frank Van Puyvelde, Information technology: opportunities for maintenance management, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 5 No. 1, 1999, pp. 9-24.
- [53] S.O. Du€uaa, K.S. Al-Sultan, A stochastic programming model for scheduling maintenance personnel, *Applied Mathematical Modelling* 25 (1999) 385-397.
- [54] Chapot JLC, Silva FC, Schirru R., A new approach to the use of genetic algorithms to solve pressurized water reactor’s fuel management optimization problem, *Ann Nucl Energy* 1999; 26(7):641–55.
- [55] Hans Lofsten, Management of industrial maintenance - economic evaluation of maintenance policies, *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 19 No. 7, 1999, pp. 716-737.

- [56] J. Crocker, U.D. Kumar, Age-related maintenance versus reliability centred maintenance: a case study on aero-engines, *Reliability Engineering and System Safety* 67 (2000) 113–118.
- [57] Kari Komonen, A cost model of industrial maintenance for profitability analysis and benchmarking, *Int. J. Production Economics* 79 (2000) 15-31.
- [58] C.G. Vassiliadis, E.N. Pistikopoulos, Maintenance scheduling and process optimization under uncertainty, *Computers and Chemical Engineering* 25 (2000) 217–236.
- [59] David F. Percy, Khairy A.H. Kobbacy, Determining economical maintenance intervals, *Int. J. Production Economics* 67 (2000) 87-94.
- [60] Vassiliadis CG., Pistikopoulos EN., Maintenance-based strategies for environmental risk minimization in the process industries, *Journal of Hazardous Materials* 71 (2000). 481–501.
- [61] Marseguerra M., Zio E., Optimizing maintenance and repair policies via a combination of genetic algorithms and Monte Carlo simulation, *Reliability Engineering and System Safety* 68 (2000) 69–83.
- [62] Borgonovo E., Marseguerra M., Zio E., A Monte Carlo methodological approach to plant availability modeling with maintenance, aging and obsolescence, *Reliability Engineering and System Safety* 67 (2000) 61–73.
- [63] Michael Vineyard, Kwasi Amoako-Gyampah, Jack R. Meredith, An evaluation of maintenance policies for flexible manufacturing systems. A case study, *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 20 No. 4, 2000, pp. 409-426.
- [64] Busacca PG, Marseguerra M, Zio E., Multiobjective optimization by genetic algorithms: application to safety systems, *Reliab Eng Syst Saf* 2001; 72(1):59–74.
- [65] Chiang JH, Yang J., Optimal maintenance policy for a Markovian system under periodic inspection, *Reliab Eng Syst Saf* 2001; 71: 165–72.

- [66] One Yoon Seng, Muhamad Jantan, T. Ramayah, Implementing Total Productive Maintenance (TPM) in Malaysian Manufacturing Organisation: An Operational Strategy Study, 2001.
- [67] Wang H., A survey of maintenance policies of deteriorating systems, *European Journal of Operational Research* 2002; 139:469–89.
- [68] Sophie Bloch-Mercier, A preventive maintenance policy with sequential checking procedure for a Markov deteriorating system, *European Journal of Operational Research* 147 (2002) 548–576.
- [69] Cepin M., Optimization of safety equipment outages improves safety, *Reliability Engineering and System Safety* 77 (2002) 71–80.
- [70] Marseguerra M., Zio E., Podofillini L., Condition-based maintenance optimization by means of genetic algorithms and Monte Carlo simulation, *Reliability Engineering and System Safety* 77 (2002) 151–166.
- [71] T. Ramayah, Muhamad Jantan, Mohd Mustapha Hassan, Change Management and Implementation of Total Productive Maintenance: An Exploratory Study of Malaysian Manufacturing Companies, 2002.
- [72] Albert H. C. Tsang, Strategic dimensions of Maintenance Management, *Journal of Quality in Management Engineering*, Vol. 8 No.1, 2002, pp. 7–39.
- [73] Basim Al-Najjar, Imad Alsayouf, Selecting the most efficient maintenance approach using fuzzy multiple criteria decision making, *Int. J. Production Economics* 84 (2003) 85–100.
- [74] Laura Swanson, An information-processing model of maintenance management, *Int. J. Production Economics* 83 (2003) 45–64.
- [75] Khan F., Haddara M., Risk-based maintenance (RBM): a quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 16 (2003) 561–573.
- [76] Bris R, Cha[^]telet E, Yalaoui F., New method to minimize the preventive maintenance cost of series–parallel systems, *Reliab Eng Syst Saf* 2003; 82:247–55.

- [77] Andrea De Lucia, Eugenio Pompella, Silvio Stefanucci, Assessing the maintenance processes of a software organization: an empirical analysis of a large industrial project, *The Journal of Systems and Software* 65 (2003) 87–103.
- [78] Geert Waeyenbergh, Liliane Pintelon, Maintenance concept development: A case study, *Int. J. Production Economics* 89 (2004) 395–405.
- [79] S. Takata, F. Kimura, F.J.A.M. van Houten, E. Westkämper, M. Shpitalni, D. Ceglarek, J. Lee, *Maintenance: Changing Role in Life Cycle Management*, 2004.
- [80] Marseguerra M., Zio E., Podofillini L., A multiobjective genetic algorithm approach to the optimization of the technical specifications of a nuclear safety system, *Reliability Engineering and System Safety* 84 (2004) 87–99.
- [81] Martorell S., Sanchez A., Carlos S., Serradell V., Alternatives and challenges in optimizing industrial safety using genetic algorithms, *Reliability Engineering and System Safety* 86 (2004) 25–38.
- [82] Khan FI., Sadiq R., Haddara MM., Risk-based inspection and maintenance (RBIM). Multi attribute Decision-making with Aggregative Risk Analysis, *Process Safety and Environmental Protection*, 82(B6): 2004, pp. 398–411.
- [83] Yuo-Tern Tsai, Kuo-Shong Wang, Lin-Chang Tsai, A study of availability-centered preventive maintenance for multi-component systems, *Reliability Engineering and System Safety* 84 (2004) 261–270.
- [84] Ro-Yeul Kwak, Akira Takakusagi, Jang-Yeul Sohn, Shuji Fujii, Byung-Yoon Park, Development of an optimal preventive maintenance model based on the reliability assessment for air-conditioning facilities in office buildings, *Building and Environment* 39 (2004) 1141 – 1156.

- [85] J. H. Seo, D. S. Bai, An Optimal Maintenance Policy for a System under Periodic Overhaul, *Mathematical and Computer Modelling* 39 (2004) 373-380.
- [86] C.S. Kim, I. Djameludin, D.N.P. Murthy, Warranty and discrete preventive maintenance, *Reliability Engineering and System Safety* 84 (2004) 301–309.
- [87] Jiejuan T., Dingyuan M., Dazhi X., A genetic algorithm solution for a nuclear power plant risk–cost maintenance model, *Nuclear Engineering and Design* 229 (2004) 81–89.
- [88] Krishnasamy L., Khan F., Haddara M., Development of a risk-based maintenance (RBM) strategy for a power-generating plant, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 18 (2005) 69–81.
- [89] Shaomin Wu, Derek Clements-Croome, Preventive maintenance models with random maintenance quality, *Reliability Engineering and System Safety* 90 (2005) 99–105.
- [90] B. lung, M. Veron, M.C. Suhner, A. Muller, Integration of Maintenance Strategies into Prognosis Process to Decision-Making Aid on System Operation, 2005.
- [91] Wen-Jinn Chen, Ching-Jong Liao, Scheduling with different maintenance policies in a textile Company, *Journal of Quality in Maintenance Engineering* Vol. 11 No. 1, 2005, pp. 43-52.
- [92] B. Castanier, A. Grall, C. Berenguer, A condition-based maintenance policy with non-periodic inspections for a two-unit series system, *Reliability Engineering and System Safety* 87 (2005) 109–120.
- [93] Srinivas Kumar Pinjala, Liliane Pintelon, Ann Vereecke, An empirical investigation on the relationship between business and maintenance strategies, *Int. J. Production Economics* 104 (2006) 214–229.
- [94] Adolfo Crespo Marquez, Jatinder N.D. Gupta, Contemporary maintenance management: process, framework and supporting pillars, *Omega* 34 (2006) 313 – 326.

- [95] Mehmet Savsar, Effects of maintenance policies on the productivity of flexible manufacturing cells, *Omega* 34 (2006) 274 – 282.
- [96] Alexander Grigoriev, Joris van de Klundert, Frits C.R. Spieksma, Modeling and solving the periodic maintenance problem, *European Journal of Operational Research* 172 (2006) 783–797.
- [97] Gosavi A., A risk-sensitive approach to total productive maintenance, *Automatica* 42 (2006) 1321 – 1330.
- [98] Lapa CM, Pereira CM, de Barros MP., A model for preventive maintenance planning by genetic algorithms based in cost and reliability, *Reliability Engineering and System Safety* 91 (2006) 233–240.
- [99] Carnero M.C., An evaluation system of the setting up of predictive maintenance programmes, *Reliability Engineering and System Safety* 91 (2006) 945–963.
- [100] Teemu Reiman, Pia Oedewald, Assessing the maintenance unit of a nuclear power plant – identifying the cultural conceptions concerning the maintenance work and the maintenance organization, *Safety Science* 44 (2006) 821–850.
- [101] Edmundas Kazimieras Zavadskas, Tatjana Vilutiene, A multiple criteria evaluation of multi-family apartment block’s maintenance contractors: I—Model for maintenance contractor evaluation and the determination of its selection criteria, *Building and Environment* 41 (2006) 621–632.
- [102] M.C. Eti, S.O.T. Ogaji, S.D. Probert, Development and implementation of preventive-maintenance practices in Nigerian industries, *Applied Energy* 83 (2006) 1163–1179.
- [103] Haitao Liao, Elsayed A. Elsayed, Ling-Yau Chan, Maintenance of continuously monitored degrading systems, *European Journal of Operational Research* 175 (2006) 821–835.
- [104] Christian Bucher, Dan M. Frangopol, Optimization of lifetime maintenance strategies for deteriorating structures considering

- probabilities of violating safety, condition, and cost thresholds, *Probabilistic Engineering Mechanics* 21 (2006) 1–8.
- [105] B.S. Dhillon, Y. Liu, Human error in maintenance: a review, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 12 No. 1, 2006, pp. 21-36.
- [106] N.S. Arunraj, J. Maiti, Risk-based maintenance—Techniques and applications, *Journal of Hazardous Materials* 142 (2007) 653–661.
- [107] Imad Alsyof, The role of maintenance in improving companies' productivity and profitability, *Int. J. Production Economics* 105 (2007) 70–78.
- [108] Peter Soderholm, Mattias Holmgren, Bengt Klefsjo, A process view of maintenance and its stakeholders, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 13 No. 1, 2007, pp. 19-32.
- [109] Dusmanta Kumar Mohantaa, Pradip Kumar Sadhu, R. Chakrabarti, Deterministic and stochastic approach for safety and reliability optimization of captive power plant maintenance scheduling using GA/SA-based hybrid techniques: A comparison of results, *Reliability Engineering and System Safety* 92 (2007) 187–199.
- [110] Panagiotis Tsarouhas, Implementation of total productive maintenance in food industry: a case study, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 13 No. 1, 2007, pp. 5-18.
- [111] Ki Yong Lee, Jin Hyun Son, Myoung Ho Kim, Reducing the cost of accessing relations in incremental view maintenance, *Decision Support Systems* 43 (2007) 512–526.
- [112] Alexandre Muller, Adolfo Crespo Marquez, Benoit Iung, On the concept of e-maintenance: Review and current research, *Reliability Engineering and System Safety* 93 (2008) 1165–1187.
- [113] Nabil Nahas, Abdelhakim Khatab, Daoud Ait-Kadi, Mustapha Nourelfath, Extended great deluge algorithm for the imperfect preventive maintenance optimization of multi-state systems, *Reliability Engineering and System Safety* 93 (2008) 1658–1672.

