

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SECONDA FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CON SEDE A CESENA

CORSO DI LAUREA

IN INGEGNERIA AEROSPAZIALE

Classe LM - 20

Sede di Forlì

TESI DI LAUREA

in

Impianti Meccanici e Logistica Industriale LM

**STRATEGIE MANUTENTIVE E GESTIONE DEL MAGAZZINO,
UN'APPLICAZIONE AERONAUTICA**

CANDIDATO

Alessandro Giazzi

RELATORE

Chiar.mo Prof. Alberto Regattieri

Anno Accademico 2012/2013

Sessione III^a

INDICE

INDICE DELLE FIGURE.....	3
INDICE DELLE TABELLE.....	7
SOMMARIO E PAROLE CHIAVE.....	9
CAPITOLO 1 – AFFIDABILITÀ, MANUTENZIONE E RICAMBI.....	11
1.1 Teoria dell’affidabilità.....	11
1.2 Strategie manutentive.....	27
1.3 Gestione dei ricambi.....	34
CAPITOLO 2 – ANALISI DI AFFIDABILITÀ.....	43
2.1 Distribuzioni di probabilità.....	43
2.2 Dati completi e dati censurati.....	46
2.3 Analisi sui tempi di vita.....	48
CAPITOLO 3 – STUDIO DELLE POLITICHE MANUTENTIVE.....	66
3.1 Analisi dei dati.....	66
3.2 Simulazione dei componenti.....	68
3.3 Simulazione delle politiche manutentive.....	74
CAPITOLO 4 – ANALISI DELLA GESTIONE DEL MAGAZZINO.....	79
4.1 Analisi dei dati.....	79
4.2 Simulazioni del magazzino.....	80
4.3 Conclusioni.....	101
CONCLUSIONI.....	102

APPENDICE A – MTTF DEI CODICI.....	103
APPENDICE B – DATI COMPLETI SIMULAZIONE.....	106
NOMENCLATURA E LISTA DEGLI ACRONIMI.....	112
BIBLIOGRAFIA.....	113

INDICE DELLE FIGURE

CAPITOLO 1

Figura 1.1 Affidabilità e rateo di guasto condizionato $T = t - t_0$ [T1]	13
Figura 1.2 Stato e possibili transizioni possibili del componente non riparabile. Riparazione non ammessa... ..	14
Figura 1.3 Profilo a vasca da bagno [D1]	17
Figura 1.4 Rateo di guasto con mortalità infantile [T1].....	17
Figura 1.5 Rateo di guasto con usura iniziale [T1]	18
Figura 1.6 Stati e transizioni possibili di un componente riparabile. Riparazione ammessa.....	19
Figura 1.7 Numero atteso di guasti per componenti riparabili e non riparabili [T1].....	21
Figura 1.8 Schema funzionale delle pompe Q1 e Q2 [T1]	23
Figura 1.9 Schema affidabilistico con componenti C_1 e C_2 in parallelo.....	23
Figura 1.10 Schema affidabilistico con componenti C_1 e C_2 in serie.	23
Figura 1.11 Schema affidabilistico serie generale	24
Figura 1.12 Schema affidabilistico parallelo generale	26
Figura 1.13 Strategie manutentive in un sistema produttivo [T1]	28
Figura 1.14 Politica manutentiva <i>type I</i> [T1]	29
Figura 1.15 Politica manutentiva <i>type II</i> [T1].....	31
Figura 1.16 Costo della gestione manutentiva. Politica ispettiva e politica preventiva [D1]	32
Figura 1.17 Politca ispettiva. Guasto e ispezione [T1]	32
Figura 1.18 Tempi di ispezione. Esempificazione politica ispettiva elementare [D1].....	33
Figura 1.19 Esempificazione di un intervento a guasto [T1].....	35
Figura 1.20 Andamento qualitativo dei costi al variare del livello delle scorte [D1].....	36
Figura 1.21 Esempificazione di consumo intermittente di un codice ricambio.....	36
Figura 1.22 Principali pattern per la caratterizzazione della domanda di ricambi [T1]	37
Figura 1.23 Consumo medio per periodo ed intervallo di previsione [T1]..	40
Figura 1.24 Abaco per la scelta rapida del numero di ricambi da mettere a scorta [D1].....	43

CAPITOLO 2

Figura 2.1 Effetto del parametro di forma [A1]	45
Figura 2.2 Effetto del parametro di scala [A1]	45
Figura 2.3 Effetto del parametro di posizione [A1]	45
Figura 2.4 Casi particolari della distribuzione Gamma generalizzata [A2].	47
Figura 2.5 Esempio di dati completi [A3].....	47
Figura 2.6 Esempio di dati censurati e destra [A3].....	48
Figura 2.7 Esempio di dati <i>interval censored</i> [A3].....	48
Figura 2.8 Esempio di dati censurati a sinistra [A3].....	49
Figura 2.9 Procedura di inserimento per dati completi relativi al codice C.	50
Figura 2.10 Ranking delle distribuzioni relativo al codice C.....	50
Figura 2.11 Codice C. Parametri della distribuzione di Weibull-3P.....	51
Figura 2.12 Grafico della probabilità di guasto, distribuzione di Weibull-3P relativa al Codice C.	52
Figura 2.1 Procedura di inserimento per dati completi relativi al codice F.	52
Figura 2.2 Ranking delle distribuzioni relativo codice F.....	53
Figura 2.3 Parametri distribuzione G-Gamma relativi al Codice F	53
Figura 2.4 Grafico funzione di guasto con distribuzione G-Gamma relativa al Codice F	54
Figura 2.5 Parametri distribuzione log-normale relativa al Codice F.....	54
Figura 2.6 Grafico della funzione guasto con distribuzione log-normale relativo al Codice F.....	55
Figura 2.19 Procedura di inserimento dati censurati a destra relativa al Codice A.....	55
Figura 2.20 Ranking delle distribuzioni relativa al Codice A.....	56
Figura 2.21 Parametri della distribuzione G-Gamma relativa al Codice A	56
Figura 2.22 Grafico di F(t) con distribuzione di probabilità G-Gamma relativo al Codice A	57
Figura 2.23 Parametri della distribuzione di Weibull-3P relativa al Codice A	57
Figura 2.24 Grafico di F(t) con distribuzione di Weibull 3P relativo al Codice A.....	58
Figura 2.25 Procedura di inserimento dati censurati relativa al Codice B...	58
Figura 2.26 Ranking distribuzioni relativo al Codice B	59
Figura 2. 27 Parametri distribuzione G-Gamma relativa al Codice B	59
Figura 2.28 Grafico probabilità di guasto con distribuzione G-Gamma relativo al Codice B.....	60
Figura 2.29 Parametri distribuzione normale relativa al Codice B.....	60
Figura 2.30 Grafico di F(t) con distribuzione normale, Codice B	61
Figura 2.31 Procedura di inserimento dati censurati relativa al Codice D..	61
Figura 2.32 Ranking distribuzioni relative al Codice D	62
Figura 2.33 Parametri della distribuzione G-Gamma relativa al Codice D.	62

Figura 2.34 Grafico probabilità di guasto con distribuzione G-Gamma del Codice D.....	63
Figura 2.35 Parametri della distribuzione di Weibull-3P relativa al Codice D.	63
Figura 2.36 Grafico di F(t) con distribuzione di Weibull-3P relativa al Codice D.....	64
Figura 2.37 Procedura di inserimento dei dati censurati relativi al Codice E..	64
Figura 2.38 Ranking delle distribuzioni relative al Codice E	65
Figura 2.39 Grafico di F(t) con distribuzione log-normale relativo al Codice E	65
Figura 2.40 Parametri distribuzione Weibull-3P relativa al Codice E.....	66
Figura 2.41 Grafico di F(t) con distribuzione di Weibull-3P relativa al Codice E.....	66

CAPITOLO 3

Figura 3.7 Inserimento parametri distribuzione G-Gamma relativa al Codice A.....	70
Figura 3.2 Schematizzazione in serie dei codici	70
Figura 3.3 Densità di probabilità di guasto dei singoli codici e del sistema a confronto	71
Figura 3.4 Tasso di guasto dei singoli codici e del sistema a confronto	71
Figura 3.5 Funzione affidabilità dei singoli blocchi e del sistema a confronto	72
Figura 3.6 Funzione F(t) dei codici a confronto	72
Figura 3.7 Confronto sull'affidabilità dei singoli codici. Il Codice F risulta il più critico	73
Figura 3.8 <i>Mean life</i> del sistema	73
Figura 3.9 Confronto tra le affidabilità dei singoli blocchi a confronto ad 1 mese, 2 mesi, 3 mesi e 4 mesi.	74
Figura 3.10 Densità di probabilità di guasto del sistema serie.....	74
Figura 3.11 Tasso di guasto del sistema.....	75
Figura 3.12 Andamento della funzione affidabilità R(t) del sistema	75
Figura 3.13 Andamento della funzione cumulata di guasto F(t)del sistema	76
Figura 3.14 Descrizione delle proprietà affidabilistiche del Codice A	76
Figura 3.15 Schematizzazione della manutenzione preventiva <i>type I</i> in BlockSim [®] [A9]	77
Figura 3.16 Schematizzazione della manutenzione preventiva <i>type II</i> in BlockSim [®] [A9]	78
Figura 3.17 Andamento dei costi delle politiche <i>type I</i> e <i>type II</i> al variare della scadenza dell'intervento manutentivo	79
Figura 3.18 Evoluzione dei costi delle <i>type I</i> e <i>type II</i> su 1 anno, 3 anni, 5 anni.....	80

CAPITOLO 4

Figura 4.1 Evoluzione temporale di affidabilità e disponibilità.....	83
Figura 4.2 Costo complessivo dei singoli codici	83
Figura 4.3 Confronto tra i periodi di fermo dei diversi codici.....	84
Figura 4.4 Alternanza dei periodi di operatività e di fermo dei codici e dell'aeromobile	84
Figura 4.5 Analisi dei costi	85
Figura 4.6 Profilo temporale dell'affidabilità e della disponibilità.....	85
Figura 4.7 Periodi di operatività e di fermo dei codici e dell'aeromobile ...	86
Figura 4.8 Analisi dei costi	86
Figura 4.9 Confronto dei costi complessivi dei singoli codici.....	87
Figura 4.10 Confronto tra i periodi di fermo dei codici.....	87
Figura 4.11 Analisi dei costi di magazzino dei codici	88
Figura 4.12 Evoluzione dell'affidabilità e della disponibilità.....	89
Figura 4.13 Analisi dei costi	89
Figura 4.14 Evoluzione dei periodi di fermo e di operatività dei codici e del sistema.....	90
Figura 4.15 Disponibilità media del sistema.....	90
Figura 4.16 Confronto tra i costi complessivi dei codici	91
Figura 4.17 Comparazione tra i periodi di fermo dei codici	91
Figura 4.18 Confronto dei costi complessivi di magazzino dei singoli codici.....	92
Figura 4.19 Profilo della disponibilità e dell'affidabilità.....	92
Figura 4.20 Evoluzione dei periodi di fermo e di operatività dei codici e dell'aeromobile	93
Figura 4.21 Analisi dei costi	93
Figura 4.22 Confronto tra i periodi di fermo dei codici.....	94
Figura 4.24 Chiamate in emergenza dei codici.....	95
Figura 4.25 Costi di gestione del magazzino dei codici.....	95
Figura 4.26 Evoluzione temporale dell'affidabilità e disponibilità del sistema.....	96
Figura 4.27 Evoluzione temporale dei guasti del sistema complessivo.....	96
Figura 4.28 Evoluzione del livello medio dell' disponibilità	97
Figura 4.29 Funzionamento e fermo dei singoli codici e del sistema complessivo.....	97
Figura 4.30 Alternanza dei momenti di funzionamento (<i>up</i>) e di fermo dell'aeromobile (<i>down</i>).....	98
Figura 4.31 Grafico a bolle di MTBF e <i>uptime</i> dei codici	98
Figura 4.32 Evoluzione temporale del costo del lavoro e di approvvigionamento.....	99
Figura 4.33 Costi complessivi ripartiti per singoli codici	99
Si riscontra infatti in Figura 4.34 come il tempo di <i>downtime</i> maggiore sia ora imputabile al Codice C.....	100

Figura 4.34 Tempo di fermo dei codici a causa di guasti o manutenzioni.	100
Figura 4.35 Criticità dei singoli codici.....	100
Figura 4.36 Previsioni di guasto per ciascun codice	101
Figura 4.37 Ordini in emergenza	101
Figura 4.39 Tempo medio di rifornimento.....	102

INDICE DELLE TABELLE

CAPITOLO 1

Tabella 1.1 Relazioni fondamentali per i componenti non riparabili.....	18
Tabella 1.2 Parallelismo rottura – aggiustamento.....	20
Tabella 1.3 Relazioni fondamentali nel processo di aggiustamento.....	20

CAPITOLO 2

Tabella 2.1 Tempi di guasto parziali. Dati in ore di funzionamento.....	48
Tabella 2.2 Parametri delle rispettive distribuzioni di tutti i codici.....	65

CAPITOLO 3

Tabella 3.4 Media e varianza della durata dell'intervento correttivo dei singoli codici.....	66
Tabella 3.5 Media e varianza della durata dell'intervento preventivo dei singoli codici.....	67
Tabella 3.6 Tempi di approvvigionamento dei codici.....	67
Tabella 3.7 Costi di approvvigionamento normale e in emergenza dei codici.....	67
Tabella 3.5 Evoluzione temporale del costo della manutenzione correttiva.....	75
Tabella 3.6 Costo preventiva <i>type I</i> al variabile dell'intervallo di intervento.....	76
Tabella 3.7 Costo preventiva <i>type II</i> al variabile dell'intervallo di intervento.....	77
Tabella 3.8 Confronto costi annuali delle tre politiche manutentive.....	78

CAPITOLO 4

Tabella 4.1 Tempi di approvvigionamento dei codici in condizioni normali e emergenza.....	79
Tabella 4.2 Costi di approvvigionamento normale e in emergenza dei codici.....	79
Tabella 4.3 Andamento del costo di manutenzione e dei ricambi al variare del numero dei codici.....	80

SOMMARIO

Il presente documento, presentato come elaborato finale nell'ambito dell'attività di tesi, intende illustrare l'applicazione delle moderne teorie dell'affidabilità, delle politiche manutentive e della gestione dei ricambi ad un ambito in cui l'affidabilità e manutenzione giocano un ruolo strategico: l'aeronautica. Partendo dall'utilizzo di dati dal campo forniti da un'azienda operante nel settore aeronautico è stato elaborato uno studio sperimentale con lo scopo di ricercare la miglior politica manutentiva. Tale politica manutentiva avrà come obiettivo quello di minimizzare i costi di manutenzione e di gestione delle scorte a magazzino. La ricerca dell'ottimizzazione dei costi di gestione, senza penalizzare qualità ed efficienza, rappresenta infatti sempre di più un fattore competitivo per tutte le aziende. Lo sviluppo sperimentale si è svolto tramite software specialistici utilizzati nel campo dello studio dell'affidabilità: Weibull++[®] e BlockSim[®]. Tramite Weibull++[®] è si sono valutati i parametri delle distribuzioni che descrivono la probabilità di guasto dei singoli componenti. A partire da questi dati sono state studiate le possibili politiche manutentive per ciascun componente ed i costi relativi individuandone la più adatta in BlockSim[®]. Da prima sono state confrontate diverse strategie manutentive: correttiva pura e preventiva. Alla scelta della miglior politica manutentiva è stata affiancato lo studio delle strategie di gestione del magazzino, al fine di individuarne la più efficace. Sia lo studio della manutenzione che quello della gestione del magazzino sono stati sempre affiancati alla valutazione di impatto economico.

KEYWORDS: manutenzione correttiva, manutenzione preventiva, gestione del magazzino, aeronautica.

ABSTRACT

This document, presented as a dissertation of the thesis aims to illustrate the application of modern theories of reliability, policy maintenance and spare parts management to a sector where reliability and maintenance play a strategic role: aviation. Starting from the use of experimental data provided by a company in the aviation industry an experimental study has been developed with the aim of finding the best maintenance policy. This maintenance policy will aim to minimize the cost of maintenance and inventory management in the warehouse. The research to optimize operating costs, without penalizing the quality and efficiency, in fact, represents an increasingly competitive factor for all companies. Experimental development is carried out by specialized software used in the study of reliability: Weibull++[®] and BlockSim[®]. Using Weibull++[®] were evaluated parameters of the distributions that describe the probability of failure of individual components. From these data we have studied the possible maintenance policies for each component and the costs of identifying the most suitable of BlockSim[®]. From the first maintenance strategies were compared: pure corrective and preventive action. The choice of the best maintenance policy was flanked the study of strategies for the management of the warehouse, in order to identify the most effective. Both the study of the maintenance of inventory management were always side by side to the economic impact assessment.

