

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA  
DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI  
INDUSTRIALI  
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DELL'INNOVAZIONE DEL  
PRODOTTO

Tesi di Laurea Magistrale

# **L'impatto economico di una corretta definizione degli intervalli d'ispezione sui costi di manutenzione**

**Il caso Acqua Minerale San Benedetto S.p.A.**

RELATORE: Ch.mo Prof. Persona Alessandro

CORRELATORE: Ing. Zennaro Ilenia

LAUREANDO: Costagliola Valerio

MATRICOLA: 1171792

Anno Accademico 2018-2019



*Alla mia famiglia*



## RINGRAZIAMENTI

Posso finalmente dire che il mio percorso accademico è giunto al termine. In questi due anni sono aiutato da moltissime di persone, con le quali ho condiviso molteplici esperienze di vita e che mi hanno aiutato a crescere sia accademicamente che come persona. Pertanto, vorrei ringraziare tutti coloro che hanno incrociato il mio cammino e che hanno lasciato un segno indelebile, permettendomi di raggiungere questo traguardo.

Grazie innanzitutto al Professor Persona e ad Ilenia Zennaro, che mi hanno seguito nel tirocinio e nella stesura di questo elaborato, con molta disponibilità e gentilezza.

Grazie ai compagni d'ufficio, Gabriele, Stefano, Mattias, per aver sopportato la mia presenza, a Francesco, Gloria e Andrea che mi hanno sempre aiutato nella stesura della tesi e nel lavoro. Grazie poi a tutti i colleghi, troppi per nominarli singolarmente, che si sono sempre dimostrati gentili e altruisti, sia nel lavoro che nelle attività di svago.

Grazie a tutti i compagni di corso, con i quali ho condiviso momenti esilaranti e che hanno alleggerito il carico di studio con spritz e risate.

Grazie ai miei amici di una vita, sempre presenti e allegri, con i quali nonostante la lontananza sembra che il tempo non passi mai. Grazie anche a Rini, mio coinquilino in questi anni, ed al nostro progetto di aprire insieme l'Osteria InContrada.

Grazie a Gilberto, Elisa e soprattutto alla piccola Greta, che mi ha reso lo Zio Lelo e che continua a portare tantissima gioia nella mia vita.

Grazie a Maria Giulia e Sandro, che mi hanno accolto nella loro casa e mi hanno fatto sentire come fossi uno di famiglia, aiutandomi sempre senza chiedere nulla in cambio.

Grazie ai miei genitori, Ciro e Salette, e a mio fratello Daniele, fondamentali nella mia vita e che nonostante mille difficoltà mi hanno sempre sostenuto e spronato, facendomi vedere il bello in ogni situazione. Grazie ai miei nonni e alla mia famiglia, che mi ha tirato sempre su di morale e sostenuto, e che mi ha sempre reso fiero di essere un Costagliola.

Grazie ad Arianna, mia compagna, insostituibile, che mi ha fatto crescere e maturare, ridere, e grazie alla quale nessun problema è mai sembrato insormontabile. Grazie per avermi sempre spronato a dare il meglio di me, a non mollare e a credere nelle mie capacità, facendomi superare ogni ostacolo.



# INDICE

SOMMARIO .....	9
INTRODUZIONE .....	11
LA MANUTENZIONE .....	13
1.1 Definizione .....	13
1.2 La manutenzione in ottica aziendale .....	15
1.3 Il ciclo di vita di un componente in un sistema di produzione.....	18
1.3.1 Entità.....	19
1.3.2 Affidabilità .....	19
1.3.3 Disponibilità .....	20
1.3.4 Manutentibilità .....	21
1.3.5 Guasti.....	21
1.4 Le Politiche Manutentive .....	23
1.4.1 Manutenzione Correttiva o a Guasto .....	24
1.4.2 Manutenzione Preventiva .....	25
1.4.3 Manutenzione su Condizione .....	26
1.4.4 Manutenzione Predittiva.....	27
1.4.5 Manutenzione Migliorativa .....	29
1.5 Ingegneria di Manutenzione.....	30
1.6 La scelta della politica manutentiva.....	31
1.7 I costi di Manutenzione .....	37
TEORIA DELL'AFFIDABILITÀ.....	41
2.1 Tempo al Guasto .....	41
2.2 Componenti Riparabili e Non Riparabili .....	42
2.3 Affidabilità (Reliability).....	43
2.4 Rateo di Guasto Condizionato .....	43
2.5 Espressioni dell'Affidabilità e del Rateo di Guasto .....	44
2.6 Tempo Medio di Guasto.....	48
2.7 Componenti Riparabili, variabili affidabilistiche.....	48
2.8 Parallelismo tra processo di aggiustamento e di rottura.....	49
2.9 Distribuzione di probabilità Esponenziale .....	51
2.10 Distribuzione di Weibull .....	52
2.11 Macchina Singola, politica ispettiva elementare.....	55

2.12 Applicazione su componente con ddp esponenziale negativa.....	58
2.13 Applicazione su componente con ddp normale.....	61
ACQUA MINERALE SAN BENEDETTO S.P.A. ....	67
3.1 L'azienda .....	67
3.2 I prodotti .....	70
3.3 Il processo di Produzione delle bottiglie in PET e di Imbottigliamento.....	73
3.3.1 Dal PET in granulo alla bottiglia .....	74
3.3.2 Il Raddrizzatore.....	77
3.3.3 Il nastro di trasporto ad aria .....	78
3.3.4 La Sciacquatrice.....	79
3.3.5 La Riempitrice .....	80
3.3.6 La Tappatrice .....	81
3.3.7 L'Etichettatrice.....	82
3.3.8 La Confezionatrice.....	83
3.3.9 Il Pallettizzatore .....	84
3.3.10 La Fasciatrice .....	85
3.3.11 L'Etichettatrice Bancale.....	86
3.3.12 Stoccaggio prodotto finito.....	86
IMPATTO ECONOMICO OTTIMIZZANDO I TEMPI D'ISPEZIONE.....	89
4.1 Introduzione.....	89
4.2 Incidenza sui costi di una correzione del MTTF .....	89
4.3 Incidenza sui costi della corretta definizione degli intervalli ispettivi per componente con ddp esponenziale negativa.....	96
4.4 Incidenza sui costi della corretta definizione degli intervalli ispettivi per componente con ddp normale.....	107
4.5 Conclusioni.....	114
APPLICAZIONE AD ALCUNE LINEE D'IMBOTTIGLIAMENTO .....	119
5.1 Premessa .....	119
5.2 Scelta del componente .....	119
5.3 Scelta delle linee di imbottigliamento .....	121
5.4 Determinazione dei Costi .....	122
5.5 Ottimizzazione dei tempi d'ispezione .....	124
5.6 Valutazioni Finali .....	127
IL SISTEMA INFORMATIVO DI MANUTENZIONE.....	129
6.1 Introduzione.....	129
6.2 Cos'è un PLM.....	130



6.3 Il PLM in Acqua Minerale San Benedetto: Teamcenter di Siemens .....	131
6.3.1 Componenti Generici, Semilavorati e designazioni .....	133
6.3.2 Item Neutri e Physical Parts .....	133
6.3.3 Vendor Part.....	135
6.3.4 Impact Analysis .....	135
6.3.5 Codici nuovi e codici riparati .....	136
6.3.6 Part Logistic Form.....	136
6.3.7 Struttura di Teamcenter .....	138
6.3.8 La Creazione della Bill of Material .....	139
6.4 L'utilizzo di Teamcenter in ottica manutentiva .....	141
6.5 I vantaggi che si vogliono ottenere .....	144
CONCLUSIONI .....	147
Bibliografia .....	151
Sitografia.....	153
Indice delle Figure .....	155
Indice delle Tabelle.....	157



## SOMMARIO

Il presente lavoro di tesi vuole essere uno strumento utile, nel panorama industriale, per ottimizzare la manutenzione. In particolare, in questa sede si va ad analizzare la manutenzione preventiva su condizione, essendo la politica manutentiva attualmente più applicata nel settore industriale, e quanto incida una corretta applicazione dei modelli teorici sul costo totale della politica manutentiva. Si tratta di un'analisi di carattere generale, per fornire uno strumento il quanto più semplice ma efficace da utilizzare, che consente di andare a verificare se valga la pena investire su uno strumento di raccolta dati che aiuti a definire correttamente il MTTF e, riguardo gli intervalli d'ispezione, quanto sia "concesso" distaccarsi dal tempo ideale per andare incontro alle esigenze pratiche senza impattare in modo considerevole sui costi di manutenzione.

Nel Capitolo 1 si introduce la manutenzione e che cosa ha rappresentato e rappresenta oggi in ottica aziendale. Si prosegue poi nel discernere il concetto di manutenzione nelle sue definizioni elementari, andando poi nello specifico a distinguere tra i vari tipi di politiche manutentive. Una volta introdotta l'Ingegneria di Manutenzione e il suo ruolo, si prosegue fornendo un'analisi sulla scelta della più corretta politica manutentiva e introducendo i costi attinenti ad essa.

Nel Capitolo 2 invece si forniscono le nozioni teoriche che sono alla base della Teoria dell'Affidabilità, con le definizioni e le procedure utili nei capitoli successivi. Si introduce poi la politica ispettiva alla base dell'analisi di questo elaborato, nella sua applicazione su componenti con distribuzione di probabilità normale ed esponenziale negativa, che rappresentano le due fasi principali della vita di un componente.

Nel Capitolo 3 si prosegue con una panoramica dell'azienda Acqua Minerale San Benedetto S.p.A. presso la quale ho svolto il tirocinio e la qui presente tesi. Dopo aver introdotto la storia dell'azienda, si prosegue con l'illustrazione di cosa sia una linea d'imbottigliamento e quali siano le macchine presenti, con il processo che parte dal granulo di PET vergine alla bottiglia finita, riempita e immagazzinata.

Nel Capitolo 4 si utilizzano gli strumenti introdotti nei capitoli precedenti per andare ad effettuare un'analisi economica verificando quanto incide una corretta definizione e applicazione del metodo proposto e quanto può essere svantaggioso economicamente un errore nella stima dei parametri. L'analisi vuole avere carattere generale in modo da poter

essere estesa a qualunque componente sul quale si effettui la manutenzione preventiva su condizione.

Nel Capitolo 5 quindi si esegue un'applicazione pratica sullo stesso componente, presente però su linee d'imbottigliamento distinte e che producono prodotti molto diversi tra loro. Venendo sfruttati in modo diverso, i parametri d'analisi risultano differenti. Pertanto, si vuole verificare se l'applicazione della politica ispettiva attualmente in uso può essere ottimizzata, e di quanto può essere migliorata la situazione attuale.

Il Capitolo 6 riprende le finalità del capitolo precedente, fornendo però uno strumento pratico con il quale attuare effettivamente questo miglioramento. Introducendo il PLM, in particolare Teamcenter di Siemens, si analizza come possa essere utilizzato per essere vettore di miglioramento e innovazione anche e soprattutto in ottica manutentiva, consentendo di avere uno strumento che permetta di mettere basi solide per le analisi svolte nei capitoli 4 e 5.

## INTRODUZIONE

L'organizzazione industriale moderna è molto più competitiva rispetto a passato. È necessario elevare il livello di performance di tutte le aree dell'azienda per risultare efficaci. La manutenzione è solo recentemente entrata a far parte di quelle aree considerate fondamentali per il corretto funzionamento dell'area produttiva, e pertanto è necessario approfondire tale argomento per migliorare la produttività e ridurre i costi. Se in passato infatti l'idea di manutenzione era esclusivamente quella di sostituire ciò che si era rotto, ora tale definizione si è affinata e racchiude diverse sfumature, distinguendosi in manutenzione a guasto, preventiva, predittiva, su condizione, migliorativa. Aumentando il grado di analisi che viene effettuata prima del guasto aumentano i costi diretti di manutenzione, ma si previene più efficacemente la perdita di produzione. Non sempre vale la pena investire tempo, energie e denaro utilizzando tecniche complesse, ma qualora ciò avvenisse è necessario ottimizzare le modalità d'esecuzione per non aumentare di molto i costi. In questo elaborato si vuole approfondire proprio quest'ultimo punto, relativamente alla manutenzione preventiva su condizione. Questa politica manutentiva prevede di effettuare periodicamente delle ispezioni sul componente, per ricavare dati su parametri d'interesse che predicano il comportamento futuro. Questo perché, analizzando l'evoluzione di tali parametri (come vibrazioni, calore, prestazioni, ecc.) è possibile individuare preventivamente lo stato di degrado del componente, che non è istantaneo ma graduale nel tempo, e che potrebbe portare a un guasto, ed effettuare preventivamente la sostituzione o riparazione. L'ispezione però avviene solitamente a macchina ferma, sia per questioni di sicurezza che di effettiva analisi, con componenti non altrimenti raggiungibili. Ciò implica che in quel momento la macchina, o in generale la linea di produzione, è ferma e non produce. Effettuare pertanto troppe ispezioni può portare a costi ingenti di mancata produzione, ma al contrario non effettuarne abbastanza implica potenzialmente di accorgersi del non corretto funzionamento dopo molto tempo, provocando costi indiretti come una riduzione di efficienza e un aumento di pezzi non conformi e quindi scarti, che se protratti per molto tempo possono essere molto significativi. L'analisi effettuata in questo elaborato vuole rispondere a questo dilemma, andando non solo a fornire uno strumento attraverso il quale calcolare l'intervallo d'ispezione ottimale che va a minimizzare i costi della politica ispettiva, ma anche andare a verificare quanto incide una non corretta definizione di tali intervalli. È possibile che in una macchina, o in macchine diverse ma appartenenti alla stessa linea, venga eseguito

questo tipo di manutenzione su più componenti. Essi hanno potenzialmente durata di vita diversa, e se venisse applicato alla lettera il modello che ottimizza le ispezioni per ogni componente, l'impianto si fermerebbe molte volte. Ecco quindi che si tende a sfruttare il fermo macchina dovuto ad altre ispezioni per accorpare più analisi, dando maggiore importanza ai componenti critici, ma ciò implica effettuare più o meno ispezioni rispetto ad altri componenti e quindi allontanarsi dal loro punto di ottimo. Lo strumento fornito in questo elaborato permette di valutare le varie voci di costo e creare un compromesso che permetta di ottimizzare gli intervalli d'ispezione in modo da minimizzare i costi di manutenzione.

È stato poi affrontato un caso pratico relativamente ad un componente critico della linea d'imbottigliamento, partendo dai dati presenti al momento dell'analisi e andando ad applicare il modello. Data la complessità dello stabilimento e la varietà di prodotti, le voci di costo utilizzate sono state pesate e stimate in base ai dati degli anni precedenti e con l'aiuto del Controllo di Gestione. Quindi per la stima del MTTF (Mean Time To Failure) sono stati utilizzati i dati in possesso del Responsabile della Pianificazione della Manutenzione, che risultano però essere in parte approssimati o comunque non completi. Sulla base di questi dati è stato applicato il modello, evidenziando in alcuni casi una sensibile variazione rispetto all'ottimo e che può essere spunto di analisi successive.

Date le talvolta evidenti lacune riguardo i dati su cui effettuare le analisi, è stato poi proposto un metodo per migliorare tale aspetto utilizzando il software PLM presente e utilizzato attualmente in azienda. Sfruttando uno strumento utilizzato a tutto tondo nelle varie aree aziendali e quindi evitando nuovi investimenti, si può perfezionare la raccolta dati e renderla più organizzata e già personalizzata per componente, rendendo in futuro i dati accessibili e fruibili in maniera ottimale. Solo infatti se si utilizza un dato corretto e veritiero si riesce ad ottenere i benefici possibili, ed ecco che attraverso le metodologie proposte questo diventa possibile.

# CAPITOLO 1

## LA MANUTENZIONE

### 1.1 Definizione

Nel contesto industriale, e nello specifico nelle industrie di produzione, è fondamentale che gli impianti e le macchine svolgano la propria funzione. Nel corso del tempo tuttavia, l'utilizzo e l'invecchiamento provocano una perdita di efficienza tecnica rispetto alle condizioni nominali, fino ad arrivare all'obsolescenza tecnologica. Si associa quindi al concetto di utilizzo di un impianto anche il concetto di manutenzione, che è necessario effettuare nel corso del ciclo di vita per assicurare che il sistema svolga la sua funzione come definita durante la fase di progettazione.

La prima definizione originale del termine “Manutenzione” venne data da parte dell'OCSE (Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico) nel 1963: *“S'intende per manutenzione quella funzione aziendale alle quali 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 corso degli anni sono state formulate nuove accezioni e sfumature, che hanno piano piano evoluto il termine e il concetto stesso. Nel 1970 ad esempio, venne coniato un nuovo termine, Terotecnologia (dal greco *terein* = prendersi cura di, conservare) che significa letteralmente “tecnologia della conservazione”. La British Standard Institution in quell'anno scrisse: *“La terotecnologia è una combinazione di direzione, finanza, ingegneria e altre discipline, applicate ai beni fisici per perseguire un economico costo del ciclo di vita ad esse relativo. Tale obiettivo è ottenuto con il progetto e l'applicazione della disponibilità e della manutenibilità degli impianti, alle macchine, alle attrezzature, ai fabbricati e alle strutture in genere, considerando la loro progettazione, installazione,*

*manutenzione, miglioramento, rimpiazzo con tutti i conseguenti ritorni di informazioni sulla progettazione, le prestazioni e i costi*". Tale definizione risulta essere più estesa rispetto a quella di manutenzione, ma ne contiene i suoi concetti cardine.

L'innovazione industriale e la maggiore attenzione riposta in tale ambito permettono nel 1991 di definire la manutenzione come *"la combinazione di tutte le azioni tecniche, amministrative e manageriali, incluse quelle di supervisione, che hanno lo scopo di mantenere o riportare la risorsa di interesse aziendale in uno stato operativo in cui possa svolgere la funzione richiesta"* (UNI 10147).

La definizione più moderna, risalente al 2003, non differisce molto dalla precedente: *"Combinazione di tutte le azioni tecniche, amministrative e gestionali, durante il ciclo di vita di un'entità, volte a mantenerla o riportarla in uno stato in cui possa eseguire la funzione richiesta"* (UNI EN 13306).

Da queste definizioni emerge chiaramente come l'attività di manutenzione abbia subito un'evoluzione nel corso degli anni, a causa della maggiore attenzione riposta in essa e alla crescita degli impianti industriali, passando da una mera azione correttiva di *"riparazione e revisione"* degli impianti ad una serie di interventi preventivi, atti a *"mantenerli e riportarli in uno stato in cui possa eseguire la funzione richiesta"*. Tale discorso è strettamente legato al concetto stesso di produzione; l'uso del componente, unito all'azione del tempo, provoca in esso un progressivo degrado e invecchiamento, che comporta una minore efficienza tecnica od obsolescenza tecnologica. L'utilizzo in modo più o meno corretto del bene considerato, per un periodo più o meno continuo e prolungato, provoca un certo grado di usura dello stesso, che consegue in una progressiva diminuzione della sua funzione e delle sue prestazioni, ultimata nell'interruzione della funzione prevista. L'avvento della rivoluzione informatica ha permesso di ampliare ulteriormente l'organizzazione produttiva, permettendo di aumentare la qualità dell'intera filiera e consentendo una tracciabilità delle informazioni. Questo ha fatto sì che, lì dove l'azienda tenda all'eccellenza e all'innovazione, anche l'azione manutentiva si specializzasse ulteriormente, diminuendo la quantità di interventi ma aumentandone la qualità, diventando quasi una nuova scienza mirata a contrastare esclusivamente le cause che determinano usura e degrado durante l'uso.



## 1.2 La manutenzione in ottica aziendale

La manutenzione deve essere fortemente integrata con le altre funzioni aziendali per garantire risultati validi. È infatti un'attività che interagisce, in modo più o meno diretto, con tutte le altre aree, e come tale ha bisogno di un forte legame e interazioni continue con esse. In particolare [1], si vuole porre l'attenzione sulle aree di:

- **Progettazione:** è fondamentale che durante la progettazione di una macchina o impianto produttivo si facciano tutte le considerazioni del caso. Domandarsi fin da subito quali potrebbero essere le cause di guasto o le aree che necessiteranno di una maggiore attenzione, semplificherà enormemente tutte le azioni durante il suo ciclo di vita. Fare considerazioni ulteriori su dove tale macchina verrà collocata, prevedendo sia un ambiente ostile che possa pregiudicarne il funzionamento (sporco, caldo, freddo, ambiente corrosivo) che evidenziare criticità ulteriori, garantirà una vita più lunga. Anche gli standard adottati dal paese in cui verrà collocata vanno presi in considerazione; banalmente, una macchina con determinate caratteristiche di funzionamento collegato ad una linea a 50 Hz (come nella Comunità Europea) non avrà le stesse caratteristiche se collegata ad una linea a 60 Hz (come negli USA).
- **Programmazione della produzione:** nella maggior parte dei casi, la manutenzione deve essere fatta quando il macchinario o la linea di produzione risulta spenta e ferma. È quindi necessaria un'adeguata programmazione della produzione, per far sì che vengano garantiti i piani di produzione, e parallelamente la manutenzione garantisca la massima disponibilità dell'impianto produttivo, in una mutua sinergia.
- **Controllo della qualità:** se il fine ultimo è quello di garantire la soddisfazione del cliente è necessario ridurre le difettosità e gli scarti, che inducono continue modifiche alla programmazione della produzione. Una corretta manutenzione può eliminare il problema alla radice.
- **Approvvigionamento dei materiali:** i materiali di consumo e di ricambio devono essere garantiti in tempi brevi, così da ridurre al minimo i periodi di fermo o comunque rientrare nel tempo programmato. Parimenti, per tali materiali deve essere garantito lo svolgimento corretto della loro funzione, per cui deve esserci un'azione di controllo prima dell'utilizzo.

- Pianificazione strategica e amministrativa: un Management efficiente punta al continuo miglioramento organizzativo della manutenzione, al fine di ottimizzare le risorse nell'arco del tempo garantendo i migliori risultati economici aziendali.

Da questo punto di vista, la manutenzione serve a:

- Migliorare le performances delle macchine e degli impianti in esercizio, aumentando la disponibilità operativa, l'efficienza, e diminuendo le difettosità;
- Ridurre i costi degli interventi manutentivi, intesi come carico di lavoro, tempo, risorse, materiali;
- Sviluppare un *know-how* manutentivo, in modo da migliorare le prestazioni negli interventi e ottimizzando i risultati ottenuti.

Un approccio manageriale improntato correttamente in quest'area prevede fasi di:

- Razionalizzazione della struttura esistente, mettendo ordine sia in fase organizzativa che nel raggiungimento degli obiettivi;
- Reengineering, ridisegnando il processo manutentivo in modo da incrementare l'efficienza, l'impatto e l'organizzazione;
- Miglioramento continuo, sia tecnico che procedurale;
- Innovazione, intesa come ricerca delle soluzioni più nuove e funzionali presenti nello stato dell'arte, così da rendere più proficua la gestione totale del processo produttivo e manutentivo.

Da queste considerazioni risulta evidente come il processo manutentivo è fortemente integrato in tutte le aree aziendali, e come tale deve essere gestito con cura per non risultare controproducente. La condivisione delle informazioni da parte dei vari reparti è fondamentale, perché permette di ottimizzare ogni settore in sinergia.

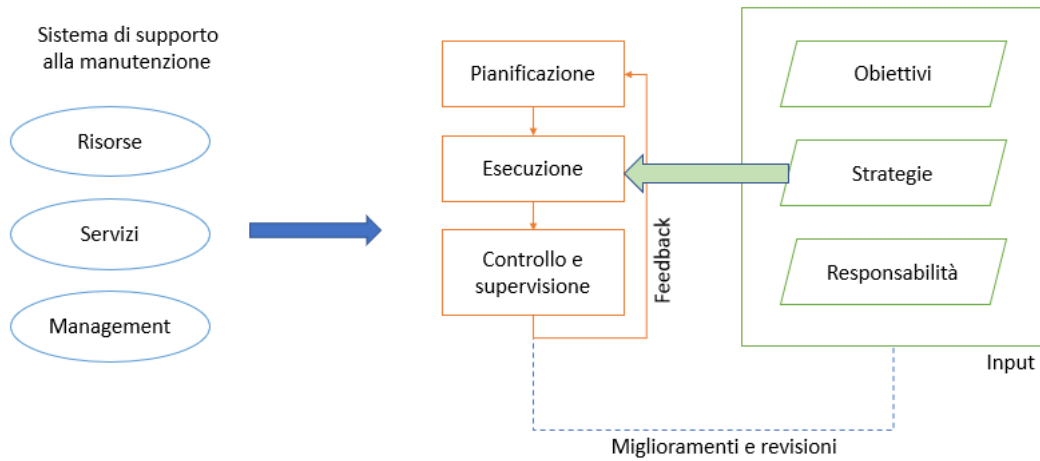


Figura 1- Schema funzionale della Gestione integrata della Manutenzione

La gestione integrata della manutenzione è fatta da tutte le attività che determinano gli obiettivi, le strategie e le responsabilità della manutenzione. Il *Master Plan* è l'elaborato che identifica nel tempo l'organizzazione delle risorse e le strumentazioni associate per effettuare un piano strategico manutentivo aziendale. Esso verrà consultato dalle varie aree aziendali in modo da coordinare le azioni nel tempo. Se ad esempio per un progetto dovrà essere fatta una modifica ad un impianto, si aspetterà il fermo previsto nel *Master Plan* così da non fermare ulteriormente la produzione, coordinando le varie attività in modo da non sottostimare le risorse necessarie e portare a termine tutte le azioni nel periodo stabilito.

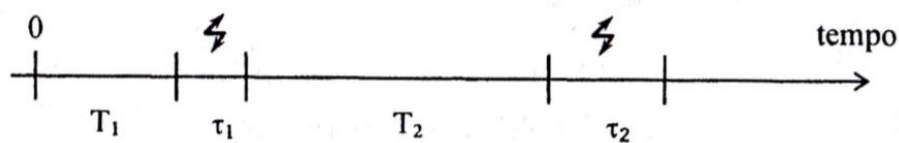
I dati di feedback invece sono estratti dall'analisi delle performance. Per un miglioramento continuo è necessario aggiornare le proprie analisi con dati sempre nuovi, così da correggere eventuali errori o stime errate. In un processo ricorsivo, organizzazione e manutenzione collaborano per migliorare di volta in volta la pianificazione della produzione e della manutenzione stessa. Tale sistema di supporto dipende da molti fattori, tra cui la complessità dell'opera di manutenzione, la capacità del personale e la disponibilità degli impianti. Lo schema di flusso sottostante è stato sviluppato nel 1999 da Duffua et al. e ben riassume quanto appena detto.



Figura 2 - Duffua et al., L'importanza dei dati di feedback nel processo manutentivo

### 1.3 Il ciclo di vita di un componente in un sistema di produzione

Un generico componente appartenente ad un impianto industriale, sia esso produttore di beni o di servizi, ha un ciclo di vita caratterizzato da periodi di *uptime* in cui tale componente funziona correttamente (ossia la sua condizione nominale) e può svolgere la sua funzione richiesta, alternato a periodi di *downtime* in cui non è garantita la sua corretta funzionalità, che può risultare parzialmente o completamente compromessa (ovvero si ha un guasto) ed è necessario un certo tempo affinché sia completata la manutenzione.



$T_i$ : intervalli di funzionamento nominale

$\tau_i$ : intervalli di fermo (o funzionamento ridotto) e di riparazione

Figura 3 - Uptime e Downtime nella vita di un componente generico

La manutenzione ha il fine ultimo di garantire la potenzialità nominale ed il corretto funzionamento per aumentare i periodi  $T_i$  e minimizzare gli intervalli di funzionamento ridotto o di fermo  $\tau_i$  con annessa riparazione. La manutenzione è quindi quella funzione che monitora e mantiene l'impianto, la strumentazione e la fabbrica operativi e funzionali.

Si considerano solamente le entità *riparabili*, per le quali il guasto o una deviazione dallo standard di funzionamento rappresenti solamente uno dei momenti tipici della sua vita.

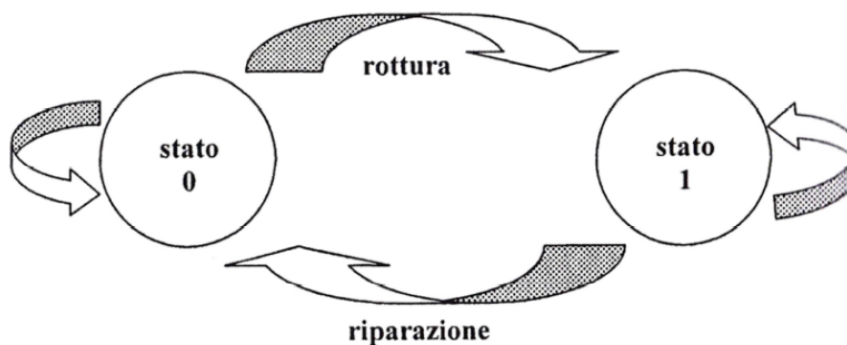


Figura 4 - Entità riparabili, ciclo di vita

In generale qualunque entità (impianto, sistema, componente, strumento, ecc.) sarà soggetto a guasto prima o poi, o comunque a un processo di degradazione dovuto al tempo. L'entità potrà essere riparata per ripristinarne l'attività. In ogni caso, sia il tempo di guasto che quello di riparazione sono variabili casuali.

Prima di procedere oltre è però necessario definire il significato dei termini che verranno utilizzati in seguito, ossia Entità, Affidabilità (Reliability), Disponibilità (Availability), Manutenibilità (Maintainability) e Sicurezza (Safety).

### 1.3.1 Entità

Un'Entità è definita come *parte, componente, dispositivo, sottosistema, unità funzionale, apparecchiatura o sistema che possa essere descritta e considerata individualmente* (UNI 13306:2018).

Preso un numero di entità, come ad esempio una popolazione di elementi, o un campione di essi, è possibile considerarli come un'entità a parte.

### 1.3.2 Affidabilità

L'Affidabilità è definita come *l'attitudine di una entità a svolgere una funzione richiesta in date condizioni durante un intervallo di tempo stabilito* (UNI 13306:2018).

La *teoria dell'affidabilità* è quell'insieme di teorie e modelli matematici che formano e costituiscono le procedure volte alla previsione, ottimizzazione e stima della probabilità di funzionamento, durante la vita prevista del componente. Ha lo scopo di studiare il comportamento dei componenti o di sistemi complessi che portano al fallimento, al fine di garantire la loro funzione corretta durante il periodo nel quale sono operativi. È fortemente legata allo studio probabilistico e statistico. Un componente, o una generica entità, i cui comportamenti a rottura sono noti, può essere modellato accuratamente valutando una serie di parametri statistici. Se i comportamenti a rottura non sono noti, bisogna utilizzare modelli accurati per la stima dei parametri, così da prevedere il comportamento. Non esiste la certezza che in quel dato momento l'entità si comporti nella maniera prevista, ma può essere calcolata la probabilità che, nell'istante di tempo stabilito, il componente performi la funzione richiesta in condizioni date.

L'affidabilità di un'entità potrebbe essere calcolata a partire dai guasti osservati per essa e/o per una serie di entità confrontabili durante un intervallo di tempo stabilito. L'affidabilità prevista di un'entità esprime pertanto il livello di fiducia riposto in essa, stimato dall'affidabilità di entità confrontabili e dalla conoscenza del suo stato effettivo. La finalità è quella di garantire una continuità nel servizio del sistema che si progetta o gestisce.

### 1.3.3 Disponibilità

La Disponibilità è definita come *l'attitudine di un'entità a funzionare come e quando richiesto, in determinate condizioni operative, partendo dal presupposto che siano fornite le risorse necessarie esterne* (UNI 13306:2018).

La disponibilità quindi viene definita mettendo in relazione il tempo di utilizzo effettivo dell'entità con il tempo totale di progettazione in determinate condizioni operative. L'intervento di manutenzione serve ad aumentare l'affidabilità dell'entità, ma il tempo trascorso nell'effettuarela diminuisce la sua disponibilità, poiché non stava svolgendo la propria funzione.

Le risorse richieste esterne, che sono diverse rispetto a quelle proprie della manutenzione, non incidono sulla disponibilità nonostante quest'ultima possa essere disponibile dal

punto di vista dell'utilizzatore. Questa attitudine dipende dalla combinazione degli aspetti di affidabilità, supporto logistico di manutenzione, manutentibilità stessa dell'entità e infine dalle azioni di manutenzione eseguite su di essa. La disponibilità può essere quantificata con l'utilizzo di indicatori e misure appropriate, e perciò è definita come *prestazione di disponibilità*. La finalità è quella di ridurre al minimo il fermo macchina, ottimizzando la produzione e al contempo garantendo l'efficienza dei sistemi di sicurezza.

#### 1.3.4 Manutentibilità

La Manutentibilità è definita come *l'attitudine di un'entità, in certe condizioni di utilizzo, ad essere mantenuta o ripristinata in uno stato in cui possa eseguire la funzione richiesta, quando la manutenzione è effettuata in date condizioni e sono adottate le procedure e le risorse prescritte (UNI 13306:2018).*

Di conseguenza la manutentibilità di un bene è una sua caratteristica e può essere quantificata tramite indicatori appropriati, da cui si può definire una prestazione di manutentibilità ossia la sua predisposizione ad essere riportato allo stato in cui possa eseguire la sua funzione richiesta. La finalità è quella di garantire il rapido ripristino dei componenti guasti.

#### 1.3.5 Guasti

Il Guasto è inteso come *l'evento di cessazione dell'attitudine di un'entità a svolgere la specifica funzione richiesta*. Possono verificarsi diverse tipologie di guasto durante il ciclo di vita di un'entità, che vengono descritte dalla famosa “curva a vasca da bagno” che definisce il tasso di guasto nel tempo.

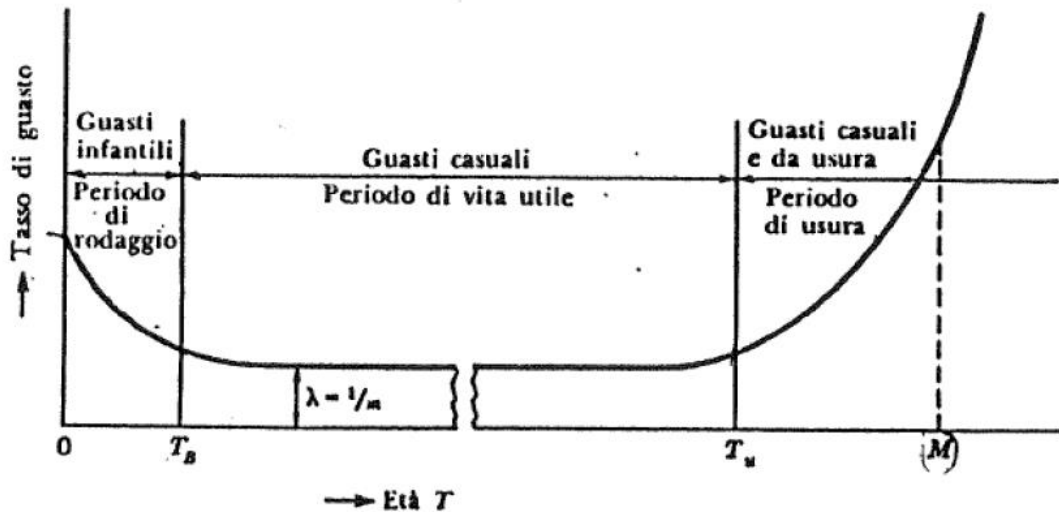


Figura 5 - Bathtub Curve, rateo di guasto durante il ciclo di vita di un'entità

Nella prima fase di vita dell'entità possono presentarsi guasti infantili, in gran parte dovuti a difetti di progettazione e controllo qualità durante il processo di fabbricazione, oppure alla difettosità del materiale. Una volta passata la prima fase di rodaggio, la curva si stabilizza nel periodo di vita utile, a guasto costante che si manifesta in modo casuale. La fine della curva vede risollevarsi il tasso di guasto, a causa dell'invecchiamento dell'entità e della sua usura, abrasione, erosione, ecc. Si verifica soltanto se non è stata soggetta a perfetta manutenzione. I guasti casuali, sempre presenti, sono provocati da improvvisi accumuli di sollecitazioni o tensioni oltre la resistenza massima di progetto del componente e non sono prevedibili.

Tramite la manutenzione si vuole estendere il periodo di vita utile dell'entità.

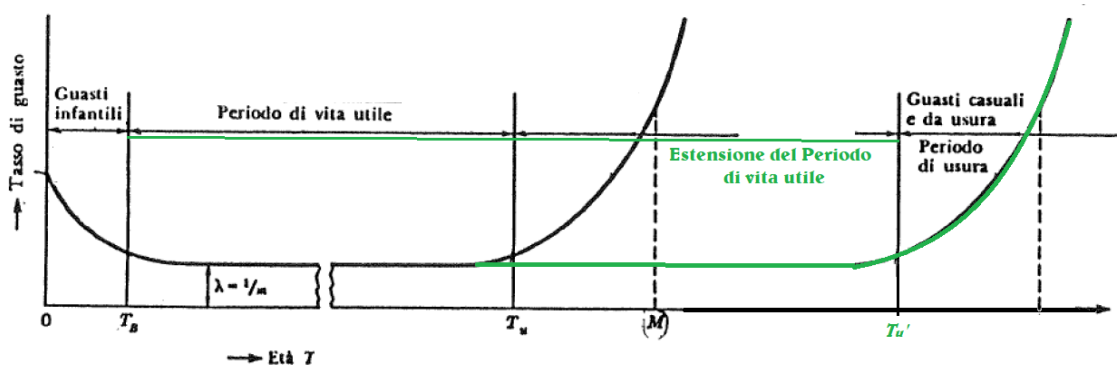


Figura 6 - Effetto della manutenzione sulla Bathtub Curve



## 1.4 Le Politiche Manutentive

La manutenzione assume un aspetto diverso a seconda del grado in cui vuole essere affrontata. In passato era infatti considerata un'attività di semplice riparazione del guasto poiché vista come una voce di costo non produttiva. Addirittura, era usanza comune sovradimensionare l'impianto produttivo, così che qualora si registrasse una perdita di efficienza dovuta a invecchiamento, si potesse continuare comunque a produrre per un periodo prolungato prima di arrivare a guasto.

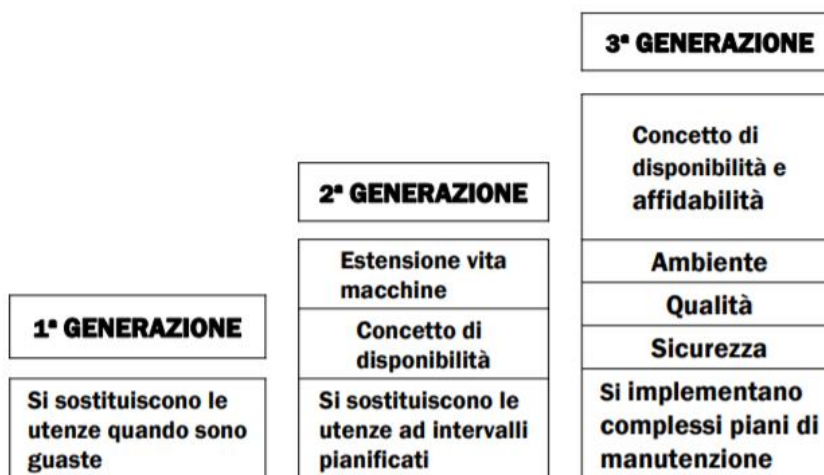


Figura 7 - Evoluzione del concetto di "Manutenzione" nel tempo

Con il passare degli anni la manutenzione ha assunto una chiave di lettura più improntata all'estensione della vita utile della macchina, sostituendo preventivamente i componenti prima di andare a rottura. Per poterlo fare correttamente però è stato necessario effettuare vari studi, che hanno portato al concetto di disponibilità.

Oggi invece viviamo in un periodo storico in cui si tende all'eccellenza, e in un mercato competitivo nel quale è fondamentale diminuire i costi, sia diretti che indiretti, per aumentare la marginalità o fornire uno stesso prodotto ad un prezzo più competitivo. Pertanto, anche la manutenzione ha subito un'evoluzione. Si pone inoltre grande attenzione alla qualità, alla sicurezza e alle politiche ambientali. Non basta più produrre un bene, ma bisogna garantire un certo standard qualitativo, diminuendo gli sprechi e facendo attenzione alla salute degli operatori. Di conseguenza, lo studio della manutenzione diventa sempre più complesso, intrecciandosi con le altre funzioni aziendali.

Per *Politiche Manutentive* si intendono tutto l'insieme di procedure e direttive che costituiscono e definiscono le modalità di intervento e la pianificazione delle attività. Diverse politiche avranno diversi benefici, quindi seconda degli obiettivi aziendali si sceglierà una strada piuttosto che un'altra.

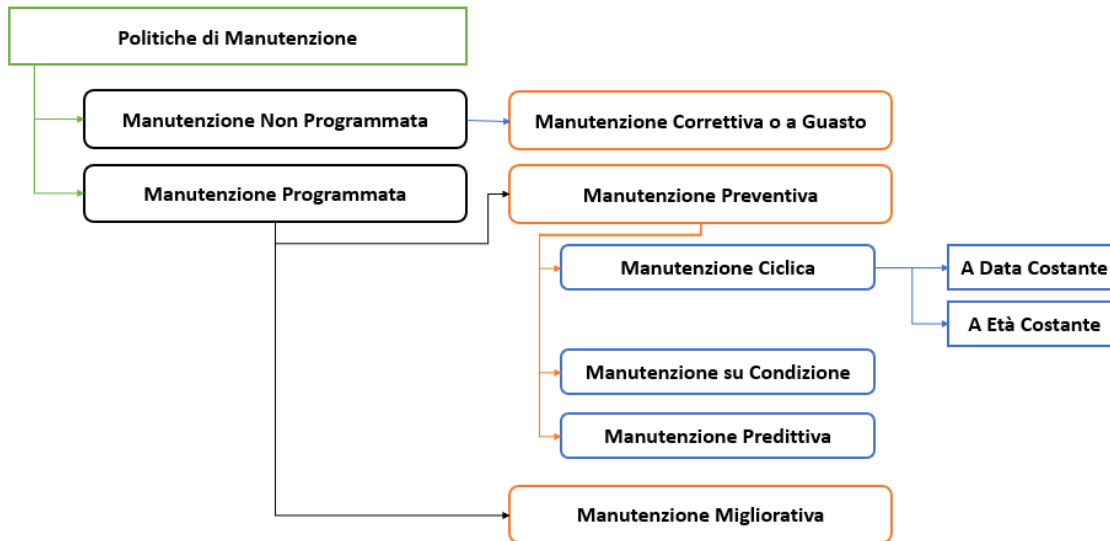


Figura 8 - Schema delle diverse tipologie di politiche manutentive

#### 1.4.1 Manutenzione Correttiva o a Guasto

È definita come *Manutenzione eseguita a seguito della rilevazione di un'avaria e volta a riportare un'entità in uno stato in cui essa possa eseguire una funzione richiesta* (UNI13306:2018).