- [114] Mirka Kans, Anders Ingwald, Common database for cost-effective improvement of maintenance performance, *Int. J. Production Economics* 113 (2008) 734–747.
- [115] Amir Khanlari, Kaveh Mohammadi, Babak Sohrabi, Prioritizing equipments for preventive maintenance (PM) activities using fuzzy rules, *Computers & Industrial Engineering* 54 (2008) 169–184.
- [116] I.P.S. Ahuja, J.S. Khamba, Total productive maintenance: literature review and directions, *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 25 No. 7, 2008, pp. 709-756.
- [117] Karen B. Marais, Joseph H. Saleh, Beyond its cost, the value of maintenance: An analytical framework for capturing its net present value, *Reliability Engineering and System Safety* 94 (2009) 644–657.
- [118] E. Deloux, B. Castanier, C. Berenguer, Predictive maintenance policy for a gradually deteriorating system subject to stress, *Reliability Engineering and System Safety* 94 (2009) 418–431.
- [119] C.C. Karamatsoukis, E.G. Kyriakidis, Optimal maintenance of a production-inventory system with idle periods, *European Journal of Operational Research* 196 (2009) 744–751.
- [120] Rackwitz R., Joanni A., Risk acceptance and maintenance optimization of aging civil engineering infrastructures, *Structural Safety* 31 (2009) 251–259.
- [121] Hu H., Cheng G., Li Y., Tang Y., Risk-based maintenance strategy and its applications in a petrochemical reforming reaction system, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 22 (2009) 392–397.
- [122] Sanchez A., Carlos S., Martorell S., Villanueva JF., Addressing imperfect maintenance modelling uncertainty in unavailability and cost based optimization, *Reliability Engineering and System Safety* 94 (2009) 22–32.
- [123] Aditya Parida, Uday Kumar, *Maintenance Productivity and Performance Measurement*, 2009.

- [124] Luca Marmo, Vinicio Crivelletto, Alessandro Starace, Recursive Operability Analysis as a decision support tool for Risk-Based Maintenance, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 22 (2009) 557–565.
- [125] Rambabu Kodali, Rajesh Prasad Mishra, G. Anand, Justification of world-class maintenance systems using analytic hierarchy constant sum Method, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 15 No. 1, 2009, pp. 47-77.
- [126] Imad Alsayouf, Maintenance practices in Swedish industries: Survey results, *Int. J. Production Economics* 121 (2009) 212–223.
- [127] Geert Waeyenbergh, Liliane Pintelon, CIBOCOF: A framework for industrial maintenance concept development, *Int. J. Production Economics* 121 (2009) 633–640.
- [128] J.A.R. Mendes Silva, Jorge Falorca, A model plan for buildings maintenance with application in the performance analysis of a composite facade cover, *Construction and Building Materials* 23 (2009) 3248–3257.
- [129] M. Samrout, E. Chatelet, R. Kouta, N. Chebbo, Optimization of maintenance policy using the proportional hazard model, *Reliability Engineering and System Safety* 94 (2009) 44–52.
- [130] Dale L. Overholts II, John E. Bell, Marvin A. Arostegui, A location analysis approach for military maintenance scheduling with geographically dispersed service areas, *Omega* 37 (2009) 838–852.
- [131] A. Crespo Marquez, P. Moreu de Leon, J.F. Gómez Fernandez, C. Parra Marquez, M. Lopez Campos, The maintenance management framework - A practical view to maintenance management, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 15 No. 2, 2009, pp. 167-178.
- [132] Jørn Vatn, Terje Aven, An approach to maintenance optimization where safety issues are important, *Reliability Engineering and System Safety* 95 (2010) 58–63.

- [133] Van der Weide JAM, Pandey MD, van Noortwijk JM., Discounted cost model for condition-based maintenance optimization, *Reliability Engineering and System Safety* 95 (2010) 236–246.
- [134] Tiedo Tinga, Application of physical failure models to enable usage and load based maintenance, *Reliability Engineering and System Safety* 95 (2010) 1061–1075.
- [135] Chun-Chen Huang, JohnYuan, A two-stage preventive maintenance policy for a multi-state deterioration system, *Reliability Engineering and System Safety* 95 (2010) 1255–1260.
- [136] Gang Niu, Bo-Suk Yang, Michael Pecht, Development of an optimized condition-based maintenance system by data fusion and reliability-centered maintenance, *Reliability Engineering and System Safety* 95 (2010) 786–796.
- [137] J. Palma, F.C. Gómez de León Higes, M. Campos Martínez, L. Guillén Cárceles, Scheduling of maintenance work: A constraint-based approach, *Expert Systems with Applications* 37 (2010) 2963–2973.
- [138] Ki Mun Jung, Minjae Park, Dong Ho Park, System maintenance cost dependent on life cycle under renewing warranty policy, *Reliability Engineering and System Safety* 95 (2010) 816–821.
- [139] Taimur Usmana, Liping Fu, Luis F. Miranda-Moreno, Quantifying safety benefit of winter road maintenance: Accident frequency Modeling, *Accident Analysis and Prevention* 42 (2010) 1878–1887.
- [140] Zhen Zhao, Fu-li Wang, Ming-xing Jia, Shu Wang, Predictive maintenance policy based on process data, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 103 (2010) 137–143.
- [141] Bhoj Raj Pantha, Ryuichi Yatabe, Netra Prakash Bhandary, GIS-based highway maintenance prioritization model: an integrated approach for highway maintenance in Nepal mountains, *Journal of Transport Geography* 18 (2010) 426–433.

- [142] R. Abdul-Rashid, A. G. Ahmad, The Implementation of Maintenance Works for Historical Buildings – A Review on the Current Scenario, *Procedia Engineering* 20 (2011) 415 – 424.
- [143] J.T. Selvik, T.Aven, A framework for reliability and risk centered maintenance, *Reliability Engineering and System Safety* 96 (2011) 324–331.
- [144] Cristea-Gabriel Rau, Pavel Necas, Mircea Boscoianu, Review of Maintainability and Maintenance Optimization Methods for Aviation Engineering Systems, *Science & Military* 2/2011.
- [145] Mehdi Vasili, Tang Sai Hong, Napsiah Ismail, Mohammadreza Vasili, Maintenance optimization models: a review and analysis, *Proceedings of the 2011 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Kuala Lumpur, Malaysia, January 22 – 24, 2011*.
- [146] Asis Sarkar, Subhash Chandra Panja, Bijan Sarkar, Survey of maintenance policies for the Last 50 Years, *International Journal of Software Engineering & Applications (IJSEA)*, Vol.2, No.3, July 2011.
- [147] Zohreh Mehrafrooz, Rassoul Noorossana, An integrated model based on statistical process control and maintenance, *Computers & Industrial Engineering* 61 (2011) 1245–1255.
- [148] Mehmet Savsar, Analysis and modeling of maintenance operations in the context of an oil filling plant, *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 22 No. 5, 2011, pp. 679-697.
- [149] Jun Wu, Min Xie, Tsan Sheng Adam Ng, On a general periodic preventive maintenance policy incorporating warranty contracts and system ageing losses, *Int. J. Production Economics* 129 (2011) 102–110.
- [150] E. Moradi, S.M.T. Fatemi Ghomi, M. Zandieh, Bi-objective optimization research on integrated fixed time interval preventive maintenance and production for scheduling flexible job-shop problem, *Expert Systems with Applications* 38 (2011) 7169–7178.

- [151] Antti Salonen, Marcus Bengtsson, The potential in strategic maintenance development, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 17 No. 4, 2011, pp. 337-350.
- [152] Matthew J. Hazaras, Christopher L.E. Swartz, Thomas E. Marlin, Flexible maintenance within a continuous-time state-task network framework, *Computers and Chemical Engineering* 46 (2012) 167– 177.
- [153] Wenbin Wang, An overview of the recent advances in delay-time-based maintenance modelling, *Reliability Engineering and System Safety* 106 (2012) 165–178.
- [154] Qingfeng Wang, Jinji Gao, Research and application of risk and condition based maintenance task optimization technology in an oil transfer station, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 25 (2012) 1018-1027.
- [155] M. Faccio, A.Persona, F.Sgarbossa, G.Zanin, Industrial maintenance policy development: A quantitative framework, *Int. J. Production Economics*, 2012.
- [156] Melesse Workneh Wakjira, Ajit Pal Singh, Total Productive Maintenance: A Case Study in Manufacturing Industry, *Global Journal of researches in engineering Industrial engineering*, Volume 12, Issue 1 Version 1.0, February 2012, ISSN:0975-5861.
- [157] S. Panagiotidou, G. Tagaras, Optimal integrated process control and maintenance under general deterioration, *Reliability Engineering and System Safety* 104 (2012) 58–70.
- [158] Jun Ni, Xiaoning Jin, Decision support systems for effective maintenance operations, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 61 (2012) 411–414.
- [159] K. Efthymiou, N. Papakostas, D. Mourtzis, G. Chryssolouris, On a Predictive Maintenance Platform for Production Systems, *Procedia CIRP* 3 (2012) 221 – 226.

- [160] Joseph H.K.Lai, Francis W.H.Yik, Hotel engineering facilities: A case study of maintenance performance, *International Journal of Hospitality Management* 31 (2012) 229–235.
- [161] Yuqiao Wang, Guangxu Cheng, Haijun Hu, Wei Wu, Development of a risk-based maintenance strategy using FMEA for a continuous catalytic reforming plant, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 25 (2012) 958-965.
- [162] Mustapha Nourelfath, Eric Chatelet, Integrating production, inventory and maintenance planning for a parallel system with dependent components, *Reliability Engineering and System Safety* 101 (2012) 59–66.
- [163] Burak Kazaz, Thomas W. Sloan, The impact of process deterioration on production and maintenance policies, *European Journal of Operational Research* 227 (2013) 88–100.
- [164] Minh Duc Le, Cher Ming Tan, Optimal maintenance strategy of deteriorating system under imperfect maintenance and inspection using mixed inspection scheduling, *Reliability Engineering and System Safety* 113 (2013) 21–29.
- [165] Weihong Guo, Jionghua (Judy) Jin, S. Jack Hu, Allocation of maintenance resources in mixed model assembly systems, *Journal of Manufacturing Systems*, 2013.
- [166] Elin E. Halvorsen-Weare, Christian Gundegjerde, Ina B. Halvorsen, Lars Magnus Hvattum, Lars Magne Nonås, Vessel fleet analysis for maintenance operations at offshore wind farms, *Energy Procedia* 35 (2013) 167 – 176.
- [167] Matthias Hofmann, Iver Bakken Sperstad, NOWIcob – A tool for reducing the maintenance costs of offshore wind farms, *Energy Procedia* 35 (2013) 177 – 186.
- [168] Pradeep Kumar Agarwal, Vineet Jain, Uma Bhawsar, Development of A Hierarchical Structure to Identify Critical Maintenance Components

- Affecting Road Safety, *Procedia- Social and Behavioral Sciences* 104 (2013) 292 – 301.
- [169] Curtis Iwata, Dimitri Mavris, Object-Oriented Discrete Event Simulation Modeling Environment for Aerospace Vehicle Maintenance and Logistics Process, *Procedia Computer Science* 16 (2013) 187 – 196.
- [170] Elizabeth A. Saltmarsh, Dimitri N. Mavris, Simulating corrective maintenance: Aggregating component level maintenance time uncertainty at the system level, *Procedia Computer Science* 16 (2013) 459 – 468.
- [171] Joel Igba, Kazem Alemzadeh, Ike Anyanwu-Ebo, Paul Gibbons, John Friis, A Systems Approach towards Reliability-Centred Maintenance (RCM) of Wind Turbines, *Procedia Computer Science* 16 (2013) 814 – 823.
- [172] Yu Zhou, Gang Kou, Daji Ergu, Modeling Maintenance Effect with failure-counting, *Procedia Computer Science* 17 (2013) 298 – 305.
- [173] Luis Eduardo Garza, Gabriel Pantoja, Pablo Ramírez, Hector Ramírez, Nestor Rodríguez, Eduardo González, Raúl Quintal, Juan A. Pérez, Augmented Reality Application for the Maintenance of a Flapper Valve of a Fuller-Kynion Type M Pump, *Procedia Computer Science* 25 (2013) 154 – 160.
- [174] Hector Ramirez, Eduardo Gonzalez Mendivil, Pablo Ramirez Flores, Manuel Contero Gonzalez, Authoring Software for Augmented Reality applications for the use of maintenance and training process, *Procedia Computer Science* 25 (2013) 189 – 193.
- [175] Ranteshwar Singh, Ashish M Gohil, Dhaval B Shah, Sanjay Desai, Total Productive Maintenance (TPM) Implementation in a Machine Shop: A Case Study, *Procedia Engineering* 51 (2013) 592 – 599.
- [176] J.A. Sainz, M.A. Sebastián, Methodology for the Maintenance Centered on the Reliability on facilities of low accessibility, *Procedia Engineering* 63 (2013) 852 – 860.