KEYWORDS: corrective maintenance, preventive maintenance, inventory management, aviation.

CAPITOLO 1

AFFIDABILITÀ, MANUTENZIONE E RICAMBI

1.1 TEORIA DELL’AFFIDABILITÀ

1.2 POLITICHE MANUTENTIVE

1.3 GESTIONE DEI RICAMBI

Si espongono in questo capitolo i fondamenti della teoria dell’affidabilità, delle principali politiche manutentive, e della gestione dei ricambi. Quanto esposto verrà utilizzato nelle applicazioni sperimentali descritte nei capitoli successivi.

1.1 TEORIA DELL’AFFIDABILITÀ

1.1.1 TEMPO AL GUASTO

Il concetto di affidabilità è legato al processo di rottura del generico componente o sistema. Tale processo è funzione di numerosi fattori, la gran parte dei quali non controllabili. Per questo motivo il tempo di rottura non è una grandezza deterministica ma casuale. Si indica quindi con τ la variabile aleatoria tempo di guasto (*TTF-time to failure*). Si indica con $f(t)$ la distribuzione di probabilità dei valori di τ (*ddp-probability density function*). Valgono le seguenti relazioni fondamentali:

$$P(\tau \leq T) = \int_{-\infty}^T f(x) dx \quad (1.1)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1 \quad (1.2)$$

La (1.1) rappresenta la probabilità che la variabile aleatoria assuma un valore non superiore a T , mentre la (1.2) rappresenta la condizione di normalizzazione comune a tutte le distribuzioni di probabilità statistiche. La funzione $f(t)$ è detta anche rateo di guasto non condizionato, poiché rappresenta una misura puntuale della velocità con la quale un generico componente si rompe in un istante di tempo t , quando è messo in funzione in corrispondenza di $t = 0$.

1.1.2 COMPONENTI RIPARABILI E NON RIPARABILI

Si indicano con la dicitura non riparabili quei componenti che alla rottura (*down*) non possono essere riparati e al più sono sostituiti da altri. Si indicano come riparabili i componenti che alla rottura possono essere riparati e sono quindi soggetti a più cicli di funzionamento (*up*) – rottura – aggiustamento. I componenti non riparabili sono quindi dei casi particolari dei riparabili. I non riparabili possono per questo essere trattati con modelli affidabilistici adatti a rappresentare il comportamento al guasto dei riparabili. In particolare i modelli che descrivono i componenti non riparabili sono impiegati per i riparabili quando di questi ultimi si vuole indagare il comportamento al primo guasto. Un sistema costituito da più componenti non riparabili è necessariamente non riparabile. Un sistema fatto di almeno un componente riparabile può essere trattato come riparabile. Si illustrano di seguito i principali parametri e modelli affidabilistici atti a descrivere il comportamento al guasto di componenti e sistemi non riparabili.

1.1.3 IL CONCETTO DI AFFIDABILITÀ

L'affidabilità (*Reliability* o *Survival function*) di un componente e di un sistema non riparabile è una grandezza probabilistica definita su un intervallo di missione T . Essa è la misura della probabilità che il componente svolga senza subire un guasto la funzione per la quale è stato concepito, date le specifiche condizioni operative. Si indica con $R_i(T)$ l'affidabilità del componente i -esimo per un intervallo di missione pari a T . Di seguito si utilizzeranno espressioni del tipo $r(t)$ o $R(t)$ dove t è un istante di tempo dell'intervallo:

$$T = t - t_0 \quad (1.3)$$

dove t_0 rappresenta l'istante di riferimento tipicamente assunto pari a 0. Dalle espressioni di tempo di guasto τ e di $ddp f(\tau)$ introdotte in precedenza scaturisce l'espressione generale dell'affidabilità:

$$R(T) = \int_T^{\infty} f(x) dx \quad (1.4)$$

Pari alla probabilità che alla variabile t sia non inferiore a T .

1.1.4 RATEO DI GUASTO CONDIZIONATO

Il rateo di guasto condizionato $\lambda(t)$ (*hazard function*) rappresenta la velocità di rottura di un componente non riparabile. Diversamente dall'affidabilità è una grandezza puntuale definita secondo la seguente:

$$\lambda(t) \cdot \Delta t = P(t \leq \tau \leq t+\Delta t / \text{funzionante in } t) \quad (1.5)$$

dove:

- $P(\tau)$: è la misura della probabilità associata all'evento rottura del componente;
- τ : è la variabile aleatoria tempo al guasto del componente in oggetto;
- Δt : è intervallo di tempo piccolo a piacere;

Si noti che $\lambda(t)$ è definita mediante la probabilità di evento condizionato, dove la condizione è che il componente, di cui si misura $\lambda(t)$, sia funzionante nell'istante di tempo t e che il componente sia messo in funzione nell'istante $t_0 = 0$. La Figura 1.1 chiarisce ulteriormente la notazione adottata:

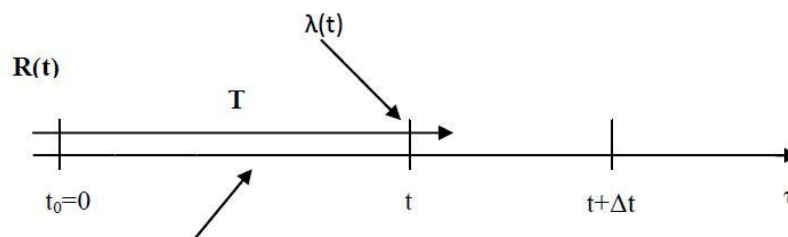


Figura 1.1 Affidabilità e rateo di guasto condizionato $T = t - t_0$ [T1]

Il rateo di guasto condizionato $\lambda(t)$ differisce dal rateo di guasto non condizionato $f(t)$ in quanto il primo rappresenta la probabilità nell'unità dei tempo (velocità istantanea) con cui il componente si rompe qualora appena prima sia funzionante. Il secondo invece è una misura della probabilità di rottura come $\lambda(t)$ ma non è condizionata. Il modello affidabilistico si basa inoltre sulle seguenti ipotesi fondamentali:

- 1) I componenti ed i sistemi possono assumere solo due stati possibili: funzionamento (stato 0) o non funzionamento (stati 1). Viene quindi esclusa la possibilità che il componente sia non del tutto funzionante;
- 2) La transizione dello stato di funzionamento a quello di rottura è istantanea;

La Figura 1.2 rappresenta il diagramma degli stati in linea con l'ipotesi sopra introdotte.

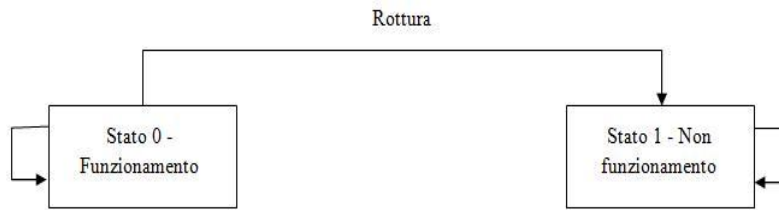


Figura 1.2 Stato e possibili transizioni possibili del componente non riparabile. Riparazione non ammessa.

1.1.5 ESPRESSIONI DELL’AFFIDABILITÀ E DEL RATEO DI GUASTO

Si ricavano ora le espressioni generali dell’affidabilità e del rateo di guasto condizionato di componenti non riparabili. Si considerino le seguenti ipotesi e definizioni:

- N numero di componenti messi in funzione nell’istante $t_0 = 0$;
- $N_G(t)$ numero dei componenti guasti in un generico istante di tempo t ;
- $N_S(t)$ numero di componenti funzionanti nell’istante t ;

Dalle definizioni introdotte derivano le seguenti relazioni:

$$N_S(t) = N - N_G(t) \quad (1.6)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left(\frac{N_G(t)}{N} \right) = 1 \quad (1.7)$$

La grandezza affidabilistica densità di probabilità di guasto o rateo di guasto non condizionato $f(t)$ esprime la velocità istantanea di rottura del generico componente messo in funzione nell’istante di tempo $t = 0$. Vale la seguente relazione di origine statistica ed applicabile anche nel campo della teoria dell’affidabilità:

$$f(t) \cdot dt = P(t \leq \tau \leq t + dt) = \int_t^{t+dt} f(x)dx \quad (1.8)$$

La probabilità di guasto $F(T)$ rappresenta la probabilità che un componente si rompa in un intervallo di missione paria a T . Valgono allora le seguenti espressioni:

$$F(t) = P(-\infty \leq \tau \leq t) = \int_{-\infty}^t f(x) dx = P(0 \leq \tau \leq t) = \int_0^t f(x) dx \quad (1.9)$$

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} = \frac{dF(t)}{dt} \quad (1.10)$$

Si introducono quindi l'espressione per la misura dell'affidabilità $R(t)$:

$$R(t) = \frac{N_S(t)}{N} = \frac{N - N_G(t)}{N} \quad (1.11)$$

e della probabilità di guasto $F(t)$:

$$F(t) = \frac{N_G(t)}{N} = \frac{N - N_S(t)}{N} = 1 - R(t) \quad (1.12)$$

Dalle espressioni appena introdotte si evince che per determinare $R(t)$ ed $F(t)$ si deve tenere traccia del numero dei guasti che si registrano nel tempo considerando N componenti identici messi in funzione nello stesso istante $t = 0$. Dalle (1.10) (1.11) deriva la seguente:

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{N_G(t+\Delta t) - N_G(t)}{N \cdot \Delta t} \right) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{N \cdot F(t+\Delta t) - N \cdot F(t)}{N \cdot \Delta t} \right) = \frac{dF(t)}{dt} = - \frac{dR(t)}{dt} \quad (1.13)$$

Quindi (1.10) e la (1.13) portano alla medesima conclusione: la $f(t)$ è la derivata della $F(t)$. La (1.10) è una relazione statistica: la ddp $f(t)$ è la derivata della funzione cumulata $F(t)$. La (1.13) è una relazione affidabilistica: la densità di probabilità di guasto è la derivata della probabilità di guasto $F(t)$. Dalla definizione del rateo di guasto condizionato secondo la (1.5) segue la sua espressione più generale:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{N_G(t+\Delta t) - N_G(t)}{N_S(t) \cdot \Delta t} = \frac{f(t)}{R(t)} = - \frac{dR(t)}{dt} \frac{1}{R(t)} \quad (1.14)$$

Dalle (1.11) e (1.12) integrando opportunamente è possibile ricavare:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (1.15)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (1.16)$$

La (1.15) rappresenta la più generale espressione dell'affidabilità. Ipotizzando che il rateo di guasto $\lambda(t)$ assuma un valore costante la (1.15) e la (1.16) diventano rispettivamente:

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t} \quad (1.17)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t} \quad (1.18)$$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda \cdot t} \quad (1.19)$$

Dalle queste relazioni si deduce quindi che nel caso rateo di guasto condizionato costante il tempo di rottura τ è distribuito secondo una legge statistica esponenziale. Questo significa che non esiste un istante di tempo in cui vi sia una maggiore probabilità di rottura. La velocità di rottura quindi non dipende dal tempo: la rottura è un processo casuale e il componente non invecchia.

1.1.6 TEMPO MEDIO DI GUASTO

Il tempo di guasto τ è una variabile aleatoria e come tale è possibile definire il suo valore medio: il tempo medio di guasto (*Mean time to Failure - MTTF*):

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = - \int_0^{\infty} t \cdot \frac{dR(t)}{dt} dt \quad (1.20)$$

Nel caso il rateo $\lambda(t)$ sia costante la (1.20) diventa:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda \cdot t} dt = \left| -\frac{1}{\lambda} e^{-\lambda \cdot t} \right|_0^{\infty} = \frac{1}{\lambda} \quad (1.21)$$

1.1.7 PROFILI DEL RATEO DI GUASTO

Si riportano in questo paragrafo alcuni profili tipici dei rateo di guasto $\lambda(t)$. Il primo profilo riportato è noto in letteratura come profilo “a vasca da bagno”. In esso è possibile individuare tre fasi:

- 1) Decrescente inizialmente (fase di rodaggio del componente);
- 2) Costante per un intervallo di tempo Δt (vita utile del componente);
- 3) Crescente alla fine (fase di usura del componente);

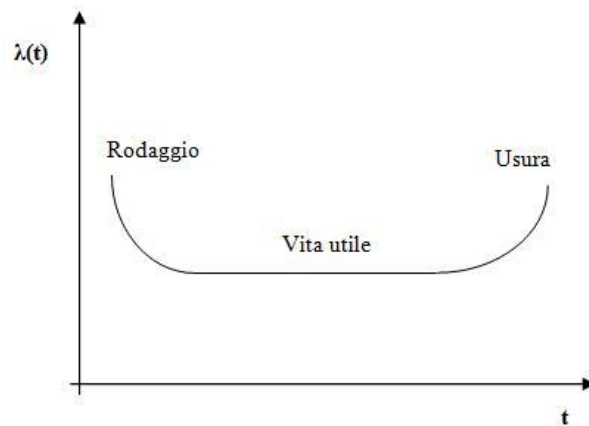


Figura 1.3 Profilo a vasca da bagno [D1]

Questo andamento è rappresentativo di buona parte dei componenti meccanici soggetti ad usura ad esempio sfere dei cuscinetti che si usurano per attrito di rotolamento, freni a disco che si usurano per attrito di contatto, etc. Il componente è soggetto ad un invecchiamento (degradamento) progressivo caratterizzato da un innalzamento della velocità di rottura. Le figure 1.4 e 1.5 riportano l'andamento del rateo di guasto condizionato per componenti dotati rispettivamente di una rilevante fase di rodaggio (Figura 1.4), o di significativa usura iniziale (Figura 1.5).

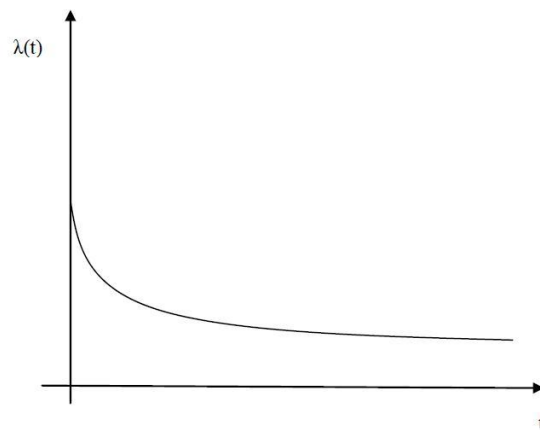


Figura 1.4 Rateo di guasto con mortalità infantile [T1]

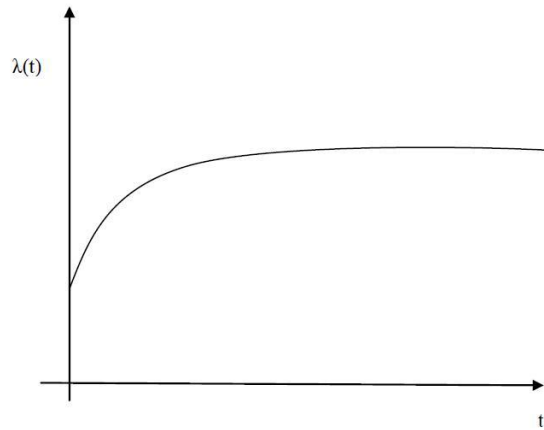


Figura 1.5 Rateo di guasto con usura iniziale [T1]

La Tabella 1.1 riassume le relazioni principali per modellare il comportamento al guasto dei componenti non riparabili.

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

Tabella 8.1 Relazioni fondamentali per i componenti non riparabili [T1]

1.1.8 MODELLI AFFIDABILISTICI PER COMPONENTI RIPARABILI

Si introducono ora i principali parametri affidabilistici necessari per lo studio dei componenti riparabili e per modellare il relativo processo di riparazione. A tali scopi si aggiungono alle ipotesi introdotti nel paragrafo 1.1.4 :

- 1) I componenti ed i sistemi possono assumere solo due stati possibili: funzionamento (stato 0) o non funzionamento (stato 1). Viene quindi esclusa la possibilità che il componente sia non del tutto funzionante;
- 2) La transizione dello stato di funzionamento a quello di rottura è istantanea;

Le ulteriori ipotesi valide per la descrizione dei riparabili:

- 3) È ammessa la riparazione del generico componente;
- 4) La transizione da uno stato (rottura o funzionamento) ad un altro è istantanea;
- 5) Non è ammessa l'esistenza di due transizioni nel generico intervallo di tempo Δt ;
- 6) I componenti "as good as new" ovvero nuovi dopo la riparazione. Questa ipotesi non è sempre realistica, considerato che difficilmente i componenti riparati tornano come nuovi. Un componente "as good as new" è quindi un componente senza memoria.