È la politica manutentiva più semplice, volta ad allungare la vita utile dell'entità ed effettuata solo dopo il manifestarsi del guasto. È efficace se applicata a sistemi e componenti non critici, a basso costo e facili da riparare, poiché in tal modo si aumenta la disponibilità dell'impianto e le fermate per riparazioni sono comunque di breve durata. Il fermo macchina indesiderato implica una perdita dei ricavi proporzionali alla durata dello stesso, per cui risulta accettabile solo se di durata contenuta o, preferibilmente, per componenti che non pregiudichino la continuità nella produzione. Non richiede attività di pianificazione e i costi non si presentano finché non avviene il guasto. Se l'entità è facile da individuare e si riescono a prendere le adeguate contromisure in tempo, può essere una via percorribile. Tuttavia, vi sono anche numerosi svantaggi; si tende a

“mettere una pezza” dove e quando necessario, andando a ridurre l’effetto e non la causa. Di conseguenza è molto probabile che il problema si ripresenti in futuro, ad intervalli casuali e quindi non prevedibili. Non essendo programmata, il guasto potrebbe avvenire in momenti in cui il personale è disponibile come in altri in cui è già saturo di lavoro, ed è quindi assolutamente da evitare per componenti chiave. Un guasto grave potrebbe avere conseguenze deleterie sul resto del sistema, compromettendone la funzionalità e con la possibilità di provocare un effetto a cascata. Non sapendo quando può avvenire il guasto, è necessario avere un magazzino ricambi fornito per ogni evenienza. Va quindi valutato correttamente, ad opera di manutentori esperti, su quali componenti è possibile utilizzare questo metodo.

#### 1.4.2 Manutenzione Preventiva

È definita come *Manutenzione destinata a valutare e/o mitigare il degrado e a ridurre la probabilità di guasto di un’entità* (UNI13306:2018).

Questa politica manutentiva si basa sulla teoria che sia determinabile a priori la vita media di un componente, per cui è possibile anticipare il guasto di una macchina o una linea di produzione ed intervenire prima che si verifichi, eliminando di conseguenza i mancati ricavi dovuti al guasto. Il fine ultimo è quello di evitare che si presentino dei guasti, mantenendo lo stato operativo e produttivo dell’impianto il più a lungo possibile. Per farlo si programma la sostituzione del componente ancora perfettamente funzionante con uno nuovo, così da prevenire la rottura casuale. In particolare, la manutenzione preventiva ciclica viene gestita a periodo costante o ad età costante, intesa come cicli di lavoro compiuti. La cadenza dell’intervento viene così gestita in base al tempo o alla mole di lavoro svolto, poiché spesso e volentieri capita che due componenti identici montati in linee produttive differenti lavorino con carichi di lavoro anche drasticamente differenti.

Per riuscire a prevedere la vita del componente, è necessario un periodo di raccolta dati sui guasti già avvenuti che servirà come fondamenta per la determinazione corretta dei parametri, che permetterà in seguito di schedulare gli interventi preventivi. Tutto ciò si accompagnerà anche all’esperienza dei manutentori, che conoscendo certamente meglio la macchina può fornire informazioni aggiuntive. Sapendo il tipo di intervento che si

andrà a fare, sarà necessario gestire anticipatamente i ricambi per effettuare le sostituzioni, anticipando anche i costi.

Il fermo impianto viene quindi pianificato e se ne riduce la durata, poiché conoscendo il tipo di intervento che verrà svolto non sarà necessaria una prima fase di analisi e ricerca. Diminuisce il costo di fermo impianto, che risulta più breve e con i manutentori che sanno già cosa dovranno fare, ma di contro aumenta il costo totale di manutenzione rispetto alla manutenzione correttiva in quanto è necessaria la fase preliminare di studio e vengono effettuate sostituzioni in componenti per i quali poteva non essere necessaria.

### 1.4.3 Manutenzione su Condizione

È definita come *Manutenzione preventiva che comprende la valutazione delle condizioni fisiche, l'analisi e le possibili azioni di manutenzione conseguenti* (UNI 13306:2010).

La valutazione delle condizioni può essere effettuata mediante osservazione dell'operatore oppure ispezione, collaudo, monitoraggio dei parametri del sistema, ecc., svolte secondo un determinato programma, sia esso su richiesta o in continuo. Il fine ultimo è quello di individuare preventivamente lo stato di degrado di un componente, che avviene nel tempo e non è istantaneo, che potrebbe portare a un guasto attraverso il rilievo delle condizioni di funzionamento. È necessario però conoscere a fondo le cause che potrebbero portare a un possibile guasto, introducendo dove necessario degli indici che possano segnalare una deviazione, avere personale che effettua le ispezioni con competenze tecniche elevate, fornire strumentazioni adeguate al rilievo dei parametri scelti. Così facendo si riducono sia gli interventi a guasto che quelli in preventiva ciclica, poiché il componente è sostituito solo quando effettivamente necessario, riducendo i costi di manutenzione e aumentando contemporaneamente la disponibilità.

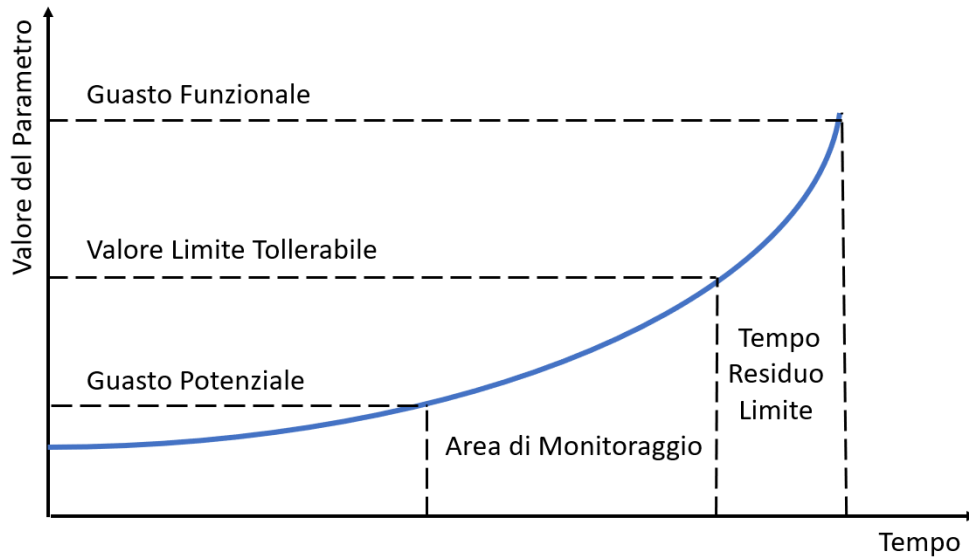


Figura 9 - Manutenzione su condizione, Valore del parametro di analisi nel tempo

Gli interventi manutentivi e i corrispettivi fermi vengono così decisi a seguito delle varie misurazioni, cercando di portarsi verso la zona limite in modo da accorpare gli interventi e non ridurre troppo la loro vita utile, sfruttandoli al meglio senza però addentrarsi troppo nella zona vicina al guasto funzionale. La manutenzione su condizione è quella più diffusa attualmente nel settore industriale.

#### 1.4.4 Manutenzione Predittiva

È definita come *Manutenzione su condizione eseguita in seguito a una previsione derivata dall'analisi ripetuta o da caratteristiche note e dalla valutazione dei parametri significativi afferenti il degrado dell'entità* (UNI 13306:2018).

È l'evoluzione della manutenzione su condizione, con la principale differenza che si punta a monitorare ed ispezionare le macchine senza interrompere il normale funzionamento. Questo è possibile utilizzando tecniche e misurazioni tali da segnalarne anticipatamente e in modo continuo il progressivo degrado. Sviluppando metodologie flessibili e affidabili per i rilevamenti, si punta a minimizzare il numero di ispezioni e revisioni, che potrebbero essi stessi portare a deterioramenti. Le tecniche su cui si basa sono essenzialmente:

- Monitoraggio visivo, fatto con ispezioni giornaliere e volto alla ricerca di difetti visibili nelle saldature, disallineamenti, cricche, perdite idrauliche, ecc.
- Monitoraggio delle prestazioni, verificando parametri specifici come pressione dei fluidi, temperatura, flusso e confrontandoli con quelli di progetto
- Monitoraggio delle vibrazioni, mediante trasduttori, e del rumore
- Monitoraggio del calore prodotto, con analisi sensoriali o termografiche, poiché un aumento potrebbe essere causato dal deterioramento di alcuni componenti che provocano maggiore attrito
- Monitoraggio dell'usura del sistema

Valutando l'evoluzione dei parametri in tempo reale, se si nota una variazione anche debole dal range normale di utilizzo si può presupporre la presenza di una anomalia e valutare con cura quando effettuare una sostituzione. Ciò presuppone però che precedentemente siano stati scelti i parametri da monitorare e sia stata effettuata un'analisi per definire il range standard degli stessi.

Un grande vantaggio della manutenzione predittiva è che non è necessario fermare l'impianto per effettuare i controlli, poiché i parametri sono valutati in diretta con una serie di sensori e metodi che non necessitano di avere la macchina ferma. Affiancando questo tipo di analisi al normale invecchiamento e usura dovuti all'utilizzo, è possibile correggere le previsioni sul lungo periodo nel tempo.

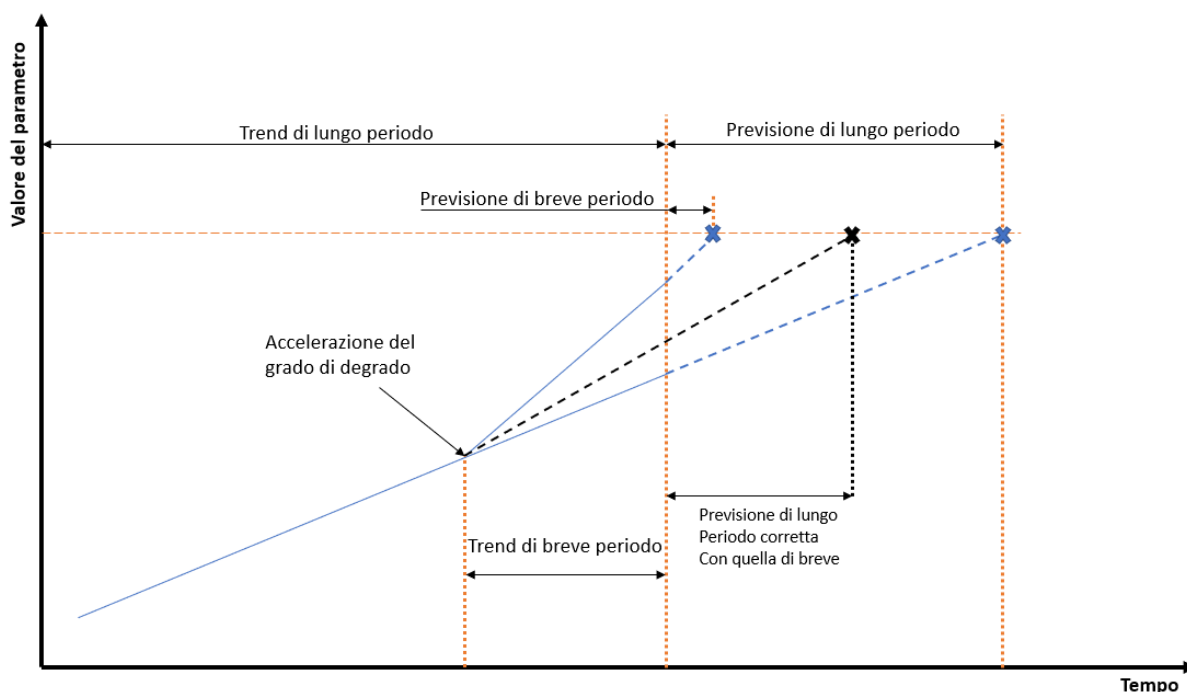


Figura 10 - Manutenzione Predittiva, previsione di vita di un'entità

Non è tuttavia così semplice da applicare e può essere molto dispersiva se applicata su entità per cui non ce n'è l'effettivo bisogno, avendo anche un costo per effettuare costantemente il monitoraggio. È ottima se applicata correttamente dove necessario, migliorando la sensibilità rispetto alla manutenzione preventiva.

#### 1.4.5 Manutenzione Migliorativa

È definita come *l'insieme di azioni di miglioramento o piccola modifica che non incrementano il valore patrimoniale del bene* (UNI 10147:2013).

Non è una vera e propria politica manutentiva, quanto una serie di strategie di miglioramento continuo attraverso una costante analisi delle cause che originano il guasto, con il fine ultimo di eliminarle. Questo è possibile attraverso un'opera di reingegnerizzazione dello stesso, eliminando così il problema alla base. Rispetto alla manutenzione predittiva l'analisi viene fatta non per valutare i parametri da analizzare, ma per conoscere le cause delle azioni che provocano il degrado e andare a rimuoverle, aumentando affidabilità e disponibilità. L'obiettivo è quello di puntare alla

configurazione ideale, ma irraggiungibile, che sia priva di guasti, migliorando la manutentibilità dell'impianto.

È preferibile applicare questa strategia in fase di progettazione, dove le modifiche sono molto più rapide e meno costose, prevenendo i problemi prima della loro realizzazione. Infatti, se fosse necessario modificare un impianto già in uso, i costi risulterebbero molto più alti, talvolta impraticabili poiché il punto di pareggio dell'investimento sarebbe troppo lontano nel tempo. Oltretutto, l'identificazione delle cause non è così immediata e richiede un'analisi profonda, per cui bisogna valutarne gli effettivi benefici.

## 1.5 Ingegneria di Manutenzione

Per Ingegneria di Manutenzione si intende quella funzione aziendale che, utilizzando un insieme di tecniche e strumenti software ha il compito di dedurre, dalle analisi quantitative svolte, adeguate proposte di miglioramento della manutenzione, sia dal punto di vista tecnico che gestionale [2]. Spesso e volentieri la manutenzione è vista come una voce di costo di cui non si può fare a meno ma che non produce effetti visibili, e come tale si cerca di diminuire sempre più il budget dedicato. Questo perché punta a estendere la vita utile del sistema produttivo, conservandolo nel suo ruolo attivo il più a lungo possibile.

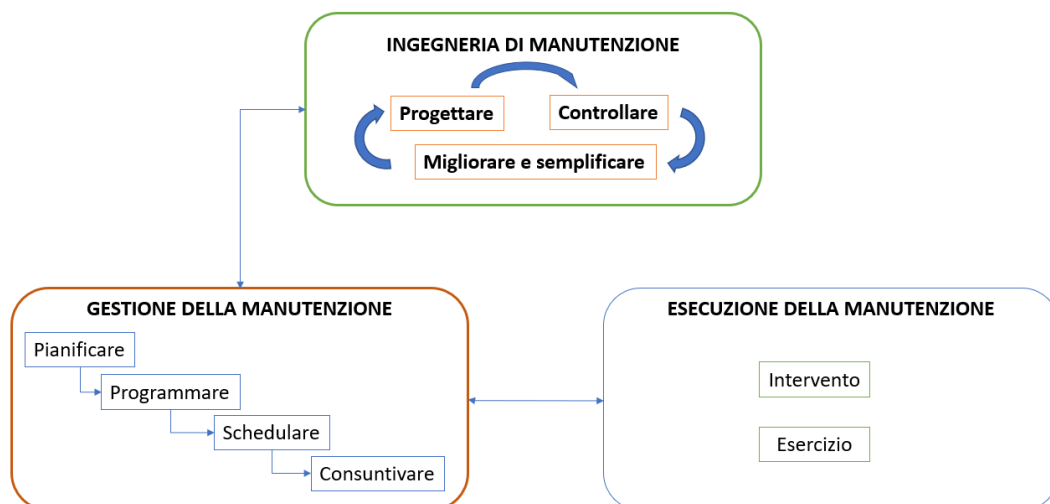


Figura 11 - Ingegneria di Manutenzione, Gestione ed Esecuzione



Il ruolo dell'ingegneria di manutenzione è quello di scegliere al meglio le politiche manutentive, pianificando le varie attività di manutenzione e gli interventi da svolgere, monitorando dove necessario i parametri più importanti. L'organizzazione industriale moderna è molto più competitiva rispetto al passato, ed è necessario elevare il livello delle performance, facendo sì che oggi la manutenzione sia presente già in fase di progettazione, costruzione ed installazione dell'impianto, migliorandolo continuamente nelle sue funzioni e semplificando dove possibile le attività. Evolve quindi la figura del manutentore, che passa da essere un tecnico di linea o un capo impianto a una figura più simile a un manager, che sceglie come ottimizzare le voci di costo per raggiungere al meglio gli obiettivi, siano essi di produzione o di spesa. I piani di manutenzione realizzati vanno alla *Gestione della Manutenzione*, che deve mettere in pratica le informazioni ricevute, generando quindi un report sulle attività svolte e andando a consuntivarli, inviando poi queste informazioni all'Ingegneria di Manutenzione per le successive analisi. Chi esegue la manutenzione invece riceve le informazioni dal piano gerarchico precedente, inviando report sullo stato di avanzamento degli interventi e le informazioni relative agli interventi preventivi o a guasto. Oltre ad avere questo triplice compito, l'ingegneria di manutenzione collabora nella realizzazione di nuovi impianti, promuovendo nel contempo il miglioramento delle competenze professionali dei manutentori, siano essi interni o esterni all'azienda.

Ha quindi un ruolo fondamentale all'interno dell'azienda, che per essere svolto al meglio ha bisogno di interazione e sinergia con le altre funzioni aziendali, dalla Produzione alla Qualità, passando per l'Ufficio Acquisti e l'IT. Solo gestendo correttamente i dati e le richieste dei vari reparti diventa possibile creare un piano di manutenzione realmente efficace, facendo sì che anziché una voce di costo necessario la manutenzione possa diventare a tutti gli effetti un centro di profitto, migliorando le performance dell'intera azienda.

## **1.6 La scelta della politica manutentiva**

Prima di tutto si vogliono ricapitolare in breve i punti di forza e le debolezze delle politiche manutentive precedentemente descritte.

	<b>Vantaggi</b>	<b>Svantaggi</b>
<b>A guasto</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se applicata correttamente risulta economica</li> <li>• Non richiede particolari attività di gestione preventiva dell'impianto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fermi impianto inaspettati, nessuna segnalazione di guasto</li> <li>• Perdite e ritardi di produzione</li> <li>• Magazzino ricambi di difficile gestione</li> <li>• Gestione difficile del personale e delle risorse</li> </ul>
<b>Preventiva</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Riduce il numero dei guasti</li> <li>• Il personale viene utilizzato al meglio in modo schedato</li> <li>• Si può pianificare il lavoro da svolgere in anticipo</li> <li>• Si riduce il magazzino</li> <li>• Il numero di fermi impianto viene ridotto e organizzato</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alcuni interventi potrebbero essere fatti su componenti ancora nuovi</li> <li>• In generale aumentano i costi di gestione</li> <li>• Si può applicare solo con degrado dovuto all'età del componente</li> </ul>
<b>Predittiva – Su Condizione</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gli impianti vengono fermati prima di guasti più severi</li> <li>• Si ottimizza lo sfruttamento dei componenti</li> <li>• Si riducono i fermi impianto</li> <li>• SI riduce molto il numero di guasti</li> <li>• Miglior gestione del magazzino</li> <li>• È possibile pianificare la produzione per estendere la vita utile dell'entità</li> <li>• Gli interventi di ispezione non necessitano di fermare l'impianto</li> <li>• Si analizza la causa del guasto in modo approfondito</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costosa se non implementata correttamente</li> <li>• Il personale deve essere formato, è necessario del tempo e ha un costo</li> <li>• Necessita di strumentazione più costosa, come un sistema informatico per gestire i dati</li> </ul>

<b>Migliorativa</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Riduce i guasti eliminandone le cause alla radice</li> <li>• È orientata ad aumentare la manutentibilità e affidabilità dell'impianto, così da aumentare anche la produzione</li> <li>• Attività una tantum</li> <li>• Punta al miglioramento continuo</li> <li>• Riduce la necessità di manutenzione, idealmente la elimina</li> <li>• Integrazione tra manutenzione e progettazione</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La riprogettazione potrebbe molto essere costosa se effettuato su una macchina già esistente</li> <li>• Fermo impianto potenzialmente molto lungo per la riprogettazione</li> <li>• È necessario un team di progettazione adeguato</li> <li>• Non sempre è attuabile</li> </ul>
---------------------	---	--

Tra queste politiche manutentive nessuna risulta migliore di altre. A seconda della situazione sarà più corretto l'una piuttosto che l'altra. Accade spesso anzi che per diversi componenti appartenenti alla stessa macchina vengano applicate politiche di manutenzione diverse.

La manutenzione a guasto è preferibile su componenti ben noti ai manutentori, che hanno un basso impatto sulla produzione o su altri parti della macchina, che prevedono un fermo macchina di breve durata, per i quali sarebbe controproducente sostenere costi elevati per prevenirne la rottura. Viceversa, per componenti critici, per i quali risulta elevato l'impatto sulla produzione e sulla sicurezza, portando a fermi macchina lunghi, è preferibile la manutenzione preventiva o addirittura predittiva. L'obiettivo finale è la definizione del Piano di Manutenzione della Produzione, che racchiude il mix di politiche di manutenzione assegnate a ciascuna entità, organizzate nel tempo secondo la ripartizione delle risorse umane, economiche e tecnologiche. La pianificazione deve partire però dagli obiettivi, definiti in sinergia tra le varie funzioni aziendali. Questi potrebbero essere di natura tecnologica, puntando all'aumento dell'affidabilità o disponibilità delle macchine, o semplicemente di natura economica, volendo minimizzare i costi totale e quindi trovare l'ottimo tra la curva dei costi di manutenzione e le curve delle perdite.

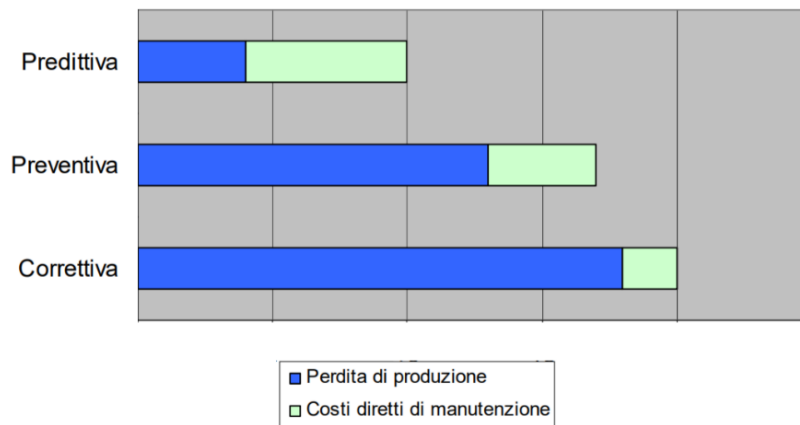


Figura 12 - Effetto delle diverse politiche manutentive sui costi totali

In generale, passando dalla manutenzione a guasto a quella preventiva e a quella predittiva, aumentano i costi diretti di manutenzione, ma diminuiscono i costi per la perdita di produzione.

Per una prima approssimazione della scelta della politica di manutenzione, è possibile utilizzare alcuni grafici creati appositamente, come quello seguente che mette in relazione la gravità dei guasti con la loro frequenza.

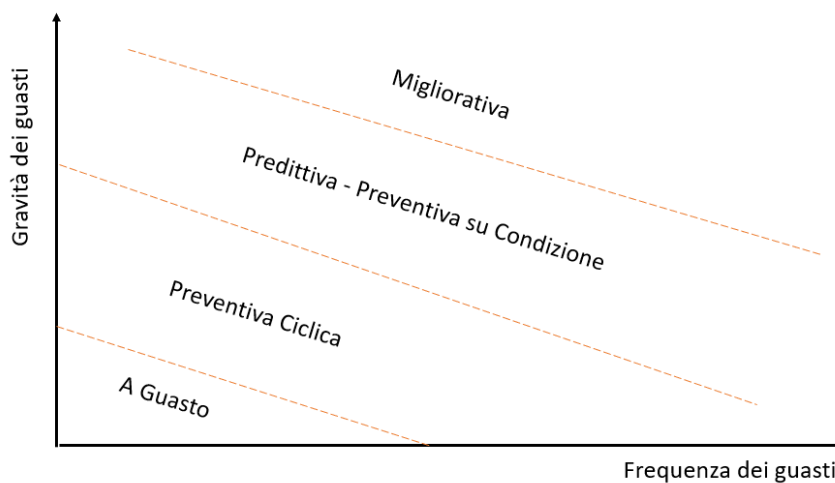


Figura 13 - Prima approssimazione della scelta della politica manutentiva da applicare

È immediato come più risultano elevati i due parametri, più converrà utilizzare una politica manutentiva sofisticata e costosa, fino ad arrivare a situazioni in cui l'unica strada percorribile è quella di modificare il progetto. Esistono alcuni criteri [3] che devono essere presi in considerazione nella stesura delle logiche decisionali:

- Il primo riguarda la diversificazione della criticità del componente o della linea, sia essa ai fini della sicurezza, della produttività o della protezione ambientale. Risultano essere ad un livello d'importanza superiore le criticità relative alla sicurezza e all'ambiente, in quanto non sono derogabili e vanno affrontate con politiche preventive cicliche o su condizione. Al contrario, le criticità relative agli investimenti e alla produttività vanno affrontate in termini di costi/benefici; se l'investimento effettuato per prevenire il guasto attraverso un approccio più sofisticato (manutenzione preventiva o predittiva) avrà un ritorno futuro maggiore, sarà bene sostenerlo. In genere poi i componenti non critici e a basso costo vengono invece mantenuti attraverso la politica a guasto.
- Il secondo invece riguarda i vincoli di legge, assicurativi o di garanzia. Normalmente i fornitori impongono un programma di ispezioni periodiche per mantenere la garanzia. Se chi utilizza l'impianto o il componente non si attiene a tali norme, non viene garantito il corretto funzionamento. Questo rientra nei range di utilizzo stabiliti nelle norme, e quindi spesso le compagnie assicurative si appoggiano ad esse per vincolare il premio alle politiche manutentive effettuate. Ad esempio, la taratura periodica delle valvole di sicurezza garantisce il loro effettivo funzionamento.
- Il terzo riguarda l'applicabilità tecnica della manutenzione su condizione; essa risulta essere infatti la più precisa e vantaggiosa, ma non sempre è possibile applicarla a causa dell'assenza di un segnale debole da monitorare per il controllo che risulti affidabile, garantendo il riconoscimento del guasto imminente. Oppure, può capitare che nonostante sia applicabile, l'intervallo di tempo tra la lettura del segnale debole e l'effettivo guasto risulti essere troppo breve per intervenire, non consentendo l'intervento. In questi casi risulta essere solamente un costo inutile il cercare di applicarla forzatamente, quindi l'alternativa migliore è procedere con la manutenzione preventiva programmata o, dove possibile, correttiva.
- La quarta riguarda i costi aggiuntivi degli interventi preventivi, nei componenti i cui guasti risultano non critici in termini produttivi. Nella preventiva programmata, il costo aggiuntivo dipende dal fatto che si revisionano e sostituiscono componenti ben prima della fine della loro vita utile, ma d'altro canto permette di snellire il magazzino ricambi. La manutenzione preventiva su condizione affina ancora più queste caratteristiche, evitando le sostituzioni inutili,

ma è necessaria un'analisi costi-benefici per valutare l'investimento nei sistemi di monitoraggio.

- La quinta riguarda i problemi organizzativi associati alla politica a guasto. La manutenzione correttiva è la più semplice da applicare, ma come si vede nella tabella precedente ha numerosi svantaggi, tra cui la necessità di operare in condizioni di emergenza e la pronta risposta delle squadre, nonché un magazzino ricambi più ampio per poter intervenire nel più breve tempo possibile e non aspettare i lead time dei fornitori. Dovrebbe essere ridotta sempre più per non creare problemi significativi nella pianificazione della produzione e nell'organizzazione, sebbene sia la preferibile nei componenti non critici.

Lo schema seguente evidenzia una possibile logica decisionale, tra le tante possibili, per la scelta della politica manutentiva più opportuna, secondo quanto appena detto.

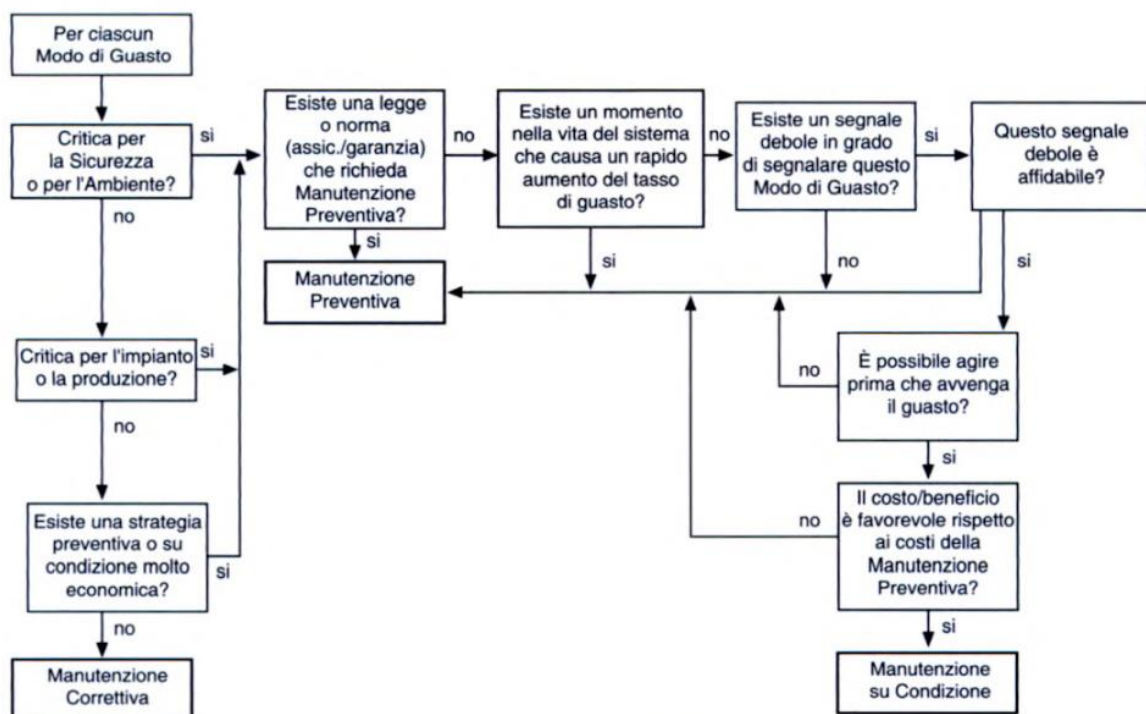


Figura 14 - Possibile logica decisionale nella scelta della politica manutentiva più adatta

## 1.7 I costi di Manutenzione

Un'azienda produttiva è solitamente composta da una serie di macchine o impianti che portano alla produzione di un manufatto. La produzione comporta una serie di costi legati alla produzione e altri legati alle strutture di supporto della stessa, che ne permettono il corretto svolgimento. Con questa distinzione possono essere individuati dei costi, che è possibile raggruppare in generale in:

- Costi Diretti, ossia costi di fabbricazione, imputabili alla fase di produzione. Essi sono dovuti alle materie prime e ai componenti, alla manodopera diretta, all'energia direttamente allocabile, ai materiali ausiliari di consumo, ecc.
- Costi Indiretti, ossia costi imputabili alle strutture a contorno, non prettamente produttive. Esse sono la manodopera non direttamente coinvolta nella produzione, i servizi (logistica, acquisti, marketing, amministrazione, ecc.), costi di ammortamento degli impianti, costi di manutenzione di ciò che non è direttamente collegato alla produzione.

Per evitare l'insorgere di costi trasversali, una corretta opera di manutenzione è fondamentale, facendo in modo che l'impianto funzioni al meglio delle sue capacità senza intoppi ed evitando fermi macchina indesiderati o prodotti al di sotto dello standard qualitativo che risultano non commercializzabili.

In generale, la manutenzione di un impianto produttivo rappresenta una voce di costo ricollegabile al centro di costo che è l'area di manutenzione nell'azienda. Si possono scomporre le varie voci di costo come nello schema seguente.

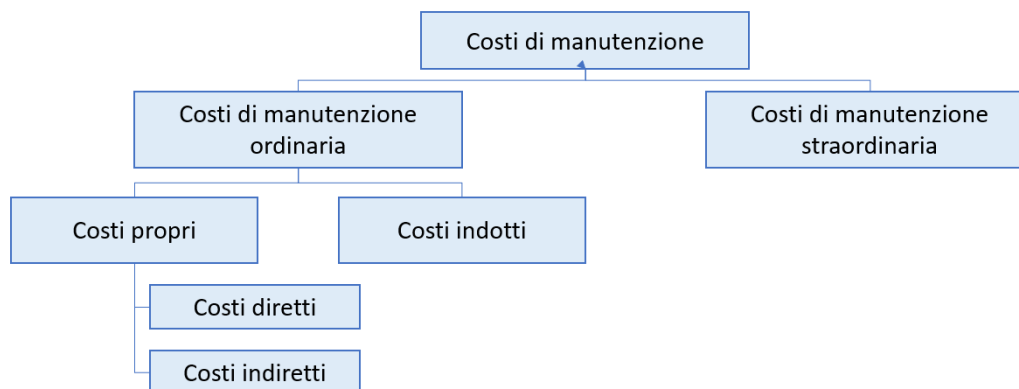


Figura 15 - Distinzione dei costi di manutenzione

Viene definita Manutenzione Straordinaria quella *tipologia d'interventi non ricorrenti e d'elevato costo in confronto al valore di rimpiazzo dell'entità e ai costi annuali di manutenzione della stessa* (UNI 11063:2003). Può prolungare in modo significativo la vita utile di un'entità, oppure migliorarne le prestazioni, determinando quindi un incremento del valore patrimoniale.

Viene invece definita Manutenzione Ordinaria quella *tipologia di interventi manutentivi durante il ciclo di vita atti a mantenere l'integrità originale dell'entità, mantenere o ripristinare l'efficienza, contenere il normale degrado d'uso, far fronte ad eventi accidentali* (UNI 11063:2003). È quella manutenzione che serve a garantire la funzione e le prestazioni proprie dell'entità durante la sua vita utile. A sua volta si può dividere questa voce di costo in due parti, i costi indotti e i costi propri. I primi sono quei costi che dipendono solo dal tipo di guasto, e che pertanto sono difficilmente quantificabili. I costi propri invece sono quelli riconducibili al funzionamento dell'intera struttura manutentiva, e come tali da approfondire. In particolare, si dividono in costi diretti e indiretti.

I costi diretti di manutenzione sono quelli direttamente contabilizzati, dovuti al lavoro della manodopera diretta, alla prestazione di terzi, al costo dei materiali e degli acquisti effettuati. Sono direttamente imputabili all'azione svolta.

I costi indiretti invece non sono così facilmente imputabili, poiché non sono direttamente legati alla manutenzione, anche se sono causati in parte da essa. Nascono principalmente dal fermo macchina, e quindi dalla mancata funzione dell'impianto, causata da un guasto oppure dall'intervento di manutenzione programmata. Il più importante è il costo di mancata produzione, poiché essendo fermo non può fisicamente produrre quanto schedato. Una corretta opera manutentiva riesce a gestire la produzione in modo tale da compensare le eventuali fermate. Collegato ad esso è anche il costo di mancata opportunità, poiché l'impianto non garantisce l'output produttivo che potrebbe. Nel caso non si riesca a soddisfare un ordine vi sono penali contrattuali dovuti alla mancata consegna o al ritardo della stessa. Questi potrebbero comportare la perdita di clienti, dovuta alla perdita d'immagine e di reputazione, che si potrebbe realizzare anche qualora vi siano prodotti venduti difettosi o di qualità inferiore a quella ammessa. Si possono aggiungere anche i costi di immobilizzo dei materiali di ricambio.

L'ingegneria di manutenzione ha il compito di ottimizzare e quindi minimizzare i costi di manutenzione, somma dei costi diretti e indiretti.



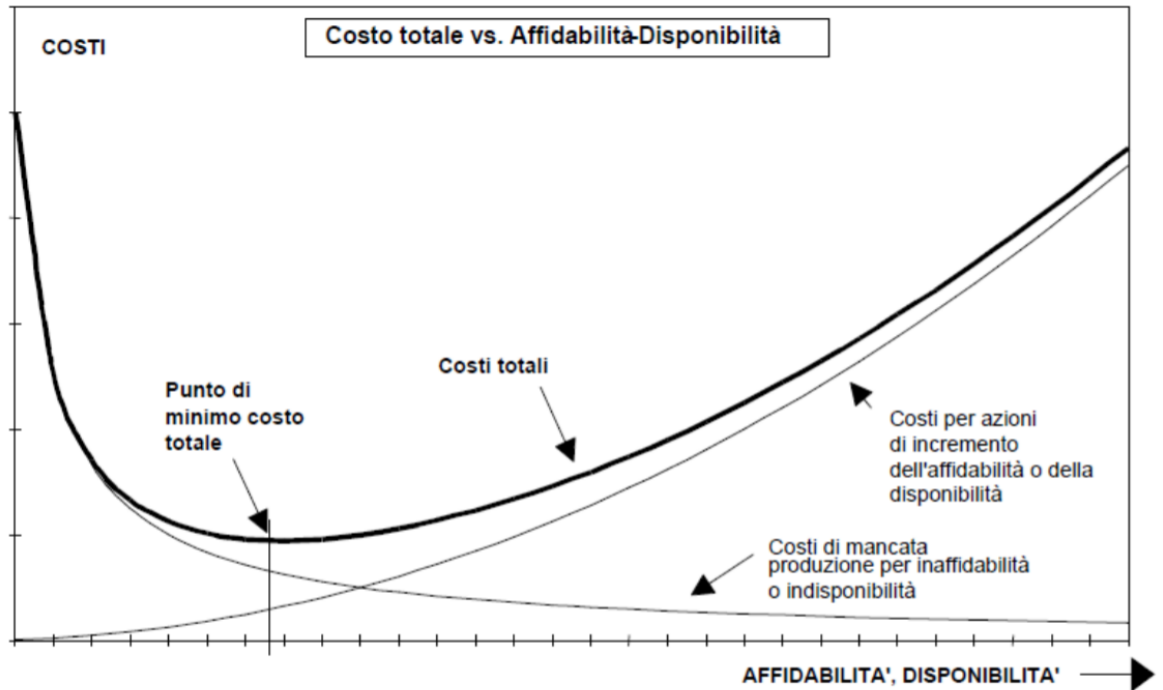


Figura 16 - Curva di Costo totale vs. Affidabilità-Disponibilità

Scegliendo correttamente la gestione della manutenzione per le varie parti dell'impianto produttivo è possibile andare a ridurre i costi diretti. Per ridurre i costi indiretti è invece necessario puntare alla diminuzione del fermo impianto, migliorando la disponibilità e l'affidabilità con interventi volti a prevenire e ridurre i guasti. L'obiettivo sarà quello di identificare e puntare al minimo della curva, che rappresenta il punto di minimo costo totale.



# CAPITOLO 2

## TEORIA DELL'AFFIDABILITÀ

### 2.1 Tempo al Guasto

Il concetto di affidabilità è legato al funzionamento dell'entità, cui si ricollega il processo di rottura della stessa, le cui cause possono essere note o meno note. I numerosi fattori che possono portare al guasto spesso non sono controllabili, per cui il tempo di rottura del componente non è definito come una grandezza deterministica, bensì casuale.

Il tempo di guasto (TTF = *time to failure*) è quindi una variabile aleatoria, indicata dalla lettera greca  $\tau$ . Non è possibile sempre descrivere il comportamento della variabile  $\tau$  con una legge statistica, sia essa normale, esponenziale, ecc. Tuttavia, si può definire la Distribuzione di Probabilità  $f(t)$  (o *ddp*) dei valori di  $\tau$  attraverso le relazioni:

$$P(\tau \leq T) = \int_{-\infty}^T f(x) dx \quad (2.1)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1 \quad (2.2)$$

L'equazione (4.1) indica la probabilità che la variabile  $\tau$  assuma un valore inferiore a  $T$ , dove  $T$  indica l'istante di tempo considerato. L'equazione (4.2) invece è la *condizione di normalizzazione*, condivisa con tutte le varie distribuzioni di probabilità. La funzione  $f(t)$  viene definita anche come *rateo di guasto non condizionato*, dato che indica per un generico componente, quando inizia la sua funzione all'istante  $t = 0$ , la velocità con cui va a guasto nel generico istante di tempo  $t$ .

## 2.2 Componenti Riparabili e Non Riparabili

In letteratura si fa molta attenzione alla distinzione tra componenti *riparabili* e *non riparabili*, poiché sono molto diversi i modelli matematici con cui vengono descritti i loro comportamenti a rottura. Con la seconda definizione si indica quella classe di componenti che effettua un solo ciclo di funzionamento, per cui nel momento in cui vanno a rottura possono solo essere smaltiti. Invece, per quanto riguarda la prima classe di componenti, quelli detti *riparabili*, si alternano due stati di funzionamento e non funzionamento, ossia *uptime* e *downtime*. Quando avviene il guasto, il componente non è più in grado di eseguire la propria funzione, per cui passerà un certo periodo di tempo in cui il guasto viene rilevato, arrivano i componenti di ricambio e viene eseguita l'azione manutentiva: questo periodo di tempo è appunto detto *downtime*.