- [177] Suharman Hamzah, Kiyoshi Kobayashi, Utilizing mid-long term maintenance management policy for sustainable maintenance of Infrastructure Facilities, *Procedia Environmental Sciences* 17 (2013) 478 – 484.
- [178] A.V. Kizim, Establishing the maintenance and repair body of knowledge: comprehensive approach to ensuring equipment maintenance and repair organization efficiency, *Procedia Technology* 9 (2013) 812 – 818.
- [179] José Caldeira Duarte, Pedro F. Cunha, João T. Craveiro, Maintenance database, *Procedia CIRP* 7 (2013) 551 – 556.
- [180] H. Akrouf, D. Anson, G. Bianchini, A. Neveur, C. Trinel, M. Farnsworth, T. Tomiyama, Maintenance Task Classification: Towards Automated Robotic Maintenance for Industry, *Procedia CIRP* 11 (2013) 367 – 372.
- [181] Parada Puig, J.E., Basten, R.J.I., L.A.M. van Dongen, Investigating maintenance decisions during initial fielding of rolling stock, *Procedia CIRP* 11 (2013) 199 – 203.
- [182] Aitor Arnaiz, Egoitz Konde, Jorge Alarcón, Continuous improvement on information and on-line maintenance technologies for increased cost-effectiveness, *Procedia CIRP* 11 (2013) 193 – 198.
- [183] E. Uhlmann, F. Otto, Maintenance Service Support System (MS3) – Work in Progress, *Procedia CIRP* 11 (2013) 105 – 107.
- [184] Shozo Takata, Maintenance-centered Circular Manufacturing, *Procedia CIRP* 11 (2013) 23 – 31.
- [185] Kamran S. Moghaddam, Multi-objective preventive maintenance and replacement scheduling in a manufacturing system using goal programming, *Int. J. Production Economics* 146 (2013) 704–716.
- [186] Salman Kahrobaee, Sohrab Asgarpour, A hybrid analytical-simulation approach for maintenance optimization of deteriorating equipment: Case

- study of wind turbines, *Electric Power Systems Research* 104 (2013) 80–86.
- [187] O. Roux, D. Duvivier, G. Quesnel, E. Ramat, Optimization of preventive maintenance through a combined maintenance-production simulation model, *Int. J. Production Economics* 143 (2013) 3–12.
- [188] Yifan Zhou, Zhisheng Zhang, Tian Ran Lin, Lin Ma, Maintenance optimisation of a multi-state series-parallel system considering economic dependence and state-dependent inspection intervals, *Reliability Engineering and System Safety* 111 (2013) 248–259.
- [189] Chiming Guo, Wenbin Wang, Bo Guo, Xiaosheng Si, A maintenance optimization model for mission-oriented systems based on Wiener degradation, *Reliability Engineering and System Safety* 111 (2013) 183–194.
- [190] Emmanuel Remy, Franck Corset, Stéphane Despréaux, Laurent Doyen, Olivier Gaudoin, An example of integrated approach to technical and economic optimization of maintenance, *Reliability Engineering and System Safety* 116 (2013) 8–19.
- [191] Adriaan Van Horenbeek, Liliane Pintelon, A dynamic predictive maintenance policy for complex multi-component systems, *Reliability Engineering and System Safety* 120 (2013) 39–50.
- [192] Mahmood Shafiee, Stefanka Chukova, Maintenance models in warranty: A literature review, *European Journal of Operational Research* 229 (2013) 561–572.
- [193] Mojgan Mollahassani-pour, Amir Abdollahi, Masoud Rashidinejad, Application of a novel cost reduction index to preventive maintenance scheduling, *Electrical Power and Energy Systems* 56 (2014) 235–240.
- [194] Sofia Panagiotidou, Joint optimization of spare parts ordering and maintenance policies for multiple identical items subject to silent failures, *European Journal of Operational Research* 235 (2014) 300–314.

- [195] Cristina López, Jose L. Salmeron, Modeling maintenance projects risk effects on ERP performance, *Computer Standards & Interfaces* 36 (2014) 545–553.
- [196] R. Fritzsche, J.N.D.Gupta, R.Lasch, Optimal prognostic distance to minimize total maintenance cost: The case of the airline industry, *Int. J. Production Economics* 151 (2014) 76–88.
- [197] Hon-lun Yip, Hongqin Fan, Yat-hung Chiang, Predicting the maintenance cost of construction equipment: Comparison between general regression neural network and Box–Jenkins time series models, *Automation in Construction* 38 (2014) 30–38.
- [198] S.M. Asadzadeh, A. Azadeh, An integrated systemic model for optimization of condition-based maintenance with human error, *Reliability Engineering and System Safety* 124 (2014) 117–131.
- [199] Mohammad Doostparast, Farhad Kolahan, Mahdi Doostparast, A reliability-based approach to optimize preventive maintenance scheduling for coherent systems, *Reliability Engineering and System Safety* 126 (2014) 98–106.
- [200] Jinqiu Hu, Laibin Zhang, Risk based opportunistic maintenance model for complex mechanical Systems, *Expert Systems with Applications* 41 (2014) 3105–3115.

Lean Maintenance model to reduce scraps and WIP in manufacturing system: case study in power cables factory

ELPIDIO ROMANO, TERESA MURINO

DICMAPI

University of Naples "Federico II"

Piazzale Tecchio, 80

80125 Napoli (ITALY)

FELICE ASTA, PIERVINCENZO COSTAGLIOLA

PRYSMIAN GROUP

Pikkala

02490FINLAND

Abstract: - The aim of this paper is to develop an innovative Lean Maintenance model in order to optimize the process flow and reduce or eliminate scraps and work-in-progress (WIP) in a manufacturing context. To achieve these objectives has been formulated a new method, called Lean Root Cause & Defect Analysis (LRCDA), which merges the process steps of the existing Root Cause & Failure Analysis (RCFA) technique and basic principles of Lean Maintenance and Total Productive Maintenance (TPM). The LRCDA is a logical sequence of phases that leads the investigator through the process of isolating the facts surrounding the event or the fault. After the problem defining, the analysis determines the best actions, corrective and preventive, to will resolve the problem and its recurrence. The model has been implemented for the first time in a power cables factory with intent to reduce the partial discharges phenomena in medium voltage (MV) cables.

Key-Words: - lean maintenance, total productive maintenance, maintenance-production relationship, autonomous maintenance, root cause & failure analysis.

1 Introduction

Maintenance is considered as a key point for the manufacturing system competitiveness because first its cost represents the major part of the operational cost, and second, a system failure can have an important impact on product quality, equipment availability, environment, and operator [7]. Effective maintenance extends equipment life, improves equipment availability and retains equipment in proper condition. Conversely, poorly maintained equipment will have a shorter useful life and experience more frequent equipment failures, leading to low levels of equipment utilization and delayed production schedules. Misaligned or malfunctioning equipment will also result in scrap, work-in-progress (WIP) or products of questionable quality [1]. Maintenance has become a multidisciplinary activity and one may come across situations in which maintenance is the responsibility of people whose training is not engineering [2].

A good maintenance management requires an understanding of the links between the production and maintenance. However, in practice, these links are often ignored, or at least forgotten [11]. The maintenance objectives are the organizational

conditions that must be met in order to fulfill the mission; they should be synchronized, together with goals and targets, with the departmental mission statement and be consistent with the facility strategic and operations/production plans that are formulated to realize the company's vision. Maintenance Operation objectives must support both the plant's strategic and production plans and the plant's objectives. In addition they must support the maintenance operation's stated mission.

The number one objective for all maintenance organizations everywhere is maintenance of equipment reliability. It is essential to establish specific goals for achievement in relation to the plant's strategic and operational plans, both short- and long-term. Furthermore, targets must be set for maintenance performance in terms of equipment up time, maintenance costs, overtime, work-force productivity and supervisor's time at job sites. Such specific targets as these enable management to monitor progress and the effectiveness of the maintenance management program and to control activities by focusing corrective attention on performances or levels that consistently fall short of the targets [1].

Some companies too often rely on production volume as their ultimate test for success. Lean isn't about productivity, and that's hard for many manufacturers to accept. Lean Maintenance is a relatively new term, coined in the last decade of the twentieth century, but the principles are well established in Total Productive Maintenance (TPM). Lean Maintenance, taking its lead from Lean Manufacturing, applies some new techniques to TPM concepts to render a more structured implementation path. Tracing its roots back to Henry Ford with modern refinements born in Japanese manufacturing, specifically the Toyota Production System (TPS), Lean seeks to eliminate all forms of waste in the manufacturing process, including waste in the maintenance operation. All Lean thinking, the premise of Lean Manufacturing and Lean Maintenance, is originally based on manufacturing processes. Some believed that everything else would just naturally evolve, or fall into line, from those roots. Time, however, has unmasked the difficulties of instituting "Lean" in production support operations, those areas adjacent to the manufacturing production process, such as maintenance, without the presence of some prerequisite conditions. To reduce costs and improve production, most large manufacturing and process companies that have embraced the Lean Enterprise concept have taken an approach of building all of the systems and infrastructure throughout the organization. The result of this traditional approach has been erratic implementation efforts that often stall-out, or are terminated, before the benefits come. Plants can accelerate their improvements with much lower risk through the elimination of the defects that create work and impede production efficiency. Optimizing the maintenance function first will both increase maintenance time available to do further improvements and will reduce the defects that cause production downtime. Thus cost reduction and improved production are immediate results from establishing Lean maintenance operations as the first step in the overall Lean Enterprise transformation [1].

2 Lean Maintenance Analysis

The very foundation of Lean Maintenance is Total Productive Maintenance (TPM). TPM is an initiative for optimizing the reliability and effectiveness of manufacturing equipment. TPM is team-based, proactive maintenance and involves every level and function in the organization, from top executives to the shop floor [5]. TPM addresses the entire production system life cycle and builds a solid, shop-floor-based system to prevent all losses. TPM objectives include the elimination of all accidents, defects and breakdowns. The concept of TPM originated in Japan's manufacturing industries, initially with the aim of eliminating production losses due to limitations in the JIT process for production operations. Nakajima is

credited with defining the fundamental concepts of TPM and seeing the procedure implemented in hundreds of plants in Japan; the key concept being autonomous maintenance [4].

TPM is a major departure from the "you operate, I maintain" philosophy. It is the implementation of productive maintenance by all associated personnel (whether machine operators or members of the management team), based on the involvement of all in the continual improvement of performance [6]. TPM endeavours to eliminate the root causes of problems, through team-based decisions and their implementation. Achieving low-cost improvements and zero-deficit product quality are striven for, while designing for minimum LCC maintenance and using the JIT procedure. All employees, through small-group activities, which include aiming for zero breakdowns and zero defects, should implement it. The three components of the concept are:

- optimized equipment-effectiveness;
- autonomous-operator maintenance;
- company-led small-group activities, throughout the entire organization.