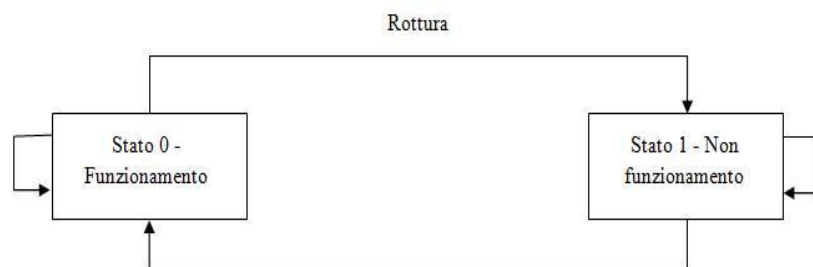


Figura 1.6 Stati e transizioni possibili di un componente riparabile. Riparazione ammessa.

Il processo di rottura di un componente riparabile si caratterizza attraverso la variabile casuale tempo di rottura (*time to failure*) assimilabile al tempo di guasto τ introdotto per i non riparabili. Anche la riparazione è un processo stocastico, nel senso che il tempo di riparazione τ_r di un generico componente riparabile è una grandezza casuale, che si può modellare ricorrendo a funzioni statistiche definite in maniera analoga che nel caso dei non riparabili. Si introducono quindi dei nuovi parametri affidabilistici:

- τ_r variabile aleatoria tempo di riparazione;
- $g(t)$ rateo di aggiustamento non condizionato, è la *ddp* della variabile aleatoria τ_r ;
- $G(t)$ manutenibilità (*Maintainability*). La manutenibilità esprime la probabilità che il componente o sistema sia riparabile entro un tempo pari a T , con riferimento a specifiche condizioni operative;

Statisticamente la definizione viene espressa come:

$$G(T) = P(\tau_r \leq T) = \int_{-\infty}^T g(x)dx \quad (1.22)$$

- **MTTR** tempo medio di riparazione (*Mean Time To Repair*). Rappresenta il valor medio della variabile aleatoria τ_r . La definizione di MTTR si traduce dunque nella seguente:

$$MTTR = \int_0^{\infty} x \cdot g(x)dx \quad (1.23)$$

- $\mu(t)$ rateo di aggiustamento condizionato, viene definito come:

$$\mu(t) \cdot \Delta t = P(t \leq \tau_r \leq t + \Delta t / \text{non funzionante in } t) \quad (1.24)$$

$\mu(t)$ misura la velocità istantanea di riparazione di un componente rotto.

Il processo di aggiustamento di un componente rotto è definito mediante questi parametri affidabilistici analoghi a quelli introdotti nella trattazione del processo di rottura dei non riparabili. La Tabella 1.2 mostra il parallelismo tra i parametri del processo di rottura e quelli del processo di aggiustamento:

AGGIUSTAMENTO	ROTTURA
$G(t)$	$F(t)$
$g(t)$	$f(t)$
MTTR	MTTF
$\mu(t)$	$\lambda(t)$

Tabella 1.9 Parallelismo rottura – aggiustamento [T1]

Analogamente a quanto fatto nel descrivere il processo di rottura per i componenti non riparabili si introduce la Tabella 1.3 riassuntiva delle relazioni affidabilistiche che governano il processo di aggiustamento.

Processo di aggiustamento nei COMPONENTI RIPARABILI	
Rateo di aggiustamento condizionato $\mu(t)$ τ_r è la variabile aleatoria	
$G(0) = 0$ $G(\infty) = 1$	
$g(t) = \frac{dG(t)}{dt}$ $g(t)dt = G(t+dt) - G(t)$ $G(t) = \int_0^t g(x_r) dx$	
$\mu(t) = \frac{g(t)}{(1-G(t))}$	$\mu(t) = \mu$
$g(t) = \mu(t) \cdot e^{-\int_0^t \mu(x) dx}$	$g(t) = \mu \cdot e^{-\mu t}$
$G(t) = 1 - e^{-\int_0^t \mu(x) dx}$	$G(t) = 1 - e^{-\mu t}$
$MTTR = \int_0^\infty x \cdot g(x) dx$	$MTTR = \frac{1}{\mu}$

Tabella 1.10 Relazioni fondamentali nel processo di aggiustamento [T1]

Si evidenzia in particolare il parallelismo tra la probabilità di guasto $F(t)$ e la manutenibilità $G(t)$: quest'ultima non è assimilabile all'affidabilità ma a quella grandezza che ne è il complemento ad uno ovvero la probabilità di guasto $F(t)$.

1.1.9 CICLI DI ROTTURA – AGGIUSTAMENTO

In generale un componente riparabile è soggetto a più cicli di funzionamento – rottura – aggiustamento come mostrato in Figura 1.7. Con riferimento a questa tipologia di componenti si introduce ora un nuovo parametro affidabilistico: il rateo di guasto non condizionato $w(t)$. Esso rappresenta la velocità di rottura del generico componente messo in funzione al tempo zero e soggetto a cicli di rottura e riparazione.

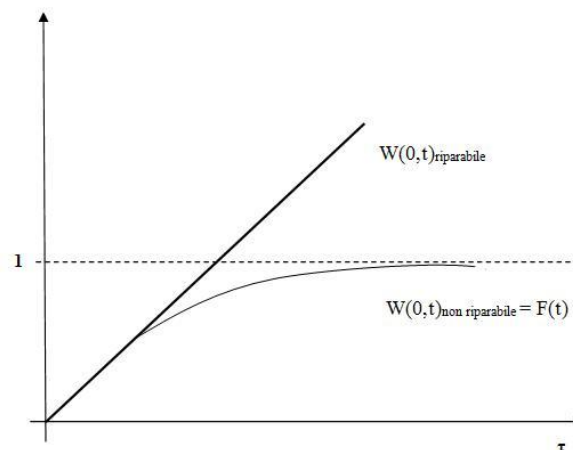


Figura 1.7 Numero atteso di guasti per componenti riparabili e non riparabili [T1]

Questo componente può essere pertanto soggetto a più fasi di rottura e per questo lo si può caratterizzare con un rateo di guasto non condizionato $f(t)$ per componenti non riparabili, che è la funzione rappresentativa del solo processo di prima rottura di in componente riparabile o di quello di rottura di un componente non riparabile. Il rateo di guasto non condizionato $w(t)$ per componenti riparabili è così definito:

$$P(t \leq \tau \leq t+dt) = w(t) \cdot dt \quad (1.25)$$

Dove:

- $P(t \leq \tau \leq t+dt)$ misura della probabilità di guasto;
- τ tempo al guasto;
- $w(t) \cdot dt$ misura dunque la probabilità di guasto entro l'intervallo infinitesimo $[t, t+dt]$;

A partire dalla grandezza affidabilistica rateo di guasto non condizionato $w(t)$ si definisce $W(t_1, t_2)$ misura del numero atteso di rotture (*Expected Number of Failure - ENF*) nell'intervallo $[t_1, t_2]$:

$$W(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} w(\tau) d\tau \quad (1.26)$$

Si tratta di un valore non negativo ed eventualmente maggiore di uno come giustificato dalla Figura 1.7.

1.1.10 SCHEMI FUNZIONALI E SCHEMI AFFIDABILISTICI

Gli schemi funzionali descrivono le connessioni fisiche di un impianto produttivo allo scopo di comprenderne i principi di funzionamento. Gli schemi affidabilistici si preoccupano di rappresentare le logiche di funzionamento/non funzionamento del sistema tenuto conto delle connessioni fisiche e delle condizioni operative. Per meglio comprendere questa distinzione si pensi alla porzione di un impianto di servizio costituito da due pompe centrifughe fisicamente connesse in parallelo come in Figura 1.8.

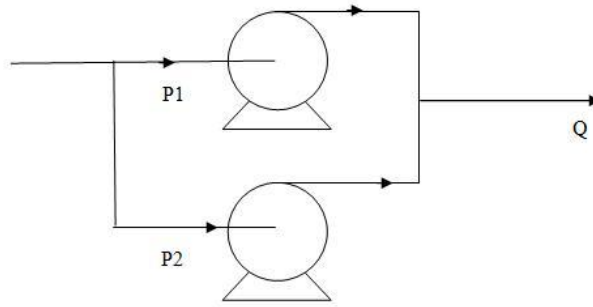


Figura 1.8 Schema funzionale delle pompe Q1 e Q2 [T1]

Questi componenti non sono necessariamente in parallelo anche sotto l'aspetto dell'affidabilità. Ciò dipende dal fabbisogno di portata che il sistema a valle delle due pompe deve garantire ad una generica utenza collegata a valle. Si ipotizzi di conoscere le portate nominali delle due pompe (Q_1 per la pompa P_1 e Q_2 per la pompa P_2). Sia Q la portata richiesta dall'utenza. Sotto l'aspetto dell'affidabilità il sistema dei due componenti è un parallelo quando la portata richiesta $Q = Q_1 = Q_2$ come in Figura 1.9.

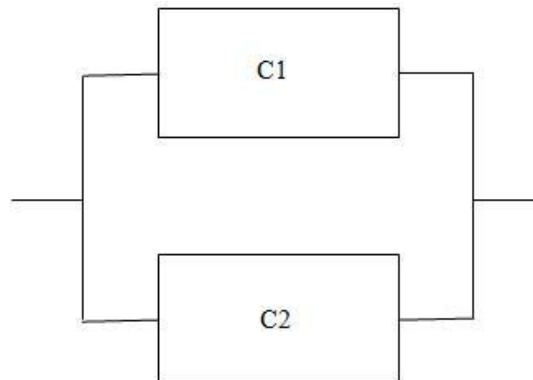


Figura 1.9 Schema affidabilistico con componenti C_1 e C_2 in parallelo.

In questo caso può funzionare una sola pompa per garantire la portata richiesta. Nell'ipotesi che $Q = 2Q_1 = 2Q_2$ lo schema affidabilistico rappresentativo del sistema è una serie (Figura 1.10).

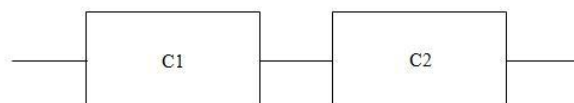


Figura 1.10 Schema affidabilistico con componenti C_1 e C_2 in serie.

Risulta quindi evidente come uno stesso sistema fisico può essere descritto da diversi schemi affidabilistici.

1.1.11 CONFIGURAZIONE AFFIDABILISTICA IN SERIE

In questa configurazione affidabilistica i componenti del generico sistema S sono tutti indispensabili per il funzionamento (Figura 1.11), è infatti sufficiente che un solo componente entri in avaria perché l'intero sistema smetta di funzionare correttamente.



Figura 1.11 Schema affidabilistico serie generale

L'affidabilità del sistema S è perciò espressa dalla relazione probabilistica seguente:

$$R_s(T) = \prod_{i=1}^n r_i dt = e^{-\int_0^T \lambda_s dt} = e^{-\int_0^T \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) dt} \quad (1.27)$$

Dove:

- $r_i(T)$ affidabilità del componente i-esimo per un intervallo di missione di lunghezza T unità di tempo;
- λ_i rateo di guasto condizionato del componente i-esimo;
- n numero di componenti in serie;

Dalla (1.27) segue la relazione di validità generale:

$$\lambda_s(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) \quad (1.28)$$

Se si considera l'ipotesi di un generico rateo λ_i risulti costante $\forall i = 1, \dots, n$ la (1.28) restituisce un valore anch'esso costante. Questo significa che il sistema dei componenti ha un comportamento al guasto casuale. Non esiste quindi un intervallo di tempo in corrispondenza del quale il sistema risulti con maggiore probabilità non funzionante. Dall'espressione generale del MTTF di un componente/sistema segue quella del sistema in serie di componenti elementari:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R_s(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\int_0^t \lambda_s(x) dx} dt \quad (1.29)$$

Se tutti i componenti hanno rateo costante segue la relazione:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda_s} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i(t)} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{MTTF_i}} \quad (1.30)$$

Qualora sia necessario innalzare l'affidabilità del sistema mantenendo la configurazione serie dei componenti, vale la pena intervenire sul componente la cui affidabilità r_i assume il valore più basso. Dimostrazione: a fronte dell'incremento di affidabilità Δr_i sul componente i -esimo, il sistema assume un valore della *survival function* pari a:

$$R_{S,II} = R_{S,I} + \Delta R_S = r_1 \cdot r_2 \dots [r_i + \Delta r_i] \dots r_n \quad (1.31)$$

Dove:

- r_i affidabilità del generico componente i .

Dalla (1.31) l'incremento dell'affidabilità del sistema ΔR_S vale:

$$\Delta R_S = R_{S,II} - R_{S,I} = r_1 \cdot r_2 \dots \Delta r_i \dots r_n \quad (1.32)$$

Dividendo ambo i membri per Δr_i e moltiplicando numeratore e denominatore a secondo membro per r_i vale la seguente relazione:

$$\frac{\Delta R_S}{\Delta r_i} = \frac{R_{S,I}}{r_i} \quad (1.33)$$

Il rapporto espresso dalla (1.33) è massimizzato quando r_i è minimo.

1.1.12 CONFIGURAZIONE AFFIDABILISTICA IN PARALLELO

In questa configurazione i componenti del sistema sono ridondanti, è cioè sufficiente il funzionamento di uno solo di essi per garantire quello dell'intero sistema (Figura 1.12). E' quindi necessario che tutti i componenti vadano in avaria per far si che l'intero sistema vada in avaria.

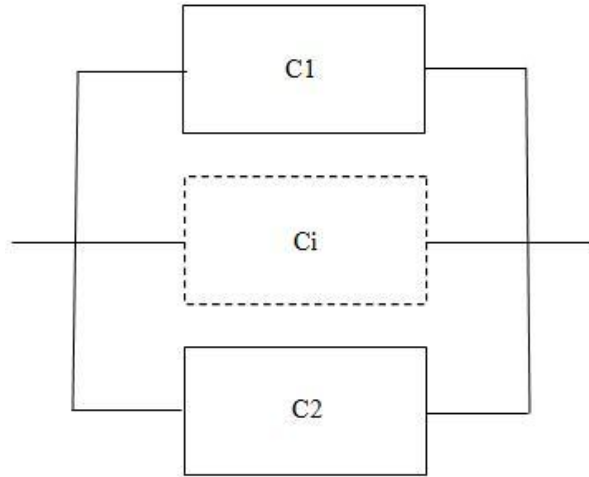


Figura 1.12 Schema affidabilistico parallelo generale

L'affidabilità del generico sistema S è espressa dalla relazione seguente:

$$R_S(T) = 1 - F_S(T) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - r_i(T)] = \prod_{i=1}^n r_i(T) \quad (1.34)$$

Dove:

- $r_i(T)$ affidabilità del componente i -esimo per un intervallo di missione di lunghezza T unità di tempo;
- λ_i rateo di guasto condizionato del componente i -esimo;
- n numero di componenti in parallelo;
- $F_S(T)$ probabilità di guasto del sistema S;

dalla (1.33):

$$R_S(T) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - e^{-\int_0^T \lambda_i(t) dt}] = \prod_{i=1}^n e^{-\int_0^T \lambda_i(t) dt} \quad (1.35)$$

Le espressioni (1.34) e (1.35) sono di validità generale. Nell'ipotesi che il generico rateo λ_i risulti costante e uguale per tutti i componenti ($\lambda_i = \lambda \forall i = 1, \dots, n$) la (1.34) assume questa veste particolare:

$$R_S(T) = e^{-\int_0^T \lambda_S(t) dt} = 1 - [1 - e^{-\lambda T}]^n \quad (1.36)$$

Dove:

- $\lambda_S(t)$ rateo di guasto condizionato riferito al sistema S;

Il valore di $\lambda_S(t)$ non è costante, come dimostrato dalla sua espressione generale:

$$\lambda_s(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{n\lambda e^{-\lambda t}(1 - e^{-\lambda t})^{n-1}}{1 - (1 - e^{-\lambda t})^n} \quad (1.37)$$

Come conseguenza per il tempo medio al guasto del sistema S:

$$\text{MTTF}_S \neq \frac{1}{\lambda_S} \quad (1.38)$$

Analogamente a quanto visto per i sistemi affidabilistici in serie, con riferimento al parallelo ridondante vale la seguente:

$$\frac{\Delta R_S}{\Delta r_i} = \frac{1 - R_S}{1 - r_i} \quad (1.39)$$

Dove:

- r_i affidabilità del generico componente i ;

Dalla (1.39) si evince che per innalzare l'affidabilità del sistema S, a parità di intervento Δr_i si deve intervenire sul componente più affidabile allo scopo di minimizzare il denominatore del secondo membro.