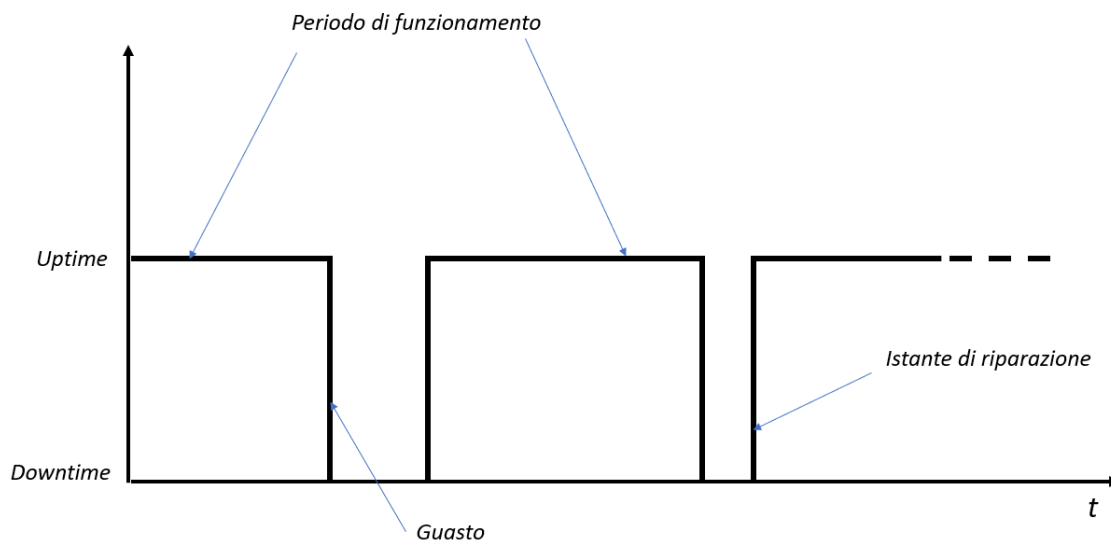


Figura 17 - Uptime e Downtime per un'entità

Per i componenti riparabili questo è il normale ciclo di funzionamento. I componenti non riparabili possono essere intesi come un particolare caso dei riparabili, quando si vuole studiare solo il comportamento al primo guasto. In ogni caso, un sistema composto da un numero elevato di componenti può essere studiato come riparabile nel caso in cui almeno un componente al suo interno sia riparabile.

## 2.3 Affidabilità (Reliability)

Per la definizione di Affidabilità si guardi il capitolo precedente. Si indica con  $R_i(T)$  l'affidabilità di un componente  $i$ -esimo considerato per un periodo di tempo specifico  $T$ . Infatti, è una grandezza che ha una dipendenza rispetto ad un intervallo di tempo, non riferito ad un singolo istante. Si può definire:

$$T = t - t_0 \quad (2.3)$$

Con  $t_0 = 0$ . Solitamente ci si riferisce anche come  $R(t)$ , dove è sottinteso il riferimento all'intervallo temporale  $[0, t]$ . Se si introducono le definizioni di  $\tau$  e di  $ddp f(\tau)$ , si ottiene l'equazione generale di affidabilità:

$$R(T) = \int_T^{\infty} f(x) dx \quad (2.4)$$

Che descrive quindi la probabilità che la variabile del tempo al guasto non sia inferiore a  $T$ .

## 2.4 Rateo di Guasto Condizionato

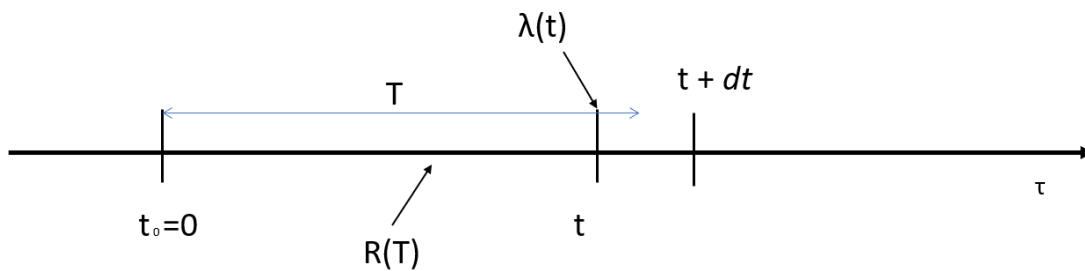
Il Rateo di Guasto (*Hazard Funcion*) rappresenta la *velocità di rottura* di un componente non riparabile al guasto. È una grandezza che fa riferimento all'istante  $t$  di tempo considerato, non a un periodo, e si definisce come:

$$\lambda(t) dt = P(t \leq \tau \leq t + dt / \text{funzionante in } t) \quad (2.5)$$

Dove:

- $dt$  è l'intervallo di tempo infinitesimo considerato
- $\tau$  è il tempo al guasto del componente, variabile aleatoria dell'equazione
- $P(\dots)$  indica la probabilità condizionata della rottura del componente, assumendo che nell'istante di tempo  $t$  esso sia funzionante. Differisce dalla densità di probabilità  $f(t)$  poiché quest'ultima non è condizionata

Si assume che il componente oggetto d'esame abbia iniziato la sua funzione nell'istante  $t_0 = 0$ , quindi che  $T = t$ .



Questo modello si basa su due ipotesi fondamentali:

1. I componenti o i sistemi possono essere rappresentati solamente attraverso due stati di funzionamento, ovvero *funzionante* (stato 0) e *non funzionante* (stato 1)
2. Il passaggio dal primo stato al secondo avviene in modo istantaneo

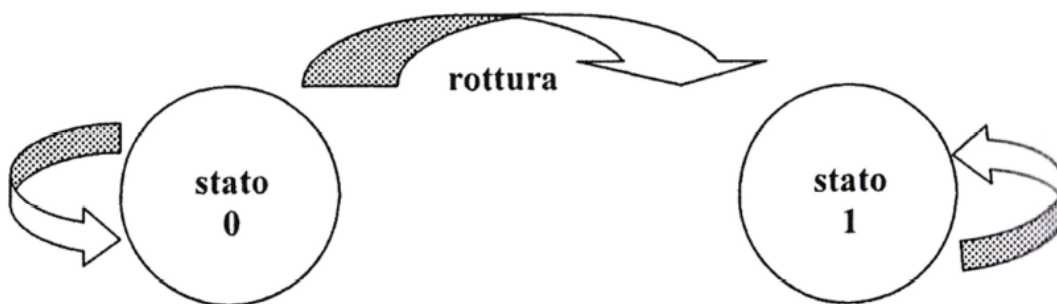


Figura 18 - Entità non riparabili, stati di funzionamento possibili

## 2.5 Espressioni dell’Affidabilità e del Rateo di Guasto

Per la seguente trattazione è necessario prima di tutto specificare che:

- $N$  = numero di componenti messi in funzione nell'istante iniziale  $t_0 = 0$
- $N_G(t)$  = numero di componenti che risultano essere *guasti* quando si considera il generico istante di tempo  $t$

- $N_S(t)$  = numero di componenti ancora funzionanti nello stesso istante  $t$

Da cui si possono definire:

$$N_S(t) = N - N_G(t) \quad (2.6)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left( \frac{N_G(t)}{N} \right) = 1 \quad (2.7)$$

La densità di probabilità di guasto  $f(t)$ , detta anche rateo di guasto non condizionato poiché non assume che all'istante  $t_0 = 0$  il componente sia funzionante, viene definita nel dominio affidabilistico come:

$$f(t) dt = P(t \leq \tau \leq t + dt) = \int_t^{t+dt} f(x) dx \quad (2.8)$$

La Probabilità di Guasto  $F(T)$  può essere definita nel dominio statistico come la funzione cumulata della densità di probabilità  $f(t)$ .

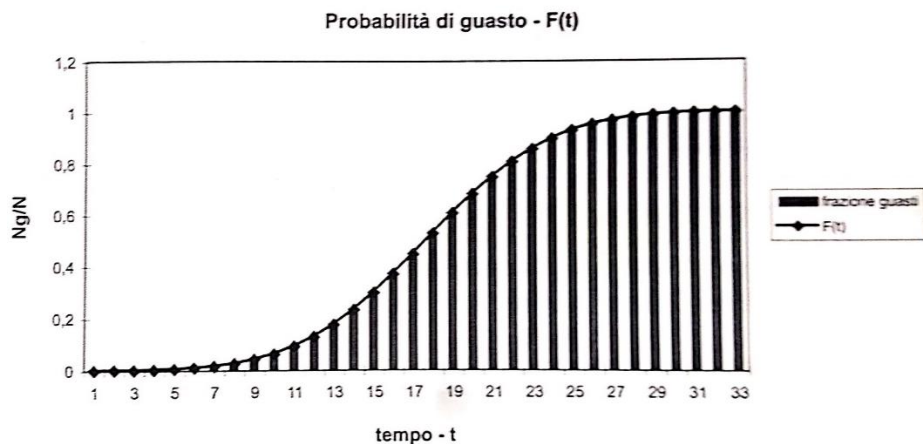


Figura 19 - Probabilità di guasto  $F(t)$

Se invece la si considera da un punto di vista affidabilistico, essa descrive la probabilità che il componente preso in esame si rompa nell'intervallo di tempo  $T = t$  se  $t_0=0$ . SI può quindi definire:

$$F(t) = P(-\infty \leq \tau \leq t) = \int_{-\infty}^t f(x) dx = P(0 \leq \tau \leq t) = \int_0^t f(x) dx \quad (2.9)$$

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} = \frac{dF(t)}{dt} \quad (2.10)$$

Detto ciò è possibile dare una prima equazione per la misura pratica dell'affidabilità e della probabilità di guasto:

$$R(t) = \frac{N_S(t)}{N} = \frac{N - N_G(t)}{N} \quad (2.22)$$

$$F(t) = \frac{N_G(t)}{N} = \frac{N - N_S(t)}{N} = 1 - R(t) \quad (2.12)$$

Queste definizioni portano ad una considerazione semplice ed efficace: se si considera un campione di  $N$  componenti e si tiene traccia nel tempo dei guasti che li riguardano, è possibile quantificare i valori di affidabilità  $R(t)$  e della probabilità di guasto  $F(t)$  di tale campione.

Procedendo ulteriormente, dalle precedenti relazioni si ottiene:

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \frac{N_G(t + \Delta t) - N_G(t)}{N \Delta t} \right) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \frac{N F(t + \Delta t) - N F(t)}{N \Delta t} \right) \quad (2.13)$$

Da cui deriva che:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = - \frac{dR(t)}{dt} \quad (2.14)$$

Attraverso quest'ultima equazione si riesce a dare una relazione di tipo affidabilistico al fatto che la densità di probabilità  $f(t)$  sia la derivata della probabilità di guasto  $F(t)$ .

Parimenti si riesce ad estendere l'espressione del rateo di guasto condizionato per avere valenza più generale:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \frac{N_G(t + \Delta t) - N_G(t)}{N_S(t) \Delta t} \right) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \frac{N F(t + \Delta t) - N F(t)}{N R(t) \Delta t} \right) \quad (2.15)$$



Da cui:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{dR(t)}{dt} \frac{1}{R(t)} \quad (2.16)$$

Integrando opportunamente infine, si ricava:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (2.17)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (2.18)$$

La (2.17) così ricavata rappresenta la definizione di affidabilità più generale e completa, dipendente dalla funzione  $\lambda(t)$  rateo di guasto condizionato, che a sua volta dipende dal tempo  $t$ . Se il rateo di guasto condizionato risulta essere costante, le espressioni (2.17) e (2.18) diventano:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.19)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.20)$$

Mentre dalla (2.14) si ottiene:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2.21)$$

Queste ultime equazioni sono una versione semplificata delle precedenti, che dimostrano come con un rateo di guasto costante si abbia una distribuzione di tipo esponenziale del tempo di rottura  $\tau$ . Ciò vuol dire che la velocità di rottura non dipende più dal tempo, per cui non esiste un'istante in cui è più probabile che avvenga il guasto. Il guasto non diventa più probabile a causa dell'invecchiamento del componente ma è un evento puramente casuale.

## 2.6 Tempo Medio di Guasto

Il tempo medio di guasto, detto *MTTF* (Mean Time to Failure) viene definito a partire dalla densità di probabilità  $f(t)$  e si basa sulla media del tempo al guasto  $\tau$ :

$$MTTF = \int_0^{\infty} t f(t) dt = - \int_0^{\infty} t \frac{dR(t)}{dt} dt \quad (2.22)$$

Se si assume anche in questo caso un rateo di guasto costante, la precedente espressione diventa:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \left| -\frac{1}{\lambda} e^{-\lambda t} \right|_0^{\infty} = \frac{1}{\lambda} \quad (2.23)$$

## 2.7 Componenti Riparabili, variabili affidabilistiche

Nel caso in cui si consideri un componente *Riparabile*, è necessario specificare le ipotesi di partenza:

- Il generico componente può essere riparato
- I componenti o i sistemi possono essere rappresentati solamente attraverso due stati di funzionamento, ovvero *funzionante* (stato 0) e *non funzionante* (stato 1)
- La transizione dallo stato di funzionamento a quello di rottura e viceversa avviene in modo istantaneo
- Nel medesimo intervallo di tempo  $\Delta t$  non è possibile avere due transizioni
- Il componente una volta riparato è considerato come nuovo

Se per il caso di componente non riparabile si ha la variabile *tempo di rottura*  $\tau$ , nel caso di componente riparabile il tempo di rottura ricomincia dopo ogni riparazione. Il processo di riparazione in particolare sarà una variabile aleatoria, e viene definita come  $\tau_r$ , ed anche in questo caso è un processo stocastico e si può modellare  $\tau_r$  tramite funzioni statistiche come per il processo di rottura. Si definisce quindi:

- $g(t)$  = *rateo di aggiustamento non condizionato*, ossia la distribuzione di probabilità del tempo di riparazione  $\tau_r$ , variabile aleatoria del sistema
- $G(T)$  = *Manutenibilità (Maintainability)*, che esprime la probabilità che il componente sia riparabile se si considera un intervallo di tempo pari a T, se sta lavorando secondo determinate condizioni operative. Statisticamente viene definita come:

$$G(T) = P(\tau_r \leq T) = \int_{-\infty}^T g(x) dx \quad (2.24)$$

- $MTTR$  = *Tempo medio di riparazione (Mean Time to Repair)*, esprime il valore medio del tempo di riparazione. Viene definito come:

$$MTTR = \int_0^{\infty} x g(x) dx \quad (2.25)$$

- $\mu(t)$  = *rateo di aggiustamento condizionato*, misura della velocità di riparazione di un componente non funzionante nell'istante considerato. È definita come:

$$\mu(t) \Delta t = P(t \leq \tau_r \leq t + \Delta t / \text{nonfunzionante in } t) \quad (2.26)$$

Come nel caso della (2.16), la precedente equazione diventa:

$$\mu(x) = \frac{g(x)}{1 - G(x)} \quad (2.27)$$

## 2.8 Parallelismo tra processo di aggiustamento e di rottura

Le variabili che descrivono i processi di rottura e aggiustamento possono essere messe in parallelo nella descrizione dei due fenomeni, in particolare *manutenibilità*  $G(t)$  e *probabilità di guasto*  $F(t)$ .

Processo aggiustamento	Processo di rottura
$G(t)$	$F(t)$
$g(t)$	$f(t)$
$MTTR$	$MTTF$
$\mu(t)$	$\lambda(t)$

Parametri affidabilistici per <b>COMPONENTI NON RIPARABILI</b>	
Rateo di guasto condizionato $\lambda(t)$ x è la variabile aleatoria	Rateo di guasto condizionato $\lambda(t) = \lambda$
$R(t) + F(t) = 1$	
$R(0) = 1 \quad F(0) = 0$ $R(\infty) = 0 \quad F(\infty) = 1$	
$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$ $f(t) \cdot dt = F(t + dt) - F(t)$ $F(t) = \int_0^t f(x) \cdot dx$	
$R(t) = \int_t^{\infty} f(x) \cdot dx$	
$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}$	$\lambda(t) = \lambda$
$f(t) = \lambda(t) \cdot \exp\left[-\int_0^t \lambda(x) \cdot dx\right]$	$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}$
$F(t) = 1 - \exp\left[-\int_0^t \lambda(x) \cdot dx\right]$	$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$
$R(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(x) \cdot dx\right]$	$R(t) = e^{-\lambda t}$
$MTTF = \int_0^{\infty} x \cdot f(x) \cdot dx = \int_0^{\infty} R(t) dt$	$MTTF = \frac{1}{\lambda}$

<b>Processo di aggiustamento nei COMPONENTI RIPARABILI</b>	
<b>Rateo di aggiustamento condizionato <math>\mu(t)</math>. <math>\tau_r</math> è la variabile aleatoria</b>	<b>Rateo di aggiustamento condizionato <math>\mu(t) = \mu^{***}</math></b>
$G(0) = 0$ $G(\infty) = 1$	
$g(t) = \frac{dG(t)}{dt}$ $g(t) \cdot dt = G(t+dt) - G(t)$ $G(t) = \int_0^t g(x_r) \cdot dx$	
$\mu(t) = \frac{g(t)}{(1-G(t))}$	
$g(t) = \mu(t) \cdot \exp \left[ -\int_0^t \mu(x) \cdot dx \right]$	$g(t) = \mu \cdot e^{-\mu t}$
$G(t) = 1 - \exp \left[ -\int_0^t \mu(x) \cdot dx \right]$	$G(t) = 1 - e^{-\mu t}$
$MTTR = \int_0^{\infty} x \cdot g(x) dx$	$MTTR = \frac{1}{\mu}$

## 2.9 Distribuzione di probabilità Esponenziale

Si definisce la distribuzione di probabilità di tipo esponenziale di una variabile  $x$  aleatoria e continua nell'intervallo considerato come:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda t} \tag{2.28}$$

Da cui derivano le espressioni della funzione di probabilità cumulata  $F(x)$  e del valore medio  $M(x)$ :

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx = 1 - e^{-\lambda t} \tag{2.29}$$

$$M(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx = \frac{1}{\lambda} \quad (2.30)$$

Se si considerano diversi valori di  $\lambda$  l'andamento della distribuzione di probabilità esponenziale negativa si modifica come nella figura successiva, essendo inverso del valore medio della variabile  $x$ .

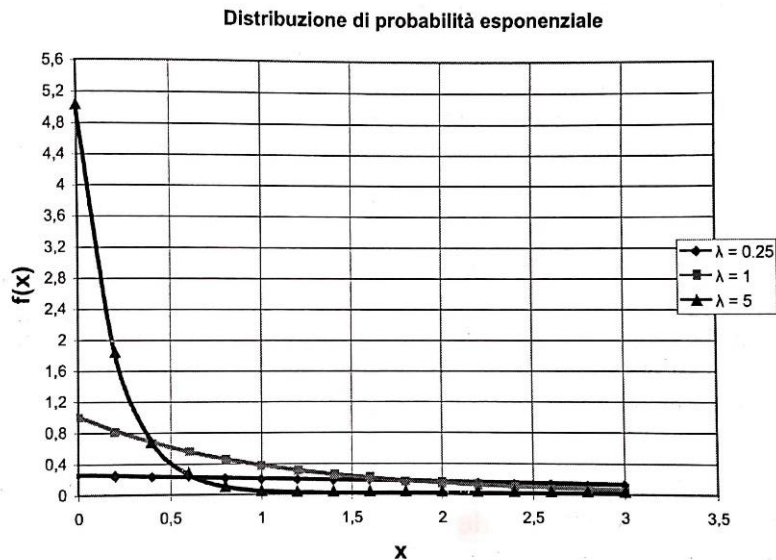


Figura 20 - Funzione di distribuzione di probabilità esponenziale

## 2.10 Distribuzione di Weibull

La distribuzione di probabilità di Weibull è molto utilizzata in ambito ingegneristico a causa della sua flessibilità. Essendo una distribuzione parametrica, è in grado di riprodurre diverse distribuzioni di probabilità attraverso la variazione di due parametri  $\alpha$  e  $\beta$ . Una variabile  $t$  ha una distribuzione di probabilità di Weibull se la sua densità di probabilità è scritta nella forma:

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha^\beta} t^{\beta-1} e^{\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right]} \quad (2.31)$$

Con  $0 \leq t \leq +\infty$

Da cui deriva la funzione di probabilità cumulata:

$$F(t) = 1 - e \left[ -\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta \right] \quad (2.32)$$

E poiché  $F(t) + R(t) = 1$ , ne deriva che:

$$R(t) = e \left[ -\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta \right] \quad (2.33)$$

$\beta$  è detto *Parametro di forma*, poiché variando questo parametro varia la forma della distribuzione di probabilità. Infatti, si ha che:

- $\beta = 1$  implica una distribuzione esponenziale negativa
- $\beta = 2$  implica una distribuzione simile ad una log-normale
- $3,5 < \beta < 4$  implica una distribuzione simile ad una gaussiana

$\alpha$  invece è detto *parametro di scala*, poiché variando questo parametro si modifica il range per cui la distribuzione di probabilità è diversa da zero.

Se si mantiene  $\alpha = 100$  e si va a variare  $\beta$ ,  $f(t)$  e  $F(t)$  si modificano come mostrato nelle figure qui sotto.

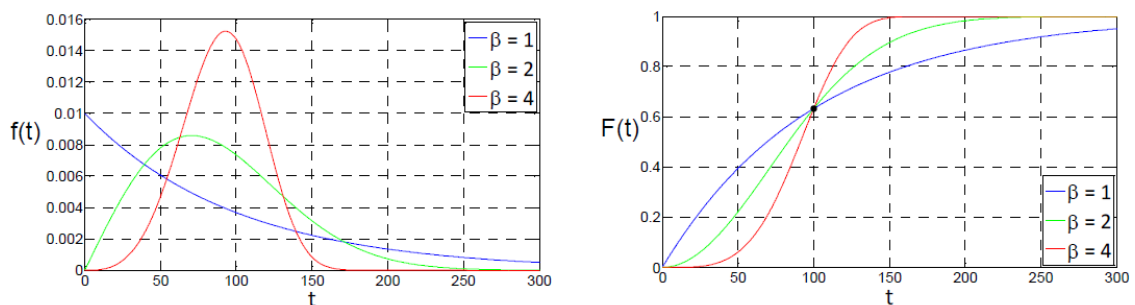


Figura 21 - Distribuzione di Weibull, variazione del parametro di forma

Se invece si mantiene costante il parametro di forma  $\beta = 2$  e si modifica il parametro di scala  $\alpha$ , le curve si modificano come segue.

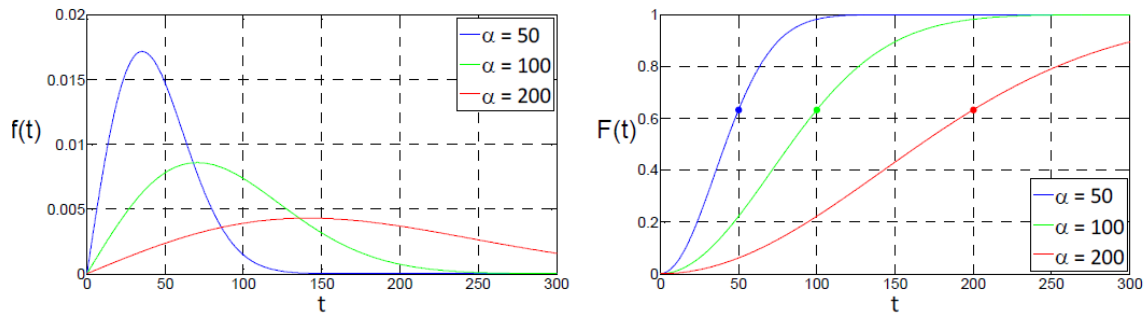


Figura 22 - Distribuzione di Weibull, parametro di scala

La distribuzione di Weibull è in grado anche di descrivere il tasso di guasto del componente a seconda del grado di invecchiamento. Se si prende a riferimento la *bathtub curve*, essa può essere descritta nelle diverse fasi variando il parametro  $\beta$ :

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{\beta}{\alpha^\beta} t^{\beta-1} \tag{2.34}$$

- Se  $\beta < 1$  il rateo di guasto  $\lambda(t)$  risulta decrescente
- Se  $\beta = 1$  il rateo di guasto  $\lambda(t)$  è costante
- Se  $\beta > 1$  il rateo di guasto  $\lambda(t)$  risulta crescente

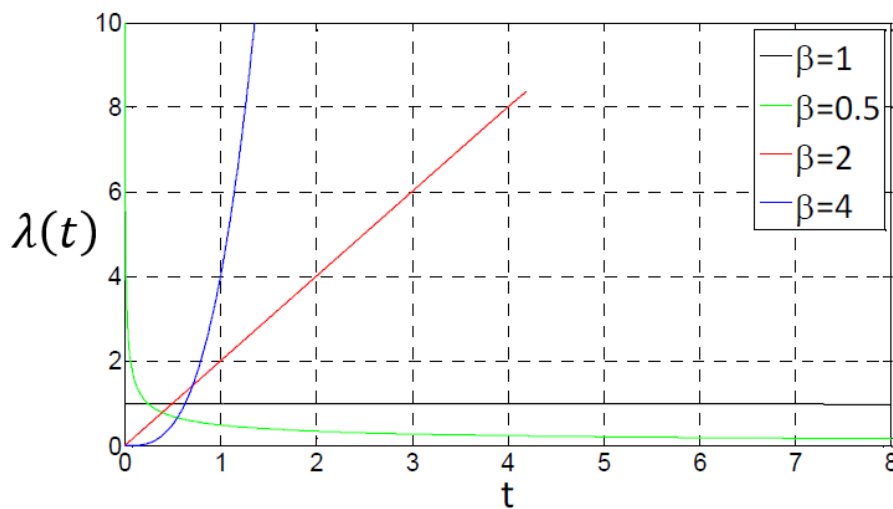


Figura 23 - Distribuzione di Weibull, rateo di guasto in funzione del parametro di forma



## 2.11 Macchina Singola, politica ispettiva elementare

Per questa politica manutentiva la base è che non si conosce lo stato di funzionamento dell'entità a meno di non procedere con un'azione di monitoraggio della stessa, la cosiddetta ispezione. Essa ha quindi lo scopo di effettuare in determinati istanti di tempo eventuali guasti o rilevamenti al di fuori della norma, atti a prevenire l'imminente rottura. La frequenza con cui viene effettuato l'intervento d'ispezione dipende da diversi parametri:

- Costo dell'ispezione
- Corretta acquisizione dei dati durante l'ispezione
- Affidabilità dei parametri indicatori rilevati nel prevedere il guasto imminente

Queste considerazioni portano a diversi modelli di costo; in questa sede si vuole analizzare, tra quelli disponibili in letteratura, quello che punta a minimizzare il costo totale della politica manutentiva. Una ispezione troppo frequente risulta essere non necessaria e molto costosa, ma viceversa effettuarla troppo di rado potrebbe comportare costi derivanti dal guasto molto più elevati.

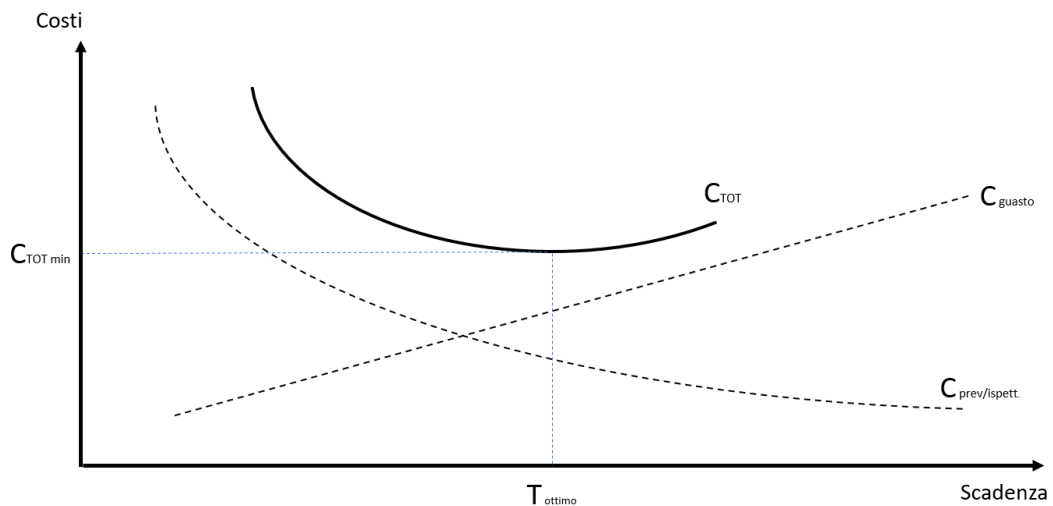


Figura 24 - Macchina singola, politica ispettiva elementare, curve di costo

L'obiettivo è trovare il giusto compromesso tra le due azioni, trovando l'intervallo di tempo ottimale per effettuare le ispezioni tale che minimizzi i costi totali. Se si dovesse

arrivare al guasto, questo inciderebbe sul costo totale di gestione in modo proporzionale al tempo trascorso dall'istante della rottura e l'istante di rilevazione.

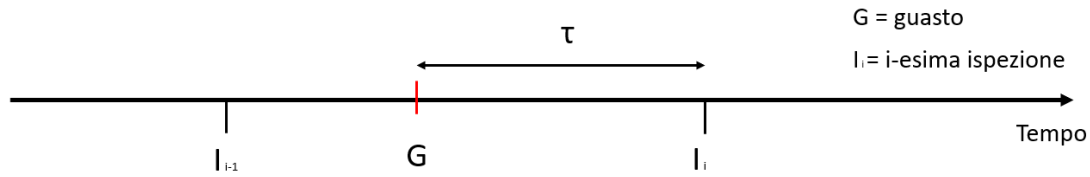


Figura 25 - Politica ispettiva elementare, tempo trascorso tra l'istante della rottura di un componente e l'istante di rilevazione

Si assume che vi sia una correlazione diretta, per il costo di intervento di riparazione successivo al guasto, tra l'istante in cui avviene la rottura a quello di effettivo rilevamento a seguito dell'ispezione. Detta  $\tau$  tale  $\Delta$  di tempo che separa i due avvenimenti, si indica con  $C_G$  la misura di questo costo. Assumendo  $\tau$  in ore, l'unità di misura di  $C_G$  è [€/h]. Solamente nel momento in cui viene effettuata l'ispezione si affronta un costo  $C_I$ , ma è solo attraverso questa azione che si può rilevare il guasto.

In questa analisi si vuole garantire che vi sia una probabilità di guasto costante  $p$  tra due generiche ispezioni  $i-1$  e  $i$  successive, per cui vale la relazione:

$$\frac{F(t_i) - F(t_{i-1})}{R(t_{i-1})} = p \quad (2.35)$$

Assumendo che all'istante di tempo  $t_{i-1}$  il componente non si sia ancora rotto e che la rottura avvenga prima dell'istante  $t_i$ , se è costante la probabilità condizionata di guasto l'equazione precedente si può riscrivere come:

$$F(t_i) - F(t_{i-1}) = (1 - p)^{i-1} p \quad (2.36)$$

Da cui si ricava il valore del numero di ispezioni svolte antecedenti alle rilevazioni del guasto, stima della variabile aleatoria  $i$  distribuita con una funzione distribuzione di probabilità  $f(i)$  discreta:

$$\mu_i = \sum_{i=1}^{\infty} i f(i) = \sum_{i=1}^{\infty} [i (1 - p)^{i-1} p] = \frac{1}{p} \quad (2.37)$$

Gli interventi ispettivi in generale non sono distribuiti in modo costante nel tempo, ma si tende ad avvicinarli man mano che invecchia.

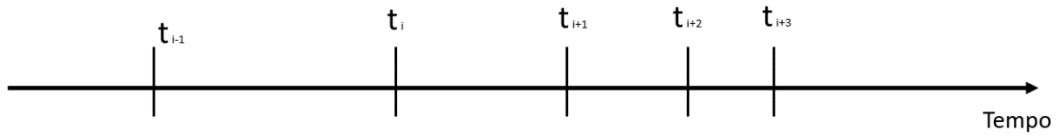


Figura 26 - Aumento di frequenza degli interventi ispettivi con il passare del tempo

Se si prende il singolo ciclo di funzionamento di un componente generico, inteso come il tempo trascorso dall'inizio dell'attività dello stesso da nuovo e la rilevazione del suo guasto, è possibile calcolare il costo totale dello stesso attraverso l'equazione:

$$C_{Totale} = C_I \mu_i + C_G \tau(p) \quad (2.38)$$

Dove:

- $C_I$  = costo della singola ispezione
- $\mu_i$  = rateo di aggiustamento condizionato
- $C_G$  = Costo di un intervento in caso di guasto per unità di tempo, che comprende sia i costi di riparazione o sostituzione del componente che i costi relativi ad un funzionamento imprevedibile e non ottimale dello stesso
- $\tau(p)$  = tempo medio di durata del guasto prima che avvenga la sua scoperta attraverso l'ispezione

Il guasto può avvenire in qualunque intervallo  $[t_{i-1}, t_i]$ , con  $i=1, 2, \dots$ , di conseguenza si può stimare la durata media del guasto  $\tau(p)$  attraverso l'equazione:

$$\begin{aligned} \tau(p) &= \sum_{i=1}^{\infty} \left[ \int_0^{t_i} (t_i - x) f(x) dx \right] \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} t_i [F(t_i) - F(t_{i-1})] - \int_0^{\infty} x f(x) dx \end{aligned} \quad (2.39)$$

Da cui si ricava

$$\tau(p) = \sum_{i=1}^{\infty} t_i q^{(i-1)} p - \text{MTTF} \quad (2.40)$$

Con

$$q = 1 - p \quad (2.41)$$

Per trovare il valore ottimale  $p^*$  della probabilità condizionata  $p$  che minimizza la curva è necessario derivare l'equazione (2.35) e porla uguale a zero:

$$\left( \frac{dC_{Totale}}{dp} \right)_{p^*} = 0 \quad (2.42)$$

## 2.12 Applicazione su componente con ddp esponenziale negativa

Si vuole considerare inizialmente un componente il cui comportamento a guasto possa essere definito attraverso una distribuzione di probabilità del tipo esponenziale negativa, utilizzata nel caso in cui il tasso di guasto sia indipendente dal tempo, risultando pertanto costante. Si può dire che i componenti che seguono questo tipo di distribuzione non abbiano “memoria” del tempo in cui hanno lavorato, che si traduce nel fatto che non sono sottoposti ad invecchiamento.

Si consideri ora l'istante  $t_0 = 0$ . Riprendendo l'equazione (2.36) risulta:

$$F(t_1) - F(t_0) = F(t_1) = (1 - p)^0 p = p \quad (2.43)$$

La funzione di probabilità cumulata per la ddp esponenziale negativa vale:

$$F(t) = \int_0^t \lambda e^{-\lambda t} dt = [-e^{-\lambda t}]_0^t = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.44)$$

Unendo (2.43) e (2.44) si ottiene il valore di  $t_i$ :

$$t_1 = -\frac{\ln(1-p)}{\lambda} \quad (2.45)$$

Sviluppando i calcoli si giunge alla relazione:

$$t_i = i t_1 \quad (2.46)$$

Questa equazione risulta coerente con il fatto che i guasti sono considerati casuali, e pertanto tutti gli intervalli hanno la medesima ampiezza  $[t_i ; t_{i+1}]$ . Infatti, se non si considera l'invecchiamento del componente, non c'è motivo per ridurre l'intervallo d'ispezione. Si considera allora l'equazione (2.38), relativa al *Costo totale della politica ispettiva elementare relativa ad un ciclo di funzionamento del generico componente*, che viene esplicitata per questo tipo di ddp, considerando che  $MTTF = \frac{1}{\lambda}$ :

$$\begin{aligned} C_{Totale} = C_I \mu_i + C_G \tau(p) &= \frac{C_I}{p} + C_G \left\{ \sum_{i=1}^{\infty} t_i q^{(i-1)} p - MTTF \right\} = \\ &= \frac{C_I}{p} + C_G t_1 \sum_{i=1}^{\infty} i q^{(i-1)} p - \frac{C_G}{\lambda} \end{aligned} \quad (2.47)$$

E ricordando la (2.34) si ottiene che:

$$C_{Totale} = \frac{C_I}{p} + C_G \left[ -\frac{\ln(1-p)}{\lambda} \right] \frac{1}{p} - \frac{C_G}{\lambda} \quad (2.48)$$

Preso ora la (2.40), si deriva la (2.48) in funzione di  $p$  e la si pone uguale a 0 per ottenere il minimo della curva:

$$\frac{dC_{Totale}}{dp} = -\frac{C_I}{p^2} + C_G \frac{\ln(1-p)}{\lambda p^2} + C_G \frac{1}{(1-p)\lambda p} = 0 \quad (2.49)$$

Ottenendo:

$$\frac{p}{1-p} + \ln(1-p) = \lambda \frac{C_I}{C_G} \quad (2.50)$$

Se si pone  $t_0 = 0$ , si conosce anche l'espressione di  $p$ :

$$\frac{F(t_1) - F(t_0)}{R(t_0)} = \frac{F(t_1) - 0}{1} = 1 - e^{-\lambda t_1} = p \quad (2.51)$$

E pertanto la (2.50) diventa:

$$\begin{aligned} \frac{p}{1-p} + \ln(1-p) &= \frac{1 - e^{-\lambda t_1}}{1 - (1 - e^{-\lambda t_1})} - \lambda t_1 = \frac{1 - e^{-\lambda t_1}}{e^{-\lambda t_1}} - \lambda t_1 = \\ &= e^{\lambda t_1} - 1 - \lambda t_1 \end{aligned} \quad (2.52)$$

L'espressione (2.42), che serve a determinare il valore  $p^*$  che minimizza la curva di costo totale, si traduce nell'equazione seguente da risolvere nell'incognita  $t_I$ :

$$e^{\lambda t_1} - 1 - \lambda t_1 = \lambda \frac{C_I}{C_G} \quad (2.53)$$

La tabella seguente riporta i valori di  $p^*$  in funzione del valore di  $\lambda \frac{C_I}{C_G}$ :

Tabella 2-1 - Valori ottimali del parametro  $p^*$  in funzione del rapporto  $\lambda C_I / C_G$

$\lambda \frac{C_I}{C_G}$	$p^*$	$\lambda \frac{C_I}{C_G}$	$p^*$
0.01	0.131	0.10	0.340
0.02	0.181	0.30	0.496
0.03	0.209	0.50	0.576
0.04	0.236	0.70	0.628
0.05	0.261	0.90	0.667
0.06	0.280	1.00	0.682
0.07	0.298	2.00	0.778
0.08	0.312	3.00	0.826
0.09	0.326	4.00	0.856

È possibile calcolare il valore di  $t_I$ , che rappresenta anche la grandezza dell'intervallo di tempo costante per le ispezioni, come secondo la (2.46):

$$t_1 = -\frac{\ln(1-p)}{\lambda} = -\ln(1-p^*) MTTF \quad (2.54)$$

### 2.13 Applicazione su componente con ddp normale

Si considera ora un componente con distribuzione normale o gaussiana della probabilità. Dalle espressioni (2.38) e (2.39) si ottiene l'espressione del costo totale nella forma corretta:

$$C_{Totale} = \frac{C_I}{p} + C_G \sum_{i=1}^{\infty} t_i q^{(i-1)} p - C_G \mu = \frac{C_I}{p} + \sigma C_G \sum_{i=1}^{\infty} \left[ \frac{t_i - \mu}{\sigma} \right] q^{(i-1)} p \quad (2.55)$$

Da cui:

$$C_{Totale} = \frac{C_I}{p} + \sigma C_G \sum_{i=1}^{\infty} z_i q^{(i-1)} p \quad (2.56)$$

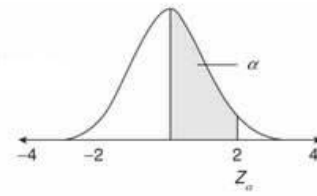
Si è utilizzato la variabile aleatoria  $z_i$ , distribuita secondo una distribuzione di probabilità standard di valor medio 0 e varianza 1.