This is a "high-employee involvement" approach. It leads to improved creative group-efforts, greater individual effort, personal responsibility, and lively innovative problem-solving meetings. TPM concepts involve commitments to long range planning, especially on the part of senior management. Typically, TPM is initiated as a "top-down" exercise, but only implemented successfully via "bottom-up" participation. However, consensus building may take about three years, from the planning phase, for sustainability to be achieved in a large organization [4,5].

TPM is a manufacturing-led initiative that emphasizes the importance of: (i) people with a 'can do' and continual improvement attitude and (ii) production and maintenance personnel working together in unison. In essence, TPM seeks to integrate the organization to recognize, liberate and utilize its own potential and skills. TPM combines the best features of productive and PM procedures with innovative management strategies and encourages total employee involvement. TPM focuses attention upon the reasons for energy losses from, and failures of equipment due to design weaknesses that the associated personnel previously thought they had to tolerate [6].

Autonomous maintenance looks into the means for achieving a high degree of cleanliness, excellent lubrication and proper fastening (e.g. tightening of nuts on bolts in the system) in order to inhibit deterioration and prevent machine breakdown. The Japanese Institute of Plant Maintenance in 1996 introduced autonomous maintenance for operations as a role for all employees' in order to achieve greater financial profits. The aim of TPM is to bring together management, supervisors and trade union members to

take rapid remedial actions as and when required. Its main objectives are to achieve zero breakdowns, zero defects and improved throughputs by:

- increasing operator involvement and ownership of the process;
- improving problem-solving by the team;
- refining preventive and predictive maintenance activities;
- focusing on reliability and maintainability engineering;
- upgrading each operator's skills.

The TPM strategy includes:

- maximizing equipment effectiveness;
- improving quality, increasing safety and reducing costs;
- raising the morale of the team that is implementing TPM.

The uppermost echelon of management should be highly committed to the setting of wise TPM goals, achieving sustainability, standardization, pertinent education and training in TPM, measuring TPM effectiveness, developing an autonomous maintenance program and implementing Kaizen-teian programs. Workshop management is responsible for implementing TPM goals via group PM, small-group activities, maximizing equipment effectiveness, zero-accident and zero-pollution aims, improving operating reliability, reducing the LCC, and problem solving [1]. Manufacturing companies have to pay attention to the reliability of their production processes as well as to their quality management. In order to improve their production processes, various quality programs are implemented. Two major improvement programs in the field of production and operations management are TPM and Total Quality Management (TQM). The main objective of TPM is to achieve a reliable manufacturing system. This is accomplished by maximizing the overall equipment effectiveness so that plant and equipment productivity is increased. In addition to this, the main objective of TQM is to generate improved product quality in order to improve firm performance. With respect to their fundamental goals, a comparison of the two improvement programs indicates substantial similarities. Both TPM and TQM strive for continuous improvement, organization-wide involvement, and reduction of waste. By combining TPM and TQM techniques, a comprehensive and consistent set of manufacturing practices can be derived to improve firm performance. Therefore, many manufacturing firms consider a simultaneous implementation of these improvement programs in order to achieve synergetic effects. One of the main tools used to support both TPM and TQM programs is the Root Cause & Failure Analysis. This method can prevent problems from recurring or examine current operations and help to identify areas and activities that can be improved. RCFA is one of the basic reliability enhancement method. It is relatively easy to perform

and many companies already do it, some using rigorous problem solving technique and some informally[10,13].

The concept of Root Cause Analysis (RCA), as illustrated by authors of publications [25] and [27], was originally developed by Sakichi Toyoda (the founder of Totota Motor Corporation) in 1958, who developed a process called the "Five Whys" to understand potential cause for problem beyond what was immediately obvious. Fatima A. in [25] consider the "Five Whys" one of the earliest models used in the history of RCA and it simply seeks to ask "why" five times until the main cause of the problem is revealed. The history of RCA continues, according to publications [25] and [26], with Six Sigma, indeed in 1986, Motorola developed a new strategy for risk management called Six Sigma, which uses specific methods, including statistical information, to outline a RCA, and with The Federal Aviation Administration (FAA) that has been actively involved in quality control, error reduction, and risk management to minimize accidents and In 1975, established the Aviation Safety Reporting System (ASRS) to conduct its safety management. Following its establishment, the FAA has reduced death rates from airline accidents by 80 percent. It has been said the success of the FAA's risk management system comes from its separation of power; ASRS being funded by FAA, but administered by the National Aeronautics and Space Administration (NASA).

J. Rose in [26] and Ghinassi in [28] consider that RCA evolution evolved during the years to accommodate many fields throughout time and most of these can be classed into five, very-broadly defined "schools" that are named by their basic field origin:

1. Safety-based RCA, which originated in the fields of occupational safety and health, as well as accidental analysis.
2. Production-based RCA, which originated in the field of manufacturing to ensure quality control.
3. Process-based RCA, which originated in the fields of business and manufacturing.
4. Failure-based RCA, called also Root Cause & Failure Analysis (RCFA), which originated in the fields of engineering and maintenance.
5. Systems-based RCA, which originated as a combination of all of the above root cause analysis techniques, as well as borrowing concepts from risk management, systems analysis, and change management.

Indeed in literature it is possible to find the RCA in every field, for example Wilson, Dell and Anderson in publication [29] in 1993 treated the RCA as a tool for Total Quality Management (TQM), but only as one of the many tools that should be used to support any TQM effort. For the authors of [29], the RCA can help identify the more obvious and needed improvements to current operations, since it focused on present obstacle.

Another viewpoint of RCA is in publication [30] where is illustrated that a retrospective approach to error analysis, called root cause analysis (RCA), is widely applied to investigate major industrial accidents. RCA has its foundations in industrial psychology and human factors engineering. Many experts have championed it for the investigation of sentinel events in medicine. In 1997, the Joint Commission on the Accreditation of Healthcare Organizations (JCAHO) mandated the use of RCA in the investigation of sentinel events in accredited hospitals [30].

Robert Latino in [32] defines the difference between RCA and RCFA. The first one implies the conducting of a full-blown analysis that identifies the Physical, Human and Latent Root Causes of HOW any undesirable event occurred. The word "Failure" has been removed to broaden the definition to include such non-mechanical events like safety incidents, quality defects, customer complaints, administrative problems (i.e. - delayed shutdowns) and the similar events, while the RCFA indicates conducting a comprehensive analysis down to all of the root causes (physical, human and latent), but connotes analysis on mechanical items only. I have found that the word "Failure" has a mechanical connotation to most people. Root Cause Analysis is applicable to many more than just mechanical situations. It is an attempt on our part to change the prevailing paradigm about Root Cause and its applicability [32].

R. Keith Mobley is one of the first author who speaks about the Root Cause & Failure Analysis (RCFA) in [18], publication of 1999. He treats the RCFA as an analysis technique used to investigate and resolve a reliability-related problems. RCFA is a logical approach to problem solution that has to major objectives: preventing catastrophic failures of critical plant production system and avoiding deviations from acceptable performance levels that result in personal injury, environmental impact, capacity loss or poor product quality.

An important contribute to RCFA literature is given by Joy LePree in publication [31] in which the author underlines the viewpoints about RCFA of the main experts in Reliability and Maintenance fields. LePree defines the RCFA as a simple, yet disciplined process used to investigate, rectify and eliminate equipment failure, and it's most effective when direct at chronic breakdowns, according to Robert Latino who says that the "RCFA is applicable everywhere and you will save a lot of money if you use it on chronic failures". Latino has found that approximately 80% of a typical maintenance budget is stored away for chronic failures, meaning these events cost far more, in aggregate, than major breakdowns. So it makes sense that the greatest savings come from applying RCFA to routine breakdowns. The same opinion is given by Rick Kalinauskas, reliability engineering supervisor

for Union Camp Paper Co., who says that his company initiated RCFA for just that reason: "We found that a large portion of downtime came from small events that occurred on a very frequent basis, rather than big, sporadic one-time failures. The power of RCFA process is that it shows you how to find the latent roots responsible for the breakdowns" [31].

With the evolving of Lean concepts, the RCFA becomes one of the most effective tool in sustaining the Lean Maintenance Transformation, as illustrated by R. Smith and B. Hawkins in [1]. The RCFA evolves in a most important functions of the Maintenance Engineering group used to find the root causes of failures and the mystery of why equipment failed.

3 Production and maintenance relationship

TPM is a synergistic relationship among all organizational functions, particularly between production and maintenance. This aims for continuous improvement of product quality, as well as operational efficiency and capacity assurance. An efficient TPM depends on both production and maintenance activities. The key supporting elements of TPM are shown in Figure 1 [5].

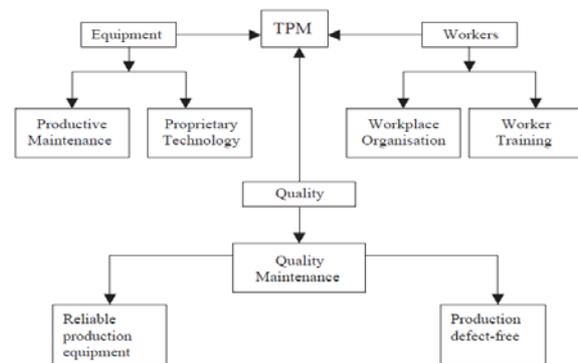


Figure 1: Key supporting elements of TPM

Also, Yamashina (1995) stated that no matter how well plants are equipped with advanced manufacturing techniques, it is always the operators, not managers or systems, who affect the plant's performance [5,1].

In this connection, operators should participate in the maintenance function by becoming responsible for the prevention of deterioration. The central role of operators in equipment operation, condition, and maintenance must be acknowledged. The co-operative effort allows maintenance personnel to focus their energies on tasks requiring their technical expertise and to learn about and use more sophisticated techniques for advanced manufacturing. Operators and maintenance personnel must reach mutual understanding and share responsibility for equipment (Jostes and Helms, 1994; Lawrence, 1999; Ben-Daya and Duffuaa, 1995). In fact, everyone concerned with equipment must co-operate with and understand the

role of everyone else. Operators should do the following:

- maintain basic equipment conditions (cleaning, lubrication, bolting);
- maintain operating conditions (proper operation and visual inspection);
- discover deterioration, mainly through visual inspection and early identification of signs of abnormalities during operation;
- enhance skills such as equipment operation, set-up, and adjustment, as well as visual inspection.

These activities constitute the operator's AM responsibilities. On the other hand, maintenance personnel should do the following:

- provide technical support for the AM activities;
- restore deterioration thoroughly and accurately, using inspections, condition monitoring and overhaul;
- clarify operating standards by tracing design weaknesses and making appropriate improvements;
- enhance maintenance skills for check-ups, condition monitoring, inspections, and overhaul.

Figure 2 illustrates the role of operations and maintenance in TPM [5].

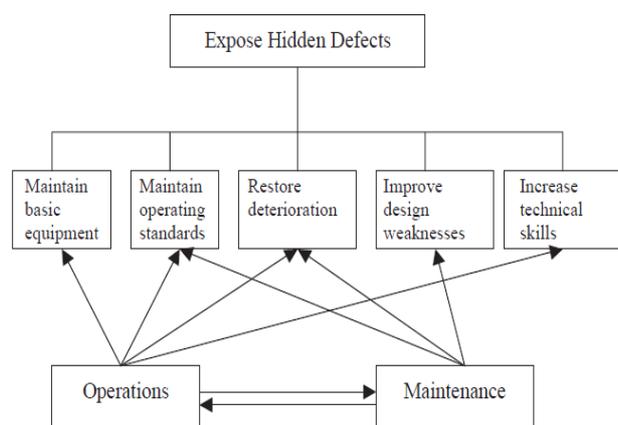


Figure 2: Relationship between operations and maintenance

4 Lean Root cause & defect analysis Model Construction

Reliability engineering and predictive maintenance have two major objectives: preventing catastrophic failures of critical plant production system and avoiding deviations from acceptable performance levels that result in personal injury, environmental impact, capacity loss, or poor product quality. Unfortunately, these events will occur include a process for fully understanding and correcting the root causes that lead to events having an impact on plant performance.