1.2 STRATEGIE MANUTENTIVE

Esistono numerosi approcci alternativi alla manutenzione di un sistema di produzione. Nessuno di questi può definirsi il migliore in assoluto, poiché l'efficacia di una politica manutentiva è strettamente connessa alla natura del sistema a cui è applicata. Si elencano di seguito le strategie manutentive più note nella letteratura specializzata:

- **Manutenzione a guasto (*Breakdown/corrective maintenance*):** questa tipologia di intervento manutentivo viene eseguito qualora il sistema produttivo sia incapace di operare a fronte della rilevazione di un guasto. Questa strategia è nota anche come *run to failure strategy* nel senso che non è prevista alcuna azione manutentiva volta ad allontanare l'accadimento dell'evento di fermo dell'impianto.
- **Manutenzione preventiva (*Preventive maintenance*):** Si tratta di una manutenzione basata su interventi preventivi ovvero che cercano di anticipare l'accadimento dell'evento rottura del sistema. In particolare si possono distinguere due categorie principali di intervento manutentivo preventivo: il modello preventivo a data costante e quello ad età costante che verranno descritti dettagliatamente in seguito.

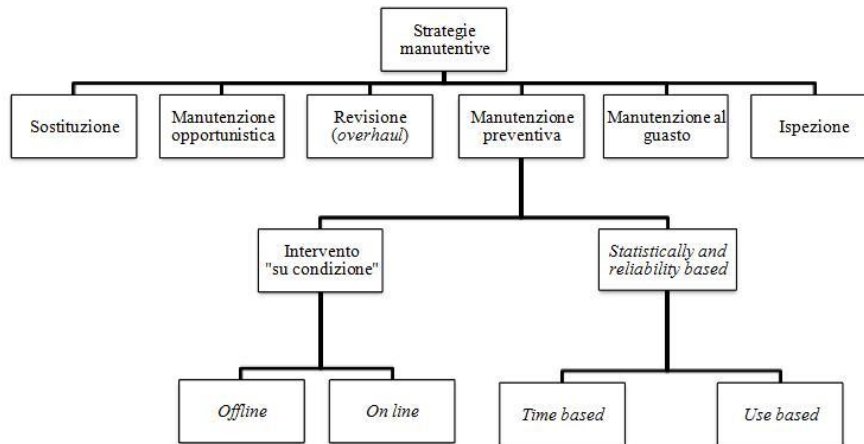


Figura 1.13 Strategie manutentive in un sistema produttivo [T1]

1.2.1 MODELLI MATEMATICI DELLA MANUTENZIONE PREVENTIVA

La notazione utilizzata nei modelli di seguito presentati e riconducibili alla manutenzione preventiva è la seguente:

- C_p costo di intervento manutentivo preventivo;
- C_f costo di un intervento manutentivo a rottura (*breakdown maintenance*);
- $f(t)$ densità di probabilità di guasto della variabile aleatoria *time to failure* (TTF) del sistema;
- $F(t)$ probabilità di guasto del sistema con riferimento al tempo di missione $T = [0,t]$;
- $R(t)$ affidabilità del sistema con riferimento al tempo di missione $T = [0,t]$;
- $\lambda(t)$ rateo di guasto condizionato del sistema. Si ricorda che questo parametro affidabilistico è definito originariamente per componenti/sistemi non riparabili;
- $w(t)$ rateo di guasto non condizionato del sistema riparabile nei cicli di funzionamento, rottura, e aggiustamento;
- $N(t)$ variabile aleatoria misura del numero di guasti del sistema all'interno dell'intervallo $(0,t)$;
- $W(t)$ numero di guasti attesi nell'intervallo $(0,t)$;
- $EC(t)$ costo atteso della politica preventiva per il ciclo operativo del sistema, dove t indica l'ampiezza del ciclo;
- UEC costo atteso della politica manutentiva per unità di tempo;

1.2.2 MODELLO PREVENTIVO AD ETÀ COSTANTE

Questa politica preventiva prende il nome di *age-based replacement policy* (spesso chiamata *type I*). Essa consiste nell'effettuare un intervento preventivo dopo t_p ore di operatività continua del sistema produttivo. Nell'ipotesi che il sistema si guasti prima di t_p , l'intervento (del tipo a guasto) viene eseguito nell'istante in cui si manifesta il guasto e il successivo intervento pianificato e di natura preventiva viene rischedulato dopo t_p ore di operatività continua. L'ipotesi base è che il sistema sia "as good as new" dopo ogni azione manutentiva. La Figura 1.14 illustra il funzionamento della politica *type I*, mostrando tre tipi di operatività: il primo di durata t_p poiché non vi è necessità di intervenire anticipatamente in ragione di un guasto improvviso; il secondo è interrotto da un guasto, il terzo, come il primo, è di durata t_p [T2].

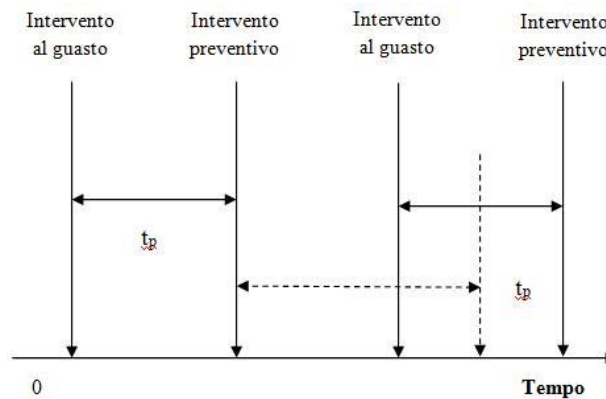


Figura 1.14 Politica manutentiva *type I* [T1]

L'obiettivo del modello è stabilire il valore ottimale del tempo t_p capace di minimizzare il costo totale della gestione manutentiva trovando il miglior compromesso tra una manutenzione preventiva a quella a guasto. Il generico intervento manutentivo può essere pensato come una vera e propria sostituzione del componente/sistema oggetto dell'analisi: così le catene impiegate in una trasmissione meccanica possono essere sostituite dopo un tempo di utilizzo prestabilito t_p o, anticipatamente, qualora sia necessario al sopraggiungere di un loro guasto. L'obiettivo del presente modello si traduce nella minimizzazione del costo totale delle due politiche manutentive (preventiva e a guasto) gravante sull'unità di tempo di operatività del sistema. Il costo totale per ciclo è espresso dalla seguente:

$$EC(t_p) = CP \cdot R(t_p) + Cf[1-R(t_p)] \quad (1.40)$$

La (1.40) misura il costo medio della gestione manutentiva pesando i costi di intervento preventivo e quelli al guasto rispettivamente con l'affidabilità del sistema e la probabilità di guasto misurate nel tempo di missione pari a

t_p . La relazione (1.41) misura il valore atteso della lunghezza del ciclo di funzionamento:

$$\hat{T} = t_p \cdot R(t_p) + \int_{-\infty}^{t_p} t \cdot f(t) dt = t_p \cdot R(t_p) + \int_0^{t_p} t \cdot f(t) dt \quad (1.41)$$

In particolare il secondo addendo della (1.41) è il tempo medio di rottura MTTF del sistema qualora si rompa entro t_p . Ne consegue l'espressione del costo medio unitario (unità per tempo) UEC, dipendente da t_p :

$$UEC(t_p) = \frac{C_p R(t_p) + C_f [1 - R(t_p)]}{t_p R(t_p) + \int_0^{t_p} t \cdot f(t) dt} \quad (1.42)$$

La politica *age-based replacement policy (type I)* si rivela particolarmente appropriata quando la $\lambda(t)$ è una funzione crescente, purché l'intervento manutentivo riporti il componente/sistema in stato "as good as new", come avviene spesso nella sostituzione preventiva o a guasto.

1.2.3 MODELLO PREVENTIVO A DATA COSTANTE

La *constant-interval replacement policy* (chiamata politica *type II*) prevede un intervento preventivo sul sistema dopo un tempo operativo t_p indipendentemente dalla numerosità degli interventi a guasto che si sono eventualmente succeduti nel corso del t_p [T2]. Si ricorda che l'ipotesi base sottostante è che il sistema sia ancora una volta "as good as new" dopo la generica azione manutentiva preventiva. Pertanto il numero di interventi a guasto non incide sulla natura della funzione di guasto del sistema. Un esempio tipico di applicazione del presente modello è a componenti meccanici quali turbine o macchine operatrici. Anche questo modello si basa sulla minimizzazione di una frazione di costo unitario (riferita all'unità di tempo). L'espressione di questo costo è la seguente:

$$UEC(t_p) = \frac{C_p + C_f \cdot W(t_p)}{t_p} \quad (1.43)$$

Dove:

- $W(t_p)$ numero stimato di interventi a guasto che il sistema richiede qualora si decida di intervenire preventivamente sul sistema ad intervalli di durata t_p (rif. Figura 1.15).

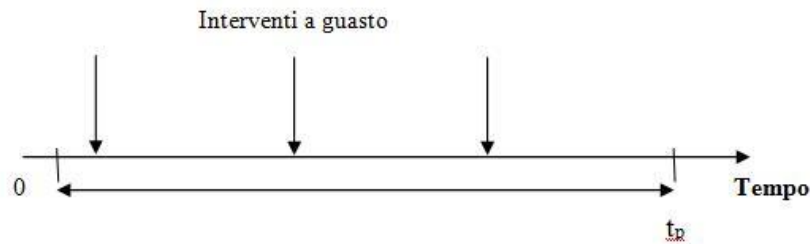


Figura 1.15 Politica manutentiva type II [T1]

Ora il numero di rotture previste con riferimento all'intervallo $[0, t_p]$ è il seguente:

$$E[N(t_p)] = W(t_p) = \int_0^{t_p} w(t)dt \quad (1.44)$$

1.2.4 MODELLI MATEMATICI PER LA MANUTENZIONE ISPETTIVA

La manutenzione ispettiva differisce da quella preventiva precedentemente illustrata perché non conosce lo stato di funzionamento del componente/sistema se non a fronte di un intervento/azione di analisi/monitoraggio dello stesso. Lo scopo di una politica manutentiva di tipo ispettivo è raccogliere informazioni utili sullo stato di salute del componente o sistema produttivo tramite definizione di indicatori di stato (vibrazioni, rumori, qualità del prodotto, etc.). Dal monitoraggio ed analisi di questi indicatori è possibile prevedere la rottura del componente/sistema e pianificare nuove azioni manutentive. La frequenza con cui viene eseguito un intervento ispettivo e il livello di monitoraggio dipendono da:

- Costo di ispezione;
- Benefici dell'ispezione a garanzia di una corretta collezione di dati;
- Bontà dell'indicatore impiegato per prevedere la rottura imminente;

Di seguito vengono presentati alcuni modelli di supporto alla determinazione della frequenza ottimale di ispezione cioè la cadenza con cui ispezionare il sistema produttivo. Si tratta ancora una volta di modelli di costo, relativamente all'obiettivo di minimizzare il costo totale della gestione manutentiva piuttosto che massimizzare il profitto totale. La Figura 1.16 illustra qualitativamente in cosa consista la minimizzazione di questo costo operativo, compromesso tra il costo a guasto e quello sostenuto per eseguire ispezioni.

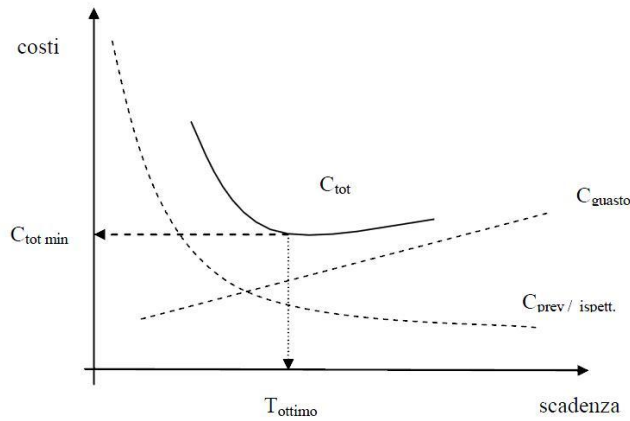


Figura 1.16 Costo della gestione manuntentiva. Politica ispettiva e politica preventiva [D1]

1.2.5 MACCHINA SINGOLA. POLITICA ISPETTIVA ELEMENTARE

Questa politica si basa sull'ispezione del sistema/impianto in particolari istanti di tempo allo scopo di rilevare un eventuale evento di guasto consumatosi, in generale, anticipatamente rispetto al periodo di rilevazione. Il costo dell'intervento di riparazione a fronte di un guasto è ipotizzato proporzionale all'entità di tempo trascorsa dall'accadimento dell'evento di guasto (G in Figura 1.17) alla sua manifestazione, ovvero più precisamente alla sua rilevazione, che chiameremo τ (rif. Figura 1.17).

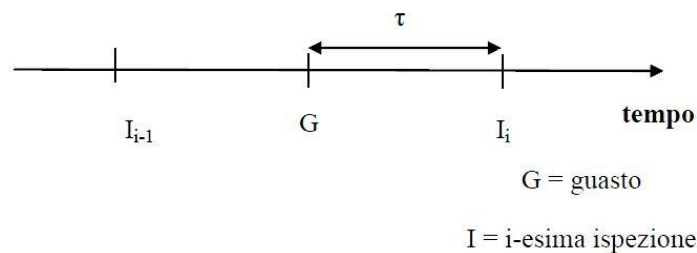


Figura 1.17 Politca ispettiva. Guasto e ispezione [T1]

C_G è la misura unitaria di questo costo espressa in €/h, qualora τ sia un tempo espresso in h. Per questo motivo il costo dell'azione correttiva è stato volutamente indicato con un simbolo diverso da C_f , già costo al guasto dei nei modelli di manutenzione preventiva illustrati precedentemente: C_G e C_f sono diversi perché diverso è l'istante di rilevazione del guasto. Nella

strategia manutentiva di tipo ispettivo la rilevazione del guasto può avvenire solo a fronte di un'ispezione, il cui singolo costo si assume pari a C_i . Qualora si voglia garantire una probabilità condizionata di guasto costante p tra due ispezioni successive (in generale tra l'ispezione $i-1$ e la i) vale la seguente relazione:

$$\frac{F(t_i) - F(t_{i-1})}{R(t_{i-1})} = p \quad (1.45)$$

Infatti la (1.45) è una misura della probabilità condizionata che il generico componente/sistema si rompa tra t_{i-1} e t_i , qualora non sia ancora rotto in t_{i-1} . Dall'ipotesi di costanza della probabilità condizionata di rottura:

$$F(t_i) - F(t_{i-1}) = (1 - p)^{i-1}p \quad (1.46)$$

Si calcola allora il valor medio del numero di ispezioni effettuate prima della rilevazione del guasto:

$$\mu_i = \sum_{i=1}^{\infty} i \cdot f(i) = \sum_{i=1}^{\infty} [i \cdot (1 - p)^{i-1}p] = \frac{1}{p} \quad (1.47)$$

La Figura 1.18 esemplifica la tipica distribuzione temporale degli interventi ispettivi: si osservi che al passare del tempo, invecchiando il componente, gli interventi si avvicinano tra loro.