Tabella 2-2 - Valori della distribuzione cumulativa di una variabile normale standard

z	.00	.01	.02	.03	.04	.05	.06	.07	.08	.09
0.0	.5000	.5040	.5080	.5120	.5160	.5199	.5239	.5279	.5319	.5359
0.1	.5398	.5438	.5478	.5517	.5557	.5596	.5636	.5675	.5714	.5753
0.2	.5793	.5832	.5871	.5910	.5948	.5987	.6026	.6064	.6103	.6141
0.3	.6179	.6217	.6255	.6293	.6331	.6368	.6406	.6443	.6480	.6517
0.4	.6554	.6591	.6628	.6664	.6700	.6736	.6772	.6808	.6844	.6879
0.5	.6915	.6950	.6985	.7019	.7054	.7088	.7123	.7157	.7190	.7224
0.6	.7257	.7291	.7324	.7357	.7389	.7422	.7454	.7486	.7517	.7549
0.7	.7580	.7611	.7642	.7673	.7704	.7734	.7764	.7794	.7823	.7852
0.8	.7881	.7910	.7939	.7967	.7995	.8023	.8051	.8078	.8106	.8133
0.9	.8159	.8186	.8212	.8238	.8264	.8289	.8315	.8340	.8365	.8389
1.0	.8413	.8438	.8461	.8485	.8508	.8531	.8554	.8577	.8599	.8621
1.1	.8643	.8665	.8686	.8708	.8729	.8749	.8770	.8790	.8810	.8830
1.2	.8849	.8869	.8888	.8907	.8925	.8944	.8962	.8980	.8997	.9015
1.3	.9032	.9049	.9066	.9082	.9099	.9115	.9131	.9147	.9162	.9177
1.4	.9192	.9207	.9222	.9236	.9251	.9265	.9279	.9292	.9306	.9319
1.5	.9332	.9345	.9357	.9370	.9382	.9394	.9406	.9418	.9429	.9441
1.6	.9452	.9463	.9474	.9484	.9495	.9505	.9515	.9525	.9535	.9545
1.7	.9554	.9564	.9573	.9582	.9591	.9599	.9608	.9616	.9625	.9633
1.8	.9641	.9649	.9656	.9664	.9671	.9678	.9686	.9693	.9699	.9706
1.9	.9713	.9719	.9726	.9732	.9738	.9744	.9750	.9756	.9761	.9767
2.0	.9772	.9778	.9783	.9788	.9793	.9798	.9803	.9808	.9812	.9817
2.1	.9821	.9826	.9830	.9834	.9838	.9842	.9846	.9850	.9854	.9857
2.2	.9861	.9864	.9868	.9871	.9875	.9878	.9881	.9884	.9887	.9890
2.3	.9893	.9896	.9898	.9901	.9904	.9906	.9909	.9911	.9913	.9916
2.4	.9918	.9920	.9922	.9925	.9927	.9929	.9931	.9932	.9934	.9936
2.5	.9938	.9940	.9941	.9943	.9945	.9946	.9948	.9949	.9951	.9952
2.6	.9953	.9955	.9956	.9957	.9959	.9960	.9961	.9962	.9963	.9964
2.7	.9965	.9966	.9967	.9968	.9969	.9970	.9971	.9972	.9973	.9974
2.8	.9974	.9975	.9976	.9977	.9977	.9978	.9979	.9979	.9980	.9981
2.9	.9981	.9982	.9982	.9983	.9984	.9984	.9985	.9985	.9986	.9986
3.0	.9987	.9987	.9987	.9988	.9988	.9989	.9989	.9989	.9990	.9990
3.1	.9990	.9991	.9991	.9991	.9992	.9992	.9992	.9992	.9993	.9993
3.2	.9993	.9993	.9994	.9994	.9994	.9994	.9994	.9995	.9995	.9995



Tabella 2-3 - Valori della distribuzione cumulativa di una variabile normale standard



	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.0000	0.0040	0.0080	0.0120	0.0160	0.0199	0.0239	0.0279	0.0319	0.0359
0.1	0.0398	0.0438	0.0478	0.0517	0.0557	0.0596	0.0636	0.0675	0.0714	0.0753
0.2	0.0793	0.0832	0.0871	0.0910	0.0948	0.0987	0.1026	0.1064	0.1103	0.1141
0.3	0.1179	0.1217	0.1255	0.1293	0.1331	0.1368	0.1406	0.1443	0.1480	0.1517
0.4	0.1554	0.1591	0.1628	0.1664	0.1700	0.1736	0.1772	0.1808	0.1844	0.1879
0.5	0.1915	0.1950	0.1985	0.2019	0.2054	0.2088	0.2123	0.2157	0.2190	0.2224
0.6	0.2257	0.2291	0.2324	0.2357	0.2389	0.2422	0.2454	0.2486	0.2517	0.2549
0.7	0.2580	0.2611	0.2642	0.2673	0.2704	0.2734	0.2764	0.2794	0.2823	0.2852
0.8	0.2881	0.2910	0.2939	0.2967	0.2995	0.3023	0.3051	0.3078	0.3106	0.3133
0.9	0.3159	0.3186	0.3212	0.3238	0.3264	0.3289	0.3315	0.3340	0.3365	0.3389
1.0	0.3413	0.3438	0.3461	0.3485	0.3508	0.3531	0.3554	0.3577	0.3599	0.3621
1.1	0.3643	0.3665	0.3686	0.3708	0.3729	0.3749	0.3770	0.3790	0.3810	0.3830
1.2	0.3849	0.3869	0.3888	0.3907	0.3925	0.3944	0.3962	0.3980	0.3997	0.4015
1.3	0.4032	0.4049	0.4066	0.4082	0.4099	0.4115	0.4131	0.4147	0.4162	0.4177
1.4	0.4192	0.4207	0.4222	0.4236	0.4251	0.4265	0.4279	0.4292	0.4306	0.4319
1.5	0.4332	0.4345	0.4357	0.4370	0.4382	0.4394	0.4406	0.4418	0.4429	0.4441
1.6	0.4452	0.4463	0.4474	0.4484	0.4495	0.4505	0.4515	0.4525	0.4535	0.4545
1.7	0.4554	0.4564	0.4573	0.4582	0.4591	0.4599	0.4608	0.4616	0.4625	0.4633
1.8	0.4641	0.4649	0.4656	0.4664	0.4671	0.4678	0.4686	0.4693	0.4699	0.4706
1.9	0.4713	0.4719	0.4726	0.4732	0.4738	0.4744	0.4750	0.4756	0.4761	0.4767
2.0	0.4772	0.4778	0.4783	0.4788	0.4793	0.4798	0.4803	0.4808	0.4812	0.4817
2.1	0.4821	0.4826	0.4830	0.4834	0.4838	0.4842	0.4846	0.4850	0.4854	0.4857
2.2	0.4861	0.4864	0.4868	0.4871	0.4875	0.4878	0.4881	0.4884	0.4887	0.4890
2.3	0.4893	0.4896	0.4898	0.4901	0.4904	0.4906	0.4909	0.4911	0.4913	0.4916
2.4	0.4918	0.4920	0.4922	0.4925	0.4927	0.4929	0.4931	0.4932	0.4934	0.4936
2.5	0.4938	0.4940	0.4941	0.4943	0.4945	0.4946	0.4948	0.4949	0.4951	0.4952
2.6	0.4953	0.4955	0.4956	0.4957	0.4959	0.4960	0.4961	0.4962	0.4963	0.4964
2.7	0.4965	0.4966	0.4967	0.4968	0.4969	0.4970	0.4971	0.4972	0.4973	0.4974
2.8	0.4974	0.4975	0.4976	0.4977	0.4977	0.4978	0.4979	0.4979	0.4980	0.4981
2.9	0.4981	0.4982	0.4982	0.4983	0.4984	0.4984	0.4985	0.4985	0.4986	0.4986
3.0	0.4987	0.4987	0.4987	0.4988	0.4988	0.4989	0.4989	0.4989	0.4990	0.4990
3.1	0.4990	0.4991	0.4991	0.4991	0.4992	0.4992	0.4992	0.4992	0.4993	0.4993
3.2	0.4993	0.4993	0.4994	0.4994	0.4994	0.4994	0.4994	0.4995	0.4995	0.4995
3.3	0.4995	0.4995	0.4995	0.4996	0.4996	0.4996	0.4996	0.4996	0.4996	0.4997
3.4	0.4997	0.4997	0.4997	0.4997	0.4997	0.4997	0.4997	0.4997	0.4997	0.4998
3.5	0.4998	0.4998	0.4998	0.4998	0.4998	0.4998	0.4998	0.4998	0.4998	0.4998
3.6	0.4998	0.4998	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999
3.7	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999
3.8	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999
3.9	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
4.0	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000

Si introduce poi il parametro  $c$ , definito come:

$$c = \frac{C_I}{C_G \sigma} \tag{2.57}$$

In tal modo si modifica l'equazione (2.56) come:

$$C_{Totale} = \sigma C_G \left[ \frac{c}{p} + \sum_{i=1}^{\infty} z_i q^{(i-1)} p \right] \quad (2.58)$$

Come nel caso precedente, si riportano nella tabella sottostante i valori di  $p^*$  che minimizzano la curva di costo in funzione questa volta del parametro  $c$ :

Tabella 2-4 - Valori ottimali del parametro  $p^*$  in funzione del parametro  $c$

$c$	$p^*$	$c$	$p^*$
0,01	0,0985	0,50	0,5397
0,03	0,1734	0,70	0,6538
0,05	0,2234	0,90	0,7001
0,07	0,2628	1,00	0,7189
0,09	0,2956	2,00	0,8278
0,10	0,3103	3,00	0,8769
0,30	0,4927	4,00	0,9069

Conoscendo  $C_I$ ,  $C_G$  e  $\sigma$  è possibile ricavare da tabella il valore di  $p^*$ , così da risalire al valore di  $t_1$ , considerando l'istante iniziale pari a 0:

$$p = \frac{F(t_1) - F(t_0)}{R(t_0)} = \frac{F(t_1) - 0}{1} = F(t_1) \quad (2.59)$$

Si utilizza la distribuzione di probabilità normale standardizzata, i cui valori sono tabulati nella Tabella 2-3. La variabile causale normalizzata  $z=N(0,1)$  si ottiene dalla *ddp* del *Time to Failure* (o TTF):

$$z_i = \frac{t_i - \mu}{\sigma} \quad (2.60)$$

Ovvero

$$z = \frac{TTF - MTF}{\sigma(TTF)} \quad (2.61)$$

Per  $\sigma(\text{TTF})$  si intende la deviazione standard della variabile causale TTF. A partire da  $F(t_1)$  ottenuta dal valore ottimale di  $p^*$  si

Conoscendo MTTF e  $\sigma(\text{TTF})$  è possibile calcolare il tempo  $t_1$  dopo il quale procedere con la prima ispezione utilizzando la relazione inversa.

$$z_1 = F_{std}^{-1}(p^*) \approx b = \frac{t_1 - MTTF}{\sigma} \quad (2.62)$$

Dove  $F_{std}^{-1}(p^*)$  è la funzione inversa della distribuzione di probabilità normale standardizzata. Dalla relazione precedente si ottiene:

$$t_1 = MTTF + \sigma b \quad (2.63)$$

Si considera l'invecchiamento del componente, per cui il  $t_2$  non si calcola attraverso la relazione (2.46), ma si riduce. Qualora il guasto non sia stato rilevato in occasione della prima ispezione, è reso necessario calcolare il secondo intervallo. Si considera sempre il valore di  $p^*$  ottimale, per cui data la relazione (2.51):

$$\frac{F(t_i) - F(t_{i-1})}{R(t_{i-1})} = \frac{F(t_2) - F(t_1)}{R(t_1)} = \frac{F(t_2) - p^*}{(1 - p^*)} = p^* \quad (2.64)$$

Ottenendo  $F(t_2) = k$ . Come nel caso precedente, si sfrutta la relazione inversa per calcolare  $t_2$

$$z_2 = F_{std}^{-1}(k) \approx d = \frac{t_2 - MTTF}{\sigma} \quad (2.65)$$

$$t_2 = MTTF + \sigma d \quad (2.66)$$

Si può continuare allo stesso modo per determinare i tempi in cui schedulare le effettive ispezioni per minimizzare il costo totale, sempre considerando il fatto che il conto si azzerava una volta rilevata una difettosità o un guasto. Dopo la sostituzione il componente

è riportato allo stato “*as good as new*”. Per comodità si possono considerare le differenze dei tempi, in modo da avere intervalli relativi.

$$\Delta t_1 = t_1 - t_0$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_1$$

$$\Delta t_3 = t_3 - t_2$$

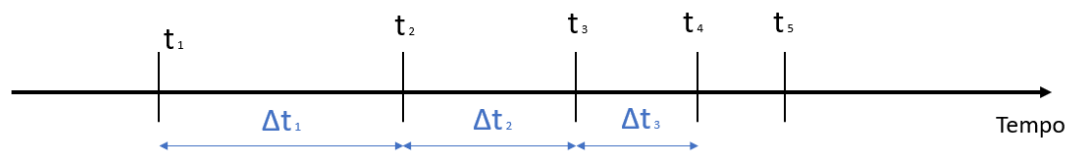


Figura 27 - Variazione del tempo d'ispezione considerando l'invecchiamento dell'entità

## CAPITOLO 3

### ACQUA MINERALE SAN BENEDETTO S.P.A.

#### 3.1 L'azienda

Acqua Minerale San Benedetto S.p.A. nasce a Scorzé (Venezia) il 10 Aprile 1956 nel cuore del Parco del Sile, prendendo il nome dalla sua antica fonte situata a 300 metri di profondità e famosa sin dai tempi della Repubblica Veneta per essere una fonte della salute. San Benedetto è anche il Santo Patrono di Scorzé, che si festeggia il giorno dell'inizio della primavera, e per questo è stato scelto come simbolo la rondine, portatrice della bella stagione. In tal modo è stato possibile legare il marchio ai concetti di primavera e rinascita, valori molto importanti e vicini ai consumatori.

Il terreno sul quale nasce e dove si trova la fonte appartiene alla famiglia Scattolin, fondatrice dell'azienda. Nel 1959 essa diventa una società per azioni, con la famiglia Scattolin che detiene il 66,6% dell'Azienda, mentre il restante 33,3% appartiene alla famiglia Zoppas, parente alla lontana della prima con un'omonima azienda di elettrodomestici di proprietà. In quegli anni inizia l'imbottigliamento dell'acqua minerale in vetro.

Nel 1971 l'azienda di elettrodomestici entra in crisi, così la famiglia Zoppas acquisisce la maggioranza della San Benedetto che in quel momento affrontava qualche problema finanziario, ed Enrico Zoppas che diventa amministratore delegato con Giuliano De Polo presidente. Inizia così uno sviluppo tecnologico e commerciale puntato verso l'innovazione, che porterà l'azienda ad essere una tra le più innovative del mercato grazie anche all'attenzione verso le tecnologie emergenti, rivelatesi scelte strategiche azzeccate. Prima tra queste fu l'introduzione del vetro a perdere, uno stratagemma che permise di bypassare il sistema dei resi (su cui si basava il mercato) che costringeva i supermercati a sobbarcarsi costi, problemi logistici e magazzini superiori a quelli necessari, risultando molto scomodo per i clienti che dovevano restituire i vuoti. Di per sé l'acqua è un prodotto di basso valore, per cui i costi di logistica e trasporto incidono notevolmente sul prezzo

finale. Le nuove bottiglie erano più leggere ma robuste, permettendo di espandere il mercato in tutta Italia e non solo dove si poteva recuperare il vuoto, garantendo un consolidamento a livello nazionale e non rimanere un'azienda puramente regionale.

Si delinea così la strategia vincente di innovazione caratteristica di Acqua Minerale San Benedetto, basata su tre punti: riduzione dei costi di produzione e di processo, rinnovamento degli impianti, ricerca di una possibile alternativa al vetro. Il vuoto a perdere infatti è risultato essere vincente nel breve periodo, ma comportava comunque un costo di produzione e trasporto notevole. La difficoltà consisteva principalmente nel trovare un'alternativa che risultasse leggera e infrangibile, ma che al contempo fosse trasparente e non garantisse contaminazioni se a contatto con materiale alimentare. Il successo avuto nell'innovazione spinge l'azienda a muoversi verso alternative non convenzionali, guardando alle nuove tecnologie. All'inizio degli anni '70, si stava sviluppando l'idea di utilizzare il PVC come contenitore nel settore alimentare, ma c'erano molte problematiche in fase di produzione poiché nel soffiaggio delle provette risultava molto difficile impedire il rilascio di sostanze nocive. La soluzione arriva a cavallo tra fine anni '70 e inizio anni '80 con l'introduzione del PET (Polietilentereftalato), polimero termoplastico adatto all'uso alimentare, asettico e riciclabile, che garantiva integrità strutturale se utilizzato con bibite in pressione e molto resistente. Grazie al reparto di Ricerca e Sviluppo, l'azienda riesce ad integrare verticalmente la tecnologia ottimizzando continuamente il processo, puntando a produrre *in casa* e non acquistare tutte le bottiglie. Un problema inizialmente riscontrato fu quello della stabilità della bottiglia, che nella forma utilizzata per le bottiglie in vetro non risulta abbastanza rigido, ed un prodotto di qualità scadente non sarebbe riuscito a superare l'era del vetro. Nel 1983 acquistano quindi il brevetto per il *fondo petaloide*, ovvero un fondo a petalo che garantisce stabilità e rigidità alla base. Grazie a questa tecnologia si riduce drasticamente il peso del contenitore, abbattendo nel contempo i costi e permettendo di espandere il mercato. La capacità produttiva aumenta nel tempo, se si pensa che si è passati dalle circa 1000 bottiglie l'ora in formato 1,5 litri dell'inizio anni '80 alle circa 500'000 bottiglie l'ora attuali. L'azienda raddoppia la produzione in pochi anni, passando dalle circa 200 milioni di bottiglie nel 1984 alle 400 milioni nel 1986, e grazie al brevetto acquisito per il fondo le altre aziende nazionali rimangono tecnologicamente dietro.

Questa leadership tecnologica permette ad Acqua Minerale San Benedetto di intraprendere diverse collaborazioni con multinazionali estere, prima tra tutte la Carbury

Schweppes International nel 1984, per la quale anche attualmente produce e distribuisce l'intera gamma di prodotti Schweppes sul territorio italiano. Nel 1988 inizia la collaborazione con Pepsi Co. International con gli stessi fini per i prodotti Pepsi e Seven Up. Tali collaborazioni portano ad una continua ricerca di soluzioni per i nuovi prodotti. Tra queste risulta fondamentale lo sviluppo di una linea completamente asettica, risultato ricercato ma mai ottenuto dalla Schweppes e ottenuto in sinergia grazie al sapiente lavoro del reparto di R&D. Quest'ultima porta anche allo sviluppo del tappo oggi noto come *push and pull*, utilizzato per le bibite energetiche in ambito sportivo, dove vi era la necessità di utilizzare una mano sola e non dover necessariamente avvitare il tappo per chiudere. L'azienda quindi aveva ampliato i propri confini, passando dal solo imbottigliamento alla produzione interna di tappi e bottiglie.

Gli anni successivi vedono una serie di investimenti che portano Acqua Minerale San Benedetto ad espandersi, prima con stabilimenti in territorio nazionale, poi all'estero. L'idea di base è quella di avvicinare il prodotto al consumatore, pertanto invece di produrre tutte le bottiglie nella sede principale di Scorzé per poi dover sostenere spese di trasporto elevate, si punta direttamente a produrre vicino al consumatore, riducendo i costi di logistica. Si fondano altre aziende e stabilimenti, tutti uniti sotto Acqua Minerale San Benedetto S.p.A., in particolare:

- 1995 – Nasce lo stabilimento di Popoli (Pescara) di Gran Guizza S.p.A., dove viene imbottigliata l'acqua minerale Guizza Fonte Valle Reale
- 1996 – Nasce in Francia (Gadagne) la società Européenne d'Emboutillage dalla collaborazione con Cadbury Schweppes
- 1997 – Nasce lo stabilimento di Donato (Biella), dove la Alpe Guizza S.p.A. produce acqua minerale Guizza Fonte Caudana
- 1997 – Nasce in Spagna (Valencia) a marchio Agua Mineral San Benedetto S.p.A. come Fuente Primavera un nuovo stabilimento per imbottigliamento di bibite e acqua minerale
- 1998 – Collaborazione nella Repubblica Dominicana in uno stabilimento per imbottigliamento e produzione di acqua minerale a nome Santa Clara C.P.A di cui San Benedetto detiene una partecipazione
- 2000 – lo stabilimento di Popoli inizia anche l'imbottigliamento dell'acqua minerale Fonte Primavera

- 2001 – Acquisizione al 100% della compagnia Acqua di Nepi S.p.A. di Viterbo per l’imbottigliamento di acqua effervescente naturale
- 2001 – Collaborazione al 50% con Danone per la costituzione della società Polska Woda in Polonia per la produzione di acqua minerale. Viene acquisita al 100% nel 2010.
- 2002 – Collaborazione al 50% con Danone per la costituzione della società Magayrviz Kft per la produzione di acqua minerale in Ungheria. Viene acquisita al 100% nel 2010.
- 2003 – Nasce lo stabilimento di Paese (Treviso) per la produzione dei tappi e laboratorio prototipo in sostegno alla sede principale di Scorzé.
- 2003 – Acquisizione in Spagna della società Parque a Presa, che produce, distribuisce e commercializza acqua minerale.
- 2014 – Nasce un nuovo stabilimento a Viggianello (Potenza) per l’imbottigliamento dell’acqua minerale San Benedetto dal Parco del pollino.
- 2015 – Acquisizione della società Cutolo Rionero (Potenza), per l’imbottigliamento di acqua effervescente naturale.

## 3.2 I prodotti

Attualmente il gruppo Acqua Minerale San Benedetto è attivo commercialmente in 100 paesi, con 10 stabilimenti nel mondo di cui 6 in Italia, arrivando a 2296 dipendenti nel mondo ed una produzione di 4,6 miliardi di bottiglie l’anno, per un fatturato di 764 milioni di euro nel 2019. L’esportazione costituisce circa il 6% dei volumi prodotti e 7% di valore, pari a 43,8 milioni di euro di fatturato. I principali mercati di riferimento, oltre all’Europa occidentale (Austria, Germania, Svizzera, Francia, Regno Unito) e l’area dell’est europeo (Ungheria, Repubblica Ceca, Bulgaria, Romania) sono gli USA, il Canada, il Giappone, l’Australia, Israele e, nel sud est asiatico, Singapore, Malesia e Thailandia. Operare in scenari di mercati molto diversificati però è una vocazione: significa offrire risposte precise alle esigenze dei target nei paesi in cui si esporta, consolidare i rapporti di collaborazione con le più importanti catene distributive, oltre che esportare il know-how produttivo italiano, dove il mercato risulta particolarmente ricettivo.



Risulta così essere il primo Player del mercato italiano del beverage analcolico, con una quota a volume del 15,8% (Fonte: GlobalData 2018. Dati 2017). In particolare, è presente sul mercato nazionale con i prodotti:

- ACQUA MINERALE SAN BENEDETTO FONTE BENEDICTA
- ACQUA MINERALE SAN BENEDETTO DAL PARCO DEL POLLINO
- ACQUA MINERALE SAN BENEDETTO DAL PARCO DELLA MAJELLA
- ACQUA MINERALE SAN BENEDETTO DEL VULTURE
- ACQUA MINERALE SAN BENEDETTO DALLE ALPI BIELLESI
- ANTICA FONTE DELLA SALUTE – MILLENNIUM WATER
- PURA DI ROCCIA
- CUTOLO RIONERO FONTE ATELLA
- ACQUA DI NEPI FONTE DI PIACERE
- FONTE VIVIA
- GUIZZA
- SAN BENEDETTO ICE FORMULA ZERO
- AQUAVITAMIN
- THÈ SAN BENEDETTO
- THÈ BIO SAN BENEDETTO
- SAN BENEDETTO INDIAN BLACK TEA
- SAN BENEDETTO BABY
- BIBITE SAN BENEDETTO
- BIBITE SAN BENEDETTO ZERO
- AMOR BIO
- BIBITE PASSIONE ITALIANA SAN BENEDETTO
- GINGER SPRITZ
- BEN'S L'APERITIVO
- SCHWEPPE
- TROPICO
- SAN BENEDETTO SUCCOSO
- ORGANIC BIO
- OASIS
- ENERGADE



Figura 28 - AMSB, distinzione delle tipologie di prodotti

A seconda del prodotto, si avrà un imbottigliamento in vetro, in plastica o in lattina. Per quanto riguarda l'imbottigliamento in PET, si hanno diversi formati:

- Bottiglie da 0,25 l
- Bottiglie da 0,33 l
- Bottiglie da 0,4 l
- Bottiglie da 0,5 l
- Bottiglie da 0,75 l
- Bottiglie da 1 l
- Bottiglie da 1,5 l
- Bottiglie da 2 l

A seconda del prodotto, si avrà una bottiglia con caratteristiche uniche, volte a rendere immediatamente riconoscibile il prodotto.



Figura 29- AMSB, esempi di prodotti

Ciò richiede una notevole capacità di progettazione e di realizzazione, con il reparto di engineering che rappresenta una solidissima realtà aziendale, poiché ogni bottiglia avrà le sue caratteristiche, il proprio colore, il tappo e l'etichetta unici. Pertanto, è resa necessaria la capacità adattiva del sistema di produzione e di programmazione, poiché vi saranno numerosi cambi formato e diversi volumi produttivi.

### **3.3 Il processo di Produzione delle bottiglie in PET e di Imbottigliamento**

In Acqua Minerale San Benedetto il processo produttivo per le bottiglie in PET è totalmente integrato verticalmente, partendo dal granulo per arrivare alla bottiglia confezionata che andrà sul mercato. Nella sede di Scorzé sono attualmente presenti 23 linee di imbottigliamento, divise come segue:

- Linee 30, 31, 34, 35 per acqua e bibite gassate in bottiglie di vetro
- Linea 39 per produzione di bibite gassate e piatte in lattina
- Linee 42, 43, 46, 50 per produzione di acqua e bibite gassate in bottiglie di PET
- Linee 60, 61, 63, 64, 65, 66 per produzione di acqua e bibite piatte in asettico
- Linee 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58 per produzione di acqua minerale naturale e gassata in PET

Le linee di imbottigliamento sono formate da una sequenza di macchine, collegate da sistemi di trasporto che costituiscono buffer, in modo che in caso di fermata sia garantita una certa continuità nel processo durante l'intervento. Le linee sono strutturate come da schema seguente.

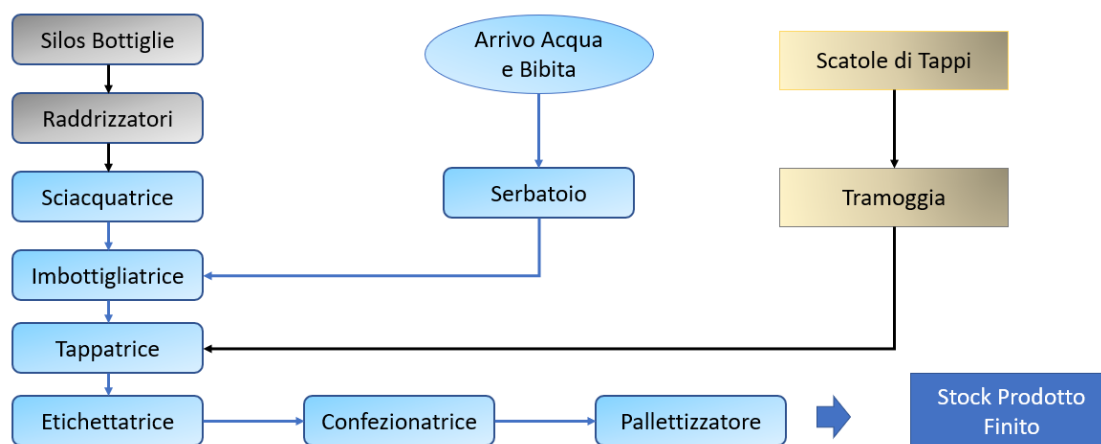


Figura 30 - Processo di Imbottigliamento

Il processo di imbottigliamento inizia con le bottiglie vuote, immagazzinate nei silos, per finire con il prodotto finito confezionato e pronto alla spedizione. Nel caso delle linee di imbottigliamento dedicate al PET, vi sarà un processo ulteriore che precede il tutto, ovvero la formazione delle bottiglie a partire da grano di PET. Chiaramente le macchine saranno leggermente diverse se si lavora con le lattine o con le bottiglie di vetro o di PET, ma il flusso rimane lo stesso. Idem dicasi per le linee 60 – 66 che lavorano in ambiente sterile e sono mantenute in pressione durante tutto il processo. Le linee hanno una capacità produttiva variabile, ma che può arrivare fino a 55000 bottiglie l'ora. Per dare l'idea della capacità produttiva dell'azienda, nel 2018 la produzione annua è stata di 4,6 miliardi di bottiglie tra tutti i prodotti e formati.

### 3.3.1 Dal PET in granulo alla bottiglia

Il PET in granuli arriva principalmente dalla Cina o da altri paesi dell'estremo oriente, dove il costo è più basso, visto che gli enormi volumi produttivi fanno sì che i lotti d'acquisto siano grandi. Dopo essere arrivati nello stabilimento di Scorzè, i containers o i sacconi contenenti i granuli vengono scaricati nei silos di stoccaggio, dalle quali verrà prelevato ed inviato in tramogge intermedie e infine nelle tramogge delle macchine. Poiché durante la produzione capita di avere degli scarti, il PET viene riciclato e unito in una certa percentuale al nuovo granulo nelle ultime tramogge. Prima di essere utilizzati però i granuli devono essere essiccati in modo da eliminare tutta l'umidità residua presente che comprometterebbe il processo. Questo avviene in un deumidificatore

apposito. Successivamente viene unito l'additivo colorante che darà il colore che si vuole ottenere per quelle determinate bottiglie.



*Figura 31 - PET in granuli*

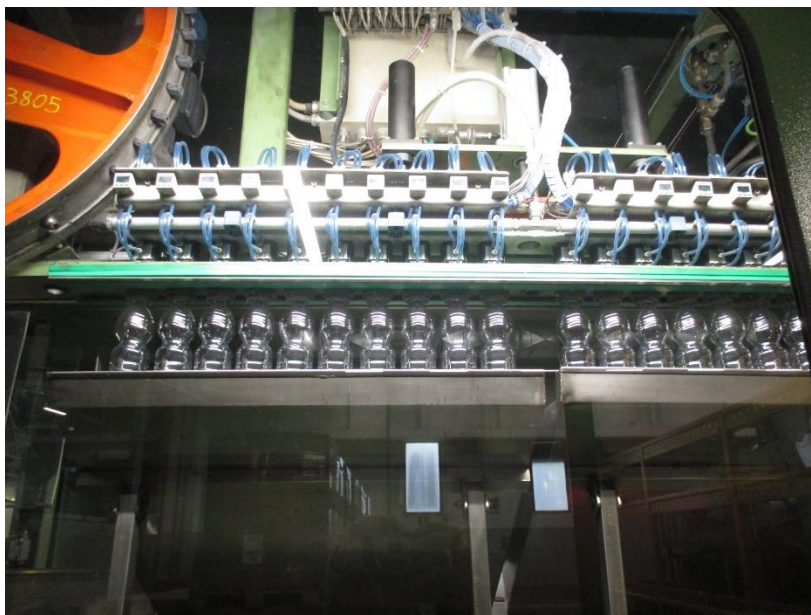
Dal granulo viene prodotta la preforma, ossia una provetta con peso variabile a seconda del tipo di bottiglia che verrà successivamente prodotta, contenente già la bocca filettata sulla quale verrà posizionato il tappo. Gli spessori sono studiati in fase di progettazione in modo da consentire l'opportuna rigidezza strutturale.



*Figura 32 - Preforme in PET*

Nell'azienda sono presenti due tipi di macchina adibite alla formazione delle bottiglie, le SIPA in monostadio e in bistadio. Nella pressa monostadio in una singola macchina si passa dal granulo in PET deumidificato alla bottiglia. Il processo avviene in 6 fasi:

1. Ingresso dei granuli di PET deumidificati nella tramoggia e quindi nell'estrusore. La vite senza fine in rotazione consente la plastificazione
2. Iniezione tramite canali caldi, così da non formare sfrido e non rendere necessaria lavorazione meccanica. Il tempo ciclo dipende dalla geometria della preforma e dallo spessore
3. Finito il ciclo, dopo il raffreddamento al di sotto della temperatura  $105^{\circ}\text{C}$  per il corpo e circa  $80^{\circ}\text{C}$  per il collo, avviene una movimentazione della preforma nella giusta posizione alla fase successiva
4. Fase di condizionamento termico, dove la preforma viene mantenuta alla temperatura ideale prima del soffiaggio
5. Stiro e soffiaggio, dove la preforma viene chiusa negli appositi stampi, quindi stirata e successivamente soffiata in due fasi tramite immissione di aria pressurizzata, prima a 10 bar e poi a 25-40 bar a seconda del tipo di bottiglia. In tal modo la preforma prende la forma dello stampo
6. Viene verificata la tenuta della bottiglia tramite soffiaggio di aria in pressione. Se il pezzo è conforme, viene espulsa dalla macchina e inviata ai silos



*Figura 33 - Macchina per la realizzazione delle preforme in PET*

Nel caso di pressa bistadio invece, il processo avviene in due macchine distinte. Nella prima si crea la preforma, che viene immagazzinata per il futuro utilizzo. Quando sarà necessario produrre la bottiglia che utilizza quella preforma, viene prelevata dai silos e indirizzata verso la seconda macchina, dove viene riportata a temperatura e quindi soffiata. Il dispendio energetico in questo caso è maggiore, poiché non si sfrutta il calore residuo del processo di stampaggio a iniezione. Tuttavia, il tempo di setup della pressa bistadio è molto inferiore, per cui il tempo di cambio formato risulta breve e capace di fronteggiare le necessità, passando da 3 ore a 1 ora. Altro vantaggio è il minor spazio necessario per l'immagazzinamento delle preforme, notevolmente più piccole. In caso di necessità, causata da un possibile picco di domanda nella stagione estiva, è possibile acquistare solo le preforme da aziende esterne, non necessitando degli stampi particolari per il successivo soffiaggio che avviene successivamente internamente. Di contro, lo spazio necessario per le due macchine è maggiore, l'ideale sarebbe mettere la soffiatrice in linea con la riempitrice, per iniziare il processo di imbottigliamento e non passare di nuovo per i silos di stoccaggio.



*Figura 34 - Macchina per la realizzazione delle preforme in PET*

### 3.3.2 Il Raddrizzatore

È il primo macchinario della linea di imbottigliamento. Ha la funzione di ricevere dai silos le bottiglie che arrivano in modo disordinato e inviarle in modo ordinato alla

successiva stazione. Le bottiglie arrivano tramite nastri trasportatori nella parte superiore della macchina, e per effetto gravitazionale entrano nel cono di distribuzione verso la zona periferica del cilindro rotante, dove si posizionano in celle apposite. Un sistema pneumatico fa sì che le bottiglie si posizionino con l'imboccatura verso l'alto, entrando in alveoli appositi posizionati nel cilindro in rotazione. È presente un sistema di recupero per le bottiglie in eccesso, che le reindirizza verso l'ingresso. Dopo essersi posizionata correttamente, la bottiglia entra in una discesa apposita inclinata, che la porta al piano inferiore, compiendo un giro intero all'interno della macchina prima di essere estratta tramite stella d'uscita. La rotazione ha lo scopo di sfruttare il movimento del piano superiore per evitare sfasature o danneggiare le bottiglie. La parte finale della macchina conduce al trasporto aereo successivo. La bottiglia arriva dalla rotazione e viene sganciata automaticamente sulla via in posizione corretta, mentre se è in posizione errata viene fatta cadere.



Figura 35 - Raddrizzatore

### 3.3.3 Il nastro di trasporto ad aria

Serve per spostare le bottiglie vuote dal Raddrizzatore alla Sciacquatrice. È essenzialmente una serie di guide che sostengono le bottiglie solamente per il collo, in posizione verticale. Tali guide possono essere regolate per consentire la movimentazione



senza incastri, adeguandosi anche a cambi formato. Le bottiglie vengono spinte in avanti attraverso una serie di soffianti ad aria, con una potenza ed una orientazione tale da non far ribaltare le bottiglie dalla guida. La lunghezza del nastro è decisa in fase di progettazione; deve essere abbastanza lunga da consentire di avere un buffer di dimensione adeguata tra le due stazioni, ma di contro maggiore è la distanza da coprire e più numerosi saranno i motori elettrici che consentono i soffiaggi, con un dispendio energetico maggiore. Come sistema di controllo, per evitare di sovraffollare le guide, sono presenti una serie di fotocellule disposte a tre e sei metri dalla macchina successiva, che nel caso rivelassero un accumulo regolano di conseguenza la portata del Raddrizzatore in modo da rallentare il numero di bottiglie in ingresso.



Figura 36 - Nastro di trasporto ad aria

### 3.3.4 La Sciacquatrice

La Sciacquatrice ha la funzione di prendere le bottiglie in ingresso e risciacquarle con del disinfettante prima del riempimento, in modo da garantire che il contenitore possa essere utilizzato senza residui di alcun tipo. Insieme alla riempitrice e alla tappatrice fa parte del cosiddetto Monoblocco di Riempimento, nel quale la bottiglia entra vuota ed esce riempita del prodotto e sigillata. La Sciacquatrice è composta da una giostra rotativa cabinata; le bottiglie vuote e in posizione corretta entrano nella coclea introduttiva, vengono opportunamente distanziate, e finiscono nella ruota dentata a stella, che ruota in modo sincrono con la giostra rotativa, dove vengono afferrate con delle pinze. Queste

ultime capovolgono la bottiglia posizionandola in asse con un getto d'acqua per il primo risciacquo, tramite del disinfettante, ed essendo rivolte con la testa verso il basso una volta fermato il getto il liquido cola per gravità ed è eliminato. Il secondo terzo della rotazione è dedicato alla fase di risciacquo con acqua, che avviene nel medesimo modo, mentre l'ultima parte della rotazione è dedicata alla fase di scarico del liquido. Quindi nell'ultima parte della macchina le pinze capovolgono la bottiglia vuota e pulita, riportandola in posizione verticale con il collo verso l'alto.



Figura 37 - Sciacquatrice

### 3.3.5 La Riempitrice

La Riempitrice ha la funzione di riempire effettivamente le bottiglie vuote e pulite con il prodotto. È la macchina più lenta della linea, per cui detterà il ritmo della stessa. Dal trasportatore d'entrata le bottiglie arrivano in una coclea d'ingresso che le distanzia correttamente e le trasferisce nella ruota dentata a stella. Da qui si entra nella giostra rotativa, dove la bottiglia viene fatta aderire alla guarnizione del rubinetto di riempimento, così da garantire il corretto accoppiamento e la tenuta durante l'ingresso del prodotto. Il serbatoio è in pressione, quindi prima di far defluire il liquido viene portata in pressione la bottiglia così da permettere il riempimento, che avviene durante la rotazione della giostra. Durante il riempimento il prodotto è indirizzato verso le pareti della bottiglia, in modo da far rientrare il gas contenuto nella bottiglia all'interno del serbatoio man mano che viene riempita, utilizzando alla fine una valvola di riempimento per consentire la

fuoriuscita del gas residuo. Quindi la bottiglia viene prelevata dalla ruota dentata a stella d'uscita, che la direziona verso la Tappatrice.

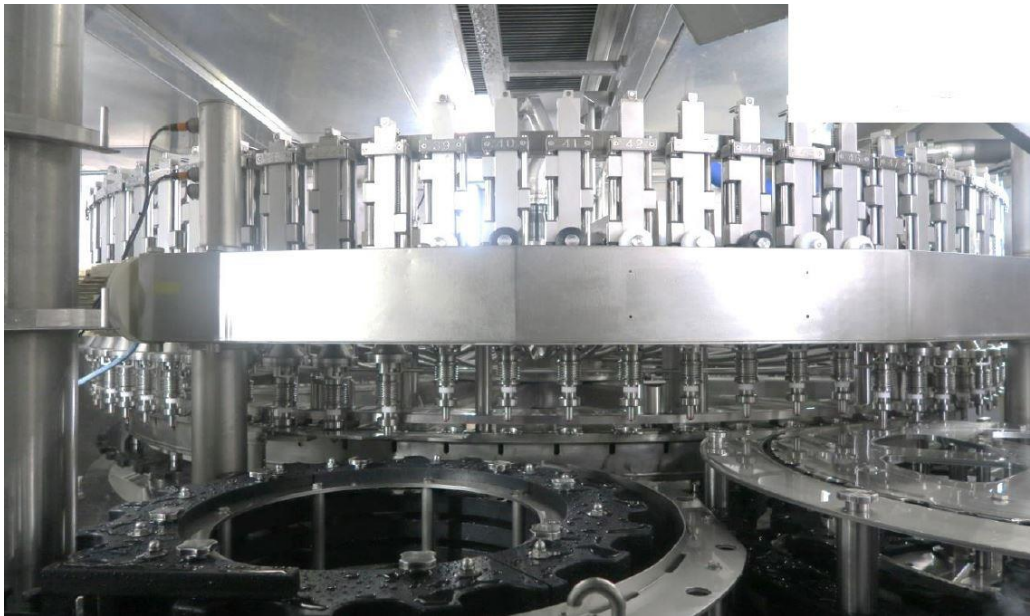


Figura 38 - Riempitrice

### 3.3.6 La Tappatrice

La Tappatrice ha la funzione di applicare il tappo alla bottiglia. I tappi vengono prodotti nella sede di Paese e recapitati nella sede di Scorzè attraverso dei grandi sacchi. Questi vengono svuotati manualmente in una tramoggia e passano in un riscaldatore, che ne aumenta la temperatura in modo da avere le giuste proprietà meccaniche. Infatti, essendo in polimero termoplastico, riscaldandosi si rammolliscono, diventando più malleabili, per poi raffreddarsi e diventare più rigidi una volta nella posizione corretta sul collo della bottiglia. I tappi dalla riscaldatrice arrivano in un condotto che li allinea nella posizione di utilizzo. Le bottiglie invece giungono dalla Riempitrice attraverso la ruota dentata a stella e bloccate attraverso un collarino anti-rotazione. La testa rotante aggancia il tappo e lo avvita sulla bottiglia, così da chiuderla. Il classico collarino collegato al tappo una volta raffreddato ridurrà le sue dimensioni, così che attraverso il movimento di rotazione del tappo si stacchi in apertura. La Tappatrice è l'ultima macchina facente parte del Monoblocco di Riempimento. La bottiglia esce così riempita del prodotto e sigillata, indirizzata su nastri trasportatori di una determinata lunghezza, per garantire anche in

questo caso un polmone, e sensori che come nel caso precedente regolano il flusso nel caso ci siano problemi, evitando accumuli.



Figura 39 - Tappatrice

### 3.3.7 L'Etichettatrice

L'Etichettatrice ha la funzione di applicare l'etichetta sopra la bottiglia riempita e sigillata. In ingresso è posizionata una coclea che ha lo scopo di distanziare in modo opportuno le bottiglie che arrivano dal nastro trasportatore, quindi vengono inserite in una stella rotativa che le porta nella giostra rotativa centrale. Le bottiglie sono così posizionate su piattelli, che le fanno ruotare durante l'applicazione dell'etichetta, e attraverso un martinetto vengono tenute ferme sulla base in rotazione. Poiché esistono diverse tipologie di etichette, le macchine varieranno leggermente a seconda di quale deve essere applicata e al tipo di bottiglia, che comporteranno anche parametri di processo differenti. Prendendo ad esempio le etichette classiche di tipo *roll fed*, arrivano alla macchina in rotoli e caricate su una bobina. Successivamente una serie di rulli garantisce che sia tenuta in tensione in modo da essere distesa correttamente prima di essere portata nella zona di taglio. Un sensore legge le etichette durante il loro svolgimento e la taglia al momento opportuno. Quindi questa passa ad un rullo di trasferimento che la mantiene attaccata tramite sistema di aspirazione, passa nel rullo dove viene applicata la colla alle due estremità e quindi viene posizionata sulla bottiglia, che come detto è posta in rotazione facendo sì che venga svolta su di essa. In uscita è presente un tunnel riscaldato che fa

aderire maggiormente l'etichetta alla bottiglia, che a questo punto viene prelevata da una stella in uscita e condotta sul successivo nastro trasportatore.