The aim of project has been to develop an innovative method focused on defects, called Lean Root Cause &

Defect Analysis (LRCDA), which includes and merges the traditional RCFA steps integrated with fundamental principles of Lean Maintenance and TPM, as shown in Figure 3, with intent to improve the process flow and the quality standards optimizing the maintenance.

The LRCDA is a process designed for use in investigating and categorizing the root causes and, by corrective and preventive actions, decrease the quantity of defects and consequently to reduce or delete the scraps and the WIP in a manufacturing system and the related time and cost losses. The model is founded on the following concepts that need to perform step-by-step during the process analysis:

- **Team-working culture:** it is important to inculcate a team-working culture, a team help to break down the barriers that are inherent in the traditional approach and to identify problems. Moreover it could suggest new ideas and viewpoints for elimination of the defects, introduce new skills that are needed and define the LRCDA program.
- **Management team commitment:** a successful deployment of LRCDA implementation needs a top management support, commitment and involvement. Management should go all-out for an evolving mechanism for multi-level communication to all employees, explaining importance and benefit of the program, promoting motivation and continuous improvement and ensuring total employee involvement.
- **Employee Empowerment:** one of the essential principles of LRCDA, such as of Lean and TPM, is the encouraging operators to assume more responsibility and authority for decisions affecting their production equipment. Employee empowerment means the extent to which employees producing a product or offering a service have a sense of controlling their work, receiving information about their performance and being rewarded for affecting performance enhancement in the workplace.
- **Continuous improvement:** it refers to continuous improvement of processes and systems, which in term manifests as improvement on many fronts, such as productivity, quality, cost, schedule and process flow.
- **Training and Multi-skilling:** adequate training and education of employees at all levels should be treated as a strategic initiative for successful model implementation. The training objective must include systematic development of knowledge, skills and attitude required by an individual to perform adequately the job responsibilities. The top management must identify the training needs, set training targets and prepare appropriate training and schedule plans.
- **Autonomous operator maintenance:** the top management should encourage operator to work alongside maintenance workers to perform tasks

that prevent deterioration of production equipment and endeavor to build the sense of ownership of the equipment. The autonomous maintenance practiced by operators helps to maintain high machine reliability, avoid defects and maintain high quality of production.

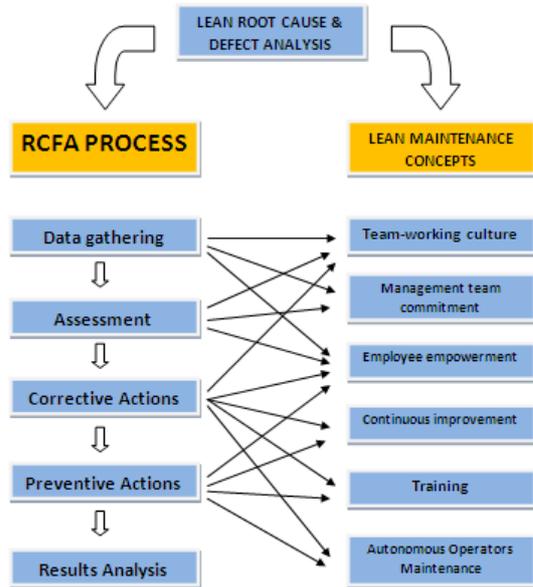


Figure 3: LRCDA elements connection

As RCFA methodology, the LRCDA is a logical sequence of phases the leads the investigator through the process of isolating the facts surrounding the event or the fault. After the problem defining, the analysis determines the best actions, corrective and preventive, to will resolve the problem and its recurrence. The LRCDA consists of six main steps:

1. Work team creation: the first step of LRCDA is the creation of a dedicated work management team that includes the figures of all the main departments: production, maintenance and quality. In addition to project management, the team have the role of motivations promoter, cross-functional team culture promoter, inter-department synergy creator and promoting training and skill enhancements for production and maintenance workers.
2. Data gathering: the second step is to make a data collection that is necessary to understand the problem and identify the root causes. It is possible to report by defect observing, process flow studies and examination, statistic documents, consulting the workers, consulting experts and asking questions.
3. Assessment: it is the defining and identify of the defect and its main causes. To assessment implementing it is possible to choose in several methods. Selecting the right method can speed the entire process up, as required in Lean Maintenance. The best methods to use are:

Ishikawa diagram, Pareto Analysis and the Fault-tree analysis.

The assessment consists, in general, of 4 steps:

- identify the defect;
 - defining the root causes and related significances;
 - cause classifications;
 - identify the reasons of root causes.
4. Corrective actions: after causes definition, it is required a corrective actions planning, formulated in Action Plan and related cost, to reduces the probability that a problem will recur. Following the TPM principles, in this phase it is very important a strict collaboration between Operations and Maintenance. In this connection, operators should participate in the maintenance actions to simplify the maintenance workers job, through check and inspections.
 5. Preventive actions: strictly correlated to corrective actions are the preventive actions. It is necessary introduce a preventive action plan to avoid the defect causes recurrence. In this step, the operators could be have an important role, indeed, the prevention could be done by them through an Autonomous Maintenance. The operators could perform tasks that prevent deterioration of production equipment and improve their performance. The organization should train the operators to perform autonomously routine check, inspection, cleaning, lubrication and adjustment, with a preset frequency.
 6. Results analysis: the last step is to measure the results of the LRCDA implementation and evaluate its efficiency in terms of defect, scraps, WIP and related costs reduction.

The LRCDA process flow is illustrated in Figure 4.

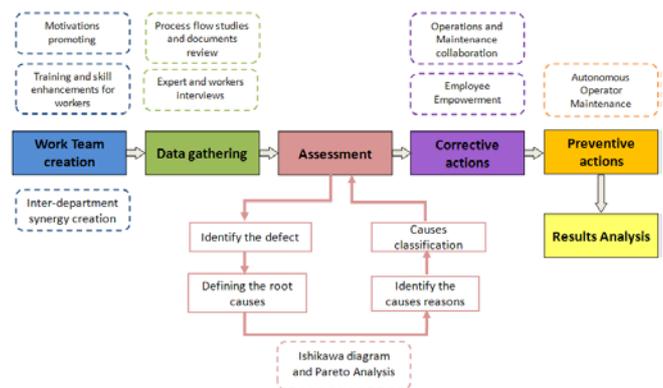


Figure 4: LRCDA process flow

The model indicators determination is necessary because of indicator importance to helps you to understand where you are, which way you are going and how far you are from where you want to be; it could also alert you to a problem before it gets too bad and help you recognize what needs to be done to fix the problem. To evaluate the performance of LRCDA, the main objective must be considered, than the

production defect reduction. For this reason, to understand the result of the model implementation it has been established the Defect Indicator as:

$$DefectIndicator = \frac{Numberofdefects}{Totalproduction} \quad (1)$$

The indicators are selected also to understand in which way the model is going and the changes that the model is providing to system. For LRCDA it is important to evaluate the integration level between maintenance and production during the procedure developing.

To measure this integration could be used indicators that observe the autonomous operator maintenance degree in a predetermined period, such as:

$$\frac{Numberofequipmentscheckedbyoperator}{Overallequipment}; \quad (2)$$

$$\frac{Operatorworktimedevotedtomaintenance}{Overalloperatorworktime}; \quad (3)$$

$$\frac{Numberofequipmentfailuresdetectedbyoperator}{Overall equipmentfailures}. \quad (4)$$

Moreover, whit intent to measure the collaboration degree between production and maintenance could be useful to observe in a predetermined period:

$$\frac{Numberofmeetingswithprod.andmaint.partecipation}{Overallmeeting} \quad (5)$$

Following the concepts of employee empowerment and commitment, it is also essential to evaluate the Employee Satisfaction that is a measure of how happy workers are with their jobs and working environment. They must feel part of a family or a team. Keeping morale high can be of tremendous benefit to any company, as happy workers are more likely to produce more, take fewer days off, and stay loyal to the company. There are many factors involved in improving or maintaining high satisfaction rates, which wise employers would do well to implement. To measure Employee Satisfaction, it is possible to submit them to a questionnaire shown in Figure 5, where Level 1 is the maximum satisfaction level and so forth.

FACTORS	LEVEL			
1) Satisfying time work organization	1	2	3	4
2) Equal distribution of work	1	2	3	4
3) Responsibility and tasks definition	1	2	3	4
4) Relationship with head	1	2	3	4
5) Motivations passed by top management	1	2	3	4
6) Top management methods to encourage shared activities	1	2	3	4
7) Relationship with colleagues	1	2	3	4
8) Work place quality	1	2	3	4
9) Equipment quality	1	2	3	4

Figure 5: Questions helping to define Employee Satisfaction

The LRCDA model is a dedicated process to root causes research with intent to remove the production defects. The difference between LRCDA and other

similar techniques, such as the RCFA, is that LRCDA is treated not only as a problem solving method but as work style that leads all the employee to a common objective achievement. In addition to rework time saving and total cost saving, the expected results coming from LRCDA implementation are the strict collaboration between operations and maintenance workers, the employee commitment and the autonomous operator maintenance introduction. The LRCDA model advantages are shown below in detail:

- the LRCDA is a model focused on reduction of random and recurring production defects;
- the LRCDA is a model focused on research and analysis of all or, at least, the main root causes of defects;
- the LRCDA has the intent to avoid the recurrence of the root causes with a continuous improvement and consequently lower the maintenance costs;
- the LRCDA may often be the fastest and least expensive way to find sources of defects;
- the LRCDA provides a reduction of scraps and WIP;
- the LRCDA reduces rework times;
- the LRCDA reduces cost due to scraps and WIP;
- the LRCDA improves the equipment effectiveness and the maintenance efficiency and effectiveness;
- the LRCDA provides a real collaboration between operations and maintenance;
- the LRCDA provides an autonomous operators maintenance;
- the LRCDA provides a training to improve the knowledge and skills of all people involved.

5 LRCDA Model Implementation

LRCDA model has been implemented in a power cables factory with intent to reduce partial discharges (PD) phenomena in medium voltage (MV) cables. Partial Discharges are electrical discharges referred to a small area of the insulation/screen system and not the overall thickness between conductor and metallic screen. They occur when gas cavities or conducting inclusions or intrusions are in insulation material (see Figure 6) and cause a progressive deterioration of the insulation in the location of the voids and could lead to cable failure.

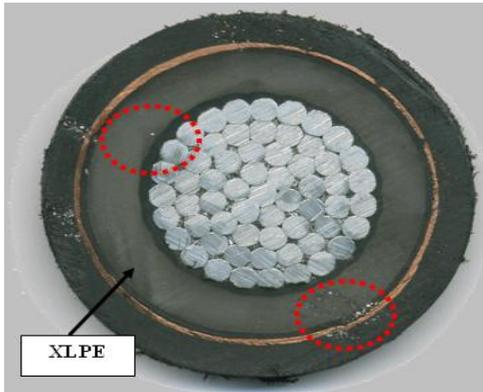


Figure 6: An example of PD causes

After work team creation composed by figures that represent all factory’s departments (maintenance, production and quality), it has been studied the PD situation in MV cables. The 2011 and 2012 situations is shown below in Table 1, where:

- MV(tons) = MV cables tons produced;
- YTD MV= MV cables tons produced year to date;
- Partial Discharge = number of PD faults come out from MV cables production.

	2011	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	2012
MV (tons)	4925,9	257	488	404	282	796	504	174	574	452	466	772	-	5.180
YTD MV	-	257	755	1.159	1.442	2.238	2.741	2.916	3.490	3.942	4.407	5.180	5.180	-
Partial Discharge	34	4	2	1	4	7	6	1	6	5	6	4	-	46

Table1: MV tons production and number of PD faults in 2011-2012

The PD Rate Indicator estimated has been calculated as:

$$PDRateIndicator = \frac{PD\ faults}{100\ Tons\ MV\ cables\ produced} \quad (6)$$

andas illustrated in Table 2, the estimated average values for 2011 and 2012 are respectively of 0,79 and 0,89.