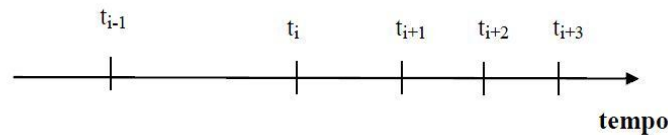


Figura 1.18 Tempi di ispezione. Esempificazione politica ispettiva elementare [D1]

Il costo totale relativo ad un ciclo di funzionamento del generico componente è il seguente:

$$C_{\text{Totale}} = C_i + \mu_i + C_G \cdot \tau(p) \quad (1.48)$$

Dove:

- C_i costo di una ispezione;
- C_G costo per unità di tempo di un intervento al guasto;
- $\tau(p)$ tempo medio di durata del guasto prima della sua scoperta mediante ispezione;

Si osservi che la durata del ciclo di funzionamento di riferimento per il costo totale C_{Totale} è quella che separa l'istante di messa in funzione del componente dalla rilevazione del suo guasto. Ora, poiché il guasto può

avvenire in uno qualunque degli intervalli $[t_{i-1}, t_i]$ (dove $i=1,2,\dots,\infty$), $\tau(p)$ può essere stimato mediante la seguente relazione:

$$\tau(p) = \sum_{i=1}^{\infty} t_i q^{i-1} p - \text{MTTF} \quad (1.49)$$

Dove:

- $q = 1-p$;

Derivando la (1.48) ed uguagliandola a zero si ottiene il valore ottimale p^* della probabilità condizionata p :

$$\left(\frac{dC_{\text{totale}}}{dp} \right)_{p^*} = 0 \quad (1.50)$$

1.2.6 CONCLUSIONI

In questo capitolo sono stati presentati diversi modelli matematici per la pianificazione e gestione degli intervalli manutentivi, con particolare attenzione a quelli preventivi ed ispettivi. Esistono numerosi altri approcci per l'ottimizzazione degli interventi che si differenziano tra loro rispetto a quelli illustrati per le ipotesi assunte e il contesto operativo in cui possono essere applicati. Occorre pertanto, al fine di ottenere risultati il più possibile attendibili, scegliere il modello che più sia adatta alla realtà produttiva in cui si opera.

1.3 GESTIONE DEI RICAMBI

1.3.1 INTRODUZIONE

Nel normale ciclo di vita di un impianto industriale a seguito di guasti oppure per l'invitabile fenomeno dell'usura nasce la necessità di sostituire i componenti con le parti di ricambio (*spare parts*). All'interno delle attività svolte in occasione degli interventi di manutenzione vi è, fra le altre, una fase di approvvigionamento di parti di ricambio. Il *lead time* di approvvigionamento può durare da pochi minuti, nel caso in cui il materiale tecnico sia nella disponibilità dell'azienda, a qualche giorno o addirittura qualche settimana nel caso si debba approvvigionare un codice disponibile presso un fornitore geograficamente molto lontano oppure un codice non standard a specifica non disponibile presso il fornitore. Questo comporta che alla durata del ciclo di approvvigionamento di un ricambio si può associare

un onere legato alla mancanza di produzione di un prodotto piuttosto che di erogazione di un servizio.

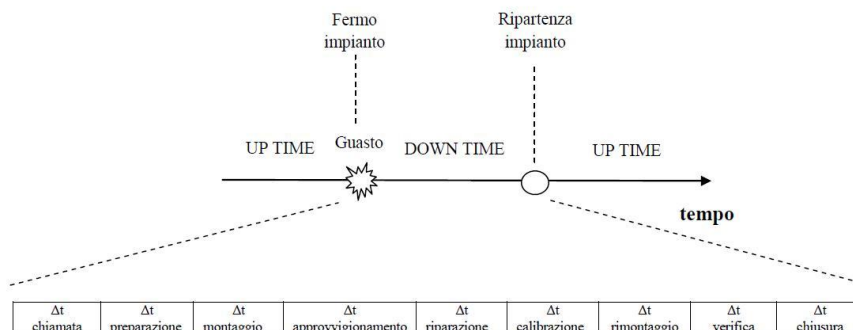


Figura 1.19 Esempificazione di un intervento a guasto [T1]

I materiali di ricambio hanno inoltre caratteristiche proprie che li portano ad avere impieghi non certi sulla macchina e quindi più elevati rischi di obsolescenza in genere associati ad elevati costi di acquisto. In base a quanto esposto è evidente che allo stoccaggio del materiale tecnico è connesso un significativo onere finanziario che, in caso di mancato uso del codice, produce molteplici effetti negativi: l'immobilizzo delle somme di denaro per l'acquisto, al costo di mantenimento a scorta, e poi ad eventuali costi di smaltimento in caso di mancato impiego e sopravvenuta obsolescenza spesso dovuta alla necessità di sostituzione dell'impianto originario da parte dell'azienda. In conclusione nella gestione dei sistemi del parco ricambi dei sistemi di produzione bisogna considerare due aspetti contrastanti: il costo di mancanza di produzione per l'assenza del codice a magazzino ed il costo di acquisto e mantenimento del codice a magazzino senza nessuna certezza su modi e sui tempi dell'impiego. La Figura 1.20 esemplifica l'andamento in controtendenza dei due costi al variare del livello di scorta di ricambi a magazzino ed il conseguente andamento del costo totale.

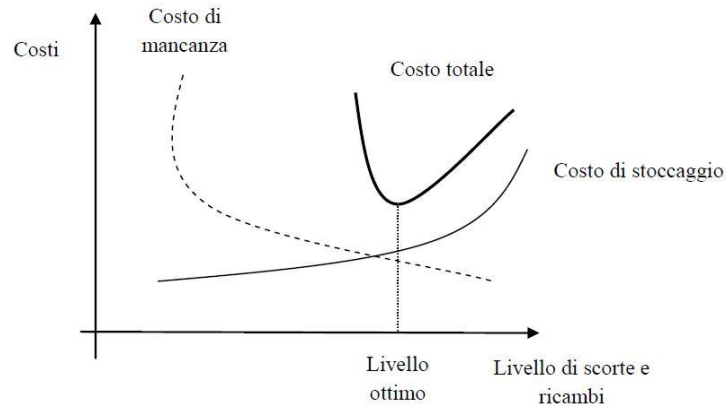


Figura 1.20 Andamento qualitativo dei costi al variare del livello delle scorte [D1]

In definitiva avendo come obiettivo la minimizzazione del costo totale del sistema di gestione dei ricambi, il problema si sposta sul piano della determinazione del *set* ottimale di ricambi in termini di tipologia e quantità che vanno mantenuti a scorta a garanzia delle *performance* del sistema di produzione.

1.3.2 CARATTERISTICHE DISTINTIVE DEI RICAMBI

Il materiale di ricambio presenta delle caratteristiche peculiari che la contraddistinguono rispetto a tutti gli altri materiali impiegati nel sistema di produzione o di servizio. La principale particolarità risiede nel fatto che il profilo di consumo dei ricambi è di tipo intermittente, avviene cioè ad intervalli irregolari di tempo, e riguarda quantità generalmente ridotte ma soprattutto molto variabili da richiesta a richiesta.

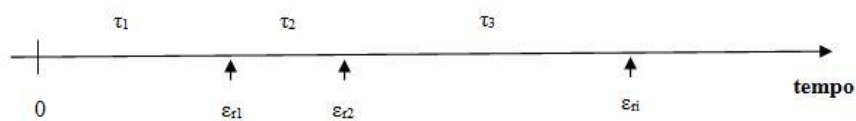


Figura 1.21 Esempificazione di consumo intermittente di un codice ricambio. ε_{ri} consumo del codice (pezzi); τ_i intervallo fra due richieste consecutive del codice (in periodi); N numero di intervalli di analisi [T1]

Per una valutazione di questa duplice caratterizzazione della domanda di un ricambio vengono utilizzati due parametri riconosciuti in ambito internazionale:

- *ADI Average interdemand interval*: intervallo medio fra due richieste del codice. È usualmente espresso in periodi, intendendo per periodo l'intervallo di tempo di riferimento che l'azienda usa per gli approvvigionamenti (di solito un mese);
- *CV² Coefficient of variation*: deviazione standard della domanda rapportata alla domanda media. È una grandezza adimensionale;

La Figura 1.21 esemplifica la tipica situazione di richiesta intermittente per un codice ricambio. Facendo riferimento alla Figura 1.22 si possono quindi definire:

$$ADI = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_i}{N} \quad (1.51)$$

$$CV^2 = \left[\frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\varepsilon_{ri} - \varepsilon_a)^2}{N}}}{\varepsilon_a} \right]^2 \quad (1.52)$$

$$\varepsilon_a = \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_{ri}}{N} \quad (1.53)$$

Sempre nella letteratura internazionale si possono derivare dei valore di taglio che permettono di caratterizzare in maniera più dettagliata il tenore intermittente della domanda dei ricambi. La Figura 1.22 la quattro categorie di domanda di ricambi (*pattern*) come vengono definite dalla odierna letteratura e i corrispondenti livelli caratteristici di ADI e CV² che le discriminano.

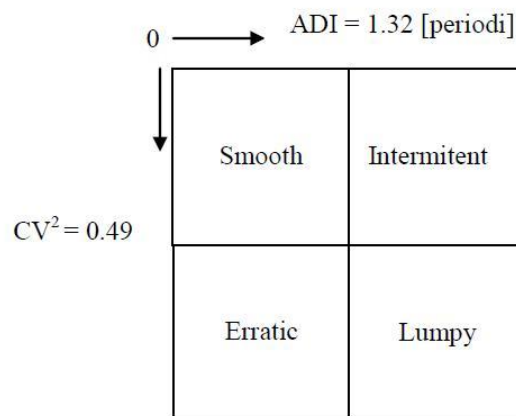


Figura 1.22 Principali pattern per la caratterizzazione della domanda di ricambi [T1]

Si possono distinguere 4 tipologie:

- A bassa rotazione - *slow moving*: questi codici hanno un comportamento che si avvicina ai tradizionali codici a bassa rotazione di un sistema produttivo (prodotti finiti);
- Propriamente intermittenti – *strictly intermittent*: sono caratterizzati da richieste estremamente sporadiche (quindi da molti periodi a richiesta nulla) con una variabilità nelle quantità per singola richiesta non particolarmente accentuata;
- Erratici – *erratic*: la caratteristica fondamentale risiede nella grande variabilità della quantità richiesta, richieste che peraltro come distribuzione nel tempo sono piuttosto costanti;
- Granulare – *lumpy*: è la categoria più difficoltosa da gestire in quanto caratterizzata da elevati intervalli fra richieste consecutive peraltro con grande variabilità nelle quantità.

Altra caratteristica distintiva del ricambio manutentivo è in genere la specificità dell'impiego. Usualmente i ricambi non sono di tipo *general purpose*, devono cioè essere impiegati per l'uso e la funzione per i quali sono stati realizzati. Questo inevitabilmente cela un elevato rischio di obsolescenza che viene sperimentato allorquando si decide la sostituzione di una attrezzatura: il *set* di ricambi non utilizzabili su altri impianti (in genere la frazione maggiore) diviene immediatamente obsoleto.

Inoltre il materiale tecnico ha tendenzialmente un elevato contenuto tecnico e quindi un alto valore unitario.

1.3.3 LA PREVISIONE DEL FABBISOGNO DI RICAMBI

La gestione dei ricambi, deve avere l'obiettivo della minimizzazione del costo complessivo del sistema che, come si è visto, è principalmente legato ai costi di stoccaggio e a quelli di mancanza. Gli oneri di stoccaggio dipendono dalle caratteristiche dello stoccaggio medesimo e in linea orientativa possono essere stimati con un canone annuo fra il 15% ed il 25% del costo di acquisto del codice. I costi di mancanza dipendono dalla tipologia di impianto su cui è montato il ricambio e dalle conseguenze dell'eventuale guasto (fermata complessiva, fermata parziale, riduzione della potenzialità produttiva, etc.). In ogni caso il problema della determinazione del livello ottimale dei ricambi da tenere a scorta richiede la preliminare valutazione del fabbisogno dei medesimi, cioè il consumo previsto per il futuro. Nella pratica industriale il fabbisogno dei ricambi viene determinato fondamentalmente attraverso:

- L'esperienza dei manutentori degli impianti;
- I consigli dei fornitori;
- L'elaborazione di previsioni da parte dell'azienda;

La previsione sulla base di metodi statistici richiede la presenza di uno storico dei consumi in grado di tenere traccia delle richieste passate di ricambi. L'esistenza di un archivio che contenga le informazioni che riguardano le prestazioni manutentive, le durate delle fermate, le richieste di intervento (correttivo, preventivo, ispettivo) ed i conseguenti consumi di materiale e quindi è fondamentale. Questa funzione è espletata dal basilare sistema di manutenzione informativo – SIM.

1.3.4 SMORZAMENTO ESPONENZIALE SEMPLICE (SES)

È un metodo basato sull'analisi della serie storica (*time series*) particolarmente adatto alle previsioni di breve periodo. In sostanza si ottiene la previsione del consumo di parti di ricambio applicando una serie di pesi, decrescenti in maniera esponenziale, ai dati registrati in passato. L'espressione di riferimento è la seguente:

$$F_{t+1} = \alpha X_t + (1-\alpha)F_t \quad (1.54)$$

Dove:

- X_t valore reale a consuntivo all'istante t ;
- F_t previsione effettuata per l'istante t ;
- α coefficiente di smorzamento;

Il coefficiente di smorzamento α assume valori differenti, in genere tra 0 e 0,4 in base alle caratteristiche del mercato (in mercati reattivi ed instabili si impiegano valori elevati del parametro).

1.3.5 METODO DI CROSTON

È una evoluzione del metodo dello smorzamento esponenziale semplice studiata con lo scopo di prevedere in maniera più precisa gli andamenti di variabili casuali con diversi valori nulli registrati nella serie storica (come avviene tipicamente nel consumo di ricambi). Si tratta di un metodo ricorsivo che determina la previsione al tempo t attraverso:

$$F_t = \Phi_t / Y_t \quad (1.55)$$

$$\Phi_t = (1-\alpha) \Phi_{t-1} + \alpha Y_t \quad (1.56)$$

$$Y_t = (1-\alpha) Y_{t-1} + \alpha Q_t \quad (1.57)$$

Dove:

- F_t previsione effettuata per l'istante t ;
- Q_t intervallo di tempo fra l'istante t e l'istante in cui di è registrata la precedente domanda non nulla;
- α coefficiente di smorzamento;

1.3.6 METODO DI POISSON

Il metodo di Poisson è tipicamente utilizzato per la previsione della probabilità di accadimento di un evento raro. Esso deriva direttamente dalla distribuzione binomiale. Questo metodo non permette il calcolo diretto della variabile da prevedere ma consente una stima della probabilità che essa assuma un determinato valore. Il punto di partenza nel modello è la valutazione del valore medio della grandezza da prevedere. Nel caso dei ricambi, immaginando un consumo medio nell'unità di tempo pari a d , la probabilità di avere un fabbisogno pari ad x (richieste di componenti) nel tempo T è pari a:

$$P_{d,T,x} = \frac{(d \cdot t)^x \cdot e^{(-d \cdot t)}}{x!} \quad (1.58)$$

Dove:

- d valor medio della variabile da prevedere [pezzi/unità di tempo];
- x valore puntuale della variabile da prevedere;
- T intervallo di tempo per il quale si assume che la variabile abbia un valore pari ad x ;

La Figura 1.23 esemplifica la situazione presentata:

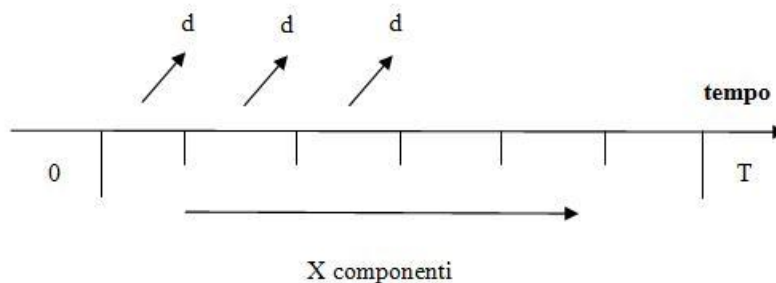


Figura 1.23 Consumo medio per periodo ed intervallo di previsione [T1]

Di conseguenza la probabilità cumulativa misura della probabilità che si consumino non più di x componenti può essere espressa da:

$$P_{\text{cum}_{d,T,x}} = \sum_{k=0}^x \frac{(d \cdot T)^k \cdot e^{-d \cdot T}}{k!} \quad (1.59)$$

1.3.7 POLITICHE PER LA GESTIONE DEL FABBISOGNO - CRITERIO DEL COSTO GLOBALE MINIMO

Si tratta della determinazione del numero ottimale N di ricambi che rende minimo il costo complessivo della politica, valutato attraverso la somma degli oneri di mantenimento a scorta dei pezzi, generalmente di elevato valore economico, e degli oneri connessi ad eventuali rotture di stock (mancanza di pezzi a magazzino) con conseguente costo derivante dalla fermata dell'impianto e quindi della mancata produzione. Il costo totale della politica dei ricambi è quindi esprimibile mediante la seguente:

$$C_{\text{tot}}(N) = C_1 + C_2 \quad (1.60)$$

Dove:

- C_1 = costo di giacenza;
- C_2 = costo di mancanza;

Riprendendo lo schema di Figura 1.23 si supponga di aver posto a magazzino all'inizio di un ciclo di approvvigionamento di durata pari a T , N ricambi di un particolare codice. Se fra l'istante t_0 e quello finale del ciclo di approvvigionamento (t_0+T) non si è verificato alcun guasto, all'istante (t_0+T) si avranno N ricambi ancora in giacenza, la probabilità di tale evento è $P_{d,T,0}$. Al contrario se tra (t_0) e (t_0+T) si è verificato un guasto, all'istante (t_0+T) si avranno ($N-1$) ricambi ancora a magazzino e ciò può accadere con probabilità $P_{d,T,1}$ e così via. Quindi i costi legati allo stoccaggio dei ricambi possono essere valutati attraverso:

$$C_1 = R \cdot \varphi [N P_{d,T,0} + (N-1) P_{d,T,1} + (N-2) P_{d,T,2} + \dots + P_{d,T,N-1}] \quad (1.61)$$

Dove:

- R costo di acquisto del componente;
- $\varphi(\%)$ tasso esprime il costo di giacenza. Si tratta di un valore percentuale che moltiplicato per il costo di acquisto del ricambio esprime il costo specifico annuale di giacenza;
- $P_{d,T,x}$ probabilità che si verifichino x richieste del medesimo ricambio nell'intervallo T ;
- T durata del ciclo di approvvigionamento [unità di tempo];

- d consumo medio dell'unità di tempo [pezzi/unità di tempo];

Il termine della (1.61) all'interno della parentesi esprime il numero medio di pezzi in giacenza a magazzino nel periodo di approvvigionamento. Il costo di rottura di stock è determinato invece sulla base della considerazione che si sperimenta un costo di mancanza solamente se lo stock di quel ricambio è nullo, condizione che si verifica solamente se la richiesta di ricambi eccede gli N pezzi. Pertanto:

$$C_2 = C_m \cdot d \cdot P \quad (1.62)$$

Dove:

- C_m costo unitario di mancanza [costo/pezzo];
- P probabilità di avere una richiesta maggiore di N ricambi nel periodo T ;

Il termine P vale quindi:

$$P = P_{d,T,N+1} + P_{d,T,N+2} + P_{d,T,N+3} + \dots \quad (1.63)$$

Per l'applicazione reale della metodologia rimane da trattare il problema della stima della probabilità $P_{d,T,x}$. Fra i diversi approcci impiegabili, spesso viene utilizzato quello suggerito dalla formula di Poisson discussa nel paragrafo precedente. Seguendo questo metodo, per la (1.59) vale che:

$$P_{d,T,x} = \frac{(d \cdot T)^x \cdot e^{-(d \cdot T)}}{x!} \quad (1.64)$$

Sul piano strettamente operativo sono stati elaborati degli abachi per l'applicazione rapida del metodo proposto. Una esemplificazione viene illustrata nella Figura 1.24:

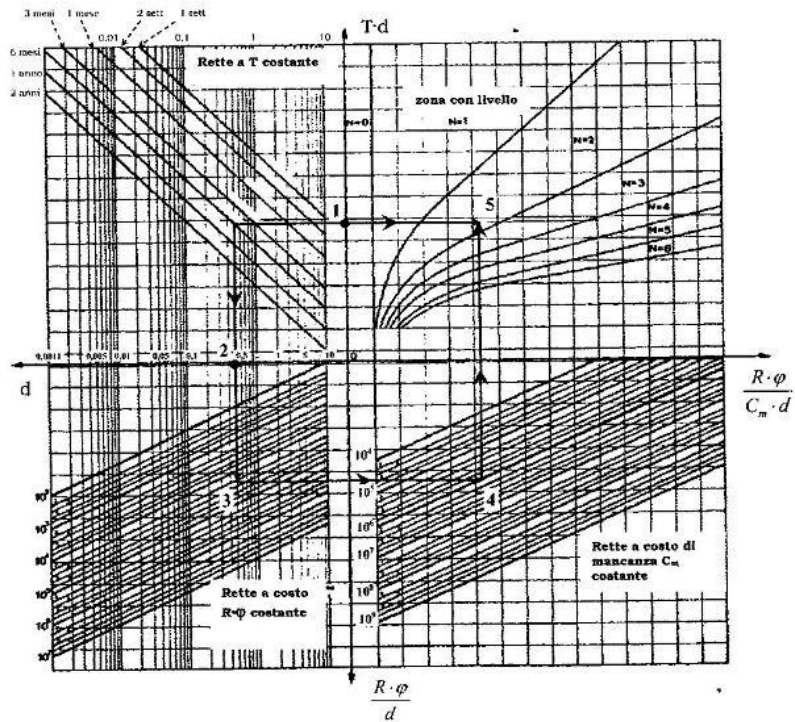


Figura 1.24 Abaco per la scelta rapida del numero di ricambi da mettere a scorta [D1]

una volta individuati due punti di ingresso sugli assi principali (per esempio i punti 1 e 2 avendo a disposizione i valori d e T) e, stabilito il valore delle variabili di supporto (in questo caso $R \cdot \varphi$, C_m), risulta univocamente individuato (punto 5 nel primo quadrante) il numero N di ricambi da mettere a scorta a seguito della determinazione dei punti 3 e 4).

CAPITOLO 2

ANALISI DI AFFIDABILITÀ

2.1 DISTRIBUZIONI DI PROBABILITÀ

2.2 DATI COMPLETI E DATI CENSURATI

2.3 ANALISI SUI TEMPI DI VITA

Si svolge nel presente Capitolo 2 l'analisi sui dati dei tempi di vita. A tal fine si illustrano, in via preliminare, le distribuzioni di probabilità di Weibull e la distribuzione Gamma generalizzata. Viene inoltre introdotta la distinzione tra dati completi e dati censurati.

2.1 DISTRIBUZIONI DI PROBABILITÀ

2.1.1 DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ DI WEIBULL

Una *ddp* molto utilizzata nella teoria dell'affidabilità e che verrà richiamata anche in seguito è la distribuzione di probabilità di Weibull. Si tratta di una distribuzione parametrica capace di rappresentare diverse distribuzioni di probabilità (gaussiana, esponenziale, log-normale, etc.) mediante la valorizzazione, nel caso più generale, di tre parametri η e β e γ . Le espressioni dell'affidabilità $R(t)$ e del rateo di guasto non condizionato $f(t)$ risultano:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.1)$$

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.2)$$

Dove:

- η è la vita caratteristica o parametro di scala ($\eta > 0$);
- β è il parametro di forma ($\beta > 0$);
- γ è il parametro di posizione (γ reale);

Quando il parametro forma β è pari ad 1 la distribuzione di probabilità del tempo di guasto τ è esponenziale con valor medio $\eta = \frac{1}{\lambda}$. Quando $\beta \geq 3$ la forma è praticamente simmetrica ed analoga a quella di una gaussiana [A1]. Le figure seguenti illustrano alcune casistiche:

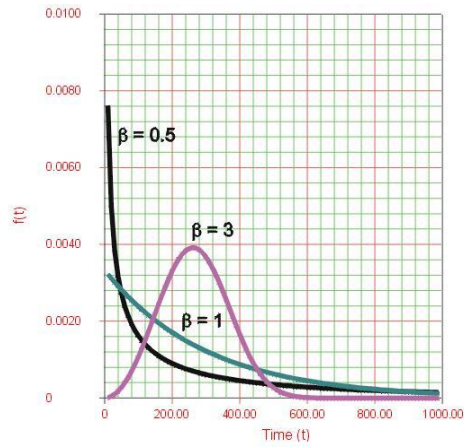


Figura 2.1 Effetto del parametro di forma [A1]

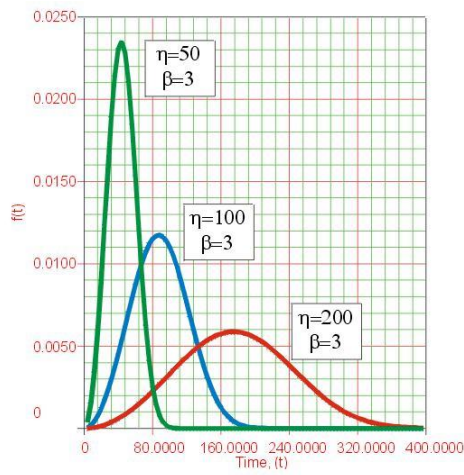


Figura 2.2 Effetto del parametro di scala [A1]

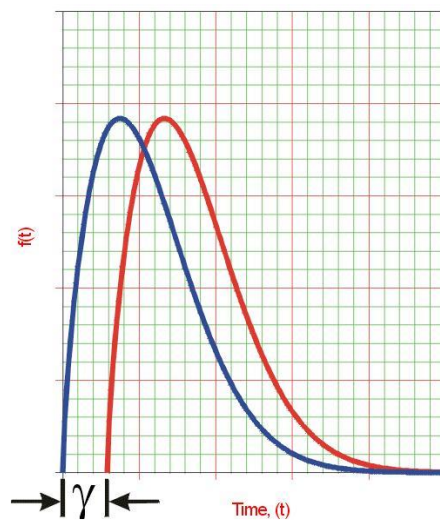


Figura 2.3 Effetto del parametro di posizione [A1]

2.1.2 DISTRIBUZIONE GAMMA GENERALIZZATA

La distribuzione di Gamma generalizzata è una distribuzione a tre parametri. Una parametrizzazione della distribuzione Gamma generalizzata utilizza i parametri k, β, θ . La funzione densità di probabilità in questo caso è data da:

$$\frac{\beta}{\Gamma(k) \cdot \theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{k\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad (2.3)$$

Il *software* utilizza tuttavia, una differente parametrizzazione basata sui seguenti parametri:

$$\mu = \ln(\theta) + \frac{1}{\beta} \cdot \ln\left(\frac{1}{\lambda^2}\right) \quad (2.4)$$

$$\sigma = \frac{1}{\beta\sqrt{k}} \quad (2.5)$$

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{k}} \quad (2.6)$$

Si ottiene quindi:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{|\lambda|}{\sigma \cdot t} \cdot \frac{1}{\Gamma\left(\frac{1}{\lambda^2}\right)} \cdot e^{\left[\frac{\lambda \cdot \frac{\ln(t)-\mu}{\sigma} + \ln\left(\frac{1}{\lambda^2}\right) e^{-\lambda \cdot \frac{\ln(t)-\mu}{\sigma}}}{\lambda^2} \right]} & \text{se } \lambda \neq 0 \\ \frac{1}{t \cdot \sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(t)-\mu}{\sigma}\right)^2} & \text{se } \lambda = 0 \end{array} \right. \quad (2.7)$$

Si tratta di una distribuzione non banale che risulta tuttavia particolarmente utile in quanto permette di includere al suo interno altre distribuzioni in base al valore che assumono i parametri μ, σ, λ [A2]. Come è possibile evincere dalla Figura 2.4 anche la distribuzione di Weibull può essere vista come un caso particolare della Gamma generalizzata quando $\lambda=1$. La distribuzione esponenziale si ottiene invece quando $\lambda=1$ e $\sigma=1$. Si ottiene invece la distribuzione log-normale quando $\lambda=0$.

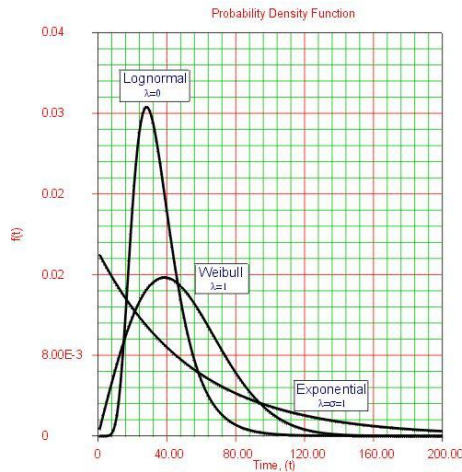


Figura 2.4 Casi particolari della distribuzione Gamma generalizzata [A2]

2.2 DATI COMPLETI E DATI CENSURATI

L'obiettivo principale delle analisi di affidabilità è quello di modellare il tasso di guasto dei singoli codici. Il modello viene costruito a partire dai dati sulla durata della vita operativa dei componenti. Questi dati possono essere ricavati sia da rilevazioni sullo scenario operativo, sia tramite test *in house*. I dati, spesso misurati in ore di funzionamento, come nel caso in esame, prendono perciò il nome di *time-to-failure data*. In generale è possibile individuare due tipi di dati: i dati completi e quelli censurati[D2]. I dati si considerano completi quando è noto il tempo di guasto di tutte le unità sottoposte a test.

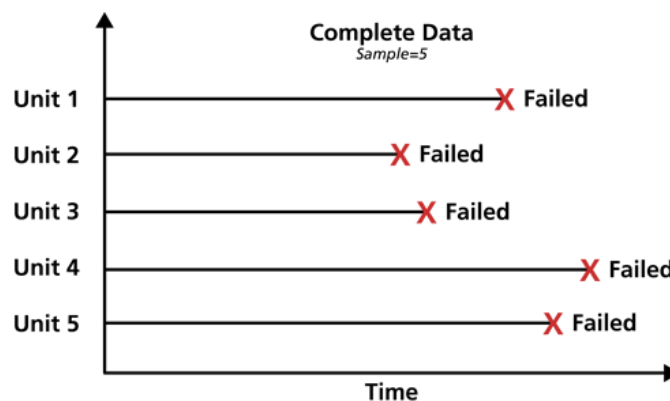


Figura 2.5 Esempio di dati completi [A3]

In molti casi alcune delle unità sottoposte a test non si guastano oppure il tempo di guasto preciso non è noto. Questo tipo di dati sono detti dati censurati. Si possono individuare tre tipologie di dati censurati. I dati censurati a destra (*right censored or suspend data*), rappresentano il caso

più comune. Scaturiscono da un campione in cui sono presenti delle unità che non si guastano per tutta la durata del test. L'istante di guasto è quindi oltre, a destra, dell'ultimo dato disponibile dal test.

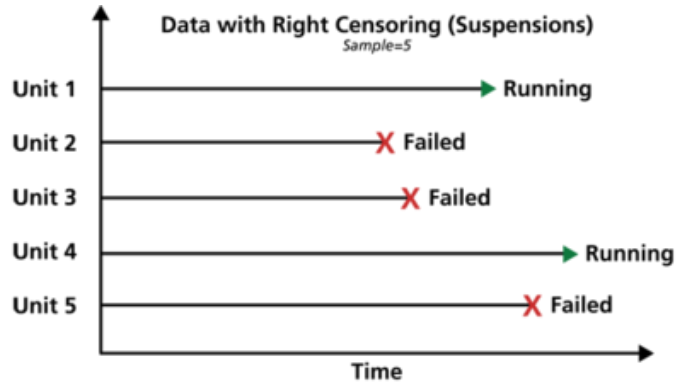


Figura 2.6 Esempio di dati censurati e destra [A3]

I dati che presentano censure sia a destra che sinistra sono detti *interval censored data*.

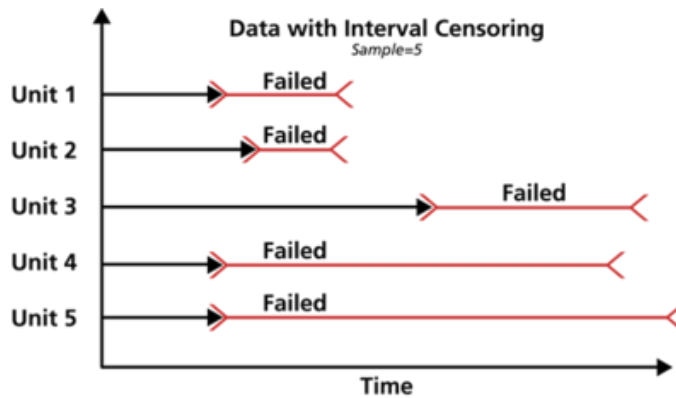


Figura 2.7 Esempio di dati *interval censored* [A3]

I dati censurati a sinistra (*left censored data*) sono dati di cui si sa solo che il guasto avviene prima di un certo istante. Sono comparabili quindi a dei dati di tipo *interval censored* in cui l'istante iniziale dell'intervallo è zero.