Figura 40 - Tipologie di Etichettatrice

### 3.3.8 La Confezionatrice

La Confezionatrice ha la funzione di confezionare le bottiglie in fardelli di varie dimensioni a seconda del formato, delle richieste del cliente terzo, dalle direttive aziendali. Solitamente sono costituite da quattro, sei, o al limite dodici bottiglie. Queste ultime arrivano dal nastro trasportatore dopo l'Etichettatrice e un sistema di guide sagomate le indirizzano in file ordinate, distanziate opportunamente da delle aste rotanti, in modo da avere una corretta distanza tra le varie file. In tal modo si forma il cosiddetto fardello prima di essere avvolto. Nel caso ci siano bottiglie vuote o cadute un sistema di sensori segnala il problema, consentendone la rimozione. Il film protettivo è avvolto in bobine e viene svolto al di sotto della macchina nella quantità necessaria per quel formato

per avvolgere il fardello, tenuto in tensione da una serie di rulli. Un traversino avvolge il film compie una rotazione e avvolge il fardello prima di essere tagliato da un coltello rotante. Alcuni sensori verificano il corretto stato di tensione del film. Il tiro del film e il taglio sono sincronizzati con il movimento del fardello stesso. Nella fase finale la confezione prosegue verso il forno di retrazione, con lo scopo di far aderire maggiormente il film facendolo retrarre a causa della temperatura elevata. Il fardello pronto viene quindi inserito in un nuovo nastro trasportatore che lo conduce verso il Pallettizzatore.



Figura 41 - Confezionatrice

### 3.3.9 Il Pallettizzatore

Il Pallettizzatore ha la funzione di creare i pallet. La macchina, molto grande, riceve in ingresso i fardelli e li posiziona in una serie di strati, in numero variabile secondo i formati. I pallet infatti devono essere di determinate dimensioni massime per non avere problemi di trasporto e di stabilità. I fardelli passano attraverso una sequenza di nastri, che li direzionano e posizionano in numero corretto su una prima rulliera, in base allo schema di pallettizzazione programmato. Quindi il primo strato viene posizionato tramite dispositivo di sollevamento sulla paletta vuota. Viene posizionato tra uno strato e l'altro, o solo dopo un certo numero di strati, una falda di cartone, prelevata da un magazzino a bordo macchina tramite ventose, che ha lo scopo di stabilizzare i fardelli e rendere l'intera struttura più stabile. Anche lo schema di pallettizzazione ha questo fine, oltre ad ottimizzare lo spazio occupato. Le operazioni si ripetono fino al raggiungimento del

numero di strati voluti, che corrispondono ad una certa altezza. Finita questa operazione, il pallet viene mobilitato verso la Fasciatrice.



Figura 42 - Pallettizzatore

### 3.3.10 La Fasciatrice

La Fasciatrice ha la funzione di sigillare il pallet formato nella stazione precedente e avvolgerlo con un film, così da sigillarlo e consentirne la trasportabilità e movimentazione. Il pallet come detto arriva attraverso una rulliera, arriva nella posizione stabilita e viene affiancato da un anello rotante, che applica il film e nella rotazione lo avvolge. Dopo aver eseguito un numero di giri tali da garantire la stabilità, il film viene tagliato e incollato. Mentre è ancora sulla rulliera, il pallet finito viene spostato alla stazione successiva.



Figura 43 - Fasciatrice

### 3.3.11 L'Etichettatrice Bancale

L'Etichettatrice Bancale ha la funzione di applicare un'etichetta al pallet. È posta accanto all'etichettatrice. L'etichetta racchiude varie informazioni, tra cui la data di produzione e il codice per la tracciabilità. Tutti i bancali che escono dall'azienda infatti devono poter essere tracciati per tutta la filiera produttiva fino alla singola bottiglia, in modo da poter risalire completamente ad un determinato lotto di produzione nel caso ci fossero problemi e dovesse essere ritirato. È fondamentale conoscere anche dove vengono spediti tutti i bancali appartenenti a quel lotto.

### 3.3.12 Stoccaggio prodotto finito

Formato il bancale, esso andrà immagazzinato prima di essere spedito. Un operatore preleva dalla rulliera il pallet in uscita e lo porta nell'area di stoccaggio del prodotto finito. Vi sono diverse zone predisposte, nel piazzale, nei vettori in attesa a piazzale, nel magazzino automatico.





*Figura 44 - Stoccaggio prodotto finito*



# CAPITOLO 4

## IMPATTO ECONOMICO OTTIMIZZANDO I TEMPI D'ISPEZIONE

### 4.1 Introduzione

In questo capitolo si vuole andare a quantificare quanto effettivamente incide una non corretta definizione degli intervalli d'ispezione sul costo totale, utilizzando il modello di costo introdotto alla fine del capitolo 2. Si distinguono inizialmente due momenti della vita del componente distinguibili nella parte centrale e finale della *bathtub curve* (Figura 5), ossia dove il rateo di guasto risulta costante e quello dove il rateo di guasto aumenta nel tempo, poiché si considera l'invecchiamento dello stesso. Per tali modelli sono necessarie due distribuzioni di probabilità distinte, ovvero esponenziale negativa e gaussiana, per le quali ovviamente si utilizzano due serie di equazioni ben distinte per approssimare il modello di costo. L'obiettivo di questa analisi è, in prima battuta, quello di verificare l'incidenza dei costi della politica ispettiva in funzione dei vari parametri presi in considerazione, per poi andare a verificare quanto può incidere una non corretta definizione degli intervalli d'ispezione sul costo totale. In ottica aziendale infatti ci si pone l'obiettivo di minimizzare i costi a parità di resa, ma non sempre si hanno tutti i dati o gli strumenti necessari per applicare correttamente i modelli. Ecco che questa analisi può risultare significativa nella decisione di investire maggiormente in una raccolta dati e nell'applicazione di un modello se i benefici ottenibili risultano concretamente accettabili.

### 4.2 Incidenza sui costi di una correzione del MTTF

La determinazione delle tempistiche d'ispezione viene fatta considerando un dato di MTTF spesso e volentieri solo stimato e basato sull'esperienza. Questo perché una puntuale ed efficace raccolta dati che ottimizzi i dati su cui si basano le analisi può

risultare estremamente lungo e costoso. Basti pensare a componenti che hanno MTTF superiori a un anno, per avere dati a sufficienza da creare un database affidabili servirebbe un tempo molto lungo. Vale la pena investire cifre importanti a riguardo?

L'analisi di questo paragrafo vuole rispondere a questa domanda. Considerato che i dati di  $C_I$  e  $C_G$  sono noti, si procede in un'analisi che invece di valutare la variazione del  $t_i$  direttamente, che si ricava a partire dal MTTF, vada a considerare il MTTF stesso come parametro da analizzare. Si fa riferimento ad una distribuzione di probabilità esponenziale negativa, corrispondente ad un rateo di guasto costante.

Per prima cosa si sono considerati diversi valori del rapporto  $C_I/C_G$ . Volendo fare un'analisi percentuale, è su questo rapporto che ci si focalizza e non è importante il valore effettivo dei due parametri. La scelta è ricaduta sui rapporti nella tabella seguente.

Tabella 4-1 - Parametri di scelta dell'analisi

	CI	CG	CI / CG
1	€ 1.000	€ 10	100
2	€ 1.000	€ 20	50
3	€ 1.000	€ 50	20
4	€ 1.000	€ 100	10
5	€ 1.000	€ 200	5
6	€ 1.000	€ 500	2

Successivamente sono stati considerati una serie di MTTF target, ovvero 1000h, 5000h, 10000h. Applicando il modello, sono stati trovati gli intervalli d'ispezione ottimali e il costo totale della politica ispettiva ottimizzato. Quindi a partire da quei MTTF, sono state considerate per ciascun rapporto  $C_I/C_G$  variazioni percentuali dell'1% rispetto al precedente MTTF in positivo e in negativo. Quindi ad esempio, partendo da MTTF = 1000h, aumentando dell'1% diventerebbe 1010h, ma un successivo aumento dell'1% verrebbe fatto sul nuovo valore, quindi  $1010 + 1010 \cdot (1/100) = 1020,1$  h. E così via. In tal modo si garantisce la variazione percentuale costante rispetto al caso precedente.

Tabella 4-2 - Variazioni percentuali dei MTTF

MTTF [h]	
-1%	951,0
-1%	960,6
-1%	970,3
-1%	980,1
-1%	990,0
-1%	1000
-1%	1010,0
-1%	1020,1
-1%	1030,3
-1%	1040,6
-1%	1051,0
-1%	1061,5

Quindi, per ogni nuovo valore di MTTF considerato, è stato nuovamente applicato il modello e verificato quanto vari il tempo d'ispezione ottimale e il costo totale rispetto al caso immediatamente sopra, che corrisponde ad una variazione dell'1% del MTTF. I risultati dei vari casi sono riportati in forma ridotta nelle tabelle sottostanti.

Tabella 4-3 - Risultati per CI/CG = 100

CI [€]	CG [€]	CI / CG
1000	10	<b>100</b>

MTTF [h]	ti [h]	Ctot [€]	% ti	% Ctot
960,6	407,25	5073,66	0,556%	0,433%
970,3	409,5	5095,63	0,552%	0,433%
980,1	411,75	5117,71	0,549%	0,433%
990,0	414	5139,91	0,546%	0,434%
1000	416,25	5162,21	0,543%	0,434%
1010,0	418,5	5184,41	0,541%	0,430%
1020,1	420,75	5206,71	0,538%	0,430%
1030,3	423	5229,13	0,535%	0,431%
1040,6	425,25	5251,67	0,532%	0,431%
1051,0	427,5	5274,31	0,529%	0,431%
1061,5	429,75	5297,07	0,526%	0,432%

MTTF [h]	ti [h]	Ctot [€]	% ti	% Ctot
4900,5	957,75	10577,6	0,525%	0,471%
4950,0	962,75	10627,4	0,522%	0,471%
5000,0	967,75	10677,5	0,519%	0,471%
5050,0	972,75	10727,3	0,517%	0,467%
5100,5	977,75	10777,4	0,514%	0,467%
5151,5	982,75	10827,7	0,511%	0,467%
5203,0	987,75	10878,3	0,509%	0,467%
5255,1	992,75	10929,1	0,506%	0,467%

Tabella 4-4 - Risultati per CI/CG =50

CI [€]	Cg [€]	CI / CG
1000	20	<b>50</b>

MTTF [h]	ti [h]	Ctot [€]	% ti	% Ctot
960,6	294,25	6882,53	0,512%	0,452%
970,3	295,75	6913,68	0,510%	0,453%
980,1	297,25	6944,98	0,507%	0,453%
990,0	298,75	6976,44	0,505%	0,453%
1000	300,25	7008,07	0,502%	0,453%
1010,0	301,75	7039,53	0,500%	0,449%
1020,1	303,25	7071,15	0,497%	0,449%
1030,3	304,75	7102,94	0,495%	0,449%
1040,6	306,25	7134,88	0,492%	0,450%
1051,0	307,75	7166,98	0,490%	0,450%

MTTF [h]	ti [h]	Ctot [€]	% ti	% Ctot
4900,5	683,75	14675,2	0,515%	0,480%
4950,0	687,25	14745,7	0,512%	0,480%
5000,0	690,75	14816,5	0,509%	0,480%
5050,0	694,25	14887	0,507%	0,476%
5100,5	697,75	14957,9	0,504%	0,476%
5151,5	701,25	15029,1	0,502%	0,476%
5203,0	704,75	15100,6	0,499%	0,476%
5255,1	708,25	15172,5	0,497%	0,476%

Tabella 4-5- Risultati per CI/CG =20

CI [€]	Cg [€]	CI / CG
1000	50	<b>20</b>

MTTF [h]	ti [h]	Ctot [€]	% ti	% Ctot
960,6	189,5	10478,7	0,531%	0,471%
970,3	190,5	10528	0,528%	0,471%
980,1	191,5	10577,6	0,525%	0,471%
990,0	192,5	10627,4	0,522%	0,471%
1000	193,5	10677,5	0,519%	0,471%
1010,0	194,5	10727,3	0,517%	0,467%
1020,1	195,5	10777,4	0,514%	0,467%
1030,3	196,5	10827,7	0,512%	0,467%
1040,6	197,5	10878,3	0,509%	0,467%
1051,0	198,5	10929,1	0,506%	0,467%

MTTF [h]	ti [h]	Ctot [€]	% ti	% Ctot
4900,5	436,25	22808,7	0,518%	0,489%
4950,0	438,5	22920,2	0,516%	0,489%
5000,0	440,75	23032,3	0,513%	0,489%
5050,0	443	23143,8	0,510%	0,484%
5100,5	445,25	23255,8	0,508%	0,484%
5151,5	447,5	23368,4	0,505%	0,484%
5203,0	449,75	23481,6	0,503%	0,484%
5255,1	452	23595,4	0,500%	0,484%

Tabella 4-6 - Risultati per CI/CG =10

CI [€]	Cg [€]	CI / CG
1000	100	<b>10</b>

MTTF [h]	ti [h]	Ctot [€]	% ti	% Ctot
960,6	135,25	14535,2	0,558%	0,480%
970,3	136	14605	0,555%	0,480%
980,1	136,75	14675,2	0,551%	0,480%
990,0	137,5	14745,7	0,548%	0,480%
1000	138,25	14816,5	0,545%	0,480%
1010,0	139	14887	0,542%	0,476%
1020,1	139,75	14957,9	0,540%	0,476%
1030,3	140,5	15029,1	0,537%	0,476%
1040,6	141,25	15100,6	0,534%	0,476%
1051,0	142	15172,6	0,531%	0,476%

MTTF [h]	ti [h]	Ctot [€]	% ti	% Ctot
4900,5	309,75	31976,7	0,487%	0,493%
4950,0	311,25	32134,4	0,484%	0,493%
5000,0	312,75	32292,9	0,482%	0,493%
5050,0	314,25	32450,6	0,480%	0,488%
5100,5	315,75	32609,1	0,477%	0,488%
5151,5	317,25	32768,4	0,475%	0,488%
5203,0	318,75	32928,5	0,473%	0,489%
5255,1	320,25	33089,4	0,471%	0,489%

Tabella 4-7 - Risultati per CI/CG = 5

CI [€]	CG [€]	CI / CG
1000	200	<b>5</b>

MTTF [h]	ti [h]	Ctot [€]	% ti	% Ctot
960,6	96,25	20274,3	0,522%	0,487%
970,3	96,75	20373	0,519%	0,487%
980,1	97,25	20472,2	0,517%	0,487%
990,0	97,75	20571,9	0,514%	0,487%
1000	98,25	20672,2	0,512%	0,487%
1010,0	98,75	20771,9	0,509%	0,482%
1020,1	99,25	20872,1	0,506%	0,482%
1030,3	99,75	20972,8	0,504%	0,483%
1040,6	100,25	21074,1	0,501%	0,483%
1051,0	100,75	21175,8	0,499%	0,483%

MTTF [h]	ti [h]	Ctot [€]	% ti	% Ctot
4900,5	219,5	44943,3	0,573%	0,496%
4950,0	220,75	45166,3	0,569%	0,496%
5000,0	222	45390,5	0,566%	0,496%
5050,0	223,25	45613,5	0,563%	0,491%
5100,5	224,5	45837,7	0,560%	0,491%
5151,5	225,75	46063	0,557%	0,492%
5203,0	227	46289,5	0,554%	0,492%
5255,1	228,25	46517,1	0,551%	0,492%

MTTF [h]	ti [h]	Ctot [€]	% ti	% Ctot
9703,0	309,5	62967,7	0,565%	0,498%
9801,0	311,25	63281,5	0,562%	0,498%
9900,0	313	63597	0,559%	0,498%
10000	314,75	63914	0,556%	0,494%
10100,0	316,5	64229,4	0,553%	0,494%
10201,0	318,25	64546,5	0,550%	0,494%
10303,0	320	64865,1		

Tabella 4-8 - Risultati per CI/CG = 2

CI [€]	CG [€]	CI / CG
1000	500	<b>2</b>

MTTF [h]	ti [h]	Ctot [€]	% ti	% Ctot
960,6	61,5	31663,8	0,408%	0,493%
970,3	61,75	31819,9	0,407%	0,493%
980,1	62	31976,7	0,405%	0,493%
990,0	62,25	32134,4	0,403%	0,493%
1000	62,5	32293	0,402%	0,493%
1010,0	62,75	32450,7	0,400%	0,489%
1020,1	63	32609,3	0,398%	0,489%
1030,3	63,25	32768,7	0,397%	0,489%
1040,6	63,5	32929	0,395%	0,489%
1051,0	63,75	33090,1	0,394%	0,489%

MTTF [h]	ti [h]	Ctot [€]	% ti	% Ctot
4900,5	139,25	70671,8	0,542%	0,499%
4950,0	140	71024,5	0,539%	0,499%
5000,0	140,75	71378,9	0,536%	0,499%
5050,0	141,5	71731,6	0,533%	0,494%
5100,5	142,25	72086	0,530%	0,494%
5151,5	143	72442,2	0,527%	0,494%
5203,0	143,75	72800,2	0,524%	0,494%
5255,1	144,5	73160	0,522%	0,494%

MTTF [h]	ti [h]	Ctot [€]	% ti	% Ctot
9703,0	196,25	99171,6	0,510%	0,500%
9801,0	197,25	99667,8	0,507%	0,500%
9900,0	198,25	100167	0,504%	0,500%
10000	199,25	100668	0,502%	0,495%
10100,0	200,25	101167	0,499%	0,495%
10201,0	201,25	101668	0,497%	0,495%
10303,0	202,25	102172		

Si vede come i risultati riportino un andamento similare e costante per i vari rapporti  $C_I/C_G$  considerati. Una variazione dell'1% del MTTF provoca una variazione percentuale del tempo d'ispezione compresa tra lo 0,4% e lo 0,6%, non correlata al valore del MTTF. In tal senso è stato visto che non c'è un pattern comune all'aumentare del MTTF. L'unica caratteristica riscontrata in tutti i casi analizzati è che aumentando dell'1% il MTTF si ha un aumento ridotto dello 0,003% rispetto al caso precedente. Di conseguenza un aumento del MTTF porterà ad un aumento meno marcato del tempo d'ispezione rispetto ad una diminuzione del tempo d'ispezione dovuto ad una diminuzione del MTTF uguale in valore.

Relativamente al Costo totale si sono ottenuti risultati più costanti e un trend comune. Aumentare dell'1% il MTTF produce un aumento del Costo Totale della politica ispettiva compreso tra lo 0,43 e lo 0,5%. Al contrario, diminuire dell'1% il MTTF riduce della stessa percentuale il costo totale. Questo risultato è in linea con le aspettative, considerando il fatto che un MTTF più elevato implica un numero d'ispezioni superiori e un tempo superiore di funzionamento ad efficienza non ottimale. Anche in questo caso però si nota un trend negativo nella variazione all'aumentare del MTTF.

A riprova di ciò è stata condotta un'analisi verificando quanto appena detto. Considerando un MTTF di 20000h, con  $C_I = 1000€$  e  $C_G = 100 €/h$ .



Tabella 4-9 - Risultati delle analisi

%MTTF	MTTF	t <sub>i</sub>	p*	C <sub>tot</sub>	% t <sub>i</sub>	%C <sub>tot</sub>
-35,0%	13000	531	0,040	54150,5	-19,55%	-19,16%
-30,0%	14000	551	0,039	56166,8	-16,52%	-16,15%
-25,0%	15000	570	0,037	58112,3	-13,64%	-13,25%
-20,0%	16000	589	0,036	59994,0	-10,76%	-10,44%
-15,0%	17000	607	0,035	61817,7	-8,03%	-7,72%
-10,0%	18000	626	0,034	63588,7	-5,15%	-5,08%
-5,0%	19000	643	0,033	65310,9	-2,58%	-2,50%
0,0%	20000	660	0,032	66988,5	0,00%	0,00%
5,0%	21000	675	0,032	68624,6	2,27%	2,44%
10,0%	22000	691	0,031	70222,2	4,70%	4,83%
15,0%	23000	707	0,030	71783,9	7,12%	7,16%
20,0%	24000	722	0,030	73312,0	9,39%	9,44%
25,0%	25000	737	0,029	74808,5	11,67%	11,67%
30,0%	26000	752	0,029	76275,5	13,94%	13,86%
35,0%	27000	766	0,028	77714,5	16,06%	16,01%

I risultati sono coerenti con le analisi precedenti. Considerando un MTTF di partenza di 20000h, una variazione dell'1% corrisponde a 200h, a cui viene associata una variazione di circa lo 0,5% sia per quanto riguarda il t<sub>i</sub> che il C<sub>tot</sub>. Una modifica di 1000h corrisponde al 5%, per cui se le analisi sono veritiere bisogna aspettarsi un risultato in negativo di poco più del 2,5% di riduzione, mentre in positivo di poco meno del 2,5%. I risultati in tal senso sono in linea con le aspettative, poiché in negativo si ottiene una riduzione del 2,58% per il t<sub>i</sub> e del 2,5% per il C<sub>tot</sub>, mentre in positivo un aumento del 2,27% per il t<sub>i</sub> e del 2,44% per il C<sub>tot</sub>. Nella tabella sono riportati i risultati relativi ad una variazione compresa tra -35% e +35%, che risultano in linea con le aspettative.

### 4.3 Incidenza sui costi della corretta definizione degli intervalli ispettivi per componente con ddp esponenziale negativa

Spesso e volentieri nelle industrie non si effettuano analisi di questo tipo, atte a determinare il minimo costo d'ispezione per il componente, ma si cerca di incastrare le attività tra loro, accorpendo gli eventuali fermi macchina necessari in un unico o in pochi momenti. Oltretutto, poiché l'ispezione è affidata ai manutentori interni all'azienda, se questi in alcuni periodi sono molto carichi di lavoro, può capitare che si salti o posticipi l'ispezione programmata secondo il master di manutenzione.

Ecco perché in questa sede si è voluto analizzare quanto costa all'azienda deviare il tempo d'ispezione rispetto ai valori che minimizzano la curva.

Per questa analisi si è partiti dai dati noti dell'ottimo riassunti in Tabella 2-1. Il valore ottimale di  $p^*$  dipende dal rapporto  $\lambda \frac{C_I}{C_G}$ , per cui sono stati inizialmente definiti i parametri fondamentali. Si è scelto di:

- Mantenere il  $MTTF$  costante
- Mantenere il  $C_G$  costante
- Modificare il costo di ispezione  $C_I$ , che risulta quindi essere l'unico parametro che varia per modificare il rapporto

Tabella 4-10 -Parametri di analisi in funzione dei valori di  $p^*$

	$MTTF$	$C_I$ [€]	$C_G$ [€]	$\lambda$	$\lambda C_I/C_G$	$p^*$	$C_{TOT}$ [€]
1	1000	€ 1.000,0	€ 100,0	0,001	0,01	0,131	€ 14.818,4
2	1000	€ 2.000,0	€ 100,0	0,001	0,02	0,181	€ 21.365,3
3	1000	€ 3.000,0	€ 100,0	0,001	0,03	0,209	€ 26.534,6
4	1000	€ 4.000,0	€ 100,0	0,001	0,04	0,236	€ 31.011,6
5	1000	€ 5.000,0	€ 100,0	0,001	0,05	0,261	€ 35.041,1
6	1000	€ 6.000,0	€ 100,0	0,001	0,06	0,28	€ 38.751,5
7	1000	€ 7.000,0	€ 100,0	0,001	0,07	0,298	€ 42.222,1
8	1000	€ 8.000,0	€ 100,0	0,001	0,08	0,312	€ 45.502,1
9	1000	€ 9.000,0	€ 100,0	0,001	0,09	0,326	€ 48.627,4
10	1000	€ 10.000,0	€ 100,0	0,001	0,1	0,34	€ 51.622,2
11	1000	€ 30.000,0	€ 100,0	0,001	0,3	0,496	€ 98.624,8
12	1000	€ 50.000,0	€ 100,0	0,001	0,5	0,576	€ 135.767,7
13	1000	€ 70.000,0	€ 100,0	0,001	0,7	0,628	€ 168.927,0
14	1000	€ 90.000,0	€ 100,0	0,001	0,9	0,667	€ 199.792,0
15	1000	€ 100.000,0	€ 100,0	0,001	1	0,682	€ 214.619,3

16	1000	€	200.000,0	€	100,0	0,001	2	0,778	€	350.524,2
17	1000	€	300.000,0	€	100,0	0,001	3	0,826	€	474.903,1
18	1000	€	400.000,0	€	100,0	0,001	4	0,856	€	593.684,8

Seguendo la procedura illustrata nel paragrafo precedente, sono stati calcolati i tempi ottimali in cui effettuare l'ispezione per minimizzare il costo della politica ispettiva. Più aumenta il costo dell'ispezione, più ovviamente incide nel calcolo del costo totale (2.48). Nel caso 1 il rapporto  $\frac{C_I}{C_G}$  è uguale a 10, mentre nel caso 18 è pari a 4000. Più aumenta questo rapporto, più l'istante di tempo in cui effettuare la prima ispezione si sposta in avanti nel tempo, poiché essendo costanti gli intervalli (2.46) si effettuerebbero più ispezioni durante l'arco di vita del componente.

Tabella 4-11 -Tempi ottimali d'ispezione in funzione dei parametri scelti

	$C_I$	$C_I/C_G$	$t_1$ [h]	$t_2$ [h]	$\Delta\% t_1/MTTF$	$n^\circ$ isp
1	€ 1.000,0	10	140,41	280,82	14%	7,12
2	€ 2.000,0	20	199,67	399,34	20%	5,01
3	€ 3.000,0	30	234,46	468,91	23%	4,27
4	€ 4.000,0	40	269,19	538,37	27%	3,71
5	€ 5.000,0	50	302,46	604,91	30%	3,31
6	€ 6.000,0	60	328,50	657,01	33%	3,04
7	€ 7.000,0	70	353,82	707,64	35%	2,83
8	€ 8.000,0	80	373,97	747,93	37%	2,67
9	€ 9.000,0	90	394,53	789,05	39%	2,53
10	€ 10.000,0	100	415,52	831,03	42%	2,41
11	€ 30.000,0	300	685,18	1370,36	69%	1,46
12	€ 50.000,0	500	858,02	1716,04	86%	1,17
13	€ 70.000,0	700	988,86	1977,72	99%	1,01
14	€ 90.000,0	900	1.099,61	2199,23	110%	0,91
15	€ 100.000,0	1.000	1.145,70	2291,41	115%	0,87
16	€ 200.000,0	2.000	1.505,08	3010,16	151%	0,66
17	€ 300.000,0	3.000	1.748,70	3497,40	175%	0,57
18	€ 400.000,0	4.000	1.937,94	3875,88	194%	0,52

Dalla Tabella 4-11 risulta evidente come, aumentando il costo di ispezione, si riduca sempre più il margine di sicurezza rispetto alla rottura del componente ( $MTTF = 1000$  h).

Nel caso 1, in cui  $\frac{C_I}{C_G} = 10$ , si riescono ad effettuare 7 ispezioni prima di arrivare al *MTTF*, riducendosi a 3 nel caso 6 e ad 1 dal caso 11, in cui il rapporto  $\frac{C_I}{C_G}$  supera quota 300.

Ovviamente ciò implica anche che, se non si è trovato un problema alla prima ispezione, si accetta di avere anche un lungo periodo in cui il componente non lavora come dovrebbe, poiché l'incidenza risulta essere percentualmente bassa. Questo modello infatti punta esclusivamente a minimizzare i costi della politica ispettiva.

Nel caso 18, in cui  $\frac{C_I}{C_G} = 4000$ , la prima ispezione viene effettuata in un istante di tempo pari quasi al doppio del *MTTF*, che comporta un tempo quadruplo per la seconda ispezione. Ciò può risultare anti-intuitivo, ricordando che la manutenzione è la *combinazione di tutte le azioni tecniche, amministrative e gestionali, durante il ciclo di vita di un'entità, volte a mantenerla o riportarla in uno stato in cui possa eseguire la funzione richiesta*. In tal senso, se non si utilizzasse il modello proposto o non si avesse una base di dati solida su cui effettuare le analisi, non risulterebbe così semplice determinare gli istanti di tempo in cui effettuare le ispezioni. Spesso e volentieri anzi ci si basa solo sull'esperienza, e se non si ha un lungo background di analisi su cui basarsi è facile discostarsi anche ampiamente dall'ottimo.

Per tale motivo per l'analisi successiva l'obiettivo è stato quello di valutare quanto effettivamente incide sui costi della politica ispettiva una non corretta definizione degli intervalli. Implementare un sistema di analisi e raccolta dati, cui segue la successiva elaborazione, può risultare molto dispendioso, sia in termini di tempo che di denaro. Per cui risulta fondamentale quantificare i benefici che una politica di tal tipo può portare se implementata correttamente.

Utilizzando le equazioni (2.35), (2.37), (2.41), (2.44), (2.50), (2.53), sono stati svolti i calcoli scegliendo arbitrariamente l'istante in cui effettuare la prima ispezione (e di conseguenza tutte le altre) e andando quindi a valutare come evolvesse il costo totale della politica ispettiva. Per comodità e facilità di lettura, si è poi scelto di confrontare, per ognuno dei 18 casi precedentemente considerati, variazioni percentuali note di tempo rispetto all'ottimo in cui andare a valutare i costi, pari a: -50%, -30%, -25%, -15%, +15%, +25%, +30%, +50%.

Nella Tabella 4-12 sottostante si riportano i risultati ottenuti nel Caso 1.

Tabella 4-12 - Calcolo del costo della politica ispettiva in funzione della variazione del tempo d'ispezione rispetto all'ottimo

Caso 1	MTTF	$C_i$	$C_G$	$\lambda$	$\lambda C_i/C_G$	$p^*$	$t_i$	$t_{i+1}$	$q$	$C_i/p$	$C_G[-\ln(1-p)]/MTTF/p$	$C_i/p$	$C_G[-\ln(1-p)]/MTTF/p$	$C_{tot}$	$C_G * MTTF$	$C_{tot}$
1	1000	1000	100	0,001	0,01	0,131	140,41215	280,8243	0,869	7633,587786	107184,8502	100000	14818,44	100000	14818,44	
	$t_1$	$t_2$	$F(t_i)$	$R(t_i)$	$F(t_{i+1})$	$p$	$q$	$\mu_i$	$C_i/p$	$C_G[-\ln(1-p)]/MTTF/p$	$C_G * MTTF$	$C_{tot}$	$\Delta C_{tot}$	$\%C_{tot}$	$\Delta t_i$	$\% t_i$
	10	20	0,00995	0,99005	0,019801	0,00995	0,9900498	100,5008	100500,833	100500,8333	100000	101001,7	86183,23	682%	130,41	-92,9%
	25	50	0,02469	0,97531	0,048771	0,02469	0,9753099	40,50208	40502,0833	101255,2083	100000	41757,29	26938,85	282%	115,41	-82,2%
	50	100	0,048771	0,951229	0,095163	0,048771	0,9512294	20,50417	20504,1665	102520,8325	100000	23025	8206,561	155%	90,41	-64,4%
	60	120	0,058235	0,941765	0,11308	0,058235	0,9417645	17,17167	17171,6664	103029,9982	100000	20201,66	5383,227	136%	80,41	-57,3%
	70	140	0,067606	0,932394	0,130642	0,067606	0,9323938	14,79155	14791,5471	103540,83	100000	18332,38	3513,939	124%	70,41	-50,1%
	80	160	0,076884	0,923116	0,147856	0,076884	0,9231163	13,00667	13006,666	104053,3276	100000	17059,99	2241,556	115%	60,41	-43,0%
	90	180	0,086069	0,913931	0,16473	0,086069	0,9139312	11,61861	11618,6101	104567,4909	100000	16186,1	1367,663	109%	50,41	-35,9%
	98,3	196,6	0,093623	0,906377	0,178481	0,093623	0,9063769	10,68113	10681,1303	104995,5111	100000	15676,64	858,2035	106%	42,11	-30,0%
	105,5	211	0,100126	0,899874	0,190226	0,100126	0,8998745	9,987463	9987,46302	105367,7349	100000	15355,2	536,76	104%	34,91	-24,9%
	119,5	239	0,112636	0,887364	0,212585	0,112636	0,887364	8,878157	8878,1568	106093,9738	100000	14972,13	153,6926	101%	20,91	-14,9%
	135	270	0,126284	0,873716	0,236621	0,126284	0,8737159	7,918654	7918,65399	106901,8289	100000	14820,48	2,044928	100%	5,41	-3,9%
	140	280	0,130642	0,869358	0,244216	0,130642	0,8693582	7,65452	7654,52	107163,28	100000	14817,8	-0,637949	100%	0,41	-0,3%
	145	290	0,134978	0,865022	0,251736	0,134978	0,8650223	7,408631	7408,63083	107425,147	100000	14833,78	15,33984	100%	4,59	3,3%
	150	300	0,139292	0,860708	0,259182	0,139292	0,860708	7,179162	7179,16198	107687,4297	100000	14866,59	48,15376	100%	9,59	6,8%
	155	310	0,143585	0,856415	0,266553	0,143585	0,8564152	6,964524	6964,5244	107950,1282	100000	14914,65	96,21466	101%	14,59	10,4%
	161,5	323	0,149133	0,850867	0,276026	0,149133	0,8508665	6,705403	6705,40295	108292,2577	100000	14997,66	179,2227	101%	21,09	15,0%
	170	340	0,156335	0,843665	0,28823	0,156335	0,8436648	6,396513	6396,51279	108740,7174	100000	15137,23	318,7922	102%	29,59	21,1%
	175,5	351	0,160963	0,839037	0,296016	0,160963	0,8390374	6,212623	6212,6232	109031,5971	100000	15244,16	425,7223	103%	35,09	25,0%
	182,7	365,4	0,166982	0,833018	0,306081	0,166982	0,833018	5,98867	5988,67029	109413,0061	100000	15401,68	583,2385	104%	42,29	30,1%
	210,55	421,1	0,189861	0,810139	0,343676	0,189861	0,8101385	5,266999	5266,99857	110896,6549	100000	16163,65	1345,215	109%	70,14	50,0%
	250	500	0,221199	0,778801	0,393469	0,221199	0,7788008	4,520812	4520,81166	113020,2916	100000	17541,1	2722,665	118%	109,59	78,0%
	300	600	0,259182	0,740818	0,451188	0,259182	0,7408182	3,858296	3858,29591	115748,8774	100000	19607,17	4788,735	132%	159,59	113,7%
	350	700	0,295312	0,704688	0,503415	0,295312	0,7046881	3,38625	3386,25015	118518,7552	100000	21905,01	7086,567	148%	209,59	149,3%
	400	800	0,32968	0,67032	0,550671	0,32968	0,67032	3,033245	3033,24478	121329,7913	100000	24363,04	9544,598	164%	259,59	184,9%
	450	900	0,362372	0,637628	0,59343	0,362372	0,6376282	2,759596	2759,59627	124181,832	100000	26941,43	12122,99	182%	309,59	220,5%
	500	1000	0,393469	0,606531	0,632121	0,393469	0,6065307	2,541494	2541,49408	127074,7041	100000	29616,2	14797,76	200%	359,59	256,1%

In generale, la curva di variazione del costo in funzione della variazione del tempo si comporta come da grafico seguente, dove con 100% si intende lo stesso costo.



Figura 45 - Variazione percentuale dei costi della politica ispettiva in funzione della variazione di  $t_i$

Risultano evidenti due considerazioni:

- Una variazione in negativo incide molto più che una variazione in positivo. È una conclusione logica, poiché sottostimare il tempo d'ispezione implica l'effettuare conseguentemente un numero più elevato d'ispezioni, e poiché  $C_I$  risulta maggiore di  $C_G$  tale risultato era prevedibile;
- Esiste un'intorno al punto di minimo abbastanza esteso per il quale non aumenta in modo significativo il costo della politica ispettiva.

Sono state poi eseguite le stesse operazioni per ciascuno dei 18 casi. Successivamente si sono confrontati i valori percentuali di riferimento.

Tabella 4-13 - Percentuale di variazione dei costi totali in funzione di una variazione percentuale dal tempo d'ispezione ottimale per i 18 casi

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-50%	24%	22%	25%	24%	24%	24%	24%	24%	24%
-30%	6%	5%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%
-25%	4%	3%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%
-15%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
15%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
25%	3%	3%	2%	2%	3%	3%	3%	2%	2%
30%	4%	4%	3%	3%	4%	4%	4%	3%	3%
50%	9%	10%	8%	8%	9%	9%	9%	8%	8%

	10	11	12	13	14	15	16	17	18
-50%	24%	23%	22%	22%	22%	21%	20%	19%	18%
-30%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	5%	5%	5%
-25%	4%	4%	4%	4%	1%	4%	3%	3%	3%
-15%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
15%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
25%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
30%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
50%	8%	8%	8%	8%	8%	8%	8%	7%	7%

Che se messe in un grafico, evidenziano la forma simile della curva per tali valori.

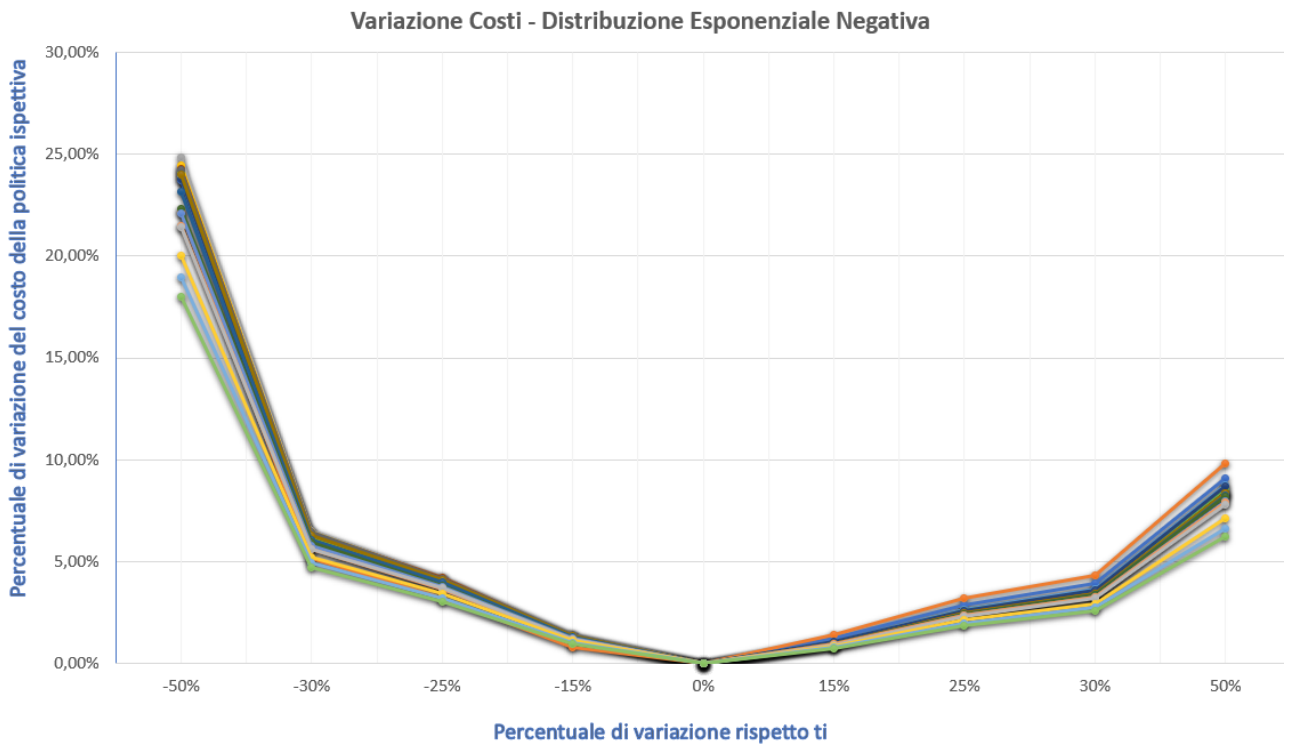


Figura 46 - Variazione percentuale dei costi in funzione della variazione percentuale rispetto a ti ottimo

La Tabella 4-13 evidenzia ancora una volta l'assenza di una specularità per variazioni percentuali opposte di tempo. Il confronto però mette in luce anche il fatto che le differenze percentuali si riducono agli estremi quando aumenta il rapporto  $\frac{C_I}{C_G}$ , che passa:

- Per  $t_i = -50\%$ , da valori del +24-25% per  $\frac{C_I}{C_G} < 1$  fino ad arrivare al 18% per  $\frac{C_I}{C_G} = 4$ . Si perdono ben 7 punti percentuali;
- Per  $t_i = +50\%$ , da valori del +8-10% per  $\frac{C_I}{C_G} < 1$  fino ad arrivare al 6% per  $\frac{C_I}{C_G} = 4$ .

La riduzione in questo caso è meno significativa, ma comunque presente.

Modificando i valori di  $MTTF$ ,  $C_I$ ,  $C_G$  ma mantenendo i rapporti  $\lambda \frac{C_I}{C_G}$ , i risultati sono stati analoghi, a conferma del fatto che l'ottimo può essere trovato tramite i valori tabulati basandosi sul valore del rapporto e non tanto sui singoli dati.

Per quantificare a quanto corrispondono effettivamente in termini di euro le differenze percentuali, si è voluto creare una tabella di riepilogo, in cui sono evidenziati, per ciascun caso, le percentuali corrispondenti agli euro che si spendono in più non ottimizzando il tempo di ispezione.