PD Rate Indicator	2011	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	2012
PD / 100 Tons cables produced	0,79	1,50	0,41	0,25	1,42	0,88	1,19	0,57	1,04	1,11	1,29	0,52	-	0,89
YTD PD / 100 Tons produced	-	1,50	0,79	0,60	0,76	0,80	0,88	0,86	0,89	0,91	0,95	0,89	0,89	0,89

Table 2: PD Rate Indicator

In 2012 it has been estimated a total cost due to PD faults in MV cables of €73.009,44. These costs have been calculated from the sum of more rates, fixed and variable costs, and are illustrated below in Table 3:

- scrap cost [€/ m];
- extra working [h/fault];
- extra WIP cost [-€];
- total time to solve problem [month].

Scrap cost: for each fault, after its locating, a part of 250 meters is cut from the piece that automatically becomes a production scrap. This is a loss and then a cost of 3,17 €/m.

Extra working: when a fault occurs, consequently extra work is producing, indeed are made more operations consisting of: extra spooling, extra use of forklift, extra

PD tests (on the average two times more).It is estimated about of 20 h/fault.

Extra WIP cost: these kind of costs are due to three several factors,

1. Drums immobilization, they are deducted to the production.
2. Occupation of space inside the plant.
3. Extra use of forklift to drums handling.

Total time to solve the problem: it represents the total time from fault detecting to fault extrapolation and delivery to the end costumer.

PD COST/YEAR	
PD faults / month	4
scrap m / fault	250
Scrap cost [€/m]	3,17
Extra working hours / fault	20
€/h	35
Extra WIP / fault [m]	3000
Extra WIP cost / month [€]	228,24
Time to solve problem (month)	6
Total cost of extra WIP	1369,44
Cost / fault [€]	1492,5
Cost / year [€]	73.009,44

Table 3: PD faults costs in 2012

The next step has been to analyze all the possible PD causes. The first stage consists to observe the MV cables with PD fault produced during 2012; this work has been composed of three working phases shown below:

1. the early stage is to do an extra test of the defective cable and try to localize, with help of a specific tester machine, the PD fault. After that, it is important to cut the piece with the fault inside;
2. the next stage is to “open the piece”, i.e. it is required to take off the jacket and the aluminium layer;
3. finally, there is the possibility to check and analysis the part of cable that is composed just from the semiconductives (external and internal), insulation material and conductor.

Thereafter, following this procedure each defective cable, two different situations have been observed:

1. The first one has been that several pieces were defected on the external semiconductive, they had some incisions, grooves and deep scratches, as shown below in Figures 7-8. These kind of faults were classified as “mechanical damages”.



Figure 7: Example of mechanical scratch (1)



Figure 8: Example of mechanical scratch (2)

2. The second situation has been that the pieces had not scratched, then it has been necessary a more deep study to understand the problem. For this reason, it has been done an silicon oil test on the pieces following this method: the cable is subjected to high voltage with intent to generate the partial discharge which leads to breakdown, therefore the piece is dipped in silicon oil and in this way it's possible to observe inside the insulation material. The partial discharge produces a sort of vortex into insulation and from the starting point of this vortex it's possible to understand from which side (external semiconductive, insulation or internal semiconductive) of the piece the partial discharge is born. An examples in Figures 9-10.



Figure 9: PD phenomenon starting from external semiconductive

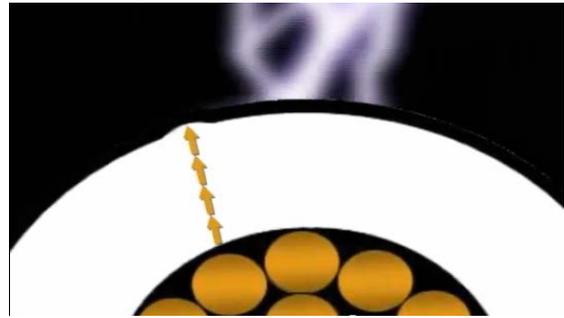


Figure 10: PD phenomenon starting from internal semiconductive

Normally this kind of problems come from air bubbles inside the insulation material, lumps on insulation screen and mixed compounds. These faults have been classified as “production process problems”.

After cables examination, the data have reflected a very important results because it's clear that the most part of the faults were mechanical damages, 71,74% of total faults, as shown in Figure 11.

After these results, indeed, the study has been focused on these faults type and first of all to delete the causes of mechanical damages.

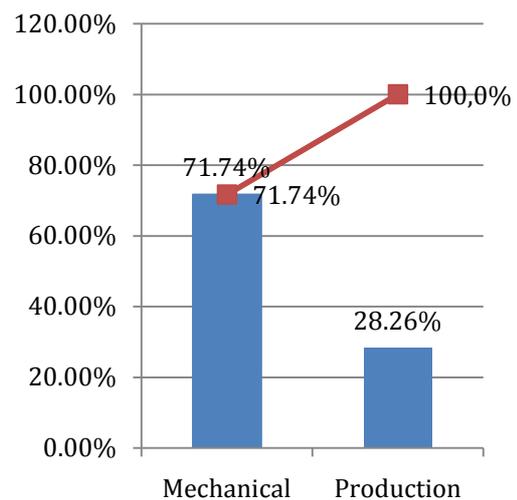


Figure 11: Pareto chart of fault type classification

Resuming what has been illustrated previously, according to studies done on the cables with PD faults, it is resulted that there two categories of faults during the production:

1. Mechanical damages on external semi conductive.
2. Process problems as air bubbles, lumps on screen or mixed compounds.

For this reason it has been clear that the attention had to be focalized on two definite production phases: insulation process phase and the starting phases of jacketing process (as shown in Figure 12).

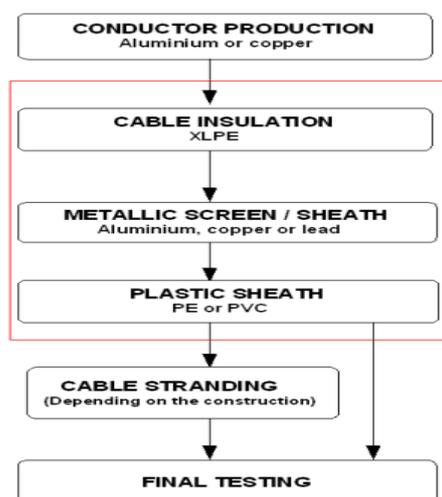


Figure 12: Main phases of process to analyze

Starting from this important assumption, it was essential to study all the steps of this two working phases and to check every component and resource used during both (machinery, components and human power). Specifically:

- drums;
- rollers;
- cooling pipe (insulation process);
- curing pipe (insulation process);
- insulation materials rooms;
- extruders (insulation process);
- pay off of jacketing line.

With the intent to a better research and capture the causes of the PD phenomena and the relationships between cause and effect, it has been drawn up an Ishikawa diagram, called also Fishbone or Cause and Effect diagram.

The basic concept in the this diagram is that the name of a basic problem is entered at the right of the diagram at the end of the main 'bone'. This is the problem of interest. At an angle to this main bone are located typically three to six sub-bones which are the contributing general causes to the problem under consideration. Associated with each of the sub-bones are the causes which are responsible for the problem designated. This subdivision into ever increasing specificity continues as long as the problem areas can be further subdivided. The practical maximum depth of this tree is usually about four or five levels. When the fishbone is complete, one has a rather complete picture of all the possibilities about what could be the root cause for the designated problem. The diagram can be used by individuals or teams; probably most effectively by a group. A typical utilization is the drawing of a fishbone diagram on a blackboard by a team leader who first asserts the main problem and asks for assistance from the group to determine the main causes which are subsequently drawn on the board as the main bones of the diagram. The team assists by making suggestions and, eventually, the entire cause and effect diagram is filled out. Once the

entire fishbone is complete, team discussion takes place to decide what are the most likely root causes of the problem. These causes are circled to indicate items that should be acted upon, and the use of the fishbone tool is complete. The drawing up of this Ishikawa diagram focused on PD faults has been assisted by a team composed of Quality Manager, Production Manager and Technical Engineer.

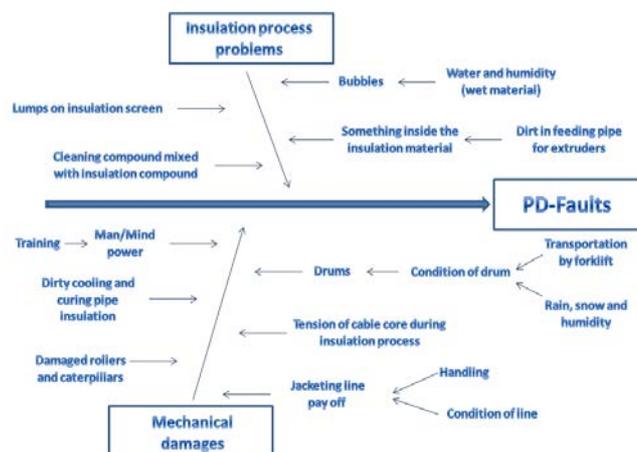


Figure 13: Ishikawa diagram focused on PD faults problem

Following the previous studies, the causes have been subdivided in two macro categories used to faults classification, mechanical damages and insulation process problems (see Figure 4.40). Associated with each macro categories are the sub-causes of the problem designated, and so forth. As shown in Figure 4.36, the mechanical damages represent about 71% of total and for this reason, the following analysis and next corrective actions are focused just on the main reasons and causes of this damages type. The most important causes are described below in detail.

Drums: they are subject to wear and breakage and these can be happened for two main reason: a wrong handling by forklift, corrosion and rust due to the drums storage on the outside and then they are subject to every atmospheric agent, like rain, snow, wind and humidity. All that causes a lot of damages on drums: sloping flanges, bangs on bottom and scratches (see Figure 14-15).



Figure 14: Example of scratch on drum

These kind of damages could be produced, during the production, especially during the take off of insulation process and the pay off of jacketing line, very deep scratches on the external semiconductive. For this reason an improper drums maintenance is one of the main cause of the mechanical damages and so it is one of the mother lode of PD faults on MV cables.



Figure 15: Example of drum sloping flanges

Rollers and caterpillars: they are essential components of the main process lines, insulation and jacketing, during power cables production. They have an important role because they give the right direction to the semifinished cable during its line crossing and avoid overburden, excessive flexing and traction. Moreover, in some cases, the caterpillars have the function of modeling tool with intent to give to the semifinished cable the predetermine dimension, a spherical form.



Figure 16: Example of damaged rollers

The main problem in this case is the bad condition of rollers and caterpillars, indeed it's important to check accurately if the rollers and belts are damaged/consumed (an example is shown in Figure 16), blocked/jammed or with accumulated dirt on the surface because these cause scratches on the cable and then could create PD faults.

Curing pipe: The curing follows on directly from the extrusion process; it therefore refers to continuous curing or continuous vulcanization. The curing process itself starts due to the heating of the PE molten mass containing peroxide which has been extruded at approximately 200 °C. Vulcanization is a chemical process for converting rubber or related polymers into more durable materials via the addition of sulfur or other equivalent "curatives" or "accelerators". These additives modify the polymer by forming crosslinks (bridges) between individual polymer chains. Vulcanized materials are less sticky and have superior mechanical properties. From the vulcanization process comes out the by-product. A by-product is a secondary product derived from a manufacturing process or chemical reaction, so it is not the primary product or service being produced. The by-products could be very dangerous during the insulation process. After an high use of the line and an elevated length of insulated core, the by-product could be amassed in some points of the curing pipe reducing the crossing opening of the cable (see Figure 17).