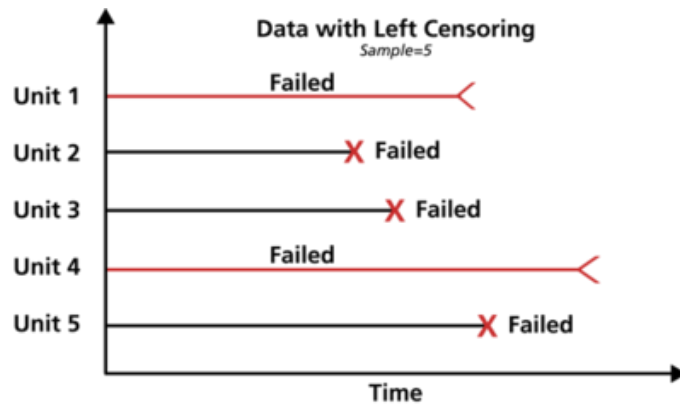


Figura 2.8 Esempio di dati censurati a sinistra [A3]

2.3.1 INTRODUZIONE

Ragioni di riservatezza impongono di non menzionare esplicitamente l'azienda, operante nel settore aeronautico, che ha messo a disposizione i dati sperimentali. È noto solo che i dati riguardano alcuni dei componenti di un determinato modello di aeromobile, anche questo un dato riservato, in uso presso l'azienda. L'impresa necessita di determinare l'affidabilità dei componenti e, in base ad essa, sviluppare una politica di gestione dei ricambi volta a minimizzare il costo totale comprensivo di manutenzione dell'aeromobile e della gestione dei ricambi. Per le medesime ragioni di riservatezza non è nota la natura dei componenti in esame. L'azienda, che ha fornito i tempi di vita dei diversi prodotti, li ha infatti identificati esclusivamente tramite dei codici.

2.3.2 SIMULAZIONI SULLE DISTRIBUZIONI DI PROBABILITÀ

Nel caso in esame si hanno a disposizione dei dati censurati a destra, come si evince dalla Tabella 2.1 dove è rappresentata solo una parte dei dati, consultabili per intero in Appendice A – MTTF Codici. Come usale nello studio dei dati censurati dove è presente la censura a destra il dato è affiancato da un "+", dove non presente il simbolo "+" i dati sono da intendersi come completi.

MTTF (h)					
CODICE A	CODICE B	CODICE C	CODICE D	CODICE E	CODICE F
9506	1348	8641	8887	3112	2428
2400	2725	3684	1134	5821	3918
2082	1741	7532	4721	1971	1856
6137+	2111	5697	2990+	376+	1860
2082	2723	5876	4197	4037	1444
9661	3082	3648	5000+	2684	1285

Tabella 2.1 Tempi di guasto parziali. Dati in ore di funzionamento. Il simbolo "+" rappresenta un dato censurato a destra.

Avendo a disposizione i tempi di guasto si procede nel determinare il tipo di distribuzione che meglio rappresenta la funzione densità di probabilità del singolo codice. Il software Weibull++[®] permette di calcolare la distribuzione che meglio approssima i dati sperimentali. Il software elabora in modo diverso i dati completi da quelli censurati[M1]. Si considerano inizialmente i dati completi ovvero quelli che si riferiscono ai codici C ed F. Per prima cosa vengono inseriti i dati sulla vita dei componenti, come illustrato da Figura 2.9.

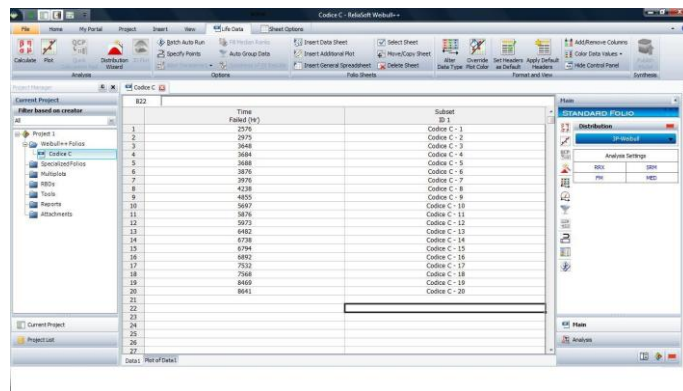


Figura 2.9 Procedura di inserimento per dati completi relativi al codice C

In base ai dati inseriti Weibull++[®] assegna un ranking a tutti i tipi di distribuzione in base alla capacità delle singole distribuzioni di approssimare dati con maggior precisione. I risultati sono illustrati in Figura 2.10.

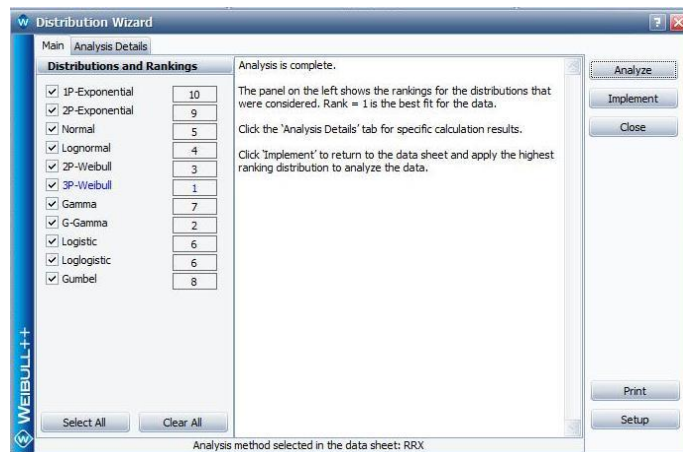


Figura 2.10 Ranking delle distribuzioni relativo al codice C

Il ranking migliore viene assegnato alla distribuzione di Weibull a 3 parametri seguita dalla distribuzione Gamma generalizzata.¹ Il *software* oltre a calcolare la miglior distribuzione, elabora anche i parametri della che consentono la miglior approssimazione, nel caso del codice C con distribuzione di Weibull 3P questi risultano quelli illustrati in Figura 2.11. Si può notare come il parametro β sia adimensionale, mentre η e γ hanno le dimensione di un tempo in particolare delle ore.

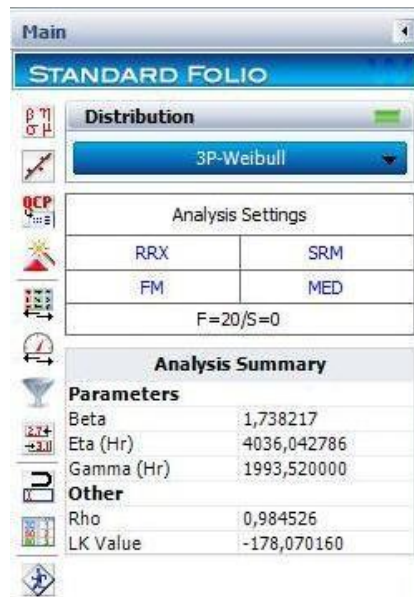


Figura 2.11 Codice C. Parametri della distribuzione di Weibull-3P

Si nota come il *software* calcoli automaticamente anche ρ (coefficiente di correlazione), ed il valore di LK (*log-likelihood function*), nonostante che per il tipo di analisi in corso non risultino influenti. È possibile anche valutare il livello di approssimazione della distribuzione effettuando un grafico della probabilità di guasto come indicato in Figura 2.12.

¹ Il manuale del *software* Weibull++[®] consiglia, cautelativamente, di soppesare il *ranking* assegnato in base all'esperienza che l'utilizzatore ha delle distribuzioni che meglio approssimano i dati. Essendo nell'impossibilità di effettuare valutazioni in base all'esperienza, si utilizzerà il *ranking* del *software* senza ulteriori considerazioni[M1].

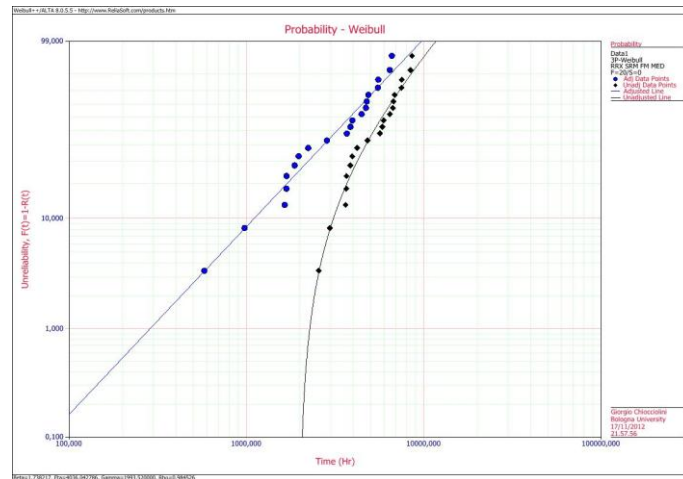


Figura 2.12 Grafico della probabilità di guasto, distribuzione di Weibull-3P relativa al Codice C. In blu sono indicati di dati con il parametro di posizione η corretto (*adjusted data*) in nero gli stessi dati non corretti (*unadjusted*)[A4].²

Questo tipo di grafico mostra sull'asse X il tempo in scala logaritmica, e sull'asse y la probabilità di guasto $F(t) = 1-R(t)$ in scala logaritmica reciproca. Conseguentemente è possibile ricavare la probabilità di guasto ad un certo istante oppure il vice versa. Nel caso del codice F si procede in modo analogo al codice C, in quanto presentano entrambi dati completi.

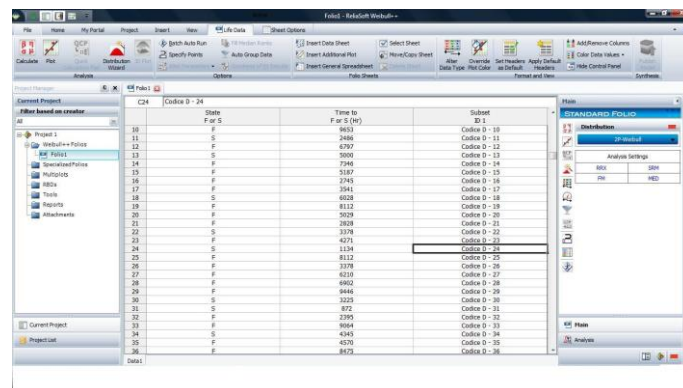


Figura 2.1 Procedura di inserimento per dati completi relativi al codice F

In questo caso la prima distribuzione nel ranking è quella G-Gamma seguita dalla distribuzione log-normale come da Figura 2.14.

² La distribuzione Weibull-3P viene utilizzata quando i dati non giacciono su una linea ma su una curva concava. Per riportare i dati in linea sul *software* calcola e aggiunge, o sottrae, automaticamente η ai dati originali. Questo giustifica l'utilità dell'utilizzo della Weibull-3P in luogo della Weibull-2P.

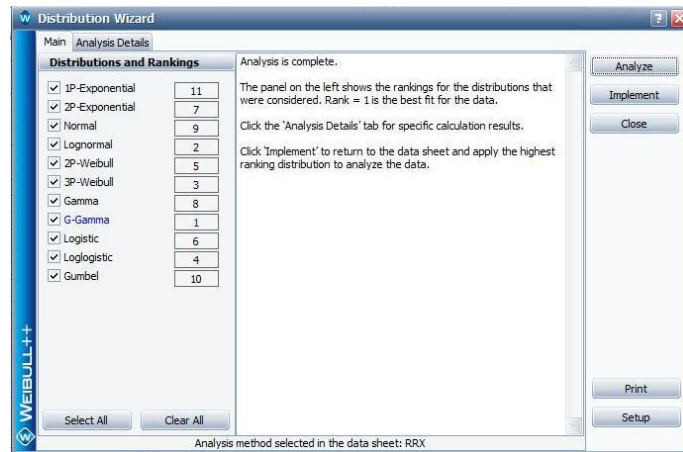


Figura 2.2 Ranking delle distribuzioni relativo codice F

Si procede calcolando i principali parametri della distribuzione Gamma generalizzata, illustrati in Figura 2.15.

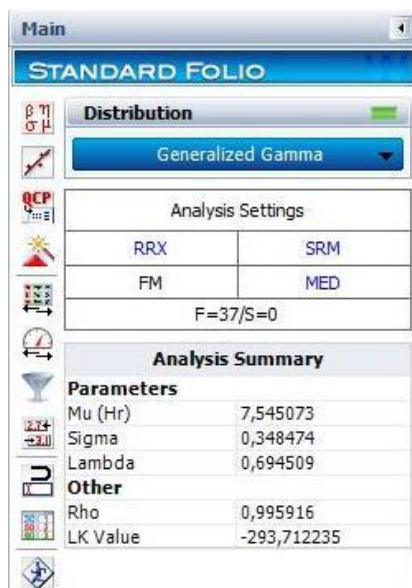


Figura 2.3 Parametri distribuzione G-Gamma relativi al Codice F

Proseguendo con l'elaborazione della funzione probabilità di guasto è possibile come apprezzare come si ottenga una buon livello di approssimazione.

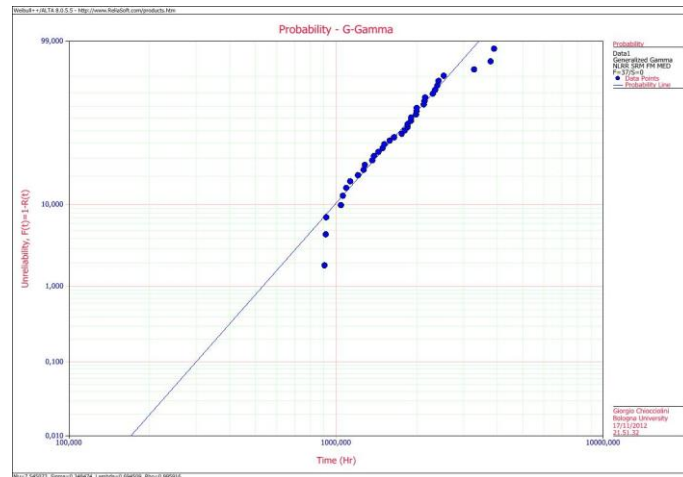


Figura 2.4 Grafico funzione di guasto con distribuzione G-Gamma relativa al Codice F

I parametri della distribuzione log-normale sono illustrati in Figura 2.17.

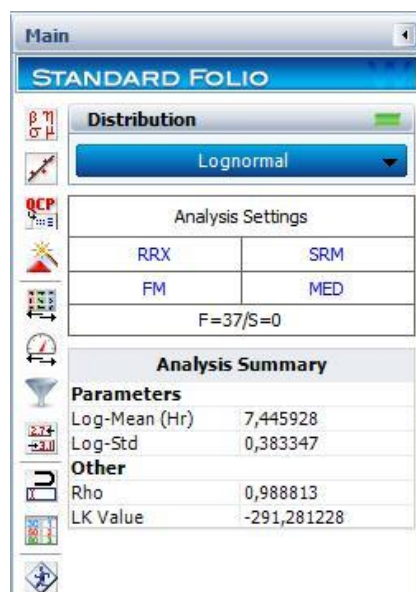


Figura 2.5 Parametri distribuzione log-normale relativa al Codice F

Il grafico della $F(t)$ nel caso di utilizzo della distribuzione log-normale risulta essere quello illustrato in Figura 2.18.

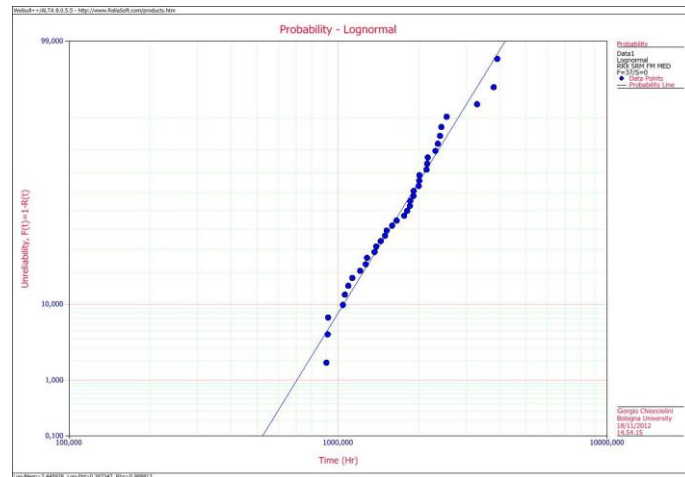


Figura 2.6 Grafico della funzione guasto con distribuzione log-normale relativo al Codice F

I codici rimanenti presentano invece dei dati censurati, in particolare, si tratta esclusivamente di dati censurati a destra (non ci sono dati *interval censored* o *left censored*). Il codice A rappresenta il primo caso di dato censurato a destra. Si sceglie quindi questa opzione per l’inserimento. La convenzione prevede che se il guasto è avvenuto si indica tempo di guasto ed F mentre se si è in presenza di censura si indica il tempo di ultima ispezione e scrivendo S nella colonna a fianco così come illustrato in Figura 2.19.