Tabella 4-14 - Quantificazione dei costi in funzione dei casi analizzati

Caso	Ctot [€]	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	10%	18%	19%	20%	21%	22%	23%	24%	25%	
1	14818,44	148,18	592,74	889,11	1333,66															
2	21365,30	213,65	427,31	640,96	854,61	1068,27	1281,92	1495,57	1709,22	1922,88	2136,53	3845,75	4059,41	4273,06	4486,71	4700,37	4914,02	5127,67	5341,33	5554,98
3	26534,60	265,35	530,69	796,04	1061,38	1592,08	2122,77													
4	31011,65	310,12	620,23	930,35	1240,47	1550,58	1860,70	2170,82	2480,93	2791,05	3101,16	5582,10	5892,21	6202,33	6512,45	6822,56	7132,68	7442,80	7752,91	8063,03
5	35041,13	350,41	700,81	1051,23	1401,65	2102,47														
6	38751,45	387,51	775,03	1162,54	1550,06	1937,57	2325,09	2712,60	3100,12	3487,63	3875,15	6975,26	7362,78	7750,29	8137,81	8525,32	8912,83	9300,35	9687,86	10075,38
7	42222,11	422,22	844,44	1266,66	1688,88	2533,33	3799,99													
8	45502,06	455,02	910,04	1365,06	1820,08	2275,10	2730,12	3185,14	3640,17	4095,19	4550,21	8645,39	9100,41	9555,43	10010,45	10465,47	10920,50	11375,52	11830,54	12285,56
9	48627,35	486,27	972,55	1458,82	1945,09	2581,11	3097,33	3613,55	4129,78	4646,00	5162,22	9231,99	9808,22	10324,44	10840,66	11356,88	11873,10	12389,33	12905,55	13421,77
10	51622,19	516,22	1032,44	1548,67	2064,89	2581,11	3097,33	3613,55	4129,78	4646,00	5162,22	10324,44	10840,66	11356,88	11873,10	12389,33	12905,55	13421,77	13937,99	14454,21
11	98624,80	986,25	1972,50	2958,74	3944,99	4931,23	5917,49	6888,38	7889,98	8899,88	9919,38	13799,86	14439,86	15079,86	15719,86	16359,86	16999,86	17639,86	18279,86	18919,86
12	135767,68	1357,68	2715,35	4073,03	5430,71	6788,38	8146,06	9503,74	10861,41	12219,09	13576,77	24438,18	25795,86	27153,54	28511,21	29868,89	31226,57	32584,24	33941,92	35299,59
13	168926,98	1689,27	3378,54	5067,81	6757,08	8446,35	10135,62	11824,89	13514,16	15203,43	16892,70	31226,57	32584,24	33941,92	35299,59	36657,26	38014,93	39372,60	40730,27	42087,94
14	199792,02	1997,92	3995,84	5993,76	7991,68	9989,60	11987,52	13985,44	15983,36	17981,28	19979,20	35962,56	37960,48	39958,40	41956,32	43954,24	45952,17	47950,09	49948,01	51945,93
15	214619,34	2146,19	4292,39	6438,58	8584,77	10730,96	12877,16	15023,35	17169,55	19315,94	21461,93	39372,60	40730,27	42087,94	43445,61	44803,28	46160,95	47518,62	48876,29	50233,96
16	350524,15	3505,24	7010,48	10515,72	14020,97	17526,21	21031,45	24536,69	28041,93	31547,17	35052,42	63094,35	66599,59	70104,83	73610,07	77115,31	80620,55	84125,80	87631,04	91136,28
17	474903,15	4749,03	9498,06	14247,09	18996,12	23745,16	28494,19	33243,22	38092,25	42841,28	47590,31	85082,56	89087,80	93093,04	97098,28	101103,52	105108,76	109114,00	113119,24	117124,48
18	593684,81	5936,85	11873,70	17810,54	23747,38	29684,24	35621,09	41557,94	47494,78	53431,63	59368,48	106863,27	112800,11	118736,96	124673,81	130610,66	136547,51	142484,35	148421,20	154358,04

Volendo ridurre la forbice di variazione, assumendo che nonostante l'errore di stima del tempo d'ispezione si riesca a rimanere entro un  $\pm 30\%$ , l'aumento percentuale massimo risulta essere del 6%, che quantitativamente si traduce nei valori della prossima Tabella 4-16.

Tabella 4-15 - Quantificazione dei costi percentuali per ognuno dei 18 casi con variazione rispetto a ti ottimo di  $\pm 30\%$ .

Caso	Ctot [€]	1%	2%	3%	4%	5%	6%
1	14818,44	148,18			592,74		889,11
2	21365,30	213,65	427,31	640,96	854,61	1068,27	1281,92
3	26534,60	265,35	530,69	796,04	1061,38		1592,08
4	31011,65	310,12	620,23	930,35	1240,47	1550,58	1860,70
5	35041,13	350,41		1051,23	1401,65		2102,47
6	38751,45	387,51	775,03	1162,54	1550,06	1937,57	2325,09
7	42222,11	422,22		1266,66	1688,88		2533,33
8	45502,06	455,02	910,04	1365,06	1820,08	2275,10	2730,12
9	48627,35	486,27	972,55	1458,82	1945,09		2917,64
10	51622,19	516,22	1032,44	1548,67	2064,89	2581,11	3097,33
11	98624,80	986,25	1972,50	2958,74	3944,99		5917,49
12	135767,68	1357,68	2715,35	4073,03	5430,71	6788,38	8146,06
13	168926,98	1689,27	3378,54	5067,81	6757,08		10135,62
14	199792,02	1997,92	3995,84	5993,76	7991,68	9989,60	11987,52
15	214619,34	2146,19	4292,39	6438,58	8584,77		12877,16
16	350524,15	3505,24	7010,48	10515,72	14020,97	17526,21	21031,45
17	474903,15	4749,03	9498,06	14247,09		23745,16	
18	593684,81	5936,85	11873,70	17810,54	23747,39	29684,24	35621,09

In generale poi, per ogni valore di  $p^*$  è stato analizzato quanto incide una non corretta definizione degli intervalli d'ispezione, valutando una forbice d'analisi compresa, rispetto al  $t_i$ , tra -95% e +100%.

Tabella 4-16 - Risultati delle analisi: quanto incide una variazione percentuale di  $t_i$  sul costo totale

		Valore di $p^*$																	
		0,131	0,181	0,209	0,236	0,261	0,28	0,298	0,312	0,326	0,34	0,496	0,576	0,628	0,667	0,682	0,778	0,826	0,856
Percentuale di variazione rispetto a $t_i$	-95%	867,0%	844,7%	872,3%	867,0%	852,9%	852,5%	847,6%	851,2%	849,6%	844,1%	804,9%	778,6%	760,5%	743,4%	738,2%	688,2%	655,5%	655,5%
	-90%	388,7%	378,2%	392,3%	390,0%	383,3%	383,4%	381,1%	383,1%	382,5%	380,0%	362,8%	351,1%	343,1%	335,4%	333,1%	310,5%	295,6%	295,6%
	-85%	230,9%	224,3%	233,8%	232,5%	228,2%	228,4%	227,1%	228,5%	228,2%	226,7%	216,7%	209,8%	205,1%	200,5%	199,2%	185,7%	176,7%	176,7%
	-80%	153,2%	148,5%	155,7%	154,8%	151,8%	152,1%	151,2%	152,3%	152,2%	151,1%	144,6%	140,0%	137,0%	133,9%	133,1%	124,0%	117,9%	117,9%
	-75%	107,6%	104,0%	109,7%	109,2%	106,9%	107,1%	106,5%	107,4%	107,4%	106,6%	102,2%	98,9%	96,8%	94,6%	94,1%	87,7%	83,3%	83,3%
	-70%	77,9%	75,2%	79,9%	79,5%	77,6%	77,9%	77,4%	78,2%	78,2%	77,6%	74,5%	72,2%	70,6%	69,0%	68,7%	64,0%	60,8%	60,8%
	-65%	57,4%	55,2%	59,2%	58,9%	57,4%	57,7%	57,3%	58,0%	58,0%	57,5%	55,3%	53,6%	52,5%	51,3%	51,0%	47,5%	45,1%	45,1%
	-60%	42,7%	40,9%	44,2%	44,0%	42,8%	43,1%	42,8%	43,4%	43,4%	43,0%	41,4%	40,1%	39,3%	38,4%	38,2%	35,6%	33,8%	33,8%
	-55%	31,8%	30,3%	33,1%	33,0%	32,0%	32,2%	32,0%	32,5%	32,6%	32,3%	31,1%	30,1%	29,5%	28,8%	28,7%	26,7%	25,3%	25,3%
	-50%	23,5%	22,3%	24,7%	24,6%	23,8%	24,0%	23,8%	24,3%	24,3%	24,1%	23,2%	22,5%	22,1%	21,5%	21,5%	20,0%	18,9%	18,9%
	-45%	17,2%	16,2%	18,3%	18,2%	17,5%	17,7%	17,5%	17,9%	18,0%	17,8%	17,2%	16,6%	16,3%	15,9%	15,9%	14,8%	14,0%	14,0%
	-40%	12,3%	11,5%	13,3%	13,2%	12,7%	12,8%	12,7%	13,1%	13,1%	12,9%	12,5%	12,1%	11,9%	11,6%	11,6%	10,7%	10,2%	10,2%
	-35%	8,6%	7,9%	9,4%	9,4%	8,9%	9,1%	9,0%	9,3%	9,3%	9,2%	8,9%	8,6%	8,4%	8,2%	8,2%	7,6%	7,2%	7,2%
	-30%	5,8%	5,2%	6,5%	6,4%	6,1%	6,2%	6,1%	6,4%	6,4%	6,3%	6,1%	5,9%	5,8%	5,6%	5,6%	5,2%	4,9%	4,9%
	-25%	3,7%	3,2%	4,2%	4,2%	3,9%	4,0%	3,9%	4,1%	4,2%	4,1%	4,0%	3,8%	3,8%	3,7%	3,7%	3,4%	3,2%	3,2%
	-20%	2,1%	1,8%	2,6%	2,5%	2,3%	2,4%	2,4%	2,5%	2,5%	2,5%	2,4%	2,3%	2,3%	2,2%	2,2%	2,0%	1,9%	1,9%
	-15%	1,1%	0,8%	1,4%	1,4%	1,2%	1,3%	1,2%	1,3%	1,4%	1,3%	1,3%	1,2%	1,2%	1,2%	1,2%	1,1%	1,0%	1,0%
	-10%	0,4%	0,2%	0,6%	0,6%	0,5%	0,5%	0,5%	0,6%	0,6%	0,6%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,4%	0,4%
	-5%	0,0%	0,0%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,2%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
	0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	5%	0,2%	0,3%	0,1%	0,1%	0,2%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
10%	0,6%	0,8%	0,4%	0,4%	0,5%	0,5%	0,5%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	
15%	1,2%	1,4%	0,9%	0,9%	1,1%	1,0%	1,0%	0,9%	0,9%	0,9%	0,9%	0,9%	0,9%	0,9%	0,9%	0,8%	0,8%	0,8%	
20%	2,0%	2,2%	1,6%	1,6%	1,8%	1,7%	1,7%	1,6%	1,6%	1,6%	1,6%	1,6%	1,6%	1,6%	1,5%	1,4%	1,3%	1,3%	
25%	2,9%	3,2%	2,4%	2,4%	2,7%	2,6%	2,6%	2,4%	2,4%	2,5%	2,4%	2,4%	2,3%	2,3%	2,3%	2,1%	2,0%	2,0%	
30%	3,9%	4,3%	3,4%	3,4%	3,7%	3,6%	3,6%	3,4%	3,4%	3,4%	3,4%	3,3%	3,3%	3,2%	3,2%	2,9%	2,7%	2,7%	
35%	5,1%	5,5%	4,5%	4,5%	4,8%	4,7%	4,7%	4,5%	4,4%	4,5%	4,4%	4,4%	4,3%	4,3%	4,2%	3,8%	3,6%	3,6%	
40%	6,3%	6,8%	5,6%	5,6%	6,0%	5,9%	5,9%	5,7%	5,6%	5,7%	5,6%	5,6%	5,4%	5,4%	5,3%	4,9%	4,5%	4,5%	
45%	7,7%	8,3%	6,9%	6,9%	7,3%	7,2%	7,2%	6,9%	6,9%	7,0%	6,9%	6,8%	6,7%	6,6%	6,5%	6,0%	5,5%	5,5%	
50%	9,1%	9,8%	8,3%	8,3%	8,7%	8,6%	8,6%	8,3%	8,3%	8,4%	8,2%	8,2%	8,0%	7,9%	7,8%	7,1%	6,6%	6,6%	
55%	10,6%	11,3%	9,7%	9,7%	10,2%	10,1%	10,1%	9,8%	9,7%	9,8%	9,7%	9,6%	9,4%	9,3%	9,1%	8,4%	7,8%	7,8%	
60%	12,2%	13,0%	11,2%	11,3%	11,8%	11,6%	11,7%	11,3%	11,2%	11,4%	11,2%	11,1%	10,9%	10,7%	10,5%	9,7%	9,0%	9,0%	
65%	13,8%	14,7%	12,8%	12,9%	13,4%	13,2%	13,3%	12,9%	12,8%	13,0%	12,8%	12,7%	12,4%	12,3%	12,0%	11,0%	10,2%	10,2%	
70%	15,5%	16,4%	14,5%	14,5%	15,1%	14,9%	15,0%	14,6%	14,5%	14,6%	14,5%	14,3%	14,0%	13,8%	13,6%	12,4%	11,5%	11,5%	
75%	17,3%	18,3%	16,2%	16,2%	16,9%	16,7%	16,8%	16,3%	16,2%	16,4%	16,2%	16,0%	15,7%	15,5%	15,2%	13,9%	12,8%	12,8%	
80%	19,1%	20,1%	17,9%	18,0%	18,7%	18,5%	18,6%	18,1%	18,0%	18,2%	18,0%	17,8%	17,4%	17,2%	16,9%	15,4%	14,2%	14,2%	
85%	20,9%	22,1%	19,7%	19,8%	20,5%	20,3%	20,4%	19,9%	19,8%	20,0%	19,8%	19,6%	19,2%	18,9%	18,6%	16,9%	15,6%	15,6%	
90%	22,8%	24,0%	21,6%	21,7%	22,5%	22,2%	22,3%	21,8%	21,7%	21,9%	21,7%	21,5%	21,0%	20,7%	20,4%	18,5%	17,1%	17,1%	
95%	24,8%	26,0%	23,5%	23,6%	24,4%	24,2%	24,3%	23,7%	23,6%	23,9%	23,7%	23,4%	22,9%	22,5%	22,2%	20,2%	18,5%	18,5%	
100%	26,7%	28,1%	25,4%	25,5%	26,4%	26,1%	26,3%	25,7%	25,6%	25,8%	25,6%	25,3%	24,8%	24,4%	24,0%	21,8%	20,0%	20,0%	

Dalla Tabella 4-16 risulta evidente come una sottostima del tempo d'ispezione abbia un peso maggiore sul costo totale. Come detto in precedenza, questo è dovuto essenzialmente al fatto che sottostimare l'intervallo implica effettuare più ispezioni nel medesimo arco di tempo, che implica mancata produzione, uso di personale e attrezzature, ecc. Esiste comunque un intorno dell'ottimo, definito all'incirca tra  $-15\% t_i$  e  $+15\% t_i$  per il quale il  $\Delta C_{tot}$  risulta trascurabile.

Ricordando la definizione di  $p^*$  (2.35) e la definizione del costo totale per questa distribuzione di probabilità (2.47), si è analizzato il comportamento della funzione costo andando a modificare i vari parametri in gioco.

Per ogni valore di  $p^*$  considerato, corrispondente ad un valore di  $\lambda C_I/C_G$  ben definito, si è mantenuto in questo caso costante il costo d'ispezione  $C_I$ , andando a modificare di conseguenza il MTTF e il  $C_G$ . Come visibile dall'esempio sotto riportato, modificando di

un fattore 10 il MTTF, che passa da 2000h a 200h, il costo totale non cambia e una medesima variazione percentuale del tempo d'ispezione corrisponde ad una uguale variazione percentuale del costo.

Tabella 4-17 - Risultati delle analisi mantenendo costante il CI e variando MTTF, a parità di p\*

Caso	MTTF	CI	CG	$\lambda$	$\lambda$ CI/CG	p*	t <sub>i</sub>	t <sub>i+1</sub>	q	CI/p	$\frac{CG[-\ln(1-p)]}{MTTF/p}$	CG*MTTF	Ctot			
2	2000	2000	50	0,0005	0,02	0,181	399,3424	798,6848	0,819	11049,72	110315,5774	100000	21365,3			

t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	F(t <sub>i</sub> )	R(t <sub>i</sub> )	F(t <sub>i+1</sub> )	p	q	$\mu$	CI/p	$\frac{CG[-\ln(1-p)]}{MTTF/p}$	CG*MTTF	Ctot	%Ctot	$\Delta$ Ctot	$\Delta$ t <sub>i</sub>	% t <sub>i</sub>
279,540	559,079	0,130442	0,8696	0,2439	0,1304	0,8696	7,6663	15332,53	107151,2	100000	22483,76	105,23%	1118,46	-119,80	-30,0%
299,507	599,014	0,13908	0,8609	0,2588	0,1391	0,8609	7,1901	14380,24	107674,5	100000	22054,72	103,23%	689,42	-99,84	-25,0%
339,441	678,882	0,156099	0,8439	0,2878	0,1561	0,8439	6,4062	12812,35	108726	100000	21538,31	100,81%	173,00	-59,90	-15,0%
399,342	798,685	0,181	0,8190	0,3292	0,1810	0,8190	5,5249	11049,72	110315,6	100000	21365,3	100,00%	0,00	-	0,0%
459,244	918,487	0,205166	0,7948	0,3682	0,2052	0,7948	4,8741	9748,208	111920,1	100000	21668,3	101,42%	303,00	59,90	15,0%
499,178	998,356	0,220879	0,7791	0,3930	0,2209	0,7791	4,5274	9054,729	112998	100000	22052,76	103,22%	687,46	99,84	25,0%
519,145	1038,290	0,228619	0,7714	0,4050	0,2286	0,7714	4,3741	8748,188	113539,5	100000	22287,67	104,32%	922,37	119,80	30,0%

Caso	MTTF	CI	CG	$\lambda$	$\lambda$ CI/CG	p*	t <sub>i</sub>	t <sub>i+1</sub>	q	CI/p	$\frac{CG[-\ln(1-p)]}{MTTF/p}$	CG*MTTF	Ctot			
2	200	2000	500	0,005	0,02	0,181	39,93424	79,86848	0,819	11049,72	110315,5774	100000	21365,3			

t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	F(t <sub>i</sub> )	R(t <sub>i</sub> )	F(t <sub>i+1</sub> )	p	q	$\mu$	CI/p	$\frac{CG[-\ln(1-p)]}{MTTF/p}$	CG*MTTF	Ctot	%Ctot	$\Delta$ Ctot	$\Delta$ t <sub>i</sub>	% t <sub>i</sub>
27,954	55,908	0,130442	0,8696	0,2439	0,1304	0,8696	7,6663	15332,53	107151,2	100000	22483,76	105,23%	1118,46	-11,98	-30,0%
29,951	59,901	0,13908	0,8609	0,2588	0,1391	0,8609	7,1901	14380,24	107674,5	100000	22054,72	103,23%	689,42	-9,98	-25,0%
33,944	67,888	0,156099	0,8439	0,2878	0,1561	0,8439	6,4062	12812,35	108726	100000	21538,31	100,81%	173,00	-5,99	-15,0%
39,934	79,868	0,181	0,8190	0,3292	0,1810	0,8190	5,5249	11049,72	110315,6	100000	21365,3	100,00%	0,00	-	0,0%
45,924	91,849	0,205166	0,7948	0,3682	0,2052	0,7948	4,8741	9748,208	111920,1	100000	21668,3	101,42%	303,00	5,99	15,0%
49,918	99,836	0,220879	0,7791	0,3930	0,2209	0,7791	4,5274	9054,729	112998	100000	22052,76	103,22%	687,46	9,98	25,0%
51,915	103,829	0,228619	0,7714	0,4050	0,2286	0,7714	4,3741	8748,188	113539,5	100000	22287,67	104,32%	922,37	11,98	30,0%

Questo poiché C<sub>G</sub> e MTTF sono inversamente proporzionali all'interno di  $\lambda \frac{C_I}{C_G}$ . Ne risulta un semplice adattamento del tempo d'ispezione rivalutato su un MTTF diverso. Tuttavia, riducendo il t<sub>i</sub> ottimale è più facile effettuare un errore percentualmente più significativo. È stato successivamente effettuato un confronto come da Tabella 4-8 modificando il valore di C<sub>I</sub>, mantenendo costante il valore del MTTF. Il risultato percentuale è stato analogo, per cui il modello è valido per ogni valore di C<sub>I</sub> considerato, sempre tuttavia che il valore di  $\lambda \frac{C_I}{C_G}$  sia il medesimo. Per qualunque combinazione dei tre parametri C<sub>I</sub>, C<sub>G</sub>, MTTF il risultato risulta percentualmente identico, a patto che il valore di  $\lambda \frac{C_I}{C_G}$  sia costante.

Il risultato esposto in Tabella 4-16 è utilizzabile nel caso si ritenga che i dati disponibili come MTTF siano corretti. In tal senso, partendo dalle tempistiche correnti utilizzate dall'azienda nell'effettuare le ispezioni si va a stimare quanto ci si discosta

percentualmente dall'ottimo, e di conseguenza se vale la pena correggere il tiro. In sostanza, la procedura può essere riassunta nei seguenti step:

1. Si determinano  $C_I$  e  $C_G$  attraverso analisi interne. Sono dati noti;
2. Si considera il MTTF come dato noto, quindi si applica il modello e si va a verificare qual è l'intervallo d'ispezione che ottimizza i costi della politica ispettiva;
3. Si va a confrontare il dato ottimo con la programmazione in atto delle ispezioni;
4. Leggendo la Tabella 4-17 si riesce ad inserirsi nella colonna corretta e verificare quanto incide la percentuale di variazione di  $t_i$  rispetto all'ottimo. Se il  $\Delta\% C_{Tot}$  viene ritenuto importante, si prosegue nel modificare l'intervallo d'ispezione, così da ridurre i costi.

Questo risultato è molto interessante perché permette di fornire una diretta e veloce stima dei costi, applicabile per qualunque componente la cui ddp sia esponenziale negativa. Tutto dipende dalla qualità del dato immesso in ingresso e quindi in base all'esperienza o preferibilmente ad una raccolta dati significativa e puntuale. La determinazione del MTTF è infatti una delle difficoltà principali di qualunque modello di analisi manutentiva.

#### **4.4 Incidenza sui costi della corretta definizione degli intervalli ispettivi per componente con ddp normale**

Come nel capitolo 4.2 si vuole analizzare come varia il costo della politica ispettiva considerando una distribuzione di probabilità normale. Per questa analisi si inizia considerando la Tabella 0-10 dove sono presenti i valori ottimali del parametro  $p^*$  che minimizzano il costo della politica ispettiva, per vedere come cambia il costo totale.

In questo caso è attraverso il valore del parametro  $c$  (2.56) che si ottiene il valore ottimale di  $p^*$ . Essendo al denominatore sia  $C_G$  che  $\sigma$ , in questa sede si è deciso di modificare solo  $C_G$  per ottenere il valore di  $c$  voluto. Per cui:

- MTTF risulta costante
- $\sigma$  risulta costante

- $C_I$  risulta costante
- $C_G$  si modifica per ottenere il valore di  $c$

Successivamente sono stati eseguiti i passaggi illustrati nel capitolo 2.13 per calcolare i costi, considerando un intervallo di confidenza del 95%. I risultati ottenuti sono presenti nella Tabella 4-18 sottostante.

Tabella 4-18 -Costo totale ottimale della politica ispettiva al variare di  $C_G$  per i valori di  $c$  considerati

MTTF	$C_I$	$C_G$	$\sigma$	$c = \frac{C_I}{C_G \sigma}$	$p^*$	$C_{tot}$
1000	10000	666,67	150	0,10	0,3103	61.074
1000	10000	133,33	150	0,50	0,5397	29.312
1000	10000	95,24	150	0,70	0,6538	25.573
1000	10000	66,67	150	1,00	0,7189	22.055
1000	10000	33,33	150	2,00	0,8278	17.652
1000	10000	22,22	150	3,00	0,8769	15.574
1000	10000	16,67	150	4,00	0,9069	14.533

L'andamento è esponenziale negativo, come è visibile se messo in un grafico.

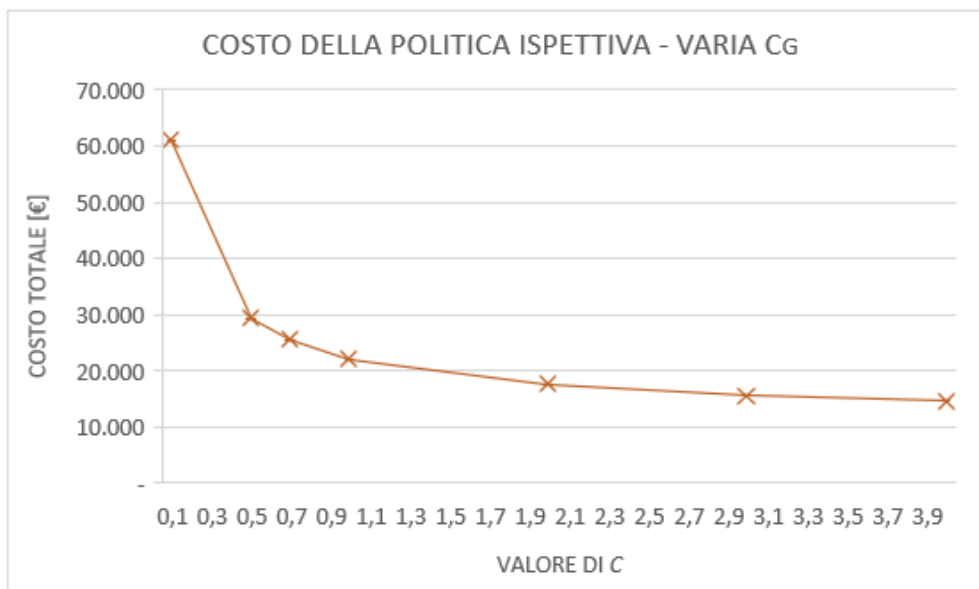


Figura 47 - Costo della politica ispettiva al variare di  $C_G$

Se invece si considera costante  $C_G$  ed aumenta di conseguenza il costo dell'ispezione, l'aumento di costo (essendo  $C_I$  al numeratore) risulta lineare.

Tabella 4-19 -Costo totale ottimale della politica ispettiva al variare di  $C_I$  per i valori di  $c$  considerati

MTTF	$C_I$	$C_G$	$\sigma$	$c = \frac{C_I}{C_G \sigma}$	$p^*$	$C_{tot}$
1000	10000	666,67	150	0.1	0,3103	61.074
1000	50000	666,67	150	0.5	0,5397	146.559
1000	70000	666,67	150	0.7	0,6538	179.010
1000	100000	666,67	150	1.0	0,7189	220.554
1000	200000	666,67	150	2.0	0,8278	353.046
1000	300000	666,67	150	3.0	0,8769	467.206
1000	400000	666,67	150	4.0	0,9069	581.314

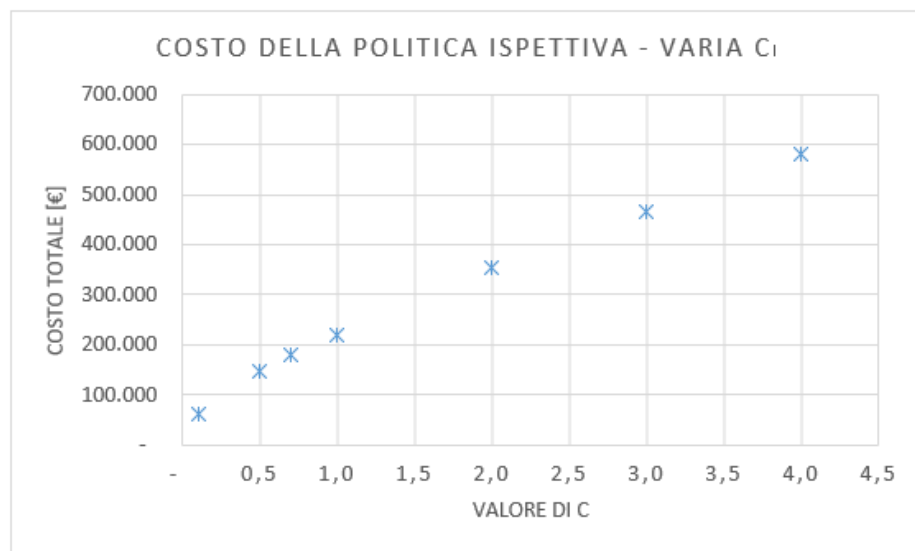


Figura 48 - Costo della politica ispettiva al variare di  $C_I$

L'aumento del costo di ispezione incide maggiormente sul costo totale, quindi l'andamento è prevedibilmente crescente al crescere del parametro  $c$ .

Considerando la distribuzione di probabilità normale, in questa analisi si è voluto verificare come incide la variazione dei vari parametri sui costi totali della politica ispettiva. È possibile infatti che non si abbiano dati completi per poter effettuare un'analisi completa e precisa.

In prima battuta si è valutato, a parità di parametri, quanto incide una variazione del MTTF. Se l'analisi è effettuata correttamente, risulta solo modificato l'istante della prima ispezione, mentre rimane costante la dimensione degli intervalli, che si riducono come previsto. Nella tabella sottostante viene riportato un confronto tra  $MTTF = 1000$  h e  $MTTF = 2000$  h, per le prime 5 ispezioni.

Tabella 4-20 - Incidenza della variazione dei MTTF sul calcolo dei tempi d'ispezione ottimali

MTTF	CI	CG	$\sigma$	$c = \frac{C_I}{C_G \sigma}$	$p^*$	t1	t2	$\Delta t_2$	t3	$\Delta t_3$	t4	$\Delta t_4$	t5	$\Delta t_5$
1000	10000	666,667	150	0,1	0,3103	925,75	1009,75	84	1066,75	57	1113,25	46,5	1153,75	40,5
2000	10000	666,667	150	0,1	0,3103	1925,75	2009,75	84	2066,75	57	2113,25	46,5	2153,75	40,5

Il costo totale risulta identico. Si è voluto procedere quindi analizzando, a parità di MTTF, quanto incide una variazione dello scarto quadratico medio. Sono stati presi in considerazione 3 casi specifici:

- $\sigma = 150$  h,  $MTTF = 2000$  h
- $\sigma = 500$  h,  $MTTF = 2000$  h
- $\sigma = 1000$  h,  $MTTF = 2000$  h

Tabella 4-21 - Incidenza della variazione dello scarto quadratico medio sul calcolo dei tempi d'ispezione ottimali

MTTF	$C_I$	$C_G$	$\sigma$	$c = \frac{C_I}{C_G \sigma}$	$p^*$	t1	t2	$\Delta t_2$	t3	$\Delta t_3$	t4	$\Delta t_4$	t5	$\Delta t_5$	$C_{tot}$
2000	10000	666,667	150	0,10	0,3103	1925,75	2009,75	84	2066,75	57	2113,25	46,5	2153,75	40,5	61.074,23
2000	10000	200	500	0,10	0,3103	1752,5	2032,5	280	2222,5	190	2377,5	155	2512,5	135	61.074,23
2000	10000	100	1000	0,10	0,3103	1505	2065	560	2445	380	2755	310	3025	270	61.074,23

Sono stati esposti in Tabella 4-21 solo i primi 5 intervalli. È evidente come aumentando l'intervallo di incertezza, aumenti la dimensione degli intervalli di ispezione, che vanno poi a ridursi come da modello. Il  $C_{tot}$  resta invariato perché il modello è ottimizzato con il parametro  $p^*$ .

La schedulazione dei tempi d'ispezione è tale da minimizzare il  $C_{tot}$  in base ai dati immessi. Come nel capitolo 4.3, anche qui si vuole andare a verificare quanto incide una non corretta applicazione del modello, stimando una variazione del tempo della prima ispezione in un intervallo [-30%; +30%] rispetto all'ottimo. Su questi nuovi istanti iniziali è stato applicato il modello.



Tabella 4-22 -Influenza di una variazione percentuale [-30%; +30%] rispetto al tempo d'ispezione ottimale nel calcolo del costo totale della politica ispettiva

	MTTF	C <sub>i</sub>	C <sub>G</sub>	σ	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	Δt <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	Δt <sub>3</sub>	C <sub>tot</sub> [€]	C <sub>tot</sub> /C <sub>tot*</sub>	Δ% C <sub>tot</sub>
-30%	2000	10000	666,667	150	1348,03	1400	51,975	1415	15	1.449.275.326,7	23729,74	2372874%
-25%	2000	10000	666,667	150	1444,31	1416,5	-27,813	1487	70,5	94.463.902,5	1546,71	154571%
-15%	2000	10000	666,667	150	1636,89	1676	39,1125	1700,75	24,75	1.273.936,8	20,86	1986%
0	2000	10000	666,667	150	1925,75	2009,75	84	2066,75	57	61.074,2	1,00	0%
15%	2000	10000	666,667	150	2214,61	2378	163,388			160.671,8	2,63	163%
25%	2000	10000	666,667	150	2407,19					280.134,1	4,59	359%
30%	2000	10000	666,667	150	2503,48					344.871,7	5,65	465%
-30%	2000	10000	200	500	1226,75	1407,5	180,75	1527,5	120	131.423,7	2,15	115%
-25%	2000	10000	200	500	1314,38	1507,5	193,125	1637,5	130	92.524,2	1,51	51%
-15%	2000	10000	200	500	1489,63	1712,5	222,875	1865	152,5	64.477,7	1,06	6%
0	2000	10000	200	500	1752,5	2032,5	280	2222,5	190	61.074,2	1,00	0%
15%	2000	10000	200	500	2015,38	2357,5	342,125	2597,5	240	71.836,4	1,18	18%
25%	2000	10000	200	500	2190,63	2577,5	386,875	2855	277,5	86.190,3	1,41	41%
30%	2000	10000	200	500	2278,25	2692,5	414,25	2985	292,5	97.896,2	1,60	60%
-30%	2000	10000	100	1000	1053,5	1515	461,5	1830	315	63.106,9	1,03	3%
-25%	2000	10000	100	1000	1128,75	1605	476,25	1930	325	62.209,9	1,02	2%
-15%	2000	10000	100	1000	1279,25	1785	505,75	2135	350	61.980,6	1,01	1%
0	2000	10000	100	1000	1505	2065	560	2445	380	61.074,2	1,00	0%
15%	2000	10000	100	1000	1730,75	2335	604,25	2765	430	62.394,1	1,02	2%
25%	2000	10000	100	1000	1881,25	2525	643,75	2980	455	66.575,9	1,09	9%
30%	2000	10000	100	1000	1956,5	2620	663,5	3085	465	68.657,8	1,12	12%

Nella Tabella 4-23 sono stati riportati solo i primi 3 istanti di tempo per dare un ordine di grandezza, mentre il  $C_{tot}$  è stato calcolato sul totale. Risulta subito evidente quanto più la distribuzione di probabilità è stretta, tanto più risulta costoso sbagliare. Si può dire che:

- Sottostimare  $t_1$  e poi ottimizzare il modello su tale valore aumenta considerevolmente il numero di ispezioni necessarie. Conseguentemente aumenta enormemente anche il costo totale, poiché riducendosi sempre più gli intervalli non si arriva mai a convergenza, o solo dopo un numero elevatissimo di ispezioni;
- Riducendo lo scarto quadratico medio  $\sigma$ , un errore nella stima di  $t_1$  produce effetti molto più gravi. Al contrario, tanto più la distribuzione è spanciata, tanto più si riducono le differenze, fino ad appiattirsi come nel terzo caso;
- In generale, costa di più sottostimare l'istante iniziale piuttosto che sovrastimarlo. Questo si riconduce al fatto che il costo di ispezione è la voce di costo predominante, e quindi aumentarne il numero significa aumentare il costo totale.

In tutti e tre i casi ottimizzando il modello si ottiene lo stesso costo totale, ma una stessa variazione percentuale dell'istante di tempo iniziale produce effetti estremamente diversi.

A tal proposito, si è voluto estendere questa considerazione anche agli altri valori ottimizzati di  $p^*$ , e vedere per essi quanto incide una sottostima o una sovrastima dell'istante iniziale. La metodologia è stata la medesima del caso appena trattato. Si è considerato per questa analisi:

- $MTTF = 1000h$
- $\sigma = 150h$
- $c$  e  $p^*$  ottimizzati secondo il modello
- $C_I$  e  $C_G$  sono stati modificati di conseguenza per ottenere il valore di  $c$  desiderato

Tabella 4-23 - Influenza di una variazione percentuale [-30%; +30%] rispetto al tempo d'ispezione ottimale sul calcolo del costo totale della politica ispettiva

MTTF	C <sub>i</sub>	C <sub>G</sub>	σ	c = $\frac{C_I}{C_G \sigma}$	p*	-30%			-25%			-15%			0			15%			25%			30%		
						C <sub>tot</sub> /C <sub>tot*</sub>	Δ% C <sub>tot</sub>	C <sub>tot</sub> /C <sub>tot*</sub>	Δ% C <sub>tot</sub>	C <sub>tot</sub> /C <sub>tot*</sub>	Δ% C <sub>tot</sub>	C <sub>tot</sub> /C <sub>tot*</sub>	Δ% C <sub>tot</sub>	C <sub>tot</sub> /C <sub>tot*</sub>	Δ% C <sub>tot</sub>	C <sub>tot</sub> /C <sub>tot*</sub>	Δ% C <sub>tot</sub>	C <sub>tot</sub> /C <sub>tot*</sub>	Δ% C <sub>tot</sub>	C <sub>tot</sub> /C <sub>tot*</sub>	Δ% C <sub>tot</sub>	C <sub>tot</sub> /C <sub>tot*</sub>	Δ% C <sub>tot</sub>	C <sub>tot</sub> /C <sub>tot*</sub>	Δ% C <sub>tot</sub>	
1000	10000	666,667	150	0,10	0,3103	16,96	1596%	7,39	639%	1,66	66%	0%	1,47	47%	2,07	107%	2,53	153%								
1000	10000	133,333	150	0,50	0,5397	12,52	1152%	5,89	489%	1,95	95%	0%	1,22	22%	1,61	61%	1,77	77%								
1000	10000	95,2381	150	0,70	0,6538	9,02	802%	4,44	344%	1,51	51%	0%	1,27	27%	1,59	59%	1,79	79%								
1000	10000	66,6667	150	1,00	0,7189	8,05	705%	4,12	312%	1,63	63%	0%	1,25	25%	1,53	53%	1,70	70%								
1000	10000	33,3333	150	2,00	0,8278	6,20	520%	3,37	237%	1,46	46%	0%	1,16	16%	1,37	37%	1,48	48%								
1000	10000	22,2222	150	3,00	0,8769	5,44	444%	3,05	205%	1,40	40%	0%	1,14	14%	1,31	31%	1,39	39%								
1000	10000	16,6667	150	4,00	0,9069	4,85	385%	2,79	179%	1,35	35%	0%	1,12	12%	1,26	26%	1,30	30%								

MTTF	C <sub>i</sub>	C <sub>G</sub>	σ	c = $\frac{C_I}{C_G \sigma}$	p*	-30%			-25%			-15%			0			15%			25%			30%		
						C <sub>tot</sub> /C <sub>tot*</sub>	Δ% C <sub>tot</sub>	C <sub>tot</sub> /C <sub>tot*</sub>	Δ% C <sub>tot</sub>	C <sub>tot</sub> /C <sub>tot*</sub>	Δ% C <sub>tot</sub>	C <sub>tot</sub> /C <sub>tot*</sub>	Δ% C <sub>tot</sub>	C <sub>tot</sub> /C <sub>tot*</sub>	Δ% C <sub>tot</sub>	C <sub>tot</sub> /C <sub>tot*</sub>	Δ% C <sub>tot</sub>	C <sub>tot</sub> /C <sub>tot*</sub>	Δ% C <sub>tot</sub>	C <sub>tot</sub> /C <sub>tot*</sub>	Δ% C <sub>tot</sub>	C <sub>tot</sub> /C <sub>tot*</sub>	Δ% C <sub>tot</sub>	C <sub>tot</sub> /C <sub>tot*</sub>	Δ% C <sub>tot</sub>	
1000	1500	100	150	0,10	0,3103	16,96	1596%	7,39	639%	1,66	66%	0%	1,47	47%	2,07	107%	2,53	153%								
1000	7500	100	150	0,50	0,5397	12,52	1152%	5,89	489%	1,95	95%	0%	1,22	22%	1,61	61%	1,77	77%								
1000	10500	100	150	0,70	0,6538	9,02	802%	4,44	344%	1,51	51%	0%	1,27	27%	1,59	59%	1,79	79%								
1000	15000	100	150	1,00	0,7189	8,05	705%	4,12	312%	1,63	63%	0%	1,25	25%	1,53	53%	1,70	70%								
1000	30000	100	150	2,00	0,8278	6,20	520%	3,37	237%	1,46	46%	0%	1,16	16%	1,37	37%	1,48	48%								
1000	45000	100	150	3,00	0,8769	5,44	444%	3,05	205%	1,40	40%	0%	1,14	14%	1,31	31%	1,39	39%								
1000	60000	100	150	4,00	0,9069	4,85	385%	2,79	179%	1,35	35%	0%	1,12	12%	1,26	26%	1,30	30%								

Percentualmente la variazione tra le due analisi risulta identica in tutto e per tutto, ma ciò che cambia è ovviamente il costo dell'ottimo, che sarà più elevato per il secondo modello, dove varia  $C_1$  essendo più incisivo.

Come detto anche nei casi precedenti, una sottostima dell'istante iniziale d'ispezione risulta più impattante rispetto ad una sovrastima percentualmente opposta, come è visibile dal grafico seguente.