Figure 17: By-product mass in the CCV curing pipe

The cable indeed, with a rocking movement, could touch the by-product mass and could be scratched itself. For this reason, the curing pipe should be inspected periodically and it is considered one of the possible causes of mechanical damage.

Insulation materials rooms (“Clean rooms”): in the “clean rooms” are located the insulation materials octabins. From them, the granulate passes to the extruder, used for melting, filtering and transporting the XLPE through the extrusion head. They are characterized by a controlled environment; air is passed through “ultra filters” for keeping the contaminant level low and maintaining overpressure with respect to outside air in order to avoid any ingress of external contaminant. Humidity is controlled in order to avoid moisture contamination of the pellets and also the temperature is controlled in order to avoid condensation as boxes are opened. For this reason, to avoid the problem of dirt and humidity in the insulation, that causes air bubble, lumps on screen or a mixture between cleaning compound and insulation compound, it’s necessary that the rooms must be with closed and isolated doors, working filters and keep tidy from every powder or dirt come from outside. Another important thing to check inside this rooms is the extruders feeding pipes that must be cleaned outside of every powder or dirt, cleaned inside of every residual materials and not damage to avoid the penetration of materials.

After PD fault causes inspection, a corrective action plans was planned with intent to remove or, at least, reduce each critical factor of MV cables production. The objective was to schedule and implement all the corrective actions during the last three months of 2012, from October to December, for a more safe production of MV cables during 2013.

The action plan is shown below in Table 4. Each main PD fault causes has been planned a corrective actions specifying also the action responsibility and date or the period. An important thing to underline is that, for the responsibility, it has been followed a specific idea: do not overload the maintenance men work, but try to share this corrective maintenance job with the operators and create a good collaboration to simplify both labors.

FAILURE	CORRECTIVE ACTION	RESPONSIBILITY	DATE
Drums	1) Drums maintenance: to repair every damaged drum removing sharp edge and corrosion. 2) To make aware the forklift driver to a slower drum handling	1) EFKAVA (Maintenance men) 2) Production manager	1) Starting date: 10/11/2012
Rollers and caterpillars	Rollers and belts maintenance: to repair or replace every flawed component.	Maintenance	27-28/11/2012
Cooling and curing pipes	CCV-line maintenance: to check the pipes by a small camera, than to remove all dirt inside them with 800 bar water pression.	Maintenance and Delete (External company)	27/11/2012
Man power	To make aware all the operators about the problems and how to work better giving them accurated information.	Production manager and shift foreman	November
Clean rooms	1) To use the material octabins in a air conditioning room with a temperature around 20-25 C. 2) To clean or replace the feeding pipes if necessary. 3) To clean the floor and to replace every damage part of the feeding machine.	Operators	December
Pay off of jacketing line	1) To make aware the operators to a more careful and slower drum and cable handling 2) Jacketing line maintenance: to check rollers and caterpillars, to clean the floor and to eliminate all the sharp edges.	Operators	December

Table 4: Action plan schedule

Drums Maintenance: the drums condition was very bad and consequently it was one of the main causes of cable scratches. For this reason, first of all it has been very important to start the corrective actions from drums maintenance. The starting point has been to create a collaboration between production and maintenance workers and share this action between both to develop a faster and easier job; following this supposition, the “instruction for drums maintenance” have been formulated as illustrated in Table 5.

Instruction for drums maintenance	
The drums must be marked with three numbers (1,2,3) putting a paper with the number on the drum. Each number indicates the maintenance priority and the usage for production.	
Number	Maintenance priority (Level of drum damage)
1	Maximum priority/High damage, do NOT use in production.
2	Medium priority/Medium damage, use in production only if drums with number 3 are not available
3	Low priority/Low Damage, use in production only if drums with green paper are not available
Every damage on the drums must be painted in red color with a spray in order to make maintenance job easier.	
After maintenance each single drum will be marked with green color paper and will be available for production.	

Table 5: Instruction for drums maintenance

The drums maintenance cycle has four main steps:

1. the shift foremen have checked the drums, examining every damage and painting in red color with a spray in order to make the repair service easier; moreover they have marked the drums with three number (1,2,3), that represent the maintenance priority (as shown in Table 5), using a “red paper”;
2. after check, the “free” drums, i.e. the drums not used in production, have been accumulated by forklift in a specific storage, close to reparation place, according to maintenance priority numbers (see Figure 18);
3. in third step, following the priority numbers, the maintenance men have started the reparations and fixing up of the drums damages (see Figure 19);

4. at the end of maintenance, the shift foremen have to confirmed the right reparation marking the drum with a green paper that represents the possibility to use this drum in production.



Figure 18: Drums storage according to maintenance priority number



Figure 19: Example of drum damage reparation

Another important thing to underline is that to avoid the drum damages reducing their main cause, i.e. a wrong handling by forklift, according with the production manager, it has been composed a "suggestions document" to give to the forklift driver, with intent to improve the drums handling.

Rollers and caterpillars maintenance: this has been the easier and faster action to make but, not for this reason, the lesser important. The job has taken only two days, 27-28 November 2012, and it has been done by maintenance men. They have checked all the damages on every production process line (insulation and jacketing lines) and consequently have repaired or replaced the rollers, the belts and small rollers of caterpillar which were damaged and not working.

Cooling and curing pipes maintenance: to execute CCV line cooling and curing pipes maintenance it has been necessary the help of an external qualified company with the maintenance manager collaboration. The company has specialized equipment to check and clean very long pipes (around 70 meters). The pipe check is done using a robot camera (see Figure 20) that goes inside the pipe and, at same time, sends the images on a monitor realizing also a recording on a compact disk. Moreover, they clean the pipes with a water high-pressure method using a rotating machinery that removes dirt and by-product material from the pipe sides.



Figure 20: Robot used to check the insulation pipes

With this tool it has been possible to observe that inside the curing pipe were a lot of by-product material on the pipe sides (see Figure 21). This is very dangerous for the cables because it could be scratch the external semiconductive during the insulation process. For this reason, it has been necessary to clean the pipe with high-pressure method using a pressure of 800 bar and, for the accessible points, the maintenance men have removed the material by a manually operation.



Figure 21: By-product material inside the curing pipe

Preventive actions: The last step for a good LRCDA implementation is the generation of preventive actions. Following identification of the problem causes for a particular causal factor, achievable recommendations for preventing its recurrence should be generated. After our studies, it's clear that the main PD phenomena causes comes from the insulation line and its process. For this reason, it has been developed an Autonomous Maintenance (AM) or routine maintenance performed by the insulation line operators. In this way, the line operators have received a training for their specific maintenance activities that typically are cleaning, inspection, minor adjustments and lubrication, so all this tasks have become operator's responsibility. With intent to implement an easier and faster preventive maintenance, a CCV line check sheet has been formulated. The operators have to fill in the check sheet marking OK or NOT-OK with an "X" each tools and machinery and it must be done

every 2 weeks during a setup. After the compilation, they have to consign it to the shift foreman who has to contact the maintenance manager to repair the failures in case of damages or problems occurrence.

6 Results analysis

The expected results, in addition to a cost saving which is later illustrated, concern more aspects of Lean Enterprise such as: quality improvement, scraps reduction in terms of cable meters, WIP reduction that leads extra spooling reduction, extra forklift use to WIP handling reduction, fewer immobilized drums due to WIP and re-working reduction in terms of fewer PD test on the same piece, rework time saving, autonomous operator maintenance, a better coordination between maintenance and production, delivery delays elimination and consequently improvement of customer satisfaction. With intent to measure the project expected results in terms of cost saving in 2013, it has been estimated a PD rate indicator, which is a statistical measures that give an indication of output quality, in this case focused on PD faults in MV cables, during the past, present and future.

PD-RATE INDICATOR	2011	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	2012
PD / 100 Tons cables produced	0,79	1,50	0,41	0,25	1,42	0,88	1,19	0,57	1,04	1,11	1,29	0,52	-	0,89
YTD (PD/100 Tons produced)	-	1,50	0,79	0,60	0,76	0,80	0,88	0,86	0,89	0,91	0,95	0,89	0,89	0,89
Target 2013		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	

Table 6: PD Rate Indicator and Target 2013

As shown in Table 6, the estimated average values for 2011 and 2012 are respectively of 0,79 and 0,89. Moreover it has been established a target to achieve in 2013. The PD Rate Indicator Target 2013 is to reach the average value of 0.40. This hypothesis comes from the assumption that the project has been focused on all the possible corrective actions with intent to reduce the mechanical damages, i.e. about 70% of total PD causes, and these actions have ended well, then it is reasonable to aspect that the quality indicator will improve, at least, of 50% and so from 0,89 (the average indicator value in 2012) to an average value in 2013 of 0,40 (see Figure 22).

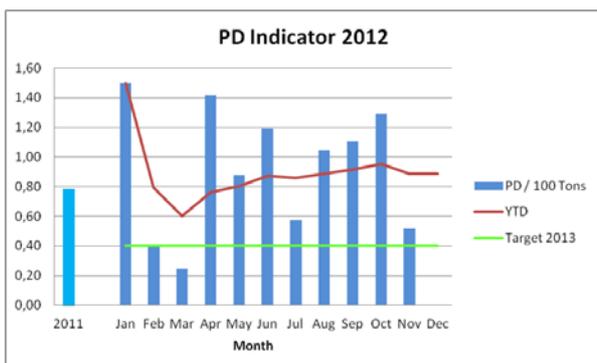


Figure 22: PD Rate Indicator graphic

The presumed improvement of PD Rate Indicator entails the PD faults number decrease and consequently a scraps and WIP reduction measured in terms of cost saving. As illustrated in detail in the Table 3, a cost/PD is estimated in €1492,5. Multiplying this value with the average PD rate indicator value (PD/100 tons) it is possible to estimate the PD costs (€100tons). The results are shown in Table 7:

	2011	2012	2013
Cost/PD (€)	1492,5	1492,5	1492,5
PD/100 tons	0,79	0,89	0,4
PD costs (€/100 tons)	1179,075	1328,325	597

Table 7: PD costs (€/100 tons)

Consequently to LRCDA method implementation and the PD Rate Indicator improvement, the PD costs, calculated as €100tons, will be cut drastically from 2012 to 2013. The PD costs reduction will generate an yearly cost saving in 2013 of €40.870,62. The details are illustrated in Table 8, where:

- MP (tons) = Yearly Master Production about MV cables tons;
- Cost/year (€) = MP(tons)/100×PD costs (€/100 tons)+Total cost of WIP
where:
Total costs of extra WIP = €1369,44;
- Cost saving (€) = Cost/Previous Year (€) – Cost/Actual Year (€).

	2011	2012	2013
MP (tons)	4325,9	5180	5154
Cost/year (€)	52375,05	73.009,44	32138,82
Cost saving (€)		-20.634,39	40.870,62

Table 8: Cost saving estimation

Finally, it is possible to observe that the cost due to PD fault should decrease from €73.009,44 in 2012 to €32.138,83 at the end of 2013 with an expected cost saving of about €40.870,62.

The first achieved results, relating to January and February 2013, are rather positive, since the PD rate indicator is decreased from 0,89 to 0,47, although the LRCDA model has been tested in a factory just for the first time and it has been introduced in the plant from few months and it requires more time to concepts and tasks assimilation by top management and employee. MV cables production and number of PD faults in January and February 2013 are shown in Table 9:

	2011	2012	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	2013
MV (tons)	4325,9	5.180	380	480											860
YTD MV	-	-	380	860											860
Partial Discharge	34	46	2	2											4

Table 9: MV tons production and number of PD faults in 2013

According to MV production and PD faults, it is possible to observe that PD Rate indicator is following a descending trend (as shown in Table 10 and Figure 23) and we hope to go closer the predetermined Target 2013 of 0,40 at the end of the year.