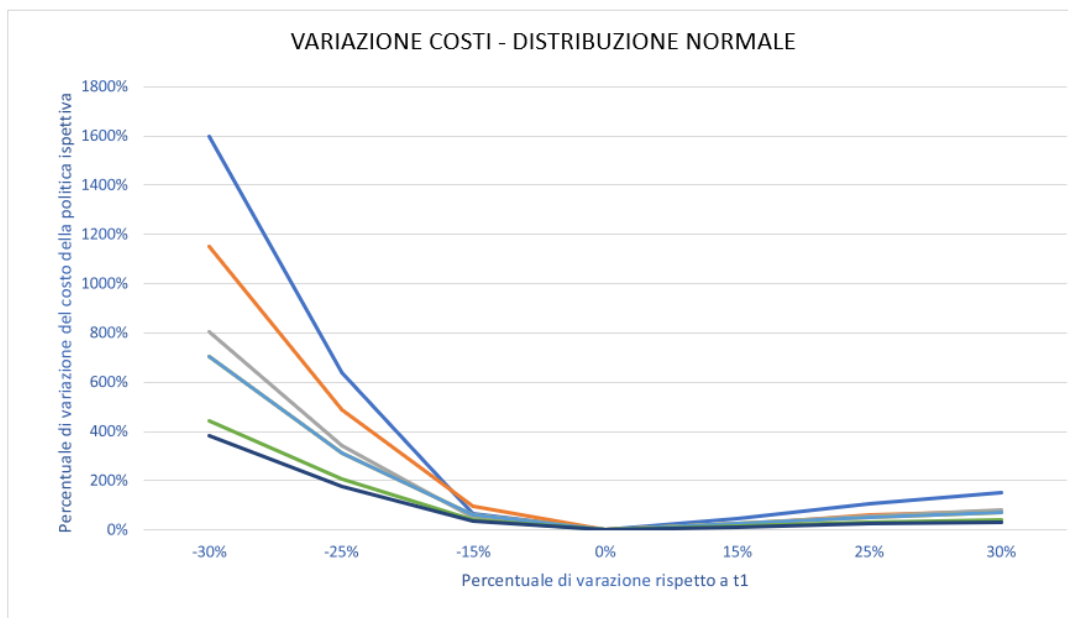


Figura 49 - Variazione percentuale dei costi della politica ispettiva con la variazione percentuale rispetto a  $t_1$  indicata

Il  $\Delta\% C_{tot}$  risulta tanto più elevato quanto minore è il parametro  $c$ ; da  $c = 4$  a  $c = 0,1$  risulta più di quattro volte superiore se considerato un  $\Delta t_1 = -30\%$ , mentre più di cinque volte superiore se si considera un  $\Delta t_1 = +30\%$

## 4.5 Conclusioni

Non potendo conoscere a priori la distribuzione di probabilità del componente, è necessario avere una solida base di dati per poter effettuare le analisi in modo corretto. È necessario innanzitutto conoscere il punto della *bathtub curve* in cui ci si trova per quel

determinato componente, poiché cambia il modello per minimizzare i costi cambiando la distribuzione di probabilità, infatti:

- Un rateo di guasto costante implica una distribuzione di probabilità esponenziale negativa, e pertanto si utilizza il modello descritto nel capitolo 2.12. Ci si trova nella parte centrale della *bathtub curve*. Non considerando l'invecchiamento del componente, non aumenta con il tempo il rateo di guasto, pertanto esso rimane casuale ed è necessario effettuare ispezioni ad intervalli regolari;
- Un rateo di guasto crescente, in cui si considera l'invecchiamento del componente, implica una distribuzione di probabilità gaussiana, e quindi si utilizza il modello descritto nel capitolo 2.13. Ci si trova nella parte finale della *bathtub curve*. L'invecchiamento del componente implica un rateo di guasto crescente procedendo con il tempo.

I dati storici sono poi necessari per identificare il *MTTF* e l'eventuale scarto quadratico medio  $\sigma$ , in modo da stimare correttamente il primo istante di tempo in cui effettuare l'ispezione. Bisogna anche considerare la possibilità di investire in strumenti più efficaci e costosi per una più corretta definizione del *MTTF* esatto; il Paragrafo 4.2 punta a dare una quantificazione dei benefici ottenibili. I risultati hanno evidenziato come una variazione del *MTTF* dell'1% comporta una variazione di circa lo 0,5% sia per quanto riguarda i tempi d'ispezione che dei costi totali. Ciò permette di quantificare eventuali benefici ottenibili da una riduzione del *MTTF* o comunque l'aumento di costo previsto della politica ispettiva se il *MTTF* reale fosse maggiore. Da questi risultati emerge come la variazione sia significativa, soprattutto se si considera un *MTTF* ridotto. Infatti, mentre per un componente che viene sostituito una volta all'anno ( $MTTF \approx 6500$  h) una variazione dell'1% equivale a 65 ore, ovvero diversi giorni di lavoro, per un componente con un *MTTF* molto più basso, come 1000 h, 1% è meno di un giorno. Di conseguenza, può essere molto significativo migliorare il sistema di raccolta dati, visto che il  $C_{tot}$  varia dell'1% ogni 2% di variazione del *MTTF*. Per cui aver sovrastimato il *MTTF* del 10% implica sostenere un costo della politica ispettiva di circa il 5% superiore. Se l'errore nella stima del *MTTF* è elevato, la variazione dei costi risulta significativa, e sarà pertanto necessario utilizzare un sistema di raccolta dati più efficiente al fine di migliorare i dati iniziali d'analisi, su cui poi andare ad ottimizzare gli intervalli d'ispezione.

A prescindere dai costi della singola ispezione e di intervento in caso di guasto per unità di tempo, una volta definito e corretto il MTTF è infatti la cadenza con cui effettuare le ispezioni che risulta fondamentale per l'ottimizzazione dei costi. Se non si ha una solida base di dati, è altresì probabile che si vada a sottostimare l'istante iniziale d'ispezione, nell'ottica di *prevenire invece che curare*, ma questa scelta può produrre effetti molto significativi in termini di costi.

Nel caso in cui si consideri un rateo di guasto costante, la Tabella 4-17 racchiude la sintesi di quanto è emerso. In sostanza, considerando il MTTF affidabile, si ottiene che una variazione compresa tra [-15%, +15%] rispetto alla cadenza d'ispezione ottimale produce variazioni trascurabili. Quindi, è possibile incastrare più attività modificando i tempi d'ispezione per ottimizzarle, senza aumentare per questo i costi in modo significativo. Questo risultato nella pratica è molto utile, poiché si cerca di effettuare più ispezioni e analisi possibili nello stesso momento, sfruttando un unico fermo impianto.

Per quanto riguarda invece una distribuzione di probabilità normale, si porta ad esempio il  $C_{tot}$  relativo ad un componente con  $MTTF = 1000h$ ,  $\sigma = 150h$ ,  $C_I = 7500 \text{ €}$  e  $C_G = 100 \text{ €/h}$ , così che risulti  $c = 0,5$ .

Tabella 4-24 - Quantificazione della variazione percentuale del costo totale della politica ispettiva con i parametri inseriti

MTTF [h]	$C_I$ [€]	$C_G$ [€/h]	$\sigma$ [h]	$c = \frac{C_I}{C_G \sigma}$	$C_{tot}$ [€]	$C_{tot}/C_{tot}^*$	
1000	7500	100	150	0,5	275222	12,5	-30%
1000	7500	100	150	0,5	129550	5,9	-25%
1000	7500	100	150	0,5	42942,5	2,0	-15%
1000	7500	100	150	0,5	21983,7	1,0	0
1000	7500	100	150	0,5	26787,7	1,2	15%
1000	7500	100	150	0,5	35313,4	1,6	25%
1000	7500	100	150	0,5	38971,6	1,8	30%

Una sottostima di  $t_1$  del 15% raddoppia i costi totali della politica ispettiva, mentre una sottostima del 30% aumenta di più di 12 volte il costo totale. Dalle analisi svolte risulta quindi anti-intuitivo come sia più vantaggioso posticipare l'ispezione piuttosto che anticiparla, andando contro quello che è l'idea alla base della manutenzione stessa. Ma

dati alla mano, una politica più previdente risulta molto più costosa, senza portare vantaggi significativi.





## Capitolo 5

# APPLICAZIONE AD ALCUNE LINEE D'IMBOTTIGLIAMENTO

### 5.1 Premessa

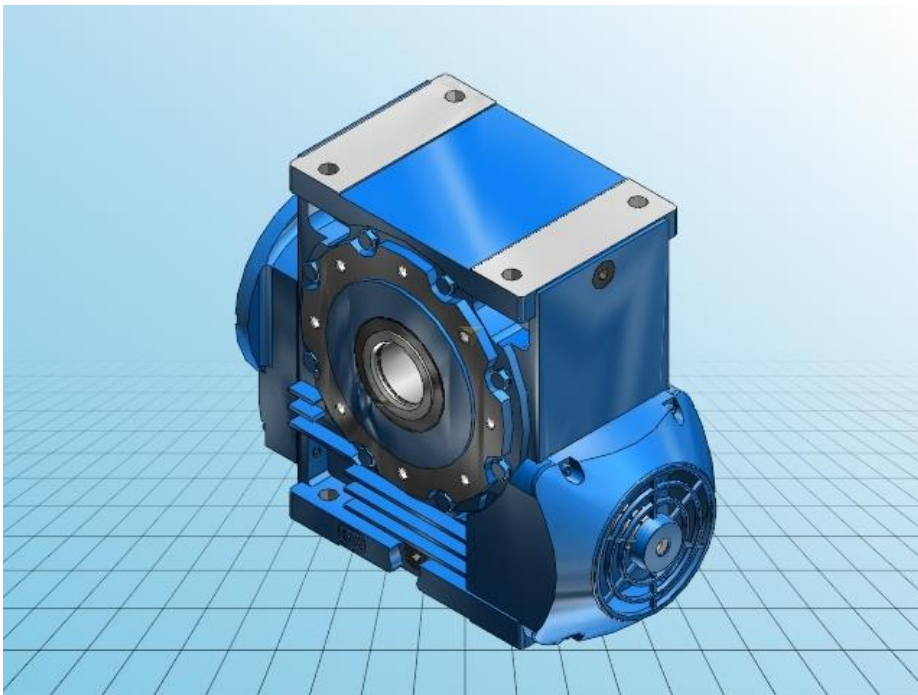
In questo capitolo si vuole applicare quanto analizzato nel capitolo precedente in un caso pratico. Si vuole considerare un componente che risulti comune a diverse linee di imbottigliamento e per il quale venga applicata la manutenzione preventiva su condizione. Questo perché nello stabilimento produttivo di Scorzè sono presenti 23 linee di imbottigliamento che, come detto nel Capitolo 3, imbottigliano prodotti diversi, con carichi produttivi differenti e che portano a margini diversi. Per esempio, la Linea 39 è l'unica sulla quale è possibile imbottigliare lattine, e pertanto tutta la produzione annuale deve essere schedata in base alla capacità produttiva della singola linea. Al contrario, se si considera l'imbottigliamento di acqua, vi sono più linee sulle quali ripartire il carico, permettendo quindi di far fronte a richieste improvvise date dalla stagionalità del prodotto. Inoltre, c'è da considerare il fatto che il prodotto "acqua" è a basso valore aggiunto ed ha quindi un margine basso, mentre una bibita, specialmente se prodotta in asettico, ha una marginalità più alta. Date queste premesse, è facile intuire come possano variare, talvolta anche sensibilmente, i costi d'ispezione e di unità di tempo per intervento. È possibile pertanto effettuare un'analisi comparativa su come viene gestita la manutenzione per tale componente e come è possibile ottimizzarla, in relazione al modello descritto, in modo personalizzato per ogni linea di imbottigliamento.

### 5.2 Scelta del componente

La ricerca del componente è stata effettuata con una serie di parametri di scelta:

- Componente comune alle diverse linee
- Componente per il quale fosse necessario avere la linea ferma per poter effettuare l'ispezione
- Componente per il quale è già prevista la manutenzione preventiva su condizione

È stato quindi analizzato il Master di Manutenzione, in collaborazione con il Responsabile della Manutenzione e il Capo dei Manutentori. La scelta è ricaduta sul Motoriduttore della macchina più importante della linea, ossia la Riempitrice. È necessario infatti che la Riempitrice funzioni al meglio delle sue capacità, essendo il collo di bottiglia di tutta la linea e determinando quindi la produzione della linea, cui verranno sottratti gli scarti e le difettosità.



*Figura 50 - Componente scelto per l'analisi*

Per le tre linee considerate in questa analisi il motoriduttore non è esattamente lo stesso, ma la variazione di prezzo e di prestazioni non risulta essere significativa.

È stato scelto questo componente poiché il suo corretto funzionamento risulta essenziale. All'interno della riempitrice tutti i movimenti devono essere sincronizzati correttamente, poiché altrimenti possono avvenire grandi danni. Se ad esempio la bottiglia in PET non entra correttamente all'interno della giostra, essa può essere schiacciata e portare quindi a uno scarto. Discorso simile può essere fatto sulle bottiglie in vetro, che però vengono ammaccate o scheggiate e risultano quindi non conformi e non vendibili. La tolleranza per il gioco tra vite e corona è quindi molto bassa, perché deve garantire il movimento in sincro tra stelo ed entrata riempitrice. Considerati anche i ritmi produttivi di alcune linee, che arrivano anche a 55-60'000 [pz/ora], non è consentito un funzionamento non corretto, e pertanto tale componente viene gestito tramite manutenzione preventiva su condizione, attraverso la quale viene analizzato il gioco.

### **5.3 Scelta delle linee di imbottigliamento**

In questa analisi si è voluto procedere analizzando i costi della politica manutentiva per tre linee di imbottigliamento. Queste sono state scelte considerando alcuni fattori:

- Le tre linee devono imbottigliare prodotti differenti, con marginalità diverse
- Devono avere carichi di lavoro elevati durante l'anno
- Devono avere ricambi recenti e non dover ricorrere a personalizzazioni che ne aumentano i costi
- Siano noti i MTTF per i componenti in quella linea e i costi relativi di manutenzione

Linee diverse imbottigliano prodotti diversi, ma anche con velocità diverse. Ad esempio, una linea vetro deve necessariamente avere una velocità più bassa per non rischiare di danneggiare le bottiglie nella loro movimentazione e nel riempimento stesso, dato anche il peso elevato. Al contrario, una linea che lavora con le lattine può avere velocità molto maggiori, dati anche i volumi ridotti del contenitore. Ciò porta ad uno sfruttamento diverso del motoriduttore della riempitrice, che se viene sottoposto a velocità maggiori e ad un carico di lavoro più cospicuo durante il corso dell'anno riduce la sua vita utile.

La scelta è quindi ricaduta su:

- Linea 31: imbottigliamento di acqua e bibite gassate in bottiglie di vetro. Il carico di lavoro è elevato durante tutto l'anno anche a causa delle velocità ridotte dovute alla manipolazione del vetro
- Linea 58: imbottigliamento di acqua naturale e gassata in PET, principalmente con formato da 0,5 l. Essendo questo formato molto richiesto dal mercato, il carico di lavoro risulta elevato durante tutto l'anno
- Linea 64: imbottigliamento di bibite piatte in asettico. Grande richiesta del mercato nazionale ed estero, unita alla varietà di prodotti fa sì che la produzione sia consistente anche in bassa stagione

## 5.4 Determinazione dei Costi

Per la determinazione dei costi d'ispezione e costo per unità di tempo di un funzionamento a guasto si sono considerati:

- Costo del materiale di ricambio/sostituzione
- Numero di risorse impiegate
- Tempo medio di svolgimento dell'intervento
- Costo di mancata produzione durante l'ispezione
- Costo diretto d'ispezione
- Costo dell'energia
- Costo dell'utilizzo della strumentazione, se utilizzata
- Costi sostenuti per un funzionamento "*out of specifications*", quantificabili in base ad una riduzione percentuale dell'efficienza della linea e dall'aumento di scarti, che riducono il margine orario potenziale

In particolare, il costo orario di mancata produzione è stato calcolando tenendo conto di vari fattori, quali:

- Stagionalità del mercato
- Saturazione della linea
- Costo della fermata
- Tipologia di prodotto

Questo tenendo sempre conto della marginalità differente dei prodotti imbottigliati nelle diverse linee.

Per andare a valutare il costo  $C_G$  per unità di tempo di un intervento al guasto è stato necessario prima effettuare una ricerca sui costi direttamente allocabili alla linea di riferimento considerati i prodotti estremamente diversi tra loro, sia in ambito di strutture che di costi da ripartire. Per il prodotto acqua è stato quindi necessario utilizzare un valore inferiore rispetto alle altre.

## 5.5 Considerazioni sul MTTF

La Linea 31 è quella con velocità media più bassa. Pertanto, il MTTF di questa linea è molto alto. La sostituzione del componente viene effettuata ogni 4 anni, ma la cadenza delle ispezioni è una volta ogni due mesi. La Linea 58 invece ha un ritmo produttivo più alto, pertanto la sostituzione viene fatta ogni due anni. Anche in questo caso l'intervallo d'ispezione è di due mesi. Varia il discorso invece per la Linea 64, che ha un ritmo produttivo elevato ma rimane più scarica durante l'anno, e la sostituzione del componente viene effettuata ogni 3 anni. Il periodo d'ispezione è in questo caso di tre mesi.

Come detto le tre linee hanno velocità d'imbottigliamento diverse, che portano a un'usura drasticamente differente. Lo stesso componente può avere per una linea un MTTF quadruplo o quintuplo rispetto ad una linea che lavora a velocità più elevate. In ogni caso il MTTF è stato valutato in base all'effettivo utilizzo, quindi andando a considerare lo storico dei turni effettivamente svolti nel corso dell'anno (ogni turno di 8 ore), e pertanto valutando in ore il tempo in cui ogni impianto è stato effettivamente attivo durante l'anno, per poi andare a valutare in passato ogni quanto è stato sostituito in base alle ore effettivamente operate. Per calcolare il MTTF sono stati considerati:

- Lo storico degli interventi effettuati
- Il carico di lavoro delle linee d'imbottigliamento negli anni passati, considerati il numero di giorni lavorati durante l'anno e il numero di turni singoli, giornalieri o tripli turni

In questo senso, utilizzare uno strumento più accurato per la rilevazione del MTTF potrebbe rivelarsi una mossa molto utile, in quanto, come esposto nel Paragrafo 4.2, modificando dell'1% il MTTF si modifica dello 0,5% il Costo Totale della politica ispettiva.

## 5.6 Ottimizzazione dei tempi d'ispezione

Per questi componenti viene considerata una distribuzione di probabilità esponenziale negativa, il tasso di guasto è considerato pertanto indipendente dal tempo, risultando costante, senza invecchiamento. Vale  $MTTF = \frac{1}{\lambda}$ .

Parimenti è stato così calcolato il numero di ore di effettivo funzionamento corrispondenti al tempo d'ispezione attuale, in modo da avere un valore di riferimento per il confronto rispetto all'ottimo. A tal proposito sono state eseguite due analisi distinte: la prima tiene come riferimento il valore di costo relativo alla sola alta stagione, considerandola come standard annuale e rimanendo in ottica cautelativa a causa della variabilità del mercato. La seconda invece è stata fatta andando a pesare la mancata produzione in funzione di un *fattore stagionale* che distinguesse tra bassa, media ed alta stagione. Questa scelta è stata fatta in virtù del fatto che in bassa e media stagione ci sia sempre un margine operativo da poter sfruttare nel caso vi sia la necessità, mentre in alta stagione ci si avvicina maggiormente alla saturazione della linea per far fronte alla domanda più elevata.

Utilizzando quindi le equazioni (2.35), (2.37), (2.41), (2.44), (2.50), (2.53), è stato calcolato il costo totale della politica ispettiva, il parametro  $p^*$  che minimizzasse tale curva di costo. Quindi si sono ricavati gli intervalli di tempo d'ispezione corrispondenti, che sono stati poi confrontati con quelli attualmente in uso nella politica ispettiva in uso. I risultati sono racchiusi nelle 3 tabelle seguenti.

Tabella 5-1 - Risultati delle analisi sulla Linea 31

Linea 31		
	$\Delta\%C_{tot}$	$\Delta\% t_i$
Alta Stagione	0,1%	-4,7%
Media Ponderata	0,1%	3,9%

Per valutare i risultati bisogna poi considerare la *Figura 43*, che evidenzia la presenza di un plateau nell'intorno dell'ottimo. Inoltre, bisogna considerare l'enorme bagaglio d'esperienza dei manutentori dell'azienda e il fatto che le macchine siano simili tra le varie linee d'imbottigliamento. Le analisi evidenziano come per la linea vetro gli intervalli d'ispezione siano abbastanza vicini all'ottimo percentualmente parlando. È un risultato coerente con il fatto che tale linea sia una delle più utilizzate, e pertanto si sia già ottimizzato nel tempo tale intervallo. Attualmente si utilizza un tempo d'ispezione di circa 1143h. Considerando il valore di  $C_I$  relativo all'alta stagione, l'attuale intervallo d'ispezione è sottostimato del 4,7%, poiché l'ideale sarebbe effettuare un'ispezione ogni 1200 ore. Questo diventa invece una sovrastima del 3,9% nel caso venga considerato un valore ponderato, poiché l'ideale sarebbe circa 1100 ore. In entrambi i casi, essendo nell'intorno dell'ottimo, la variazione di costo ottenibile risulta presso che trascurabile.

Peggiora la situazione se si considera la Linea 64. In questo caso si è voluto considerare anche la saturazione dell'impianto, essendo la linea più scarica durante l'anno tra quelle considerate, ma con prodotti la cui richiesta del mercato potrebbe variare nel corso del tempo.

Tabella 5-2 - Risultati delle analisi sulla Linea 64

Linea 64		
	$\Delta\%C_{tot}$	% ti
Alta Stagione	0,2%	6,1%
Media Ponderata	1,8%	20,2%
Saturazione	0,8%	-9,8%

Ciò detto, si può vedere come l'approccio cautelativo, considerando i  $C_I$  fissi durante l'anno e pari a quelli relativi all'alta stagione, risulti il più vicino al modello applicato. Attualmente si effettua un'ispezione ogni 540 ore di effettivo utilizzo. L'intervallo d'ispezione viene attualmente sovrastimato del 6,1%, poiché l'ideale sarebbe ogni 510 ore, che porta anche in questo caso ad una maggiorazione del costo della politica ispettiva trascurabile. Il discorso però cambia se si considera una media pesata durante l'anno, che porta la sovrastima al 20,2% essendo l'ideale di 450 ore; con tali dati la variazione percentuale di costo diventa più sensibile e quasi del 2%. Al contrario, in una possibile

situazione di saturazione si avrebbe una sottostima di quasi il 10%, essendo l'ottimo a 600 ore. Si nota in ogni caso come sia maggiore la variazione di costo se si sottostimasse l'intervallo.

L'ultima analisi è quella che ha fornito i risultati più significativi. Gli intervalli d'ispezione sono simili alla linea 31, considerato che anche il livello di saturazione della linea non si distacca di molto. Varia però considerevolmente il MTTF, poiché la velocità della Linea 58 è molto maggiore rispetto alla linea vetro. Si discosta anche la voce di costo  $C_G$ , che risulta diminuita sensibilmente rispetto alle altre due. I risultati dell'analisi sono i seguenti.

Tabella 5-3 - Risultati delle analisi sulla Linea 58

Linea 58		
	$\Delta\%C_{tot}$	% ti
Alta Stagione	4,9%	33%
Media Ponderata	8,3%	53%

Si vede come qui gli intervalli d'ispezione ottimali siano molto differenti rispetto all'ottimo. Attualmente viene effettuata una ispezione ogni 1068 ore circa. Preso il caso riferito al  $C_1$  relativo dell'alta stagione, così allineato con il caso reale per le altre due linee, in questo caso la sovrastima sale fino al 33%, poiché l'ottimo sarebbe effettuare un'ispezione ogni 800 ore. Addirittura, si sale al 53% se si considera la media ponderata, essendo l'ideale 700 ore. Ciò porta ad un aumento dei costi decisamente più sensibile, pari rispettivamente al 4,9% e all'8,3%. In questo caso attualmente si applica una strategia manutentiva simile alla linea 31, essendo l'utilizzo della due linee simile, ma a causa delle velocità drasticamente diverse il MTTF risulta talmente inferiore da rendere le stime non corrette.



## 5.6 Valutazioni Finali

Dalle analisi effettuate risulta evidente come, sebbene ci sia un carico d'esperienza aziendale notevole, non risulta ottimizzata quanto potrebbe l'organizzazione del Piano di Manutenzione rispetto al costo totale. Si possono utilizzare questa analisi per procedere ulteriormente lì dove si siano messi i presupposti per un miglioramento sostanziale. Riguardo la linea 58, ad esempio, è possibile ottimizzare l'intervallo d'ispezione per questo componente, considerato tra i più importanti essendo fondamentale per il corretto funzionamento della riempitrice, e adeguare le restanti ispezioni con importanza relativa inferiore in modo da ripartire su più componenti i costi d'ispezione.

Ancora meglio sarebbe effettuare analisi ulteriori per determinare correttamente il MTTF dei componenti. Successivamente si potrà valutare l'intervallo in modo migliorato e ottimizzare correttamente il modello.



# CAPITOLO 6

## IL SISTEMA INFORMATIVO DI MANUTENZIONE

### 6.1 Introduzione

Il problema principale riscontrato nei capitoli 4 e 5 è fondamentalmente la base di dati iniziale da cui poter cominciare le analisi. Spesso le aziende si affidano ad uno strumento tremendamente versatile, semplice da utilizzare ed intuitivo qual è Excel per le più svariate analisi. Enormi database vengono gestiti in locale dalle varie figure aziendali, raccogliendo informazioni utili per il proprio lavoro.

Spesso quindi i dati relativi alla manutenzione, quali i componenti sostituiti, la cadenza degli interventi, i tempi necessari, sono registrati in una serie di documenti diversi, localizzati in cartelle su pc locali o, se condivise, comunque sparse su varie ripartizioni dei server e non in un unico luogo. Se ogni persona ha una propria cartella nella quale gestisce i dati relativi al proprio lavoro, nominando i file senza una chiave di standardizzazione, risulta complesso per un'altra persona cercare nello specifico determinate informazioni, e l'unico modo risulta contattare la persona che se ne occupa per cercare di risalire alle informazioni volute. Per quanto riguarda invece interventi effettuati in passato, non si ha una tracciabilità ben definita ma ci si affida all'esperienza dei manutentori, capi impianto o tecnici di linea, che occupandosi da molti anni della propria linea produttiva conoscono la propria area di competenza e riescono a risalire a ciò che è avvenuto. Questo crea molte difficoltà quando si vuole risalire a dati certi e fare analisi più approfondite, poiché quelli che ci sono, se ci sono, risultano essere parziali o comunque incompleti.

Per realizzare infatti un piano di manutenzione efficace, a prescindere dalla politica adottata, è necessario avere un adeguato supporto informativo, così da avere un flusso organico di dati organizzati e coerenti, il cosiddetto *Sistema Informativo di Manutenzione*. Esso viene definito dall'Ente Nazionale di Unificazione come *il complesso di norme, procedure e strumenti atti a raccogliere ed elaborare le informazioni necessarie per la*

*gestione delle attività di manutenzione e per il monitoraggio delle attività degli impianti.* La conoscenza del comportamento degli impianti e dei componenti risulta cruciale nella gestione della manutenzione. Per applicare correttamente i modelli che si basano sulla teoria dell'affidabilità è fondamentale avere una base di dati corretta e utilizzabile, con la conoscenza puntuale del comportamento a guasto del componente preso in esame. Ecco che in quest'ottica, uno strumento potente come un PLM può risultare estremamente vantaggioso per una raccolta dati efficiente ed efficace. In questo capitolo si vuole introdurre il PLM Teamcenter di Siemens ed il suo utilizzo in Acqua Minerale San Benedetto, in particolare in ottica manutentiva e di raccolta dati, esplicitando come può essere utilizzato nel migliorare il piano di manutenzione e la raccolta dati.

## 6.2 Cos'è un PLM

La gestione del ciclo di vita di un prodotto (PLM = Product Lifecycle Management) è una strategia aziendale, di business e tecnologica che consente ad un'azienda di collegare le varie aree aziendali, disposte fisicamente in aree diverse condividendo le informazioni. È un ambiente nel quale si gestisce e coordina tutta la vita di un prodotto, cominciando dalla fase di progettazione, alla realizzazione, post-vendita e smaltimento, permettendo alle varie aree di condividere le informazioni legate al prodotto e al processo in un unico luogo, aumentando l'efficienza aziendale.



Figura 51 - PLM e relazioni con tutta la vita del prodotto

Integra al suo interno le altre soluzioni presenti in azienda, come l'ERP per la pianificazione degli acquisti e delle risorse, gli strumenti CAD, CAM e CAE in fase di progettazione, i criteri di Project Management, ecc. Si evitano così le ripetitività nelle fasi di lavorazione e si ottimizzano le lavorazioni stesse secondo le BOM (Bill of Materials). Si evitano le inutili ricerche di informazioni tra reparti diversi, poiché sono immediatamente disponibili a tutti, tracciando le varie attività. Gli obiettivi fondamentali di un PLM sono quindi:

- Condividere efficacemente le informazioni, coordinando i processi multidisciplinari nel ciclo di vita del prodotto
- Aumentare il tasso d'innovazione
- Ridurre il time-to-market
- Ottimizzare le risorse
- Eliminare le ridondanze
- Gestire al meglio i dati aziendali, automatizzando i flussi di lavoro
- Creare collegamenti tra aree diverse, sincronizzando e accelerando le attività
- Aumentare l'efficienza produttiva, consentendo di ridurre il tempo dedicato al reperimento delle informazioni
- Eliminare errori costosi o rilavorazioni, fornendo una visuale dall'alto dell'intero ciclo del prodotto
- Aumentare i ricavi, allineando le scelte aziendali ai requisiti del mercato
- Gestire le modifiche mediante la valutazione del relativo impatto sulle varie fasi residue del ciclo di vita del prodotto
- Ridurre i costi di gestione

### **6.3 Il PLM in Acqua Minerale San Benedetto: Teamcenter di Siemens**

In Acqua Minerale San Benedetto si è scelto di affidarsi a Teamcenter, un software PLM con struttura modulare sviluppato da Siemens. Viene sfruttato un database condiviso su server dedicato, e tramite rete aziendale viene condiviso sui pc abilitati al suo utilizzo. Teamcenter ha un'interfaccia integrata con il pacchetto Office, che permette di utilizzare

i formati diffusi nelle diverse aree senza sforzo. In ottica manutentiva è stato scelto di creare l'Ufficio Struttura Aziendale, con il compito di ricreare il diagramma ad albero di tutta l'azienda, divisa nei suoi stabilimenti produttivi. Ogni linea d'imbottigliamento viene ricreata nella sua totalità, andando dove necessario ad aumentare il grado di dettaglio. Vi sono le varie macchine, i trasporti, gli impianti ausiliari, macchine per la plastica, componenti, identificati con codici univoci e quindi facilmente richiamabili. Questo viene fatto per più obiettivi:

- Ricreare la struttura aziendale
- Utilizzare la struttura così creata come base sulla quale effettuare una corretta e proficua raccolta dati, da poter analizzare per analisi future
- Avere una panoramica immediata dell'intera azienda, permettendo una gestione migliorata di tutti i componenti

Ci si vuole soffermare in particolare su quest'ultimo punto: in un'azienda molto grande ed estesa, con volumi produttivi così elevati, è fondamentale avere chiara la gestione delle macchine e dei ricambi. Tuttavia, utilizzando strumenti flessibili ma in locale, come fogli di carta o fogli Excel, risulta complesso tenere traccia dei componenti e delle modifiche effettuate. Capita spesso che un macchinario o un impianto non sia subito funzionale al 100%, ma abbia bisogno di modifiche e adattamenti. Questi vengono effettuati anche quando si vuole realizzare un prodotto nuovo su una macchina in cui non era previsto, con la necessità di adattare i formati, con tutte le problematiche relative. Di conseguenza, non sempre si ha in ogni momento un'immagine chiara e condivisa da tutti di ciò che è presente realmente in linea, e per farlo è necessario contattare i Tecnici di Linea o i Capi Impianto che hanno le informazioni richieste. Tuttavia, la perdita di tempo in alcuni casi può risultare molto elevata, con file che seppur condivisi su server condivisi non sono immediatamente trovabili da chi non conosce il *modus operandi* della singola persona. Ecco allora che un software PLM può risultare cruciale nel reperire immediatamente le informazioni necessarie; nonostante abbia una curva di apprendimento più elevata rispetto ad un sistema facile da utilizzare come Excel, il PLM permette di avere una visuale immediata e ben chiara di ciò che è avvenuto nel tempo, mantenendo tutta la storicità delle modifiche e da chi è stata effettuata, così da conoscere anche la situazione precedente e verificare che azioni sono state compiute, cosa impossibile in un foglio Excel a meno di non creare una copia del file ad ogni modifica. La flessibilità dello strumento

Teamcenter permette di adattare il software alle esigenze dell'utilizzatore grazie ad un'architettura modulare e ad un'interfaccia aperta ed ergonomica.

### 6.3.1 Componenti Generici, Semilavorati e designazioni

In Acqua Minerale San Benedetto è stato deciso di dividere i componenti acquistati esternamente da quelli prodotti internamente: i primi vengono indicati con la denominazione CG (= codice generico) seguito da 6 cifre (es. CG123456), mentre i secondi sono indicati con SL (= semilavorato) seguito da 6 cifre (es. SL234567). Il semilavorato viene prodotto internamente e può essere frutto dell'elaborazione di macchinari o più semplicemente di *Reverse Engineering*, così da produrre un certo componente ad un prezzo inferiore rispetto a fornitori terzi, i cui rincari nel tempo rendono necessario questo accorgimento. Allo stesso modo si possono definire altri *item* in modo da distinguerli in modo immediato:

- Un impianto di imbottigliamento viene definito con IP
- Un documento con DO seguito da 13 cifre
- Schemi elettrici e documentazione idrica hanno la propria designazione, ecc.

Questa flessibilità permette di avere subito chiaro cosa si sta osservando, mentre il codice numerico identifica in modo univoco quell'oggetto. La scelta dell'indicazione risulta ovviamente personalizzabile, così da essere adattata all'azienda che lo utilizza e al proprio modo di ragionare.

### 6.3.2 Item Neutri e Physical Parts

Si distinguono poi gli *item neutri* e le *physical part*; le prime rappresentano i “componenti a catalogo”, ossia quelli che si possono ad esempio vedere sul sito di un fornitore, mentre le seconde rappresentano le vere e proprie parti fisiche, distinte tra loro attraverso un numero di serie univoco sebbene appartengano allo stesso modello. Dallo stesso *item neutro* posso derivare diverse *physical part*, che avranno lo stesso codice neutro a cui però si aggiunge anche numero di serie specifico. In Teamcenter ogni modifica è tracciata e prende il nome di *Revisione*. Tra parti neutre e parti fisiche è stato scelto di identificare in modo distinto il numero di revisioni, che passa da una sequenza di lettere per le prime

(revisione A, B, C, ...) ad una sequenza di numeri per le seconde (revisione 0001, 0002, 0003, ...). Creando una nuova parte fisica basata sulla revisione /F dell'item neutro, questa avrà revisione 0001, essendo effettivamente la prima; se si dovesse *ri-basare*, ossia basare la nuova revisione della fisica su una successiva modifica della neutra /G, allora prenderebbe nomenclatura 0002. Si veda negli schemi seguenti l'esempio di un codice generico identificativo di una elettropompa.

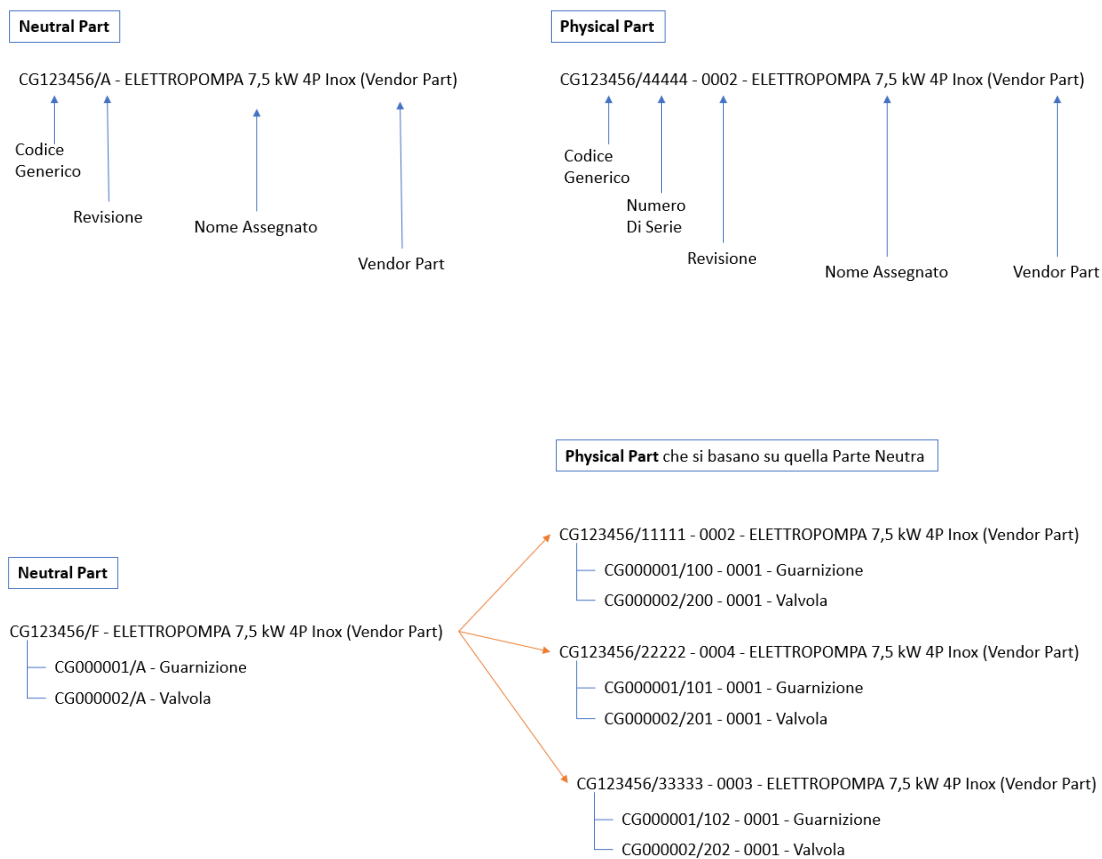


Figura 52 - Neutral Part e Physical Part

Si vede come il codice CG123456 rimanga lo stesso per tutti, perché effettivamente rappresenta il medesimo modello basato su quella *Neutral Part*, ma cambia il Numero di Serie, essendo effettivamente oggetti fisici diversi.



### 6.3.3 Vendor Part

Il *Vendor Part* rappresenta un collegamento, per quell'oggetto, corrispondente alla somma del modello e del venditore. Se la Pompa fosse di modello A123, venduta dalla ditta XYZ, al posto di "(Vendor Part)" ci sarebbe "(A123 XYZ)", così da identificare immediatamente il modello, noto nella dicitura agli addetti ai lavori, e chi la vende. Questo viene fatto in modo tale da avere anche un collegamento diretto con il SAP e avere quindi allineati i codici identificativi dell'azienda e del venditore, che sono ovviamente diversi seguendo ognuno la propria logica, ma uniti in un unico luogo così da avere immediatamente accesso alle informazioni.

### 6.3.4 Impact Analysis

La possibilità di creare collegamenti di questo tipo rappresenta un grande punto di forza per la gestione, poiché se viene effettuata una modifica, lo si fa tramite revisione di un solo item, aggiornando in automatico tutti i collegamenti relativi. In tal modo si riescono ad avere sempre le informazioni aggiornate. All'interno di Teamcenter è possibile utilizzare la *Impact Analysis*, strumento che serve a trovare tutti i collegamenti con quell'oggetto e risalire a dov'è utilizzato. È uno strumento molto potente, che permette di risalire anche a tutte le attività che sono state svolte prima di quel momento, e potenzialmente anche da chi sono state effettuate, poiché ogni account è personale.

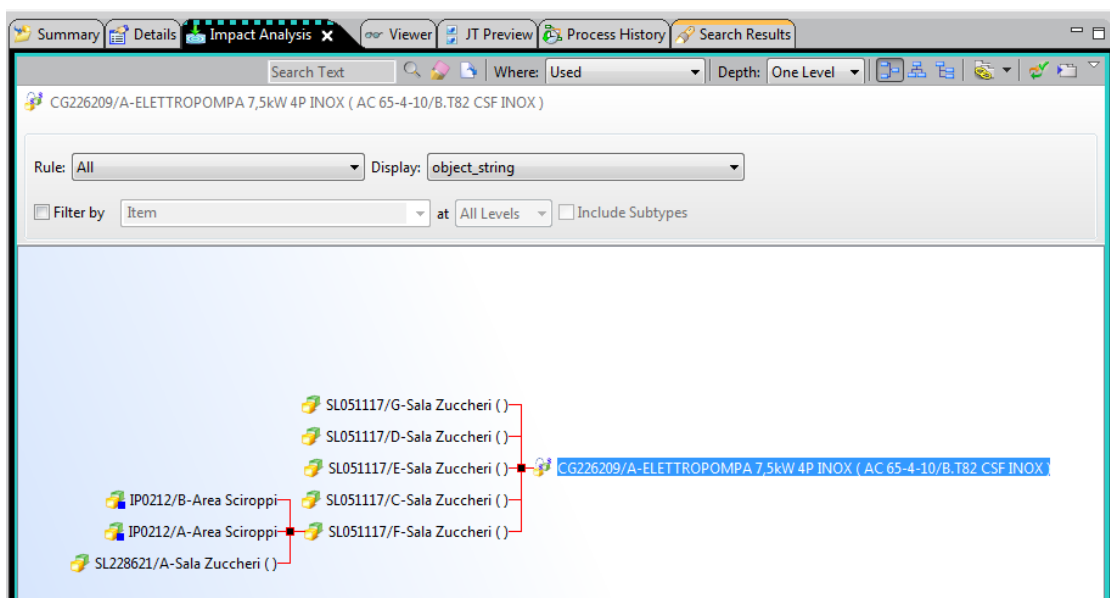


Figura 53 - Impact Analysis all'interno dell'interfaccia Teamcenter

### 6.3.5 Codici nuovi e codici riparati

Altra distinzione viene effettuata per codici nuovi e codici riparati. Se un componente appena acquistato ha un certo valore commerciale, esso non sarà lo stesso dopo un certo tempo e dopo varie riparazioni, ma diminuirà. Per distinguere all'interno del programma componenti nuovi e riparati si è deciso di utilizzare lo stesso nome, con gli stessi item collegati, ma con un codice diverso, in modo da poterne distinguere il valore commerciale:

- CG123456/A - Pompa 7,5 kW 4P (A123 XYZ)
- CG987654/A - ++ Pompa 7,5 kW 4P (A123 XYZ)

### 6.3.6 Part Logistic Form

Se si prende un componente neutro, in questo caso una Piattaforma CIP (= Cleaning in Place), prendendo il codice relativo si nota come vi sia un item *padre*, con il quale vengono effettuati i collegamenti, e i vari item *figli* o revisioni, contraddistinte dalla lettera.