QUALITY INDICATOR	2011	2012	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	2013
PD / 100 Tons cables produced	0,79	0,89	0,53	0,42											0,47
YTD (PD/100 Tons produced)			0,53	0,47											
Target 2013			0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	

Table 10: PD Rate Indicator 2013

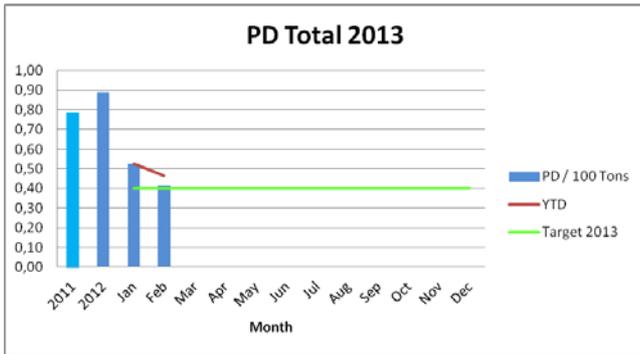


Figure 23: PD Rate Indicator 2013 trend

The achieved cost saving in 2013 (see Table 11) is quite good and satisfying, considering that it has been achieved a cost saving of €2956,78.

	January 2012	January 2013	February 2012	February 2013	YTD 2013
MV (cable)	267	379	488	480	
PD faults	4	2	2	2	
PD rate indicator	1,5	0,53	0,41	0,42	
PD unit cost (€)	1492,5	1492,5	1492,5	1492,5	
PD cost (€ / 100)	2238,75	791,02	611,92	626,85	
MVP Cost/month(€)	114,17	114,17	114,17	114,17	
Cost/month(€)	6091,58	3112,16	3100,36	3123	
Cost saving achieved (€)		2979,42		-22,64	2956,78

Table 11: YTD achieved cost saving 2013

Comparing expected cost saving with achieved cost saving (see Table 12), it is observed that achieved saving YTD are quite less than expected saving but in any case the first procedures model test provides good results in terms of cost saving and a better collaboration and synergy between production and maintenance.

	COST SAVING (€)	
	Expected	Achieved
January	3714,83	2979,42
February	238,36	-22,64
YTD	3943,19	2956,78

Table 12: Results analysis

7 Conclusions

The achieved results do hope for the future but it is important to underline that in order to provide a continuous improvement in terms of product quality

and process flow, it is required that the planned actions and their standard procedures (drums, roller, caterpillar and process line maintenances) will be over and over again implemented, moreover related motivations and attentions will be constant also in future. Remembering that interventions done and planned concern and are focused on root causes of mechanical damages, if target will not reach at the end of 2013 and the partial discharge phenomena in MV cables will be still significance, then LRCDA method could be focused also on the second causes macrocategory, i.e. insulation process problems, with the intent to reduce and delete overall PD root causes.

The first results from this preliminary study and implementation seem to indicate that the expected benefits of this model correspond to real and practical benefits, in terms of production defect reduction and cost saving related. For sure the data achieved must be completed with more data coming from enough tests to validate the model in power cables field, its indicators and to understand how much LRCDA could be better than other similar procedures and how much LRCDA could give more than others and for how long LRCDA could be implemented and developed in a factory with a constant motivation by top management and employee. After the model validation in this specific sector, a future work could be to expand LRCDA and its main concepts in several branches, in order to make LRCDA a solid model to develop and perform in every field.

References

- [1] Ricky Smith and Bruce Hawkins - Lean maintenance: reduce costs, improve quality, and increase market share, Elsevier Butterworth-Heinemann, United States of America, 2004.
- [2] Mohamed Ben-Daya, Salih O. Duffuaa, AbdulRaouf, Jezdimir Knezevic, Daoud Ait-Kadi - Handbook of Maintenance Management and Engineering, Springer-Verlag London Limited 2009.
- [3] Laura Swanson - An empirical study of the relationship between production technology and maintenance management, Department of Management, Southern Illinois University at Edwardsville, USA, 1997.
- [4] Rachna Shah and Peter T. Ward - Defining and developing measures of lean production, Journal of operations management, Elsevier B. V., USA, 2007.
- [5] F.T.S. Chan, H.C.W. Lau, R.W.L. Ip, H.K. Chan, S. Kong - Implementation of total productive maintenance: A case study, Int. J. Production Economics, Elsevier B. V., Honk Hong, 2003.

- [6] M.C. Eti, S.O.T. Ogaji, S.D. Probert - Implementing total productive maintenance in Nigerian manufacturing industries, Applied Energy, Elsevier Ltd, 2004.
- [7] J-B. LEGER, E. NEUNREUTHER, B. IUNG, G. MOREL - Integration of the Predictive Maintenance in Manufacturing System, CRAN-GSIP Nancy Research Centre of Automatic Control Faculty of Science – Henri Poincare University BP 239 – F-54506 VANDOEUVRE (FRANCE).
- [8] Laura Swanson - Linking maintenance strategies to performance, Department of Management, Southern Illinois University Edwardsville, Edwardsville, Elsevier Science B.V., USA, 2001.
- [9] E. Charlot, J.P. Kenne, S. Nadeau - Optimal production, maintenance and lockout/tagout control policies in manufacturing systems, Elsevier B.V., Canada, 2006.
- [10] Kristy O. Cua, Kathleen E. McKone, Roger G. Schroeder B. - Relationships between implementation of TQM, JIT, and TPM and manufacturing performance, Journal of Operations Management, Elsevier Science B.V., USA, 2001.
- [11] Kathleen E. McKone, Roger G. Schroeder, Kristy O. Cua - Total productive maintenance: a contextual view, Journal of Operations Management, Elsevier Science B.V., USA, 1999.
- [12] Philipp A. Konecny and Jorn-Henrik Thun - Do it separately or simultaneously — An empirical analysis of a conjoint implementation of TQM and TPM on plant performance, Int. J. Production Economics, Elsevier B.V., Germany, 2010.
- [13] ParastooRoghianian, AmranRasli, MostafaKazemi, HamedGheysari - Productivity Tools: TPM and TQM, I.J. of Fundamental Psychology & Social Sciences, Faculty of Management and HRD, University Technology Malaysia (UTM), 81310 Skudai, Johor, Malaysia, 2 Faculty of Economic, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, 2012
- [14] Mike Sondalini - How to Make RCFA a Successful Business Improvement Strategy, Lifetime Reliability Solutions, Conference 2008.
- [15] James J. Rooney and Lee N. VandenHeuvel - Root Cause Analysis For Beginners, Quality progress, 2004.
- [16] John Kacher and TitaOuvreloeil - What makes a root cause failure analysis program successful, HSB Reliability Technologies LLC.
- [17] R. Keith Mobley - Root Cause Failure Analysis, Elsevier B.V., USA, 1999.
- [18] G. Pozzati - Cable Manufacturing: Main processes & Technologies, Property of Prysmian, Milan, 17 June, 2008.
- [19] Giovanni Pozzati - Cables Tecnology, PD&Q – Cable Technolgy, Introduction to Cables & Systems, Milan, 18-19 December, Property of Prysmian, 2007.
- [20] Anatomy Of A Hv Cable, Vol. 1, A guide to HV cables, Accessories and installation technologies, Cable Systems Knowledge, Property of Prysmian.
- [21] Extruders cables technology, Vol. 11, A guide to HV cables, Accessories and installation technologies, Cable Systems Knowledge, Property of Prysmian.
- [22] M. Gallo, R. Revetria, E. Romano – A pull management model for a production cell under variable demand conditions, International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, Issue 4 volume 6, 2012, pp 519-526. ISSN: 1998-0140.
- [23] L. Guerra, T. Murino, E. Romano – Reverse Logistics for Electrical and Electronic Equipment: a modular simulation model, Recent Advances in System Science and Simulation in Engineering, Proceedings of the 8th WSEAS International Conference on System Science and Simulation in Engineering. October 17-19 2009, Genova Italy, pp. 307-312. ISSN: 1790-2769. ISBN: 978-960-474-131-1.
- [24] Romano E., Santillo L.C., Zoppoli P., A static Algorithm to solve the air traffic sequencing problem, Wseas Transaction on Systems, Issue 6, Volume 7, June 2008, pages 682-695.
- [25] Romano E., Santillo L.C., Zoppoli P., Transformation of a production/assembly washing machine lines into Lean manufacturing system, Wseas Transaction on Systems and Control, Issue 2, Volume 4, 2009, pages 65-76.
- [26] James Rose - Root Cause Analysis and critical thought, International professional practice framework, The Institute of International Auditors, 2012.
- [27] Stacy Gardner - Applying Root Trigger Analysis (RCA) to organization continuity, Evaluation Consulting, 2012.
- [28] Frank Ghinassi - Root Cause Analysis, University of Pittsburg, 2009.
- [29] Paul F. Wilson, Larry D. Dell, Gaylord F. Anderson - Root Cause Analysis: A tool for Total Quality Management, ASQ, USA, 1993.
- [30] Heidi Wald and Kaveh G. Shojania - Making Health Care Safer: A Critical Analysis of Patient Safety Practices, Chapter 5. Root Cause Analysis, AHRQ, USA.
- [31] Joy LePree - Root Cause Failure Analysis, Reliability Center, INC. Robert J. Latino, What is the Difference Between Failure Analysis (FA), Root Cause Analysis (RCA) and Root Cause Failure Analysis (RCFA)?, Reliability center, INC.
- [32] Holimchayachotikul, P., Derrouiche, R., Leksakul, K., Guizzi, G. - B2B supply chain performance enhancement road map using data mining techniques(2010) International conference on

- System Science and Simulation in Engineering - Proceedings, pp. 336-341.
- [33] Holimchayachotikul, P., Limcharoen, A., Leksakul, K., Guizzi, G. –Multi-objective optimization based on robust design for etching process parameters of hard disk drive slider fabrication(2010) 11thWseasInternational conference on Automation and Information, ICAI '10 - Proceedings, pp. 166-170.
- [34] Chiocca, D., Guizzi, G., Murino, T., Revetria, R., Romano, E. - A methodology for supporting lean healthcare(2012) Studies in Computational Intelligence, 431, pp. 93-99.
- [35] Guizzi, G., Chiocca, D., Romano, E. - System dynamics approach to model a hybrid manufacturing system(2012) Frontiers in Artificial Intelligence and Applications, 246, pp. 499-517.
- [36] AmirAzizi, AmirYazid b. Ali, and LohWeiPing - Model Development and Comparative Study of Bayesian and ANFIS Inferences for UncertainVariables of Production Line in TileIndustry. WseasTransaction on Systems, Issue 1, Volume 11, January 2012, pages 22-37.
- [37] Yuan-Shyi Peter Chiu, Feng-Tsung Cheng, Kuang-Ku Chen, Huei-Hsin Chang, Reexamining a SpecificVendor-buyer System with Rework and an Improving Delivery Plan Using an Alternative Approach. Wseas Transaction on Systems, Issue 5, Volume 11, May 2012, pages 153-162.
- [38] Murino T., Romano E., Santillo L.C. - Supply chain performance sustainabilitythroughresiliencefunction, 2011 WinterSimulation Conference, WSC 2011, ISSN: 08917736.
- [39] Mosca, R., Cassettari, L., Revetria, R., Magro, G. - Simulation assupport for production planning in small and medium enterprise: A case study(2005) Proceedings – WinterSimulation Conference, 2005, art. no. 1574537, pp. 2443-2448.
- [40] Bruzzone, A., Orsoni, A., Mosca, R., Revetria, R. - AI-based optimization for fleet management in maritime logistics(2002) WinterSimulation Conference Proceedings, 2, pp. 1174-1182.
- [41] Briano, E., Caballini, C., Mosca, R., Revetria, R. - Using WITNESSTM simulation software as a validationtool for an industrial plant layout(2010) International conference on System Science and Simulation in Engineering - Proceedings, pp. 201-206.
- [42] Briano, E., Caballini, C., Giribone, P., Revetria, R. - Objectives and perspectives for improvingresiliency in supply chains(2010) WSEAS Transactions on Systems, 9 (2), pp. 136-145.