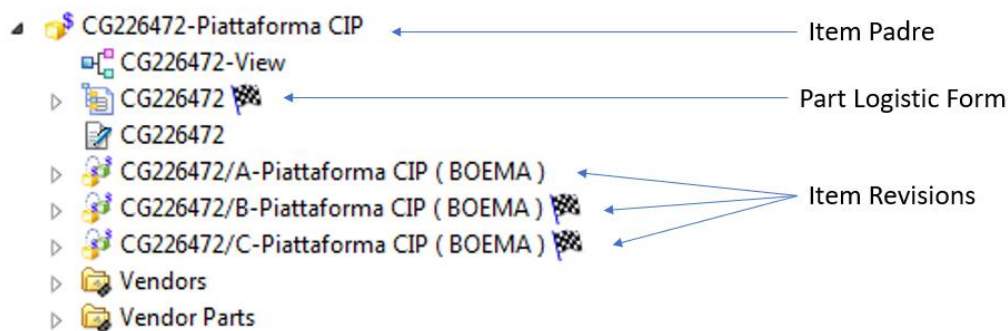


Figura 54 - Logica tra item padre e revisioni all'interno di Teamcenter

Quando si effettua un ri-basamento di una parte fisica sulla neutra, il sistema prende automaticamente l'ultima revisione disponibile (in questo caso la C) su cui basarsi per le modifiche. Assume importanza anche il cosiddetto *Part Logistic Form*, ossia un modulo in cui distinguere come verrà gestita la tracciabilità del componente.

CG227487

owning\_user: Costagliola Valerio last\_mod\_date: 24-Jun-2019 15:02

Properties

Traceable:  True  False

Serialized:  True  False

Lot:  True  False

---

Rotable:  True  False


Consumable:  True  False

Preserve Quantity:  True  False

Life Limited:  True  False

Figura 55 - Part Logistic Form

**TRACCIABILITA'**  
**TABELLA RIASSUNTIVA**



0000000026950/# :3-Tracciabilità - Tabella Riassuntiva

Traceable	Serialized	Preserve Quantity	Rotable	Consumables	Lot	Denominazione Comune	NOTE
False	False	False	False	False	False	Non Tracciabile non presente in distinta	Componente che è materiale di consumo durante la manutenzione. Viene riportato il codice nell'intervento di manutenzione Esempio: - Teflon, guanti di plastica...
False	False	False	False	False	False	Non Tracciabile ma presente in distinta	Componente di cui non interessa la movimentazione nella macchina (non è oggetto di manutenzione preventiva) e che non è soggetto alla certificazione. Questo componente è però presente in distinta con una specifica bollatura. Esempio: - O-Ring, viti, dadi, guarnizioni, raccordi di estremità SR, Nipples
True	False	False	False	True	False	Tracciabilità Semplice	1. Componente che in SAP viene gestito a lotti. Ogni componente avrà la sua bollatura (es. per i dadi di un valvola V12, saranno V12-01, V12-02,...) Esempi: - O-Ring, guarnizioni con Certificazione CE 1935/04 - Viti, Dadi, Flange, Tubazioni con Certificazione 3.1, Cavi Elettrici. 2. Componente che viene generalmente buttato dopo la disinstallazione, di cui non interessa la storia della manutenzione, ma solo quante volte è stato cambiato il pezzo in quella determinata posizione o che è oggetto della Manutenzione Preventiva. La bollatura sarà per esempio V1, SC01, F02... Esempi: Valvole Manuali, Scaricatori di Condensa, Silenziatori, Fari Aria, Olio
True	False	True	False	True	False	Tracciabilità con Preserve Quantity	Componente che viene generalmente buttato dopo la disinstallazione, di cui non interessa la storia della Manutenzione, ma solo quante volte è stato cambiato il componente in quella determinata posizione o che è soggetto alla Manutenzione Preventiva. Di questi componenti, per una specifica posizione, possono esserne cambiati più componenti contemporaneamente durante la manutenzione. Esempio: - Anelli Segger: Nei rulli in genere si cambia sia il destro che il sinistro...in ogni caso. - Guarnizioni di una Valvola: se si è consumata una guarnizione, in ogni caso si cambia anche l'altra.
True	False	False	False	True	True	Gestione a Lotti	Caso di componente che viene gestito a lotti in SAP. Componente che viene generalmente buttato dopo la disinstallazione. Per il momento si è deciso di gestire in TC solamente le Resistenze elettriche delle Confezionatrici.
True	True	False	True	False	False	Gestione a Serie o Tracciabilità superiore	Componente che generalmente viene manomontato; quindi viene smontato, mandato in officina oppure da un fornitore esterno per manomontarlo. Esempi: - Organi di sicurezza: Pressostati, Flussostati per aria compressa, vapore e acqua surriscaldata - Pompe, Valvole modulatori, scambiatori, motori grandi, inverter - Core e Lip (che hanno un codice SL). Questi attualmente in SAP vengono gestiti a lotti di produzione SB. Verranno gestiti a serie. - Rulli gommati, Alberi, Lame fisse o rotanti. In questi casi, non è inciso un Serial Number nel pezzo. Quando il componente viene mandato a riparare, bisogna attaccarci una targhetta provvisoria con il SN o Barcode che è impostato in TC. <b>Attenzione!</b> Se il Fornitore mette il Serial Number su un componente non è obbligatorio che anche noi gestiamo il componente a serie. (Esempio: le campine di filtrazione dell'acqua, oppure i filtri per aria compressa di bassa categoria PED che di solito gestiamo come "usa e getta").

Figura 56 - Tabella tracciabilità, logiche decisionali

A seconda dell'importanza del componente infatti, questo verrà gestito in modo diverso in ottica manutentiva. Risulta controproducente andare a tracciare guanti di plastica monouso, poiché è un'operazione lunga e inutile. Altri componenti invece, come le

pompe, vengono gestite a serie, ossia viene effettuata la manutenzione e non gettato una volta che non svolge più la sua funzione. Questi componenti quindi vengono smontati, inviati in officina o presso manutentori esterni, riparata e quindi riportata in linea funzionante (o in magazzino ricambi). Il *Part Logistic Form* risulta quindi fondamentale per distinguere i vari componenti, in fase di creazione, per come verranno gestiti a manutenzione.

### 6.3.7 Struttura di Teamcenter

La struttura di Teamcenter è modulare, dove ogni modulo adempie ad una determinata funzione. In Ufficio Struttura Aziendale in particolare si utilizzano i seguenti moduli:

- *MyTeamcenter*: la schermata principale, viene utilizzata per aprire i vari CG, SL o item in genere, effettuare ricerche o utilizzare l'*Impact Analysis*;
- *Classification*: Classificatore, lo si utilizza nel momento in cui si crea un nuovo codice. In esso sono presenti vari cassetti con tutti gli attributi di tutti i componenti, ricambi, ecc.. Sono presenti le classi di oggetti (che sono state precedentemente identificate, come ad esempio la classe *Pompe* contenente le sottoclassi *Pompe Centrifughe*, *Pompe a Membrana*, ecc.) e quindi tutti gli attributi ritenuti necessari, come informazioni fisiche, dimensionali, ingombri, trattamenti termici, materiali, ecc.;
- *Service Manager*: modulo nel quale si va a modificare effettivamente le *Physical Parts*. Solo l'Ufficio Struttura Aziendale e gli admin del sistema hanno accesso a questo modulo, che permette di modificare le informazioni affinché l'utente finale ottenga i risultati voluti in fase di ricerca;
- *Structure Manager*: è il modulo utilizzato nella creazione delle parti neutre delle distinte, ossia le Bill of Material, che verranno utilizzate successivamente come base per creare le Physical Parts;
- *Workflowviewer*: serve per identificare le operazioni che devono essere svolte in una determinata procedura, verificare a che punto si è, quali sono state svolte o ancora in corso d'opera. La sequenza di operazioni risulta comoda per avere un quadro generale, con il sistema che manda in automatico i messaggi con richiesta/completamento dei vari step in modo da non intasare i server e non dover scrivere mail di richiesta ogni volta all'utente che deve prendersi carico dello step

successivo. All'interno è presente anche l'attività, con una specie di cartella condivisa dove vi sono i file associati alle operazioni da svolgere. In tal modo non è necessario scaricarsi in locale gli stessi file più volte, ma si ha un luogo sicuro dove i documenti sono riposti e aggiornati in tempo reale.

### 6.3.8 La Creazione della Bill of Material

La creazione della BOM può avvenire sostanzialmente in tre modi, profondamente diversi:

1. In sede di progettazione, è il progettista stesso a creare la BOM nel dettaglio, collegando anche i CG associati a quei determinati componenti o provvedendo ad indicare le lavorazioni interne. È la modalità da preferire, poiché è il progettista stesso che conosce al meglio la sua creazione e sa cosa è necessario. Così facendo si riesce a non commettere errori e a non perdere tempo nella ricerca di componenti o sostituti, poiché si inserisce direttamente quanto previsto;
2. In fase di acquisto, si delega al fornitore la lista della BOM, che andrà poi inserita all'interno del programma partendo da una base molto solida, avendo concretamente in mano la lista di tutti i componenti;
3. Tramite *Reverse Engineering*: è la modalità meno indicata, ma la più utilizzata partendo da un'azienda già saldamente radicata. In un'azienda che non è nata 4.0, ma ha una storicità importante come Acqua Minerale San Benedetto, vi sono macchinari o impianti appartenenti agli anni '50, di cui nel corso del tempo sono stati persi i manuali, l'azienda fornitrice ha chiuso e quindi non sono più reperibili, oppure sono state modificate nel corso del tempo e di queste non se n'è tenuta traccia. Se per chi lavora da anni su quella macchina possono non esserci problemi a riconoscere componenti e funzionamento, il discorso diventa diverso per un non addetto ai lavori che esegue quindi un'azione di ricerca e cerca di capire il funzionamento, chiamando chi di dovere per eventuali spiegazioni. La creazione di gruppi funzionali, sotto cui inserire i vari componenti andando sempre più nel dettaglio, risulta in questo modo complessa e richiede molto tempo, perché prevede una fase iniziale lunga e collaborazione da parte di più persone, che non sempre sono disponibili poiché impegnate in altre attività che hanno la precedenza. Oltretutto è necessario inserire nella BOM il componente utilizzato,

univoco e a cui deve essere collegato anche il dato proveniente dal SAP. È necessaria perciò una fase iniziale di ricerca delle informazioni su ciò che fisicamente è montato in linea per ottenere tutti i dettagli voluti. Ciò risulta molto semplice per macchinari relativamente nuovi, riuscendo addirittura ad utilizzare documentazione digitale oltre alla targhetta identificativa apposta sulla macchina stessa. Risulta invece molto complesso nel caso di macchinari o componenti vecchi, o comunque componenti che nel tempo vengono aggiornati o modificati esteticamente, per cui anche una ricerca visiva via cataloghi risulta inefficace.

Nel caso di Acqua Minerale San Benedetto si sta procedendo prevalentemente attraverso la terza metodologia. Questo risulta un enorme svantaggio per l'utilizzo efficace del PLM in ottica manutentiva, poiché prima di poter effettuare delle analisi è necessario reperire le informazioni, codificare e introdurre all'interno del programma una mole enorme di dati, con le difficoltà sopra riportate.

Parimenti c'è da considerare che Teamcenter è uno strumento flessibile, che si può adattare sulle esigenze dell'azienda, ma finché questa non ha un *modus operandi* funzionale e funzionante, possono avvenire modifiche in corso d'opera che possono anche minare la bontà del lavoro già svolto.

Nel paragrafo 6.3.6 è stato definito il *Part Logistic Form*, che in questo caso risulta avere molta importanza. È infatti necessario definire il modo in cui verranno gestiti durante la manutenzione i vari componenti, perché lo scopo ultimo non deve e non può essere quello di monitorare ogni cosa che succede ad ogni piccolo e trascurabile componente, ma va gestito per ciò che serve. Relativamente alle pompe può essere fatto un esempio diretto: se in fase iniziale si decide che lo scopo è quello di verificare quante volte viene manutentionata il modello A123, per stabilire una base di dati sulla quale creare un piano di manutenzione specifico, fino a che punto è necessario spingersi con la distinta? Risulta complesso e inutile creare codici per girante, guarnizioni, viti, motore, ecc. se poi le informazioni relative ad esse non vengono utilizzate in alcun modo. Ecco quindi che risulta fondamentale una diretta collaborazione tra i manutentori, chi inserisce i dati e chi effettua le analisi sui costi. Il grado di dettaglio con cui si vuole ricreare la BOM deve essere pertanto funzionale allo scopo delle analisi che si vogliono effettuare.

## 6.4 L'utilizzo di Teamcenter in ottica manutentiva

Il primo fine dell'utilizzo di Teamcenter risulta essere quello di avere una corretta panoramica di tutta l'azienda, riuscendo a censire macchinari e componenti. In tal modo si trasferiscono le informazioni in possesso solamente di chi lavora a stretto contatto con le macchine e le linee d'imbottigliamento a chiunque voglia (e possa) accedervi all'interno dell'azienda. Risultano in tal senso fondamentali i vari collegamenti che vengono effettuati con i codici; andando a vedere una determinata pompa montata in una posizione definita all'interno di una linea d'imbottigliamento, posso risalire tramite tali collegamenti allo schema di flussi di tutta la linea, oppure alle macchine presenti, ai costruttori di esse e ai codici presenti in SAP per il riordino, oppure semplicemente a documenti, foto o mail allegate. In tal modo anche a distanza di anni si riesce a risalire in modo semplice a tutte le informazioni relative alla storia del componente, alle difficoltà che ci sono state, alle modifiche che sono state fatte, ecc.

Una visione panoramica dell'azienda permette poi di ottimizzare anche le scorte di sicurezza a magazzino. Sapendo che la stessa macchina o lo stesso componente è montato in varie aree dello stabilimento, permette di avere anziché  $n$  scorte di una certa dimensione una sola che riduca il totale, riducendo al contempo i costi di gestione a magazzino e i costi di riordino, andando ad effettuare ordini di lotti maggiori.

In secondo luogo, si riesce a costruire una base di dati per future analisi. Spesso e volentieri si utilizzano fogli Excel personali nei quali si inseriscono solo le informazioni che interessano per una determinata attività, oppure fogli condivisi che tuttavia risultano estremamente pesanti di difficile lettura. Tramite PLM invece si possono raccogliere tutte le informazioni esclusive di quel componente sotto il codice corrispondente. In tal modo si può costruire ad esempio uno storico delle volte in cui è andato in manutenzione, dei momenti in cui sono stati effettuati gli spostamenti (smontaggio, invio a magazzino, invio eventuale a manutentori esterni, tempi di riparazione, ritorno in azienda, rimontaggio in linea), ma anche di quali problemi sono stati riscontrati, quali componenti sono stati sostituiti, eventuali considerazioni dei manutentori, ecc. In pratica tutte le informazioni utili per quel determinato componente vengono racchiuse in un unico luogo comune e non dislocate in innumerevoli file ridondanti d'informazioni e di difficile accesso. Costruire una base di dati significativa permette di effettuare analisi più approfondite sui

costi di manutenzione, in modo da trovare il minimo delle varie curve e così ottimizzare efficacemente tutti i piani di manutenzione.

Si riescono poi ad associare tutte le attività di manutenzione ordinaria o straordinaria svolte sulla specifica *Physical Part*. Solitamente infatti le attività di manutenzione vengono gestite tramite appositi fogli compilati dai manutentori, nei quali vengono indicati:

- Tipo di attività manutentiva svolta, scelta tra a guasto, preventiva su condizione, preventiva ciclica, migliorativa, straordinaria;
- Nome dell'operatore che svolge l'attività ed il periodo di tempo nel quale è stata svolta;
- Impianto, macchina e posizione all'interno dello schema presente in azienda, che identifica univocamente quel determinato componente;
- Causa presunta del guasto;
- Attività svolta;
- Se è stato sostituito un pezzo, la sigla e il codice a magazzino del componente, nonché la quantità di materiale utilizzato;
- Eventuali note sull'intervento.





- Avere una visione più precisa e immediata di quali siano i componenti critici
- Andare quindi ad agire su tali componenti per eliminare le criticità e aumentare il tempo di utilizzo della macchina
- Utilizzare i dati storici per creare piano di manutenzione più efficace
- Ridurre i costi
- Ridurre i tempi di inserimento

L'ultimo punto ricade nell'ottica del miglioramento continuo e dell'avere una visione il più possibile aggiornata di quanto accade nello stabilimento in tempo reale. Precedentemente infatti potevano passare anche mesi prima che la scheda cartacea venisse inserita nel sistema, poiché una singola persona aveva il compito di inserire i dati, verificando anche eventuali errori e contattando le persone che avevano compilato le schede nel caso non fosse chiaro ciò che era scritto. Se invece è il manutentore stesso che si opera nell'inserire in digitale le informazioni, aumenta l'efficienza del processo totale e ciò consente di reagire in modo immediato nel caso vi siano una serie di dati al di fuori della norma.

## **6.5 I vantaggi che si vogliono ottenere**

L'utilizzo del PLM Teamcenter all'interno della realtà aziendale ha l'obiettivo di migliorare la gestione della manutenzione sotto molteplici aspetti.

- Garantire la tracciabilità degli interventi, permettendo di sapere quando è stato svolto, quante volte nel corso della vita dell'entità, in che posizione. Ciò permette di avere uno storico personalizzato d'interventi per quel singolo componente, che è sottoposto a carichi di lavoro diversi rispetto ad altri in posizioni differenti;
- Gestione della documentazione del componente che va in manutenzione. Ora come ora viene gestito a cartelle, ed è un problema poiché per alcuni componenti, come gli inverter, la manutenzione prevede anche il settaggio di alcuni parametri, che devono essere immediatamente richiamati e non sempre l'informazione è di facile reperimento;
- Accessibilità a tutti delle informazioni: come detto, lo strumento deve servire ai manutentori per velocizzare ed ottimizzare le operazioni, ma chi si occupa

dell'inserimento dei dati non è un tecnico onnisciente in tutti i campi, e pertanto potrebbe commettere errori. I diretti interessati quindi hanno modo di verificare i dati e comunicare eventuali notifiche d'errore, oltre che a suggerire evoluzioni utili per il loro lavoro, migliorando continuamente il sistema. Pertanto, è il programma stesso che si adatta alle esigenze dell'azienda e al suo *modus operandi*;

- Se durante gli interventi vengono fornite informazioni e note, queste possono essere riutilizzate negli interventi successivi perché rimangono direttamente attaccati al componente;
- È possibile inserire e ricollegare uno standard d'interventi per le varie posizioni, personalizzati, che possano dare una mano al manutentore suggerendo procedure e strumentazioni da utilizzare per quel determinato intervento;
- Inserire direttamente un timer di scadenza della manutenzione, che avvisi in automatico quando si avvicina il momento di effettuarla. Questo può essere uno strumento di grandissima utilità che permetta di alleggerire il Piano di Manutenzione e suddividerlo per ogni componente, potendo poi essere richiamato e filtrato a piacere nella sua totalità senza passare necessariamente per un foglio Excel condiviso e che contiene tutte le informazioni;
- Attraverso una BOM chiara e precisa, chiunque osservi riesce ad avere un'idea chiara di come funziona la macchina, senza aver bisogno del tecnico che la conosce nello specifico. In questo modo si riesce a capire anche dov'è situato il componente soggetto ad analisi all'interno della macchina stessa, a quali gruppi funzionali appartiene, ecc.;
- Il sistema Teamcenter è certificato, a differenza di un foglio di calcolo, il che non consente manomissioni o falsificazioni dei dati introdotti, ma è tutto tracciato. Questo permette, soprattutto in un'azienda alimentare, di risalire a tutta la filiera produttiva e ad ogni componente che è stato a contatto con gli alimenti, verificando se presenta certificazione FDA;
- In tal senso viene garantita anche la tracciabilità dei componenti stessi, con il sistema che prevede di poter verificare la situazione presente in una determinata finestra di tempo, risalendo potenzialmente anche al lotto d'appartenenza di tutto ciò che era in utilizzo in quel momento nella posizione considerata;
- Consentire un sistema di priorità d'intervento per i manutentori; attualmente gli interventi di manutenzione vengono svolti a chiamata del Tecnico di Linea, che

nel momento della necessità chiama tramite telefono il manutentore meccanico od elettrico, che magari non è libero essendo impegnato in altre attività. È possibile creare un sistema d'organizzazione delle risorse indipendente dalla chiamata fisica, che permette ai TL di inserire in ambiente comune il tipo d'intervento da svolgere e la gravità della situazione (ad esempio con priorità alta se la macchina è ferma, media e bassa). I manutentori riescono a vedere quali sono gli interventi da fare, prenderli in carico secondo la priorità e la zona dell'azienda in cui si trova, permettendo di ridurre drasticamente i tempi persi e ottimizzando anche l'ordine d'esecuzione degli interventi;

- Utilizzando dei barcode collegati alla *Physical Part*, si può risalire tramite palmare a tutta la documentazione relativa, i parametri e le procedure, permettendo al contempo di indicare l'inizio e la fine dell'intervento (ed eventuali pause nel mezzo), riuscendo a fornire un dato accurato anche sulla tempistica dell'intervento;
- È possibile creare un sistema interconnesso alle diverse aree aziendali, che permetta, nel momento in cui viene effettuato l'intervento, di richiamare dal magazzino tutti i componenti necessari per esso facendo sì che arrivino direttamente in quella posizione, senza che sia il manutentore a doversene prender carico e riducendo quindi i tempi morti.

## CONCLUSIONI

In questo lavoro di tesi è stato analizzato l'impatto economico di una corretta definizione degli intervalli d'ispezione sui costi di manutenzione. Si prende in considerazione la manutenzione preventiva su condizione, ovvero quella più diffusa attualmente nel settore industriale, che permette di sfruttare maggiormente i componenti avvicinandosi alla fine della vita utile, poiché il componente è sostituito solo quando effettivamente necessario, riducendo i costi di manutenzione e aumentando contemporaneamente la disponibilità. Si tratta di un'analisi volutamente generale, che parte da formulazioni ben presenti in letteratura per andare a verificare quanto è "permesso" distaccarsi dal modello teorico per andare incontro alle diverse esigenze pratiche. Teoria e realtà infatti spesso si scontrano tra loro, ed è necessario avere uno strumento che risulti il quanto più flessibile possibile per raccogliere e soddisfare le esigenze del più elevato numero di aree possibili. Questo perché al giorno d'oggi la manutenzione deve essere quanto più integrata e collaborativa possibile, intersecandosi al meglio con produzione, project management, logistica, ecc.

In tal senso i risultati di questo elaborato sono molto incoraggianti, in particolare se si considera la parte centrale del periodo di vita utile di qualunque entità, che viene rappresentata nella parte centrale della *bathhtub curve*, nel quale si ha un rateo di guasto indipendente dal tempo e quindi costante, rappresentato da una distribuzione di probabilità esponenziale negativa. Questo considerando il fatto che lo scopo ultimo della manutenzione è quello di estendere la durata di questa vita utile, come visibile in Figura 6.

Minimo comune denominatore di queste analisi è la corretta definizione dei parametri iniziali, ovvero  $C_I$ ,  $C_G$  e il MTTF. Se per i primi due è necessario un coinvolgimento del Controllo di Gestione, che conserva e protegge i dati più sensibili, per la corretta stima del MTTF è necessario un sistema informativo di manutenzione adeguato, che permetta di creare ed utilizzare una base di dati ampia ed efficace. In tal senso è stato proposto in questa sede l'utilizzo di un PLM, in particolare Teamcenter di Siemens, come strumento attraverso il quale ripensare interamente la raccolta dati e il Piano di Manutenzione stesso, che potrebbe essere quasi *automatizzato* attraverso i dati immessi all'interno del PLM. Questo poiché in assenza di dati sicuri non si può essere certi del costo totale della politica ispettiva. Guardando la Tabella 7-1 seguente, è possibile vedere i risultati delle analisi. Variando percentualmente il MTTF dell'1%, si ha una variazione di circa lo 0,5%, in

positivo e in negativo, per quanto riguarda sia l'intervallo d'ispezione ottimale che il costo totale della politica ispettiva. Ne consegue che, soprattutto nel caso di MTTF relativamente bassi, è possibile sbagliare e di molto, variando considerevolmente i costi.

Tabella 7-1 - Tabelle generali riassuntive

%MTTF	% ti	%Ctot	λ Ci / Cg				
			0,01 - 0,5	0,7 - 1	2	3	4
-95%	-80,41%	-72,39%	850,3%	747,4%	688,2%	655,5%	655,5%
-90%	-70,62%	-63,84%	382,3%	337,2%	310,5%	295,6%	295,6%
-85%	-63,14%	-57,23%	227,8%	201,6%	185,7%	176,7%	176,7%
-80%	-57,47%	-51,65%	151,6%	134,6%	124,0%	117,9%	117,9%
-75%	-51,55%	-46,73%	106,8%	95,2%	87,7%	83,3%	83,3%
-70%	-46,65%	-42,28%	77,6%	69,4%	64,0%	60,8%	60,8%
-65%	-42,78%	-38,18%	57,5%	51,6%	47,5%	45,1%	45,1%
-60%	-38,14%	-34,37%	42,9%	38,6%	35,6%	33,8%	33,8%
-55%	-34,02%	-30,78%	32,1%	29,0%	26,7%	25,3%	25,3%
-50%	-30,62%	-27,39%	23,9%	21,7%	20,0%	18,9%	18,9%
-45%	-26,80%	-24,16%	17,6%	16,0%	14,8%	14,0%	14,0%
-40%	-23,45%	-21,08%	12,7%	11,7%	10,7%	10,2%	10,2%
-35%	-20,10%	-18,12%	9,0%	8,3%	7,6%	7,2%	7,2%
-30%	-17,01%	-15,28%	6,1%	5,7%	5,2%	4,9%	4,9%
-25%	-13,92%	-12,53%	4,0%	3,7%	3,4%	3,2%	3,2%
-20%	-11,34%	-9,88%	2,4%	2,2%	2,0%	1,9%	1,9%
-15%	-7,73%	-7,30%	1,2%	1,2%	1,1%	1,0%	1,0%
-10%	-5,15%	-4,80%	0,5%	0,5%	0,5%	0,4%	0,4%
-5%	-2,84%	-2,37%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
0%	0,00%	0,00%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
5%	2,42%	2,31%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
10%	4,64%	4,57%	0,5%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%
15%	7,22%	6,77%	1,0%	0,9%	0,8%	0,8%	0,8%
20%	9,79%	8,93%	1,7%	1,5%	1,4%	1,3%	1,3%
25%	11,86%	11,04%	2,6%	2,3%	2,1%	2,0%	2,0%
30%	14,18%	13,12%	3,6%	3,2%	2,9%	2,7%	2,7%
35%	16,49%	15,15%	4,7%	4,2%	3,8%	3,6%	3,6%
40%	18,56%	17,14%	5,9%	5,4%	4,9%	4,5%	4,5%
45%	20,62%	19,10%	7,2%	6,6%	6,0%	5,5%	5,5%
50%	22,94%	21,03%	8,6%	7,9%	7,1%	6,6%	6,6%
55%	25,00%	22,92%	10,1%	9,3%	8,4%	7,8%	7,8%
60%	27,06%	24,79%	11,6%	10,7%	9,7%	9,0%	9,0%
65%	29,12%	26,62%	13,2%	12,2%	11,0%	10,2%	10,2%
70%	31,08%	28,43%	14,9%	13,8%	12,4%	11,5%	11,5%
75%	32,99%	30,21%	16,7%	15,4%	13,9%	12,8%	12,8%
80%	35,05%	31,97%	18,5%	17,1%	15,4%	14,2%	14,2%
85%	36,86%	33,70%	20,3%	18,9%	16,9%	15,6%	15,6%
90%	38,66%	35,41%	22,2%	20,7%	18,5%	17,1%	17,1%
95%	40,72%	37,10%	24,1%	22,5%	20,2%	18,5%	18,5%
100%	42,27%	38,76%	26,1%	24,4%	21,8%	20,0%	20,0%

Se si è in possesso invece di dati più sicuri sul MTTF, è possibile effettuare un'analisi che vada ad ottimizzare gli intervalli d'ispezione in modo da minimizzare i costi. Osservando la Figura 45, la Tabella 4-13, la Tabella 4-16 e per ultima la Tabella 7-1 qui

sopra, si può osservare come a seguito delle analisi svolte emerga un certo intervallo di “sicurezza”, compreso nell'intorno  $-15\% - +15\%$  rispetto all'ottimo, entro il quale il  $\Delta\%$  del Costo Totale della politica ispettiva risulta trascurabile. È un risultato che permette di avere flessibilità nella scelta, tanto più estesa tanto più aumenta il MTTF.

Altro risultato utile è il fatto che non vi sia una specularità nella crescita dell'errore, ma che stimare verso il basso (e quindi effettuare più ispezioni nello stesso arco di tempo) risulta molto più costoso rispetto allo stimare verso l'alto. Una sovrastima del 50% provoca un incremento del costo totale, mediamente, dell'8,2%; al contrario, sottostimare l'intervallo d'ispezione del 50% implica aumentare mediamente i costi totali del 22,7%. Questo risultato può essere contro intuitivo con l'idea comune di manutenzione, ma questo modello punta a minimizzare i costi totali della politica ispettiva. In generale comunque, tanto più decresce il rapporto  $C_I / C_G$  tanto più incide un errore di valutazione od organizzazione.

I risultati ottenuti dalle analisi sono stati confrontati con quanto viene attualmente fatto in azienda, riguardo alcuni componenti chiave della produzione. Gli intervalli di ispezione attualmente utilizzati, ottimizzati in base all'esperienza, non discostano sensibilmente rispetto all'ottimo teorico per la maggior parte dei casi, ma in altri (vedasi la Linea 58, Tabella 5-3) il modello teorico fornisce la possibilità di diminuire e ottimizzare i costi, riuscendo a quantificare quanto si potrebbe risparmiare rientrando nell'intervallo accettabile.

Si è poi svolta una seconda analisi, relativa alla parte finale della vita utile dell'entità (e anche della *bathtub curve*), descrivibile attraverso una distribuzione di probabilità normale e caratterizzata da un rateo di guasto crescente nel tempo. Si considera infatti l'invecchiamento del componente e la sua usura, che fanno sì che con il passare del tempo la probabilità di guasto aumenti. In questo caso l'intervallo d'ispezione non è costante, ma diminuisce il tempo che intercorre man mano tra le ispezioni più ci si avvicina. Considerando lo scarto quadratico medio della distribuzione, si nota come riducendo  $\sigma$ , un errore nella stima di  $t_1$  produce effetti molto più sensibili, aumentando di molto il  $\Delta\%$  del Costo Totale. Al contrario, tanto più la distribuzione è spanciata, tanto più si riducono le differenze, fino ad appiattirsi come nel terzo caso della Tabella 4-13. In generale comunque, con questo tipo di distribuzione costa di più sottostimare l'istante iniziale

piuttosto che sovrastimarlo. Questo si riconduce al fatto che il costo di ispezione è la voce di costo predominante, e quindi aumentarne il numero significa aumentare il costo totale.



## Bibliografia

[1] Baldin et al., 1978; Ferrari, 1994; Regattieri, 2000, *Manutenzione dei Sistemi di Produzione*, Progetto Leonardo.

[2] Furlanetto L., Garetti M., Macchi M., 2007, *Ingegneria di Manutenzione: Strategie e Metodi*, FrancoAngeli.

[3] Nunzio d'Addea, Graziano Perotti. 2005, *Manuale di Manutenzione Industriale*, Tecniche Nuove.

Sgarbossa F., Zennaro I., Florian E., Persona A., 2018, *Impact of Weibull parameters estimation on preventive maintenance cost*, IFAC PapersOnLine 51-11 508–513

Manzini R., Rigattieri A., Pham H., Ferrari E., 2009, *Manutenzione dei sistemi di produzione*, Springer

UNI 13306:2018

Regattieri, A., Manzini, R., & Battini, D. (2010). *Estimating reliability characteristics in the presence of censored data: A case study in a light commercial vehicle manufacturing system*. Reliability Engineering & System Safety, 95(10), 1093-1102.

Yiwei WANG, Christian GOGU, Nicolas BINAUD, Christian BES, Raphael T. HAFTKA, Nam H. KIM, (2017), *A cost driven predictive maintenance policy for structural airframe maintenance*, Chinese Journal of Aeronautics, 30(3): 1242–1257

Qi Gao, Yang Ge, *Maintenance interval decision model for a system with failure interaction*, Journal of Manufacturing Systems 36 (2015) 109–114

R. Huang, L. Xi, J. Lee & C. R. Liu (2005) *The framework, impact and commercial prospects of a new predictive maintenance system: intelligent maintenance system*, *Production Planning & Control*, 16:7, 652-664, DOI:

Joung Taek Yoon, Byeng D. Youn, Minji Yoo, Yunhan Kim, Soho Kim, *Life-cycle maintenance cost analysis framework considering time-dependent false and missed alarms for fault diagnosis*, Reliability Engineering and System Safety 184 (2019) 181–192

Slide delle lezioni: ddr. David Bogataj, *Maintenance Management*

Slide delle lezioni: Prof. Stefano Ierace, *Manutenzione Industriale*



## Sitografia

Beverfood; <https://www.beverfood.com/>

Acqua Minerale San Benedetto S.p.A: <https://www.sanbenedetto.it/it/home/>

Progetto Ecogreen San Benedetto: <http://www.risorseperlavita.it/progetti/eco-green>

Istat: <http://www.istat.it/it/>

[http://cefran.altervista.org/formazione/Archivio/POLITICHE\\_DI\\_MANUTENZIONE.pdf](http://cefran.altervista.org/formazione/Archivio/POLITICHE_DI_MANUTENZIONE.pdf)

<http://www.fornasinimauro.it/media/uploads/allegati/2/politiche-di-manutenzione-industriale.pdf>

<http://www.ording.roma.it/archivio/File/Argomenti%20di%20Ingegneria%20della%20Manutenzione.pdf>



## Indice delle Figure

Figura 1- Schema funzionale della Gestione integrata della Manutenzione.....	17
Figura 2 - Duffua et al., L'importanza dei dati di feedback nel processo manutentivo ..	18
Figura 3 - Uptime e Downtime nella vita di un componente generico.....	18
Figura 4 - Entità riparabili, ciclo di vita.....	19
Figura 5 - Bathtub Curve, rateo di guasto durante il ciclo di vita di un'entità .....	22
Figura 6 - Effetto della manutenzione sulla Bathtub Curve.....	22
Figura 7 - Evoluzione del concetto di "Manutenzione" nel tempo.....	23
Figura 8 - Schema delle diverse tipologie di politiche manutentive.....	24
Figura 9 - Manutenzione su condizione, Valore del parametro di analisi nel tempo .....	27
Figura 10 - Manutenzione Predittiva, previsione di vita di un'entità.....	29
Figura 11 - Ingegneria di Manutenzione, Gestione ed Esecuzione .....	30
Figura 12 - Effetto delle diverse politiche manutentive sui costi totali .....	34
Figura 13 - Prima approssimazione della scelta della politica manutentiva da applicare .....	34
Figura 14 - Possibile logica decisionale nella scelta della politica manutentiva più adatta .....	36
Figura 15 - Distinzione dei costi di manutenzione .....	37
Figura 16 - Curva di Costo totale vs. Affidabilità-Disponibilità .....	39
Figura 17 - Uptime e Downtime per un'entità .....	42
Figura 18 - Entità non riparabili, stati di funzionamento possibili .....	44
Figura 19 - Probabilità di guasto $F(t)$ .....	45
Figura 20 - Funzione di distribuzione di probabilità esponenziale.....	52
Figura 21 - Distribuzione di Weibull, variazione del parametro di forma.....	53
Figura 22 - Distribuzione di Weibull, parametro di scala.....	54
Figura 23 - Distribuzione di Weibull, rateo di guasto in funzione del parametro di forma .....	54
Figura 24 - Macchina singola, politica ispettiva elementare, curve di costo.....	55
Figura 25 - Politica ispettiva elementare, tempo trascorso tra l'istante della rottura di un componente e l'istante di rilevazione .....	56
Figura 26 - Aumento di frequenza degli interventi ispettivi con il passare del tempo ...	57
Figura 27 - Variazione del tempo d'ispezione considerando l'invecchiamento dell'entità .....	66

Figura 28 - AMSB, distinzione delle tipologie di prodotti .....	72
Figura 29- AMSB, esempi di prodotti.....	72
Figura 30 - Processo di Imbottigliamento .....	74
Figura 31 - PET in granuli.....	75
Figura 32 - Preforme in PET .....	75
Figura 33 - Macchina per la realizzazione delle preforme in PET.....	76
Figura 34 - Macchina per la realizzazione delle preforme in PET.....	77
Figura 35 - Raddrizzatore.....	78
Figura 36 - Nastro di trasporto ad aria .....	79
Figura 37 - Sciacquatrice.....	80
Figura 38 - Riempitrice .....	81
Figura 39 - Tappatrice .....	82
Figura 40 - Tipologie di Etichettatrice .....	83
Figura 41 - Confezionatrice.....	84
Figura 42 - Pallettizzatore .....	85
Figura 43 - Fasciatrice.....	86
Figura 44 - Stoccaggio prodotto finito .....	87
Figura 45 - Variazione percentuale dei costi della politica ispettiva in funzione della variazione di $t_i$ .....	100
Figura 46 - Variazione percentuale dei costi in funzione della variazione percentuale rispetto a $t_i$ ottimo .....	101
Figura 47 - Costo della politica ispettiva al variare di $C_G$ .....	108
Figura 48 - Costo della politica ispettiva al variare di $C_I$ .....	109
Figura 49 - Variazione percentuale dei costi della politica ispettiva con la variazione percentuale rispetto a $t_i$ indicata .....	114
Figura 50 - Componente scelto per l'analisi .....	120
Figura 51 - PLM e relazioni con tutta la vita del prodotto .....	130
Figura 52 - Neutral Part e Physical Part.....	134
Figura 53 - Impact Analysis all'interno dell'interfaccia Teamcenter.....	135
Figura 54 - Logica tra item padre e revisioni all'interno di Teamcenter .....	136
Figura 55 - Part Logistic Form.....	137
Figura 56 - Tabella tracciabilità, logiche decisionali .....	137
Figura 57 - Scheda intervento di manutenzione in produzione in San Benedetto .....	143

## Indice delle Tabelle

Tabella 2-1 - Valori ottimali del parametro $p^*$ in funzione del rapporto $\lambda C_I / C_G$ .....	60
Tabella 2-2 - Valori della distribuzione cumulativa di una variabile normale standard.	62
Tabella 2-3 - Valori della distribuzione cumulativa di una variabile normale standard.	63
Tabella 2-4 - Valori ottimali del parametro $p^*$ in funzione del parametro $c$ .....	64
Tabella 4-1 - Parametri di scelta dell'analisi .....	90
Tabella 4-2 - Variazioni percentuali dei MTTF.....	91
Tabella 4-3 - Risultati per $CI/CG = 100$ .....	91
Tabella 4-4 - Risultati per $CI/CG = 50$ .....	92
Tabella 4-5- Risultati per $CI/CG = 20$ .....	92
Tabella 4-6 - Risultati per $CI/CG = 10$ .....	92
Tabella 4-7 - Risultati per $CI/CG = 5$ .....	93
Tabella 4-8 - Risultati per $CI/CG = 2$ .....	93
Tabella 4-9 - Risultati delle analisi .....	95
Tabella 4-10 -Parametri di analisi in funzione dei valori di $p^*$ .....	96
Tabella 4-11 -Tempi ottimali d'ispezione in funzione dei parametri scelti.....	97
Tabella 4-12 - Calcolo del costo della politica ispettiva in funzione della variazione del tempo d'ispezione rispetto all'ottimo .....	99
Tabella 4-13 - Percentuale di variazione dei costi totali in funzione di una variazione percentuale dal tempo d'ispezione ottimale per i 18 casi .....	101
Tabella 4-14 - Quantificazione dei costi in funzione dei casi analizzati .....	103
Tabella 4-15 - Quantificazione dei costi percentuali per ognuno dei 18 casi con variazione rispetto a ti ottimo di $\pm 30\%$ ,.....	104
Tabella 4-16 - Risultati delle analisi: quanto incide una variazione percentuale di ti sul costo totale .....	105
Tabella 4-17 - Risultati delle analisi mantenendo costante il CI e variando MTTF, a parità di $p^*$ .....	106
Tabella 4-18 -Costo totale ottimale della politica ispettiva al variare di CG per i valori di $c$ considerati .....	108
Tabella 4-19 -Costo totale ottimale della politica ispettiva al variare di CI per i valori di $c$ considerati .....	109
Tabella 4-20 -Incidenza della variazione dei MTTF sul calcolo dei tempi d'ispezione ottimali .....	110

Tabella 4-21 - Incidenza della variazione dello scarto quadratico medio sul calcolo dei temi d'ispezione ottimali.....	110
Tabella 4-22 -Influenza di una variazione percentuale [-30%; +30%] rispetto al tempo d'ispezione ottimale nel calcolo del costo totale della politica ispettiva .....	111
Tabella 4-23 - Influenza di una variazione percentuale [-30%; +30%] rispetto al tempo d'ispezione ottimale sul calcolo del costo totale della politica ispettiva .....	113
Tabella 4-24 - Quantificazione della variazione percentuale del costo totale della politica ispettiva con i parametri inseriti .....	116
Tabella 5-1 - Risultati delle analisi sulla Linea 31 .....	124
Tabella 5-2 - Risultati delle analisi sulla Linea 64.....	125
Tabella 5-3 - Risultati delle analisi sulla Linea 58.....	126
Tabella 7-1 - Tabelle generali riassuntive .....	148