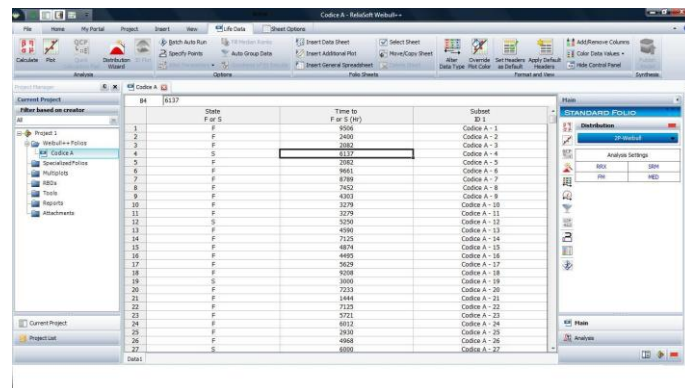


Figura 2.19 Procedura di inserimento dati censurati a destra relativa al Codice A

Calcolando il ranking delle distribuzioni di nota come anche in questo caso il ranking più elevato lo ottenga la distribuzione G-Gamma, seguita dalla Weibull-3P.

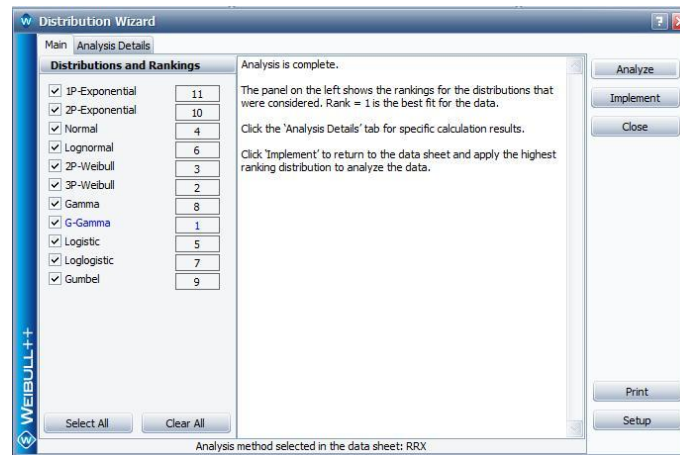


Figura 2.20 Ranking delle distribuzioni relativa al Codice A

Si procede implementando i parametri della distribuzione G-Gamma come da Figura 2.21.

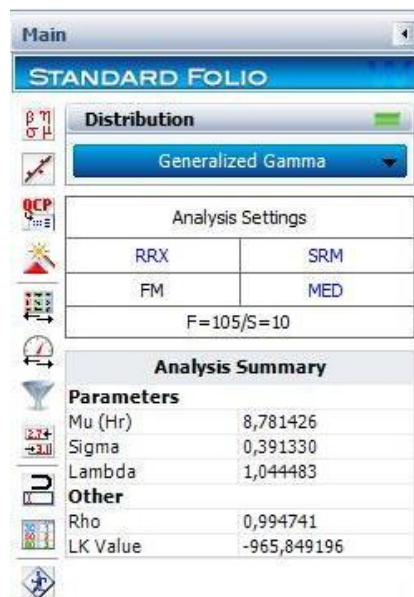


Figura 2.21 Parametri della distribuzione G-Gamma relativa al Codice A

Il grafico della $F(t)$ approssimata tramite la distribuzione G-Gamma elaborata è riportato in Figura 2.22.

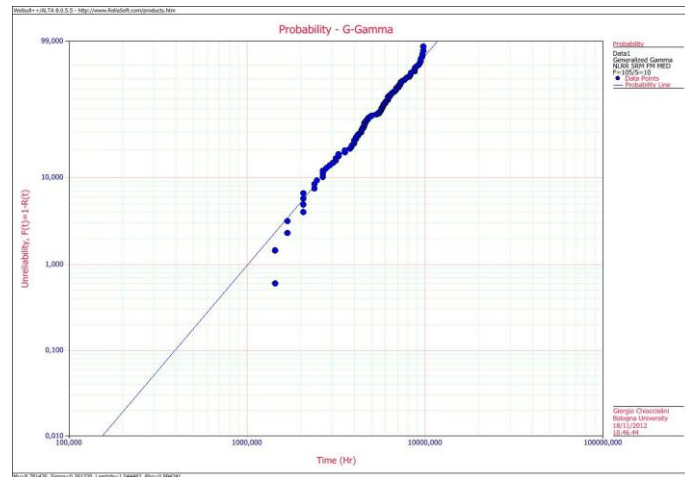


Figura 2.22 Grafico di $F(t)$ con distribuzione di probabilità G-Gamma relativo al Codice A

I parametri della distribuzione di Weibull-3P risultano essere quelli di Figura 2.23.

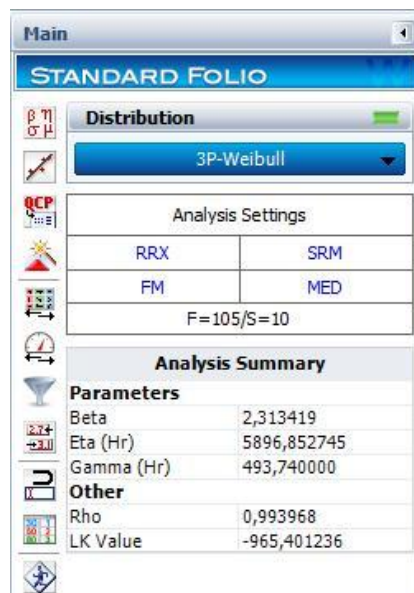


Figura 2.23 Parametri della distribuzione di Weibull-3P relativa al Codice A

Il grafico della $F(t)$ utilizzando una distribuzione di Weibull-3P è illustrato in Figura 2.24.

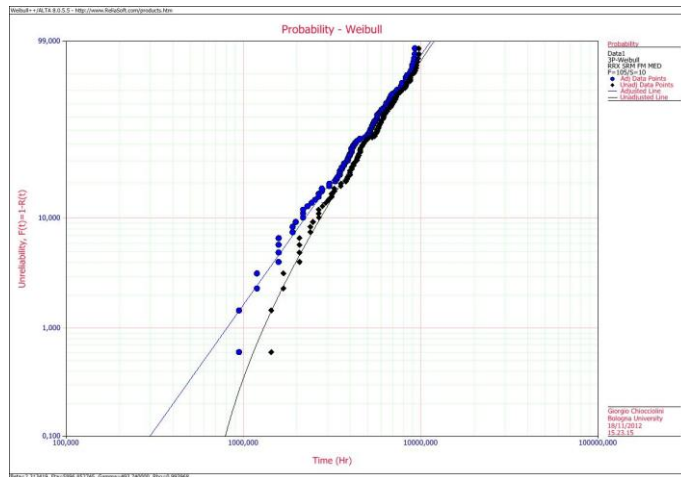


Figura 2.24 Grafico di $F(t)$ con distribuzione di Weibull 3P relativo al Codice A

Anche il codice B rientra nel caso dei dati censurati, si procede quindi con l'apposita procedura di inserimento dati descritta in precedenza.

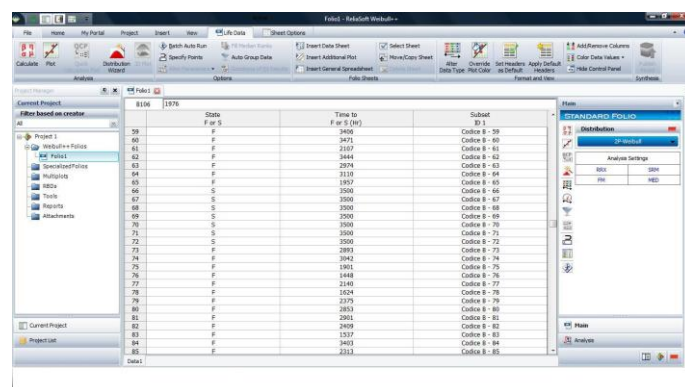


Figura 2.25 Procedura di inserimento dati censurati relativa al Codice B

L'analisi delle distribuzioni mostra come la più adatta sia anche in questo caso la G-Gamma seguita dalla distribuzione normale.

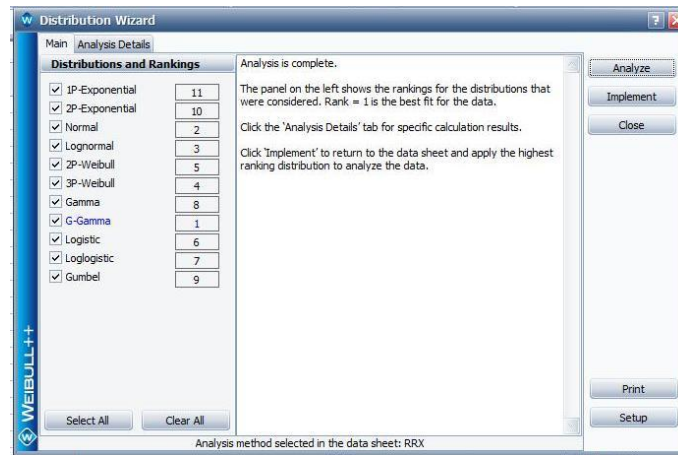


Figura 2.26 Ranking distribuzioni relativo al Codice B

Si procede quindi con calcolo dei parametri della distribuzione G-Gamma, vedi Figura 2.27.

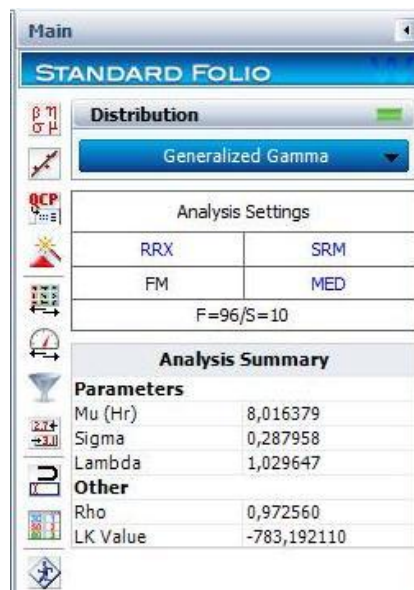


Figura 2. 27 Parametri distribuzione G-Gamma relativa al Codice B

Il grafico della $F(t)$ approssimata tramite distribuzione G-Gamma è rappresentato in Figura 2.28.

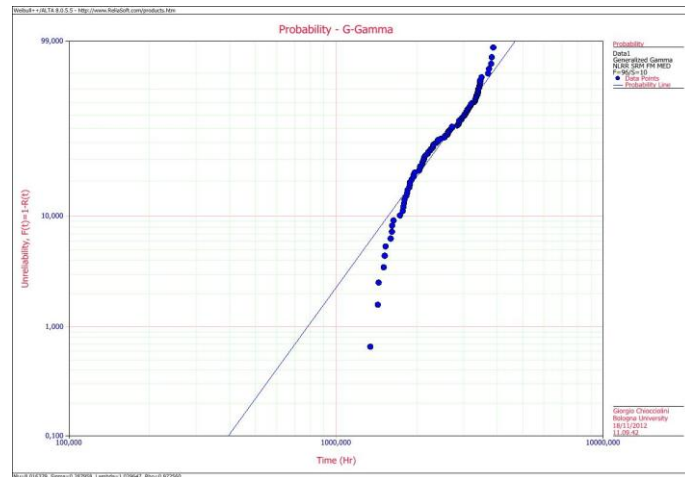


Figura 2.28 Grafico probabilità di guasto con distribuzione G-Gamma relativo al Codice B

Il software procede con il calcolo dei parametri della distribuzione normale, che risultano essere quelli esposti in Figura 2.29.

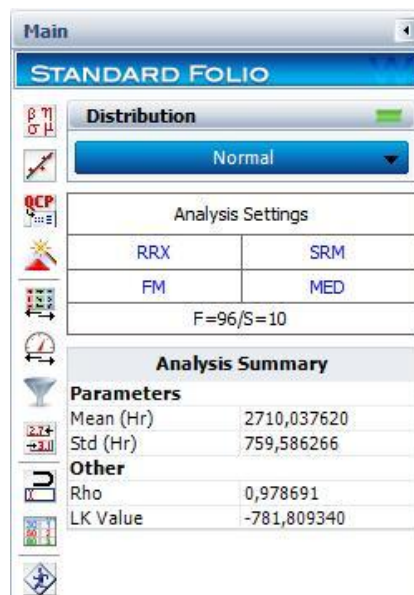


Figura 2.29 Parametri distribuzione normale relativa al Codice B

Il grafico della $F(t)$ approssimata tramite la distribuzione normale è mostrato in Figura 2.30.

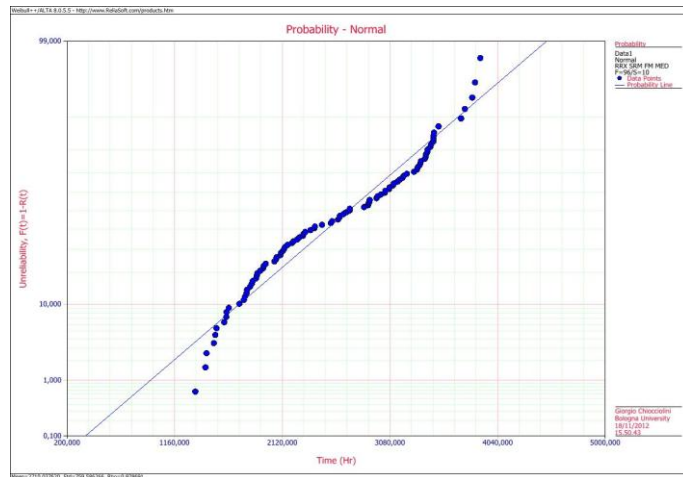


Figura 2.30 Grafico di F(t) con distribuzione normale, Codice B

Anche per il Codice D si procede con l'iter di inserimento dati nel caso di dati censurati come da Figura 2.31.

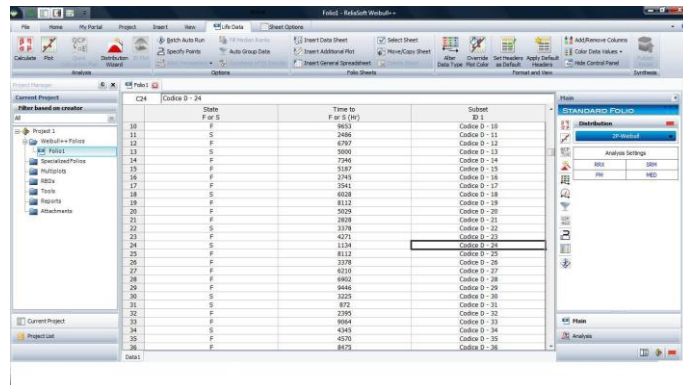


Figura 2.31 Procedura di inserimento dati censurati relativa al Codice D

Anche in questo caso la migliore distribuzione è la G-Gamma seguita dalla Weibull-3P.

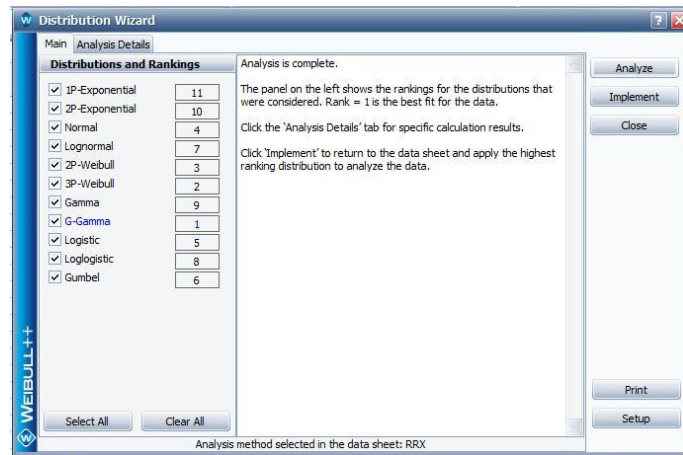


Figura 2.32 Ranking distribuzioni relative al Codice D

I parametri della distribuzione elaborati G-Gamma sono illustrati in Figura 2.33.

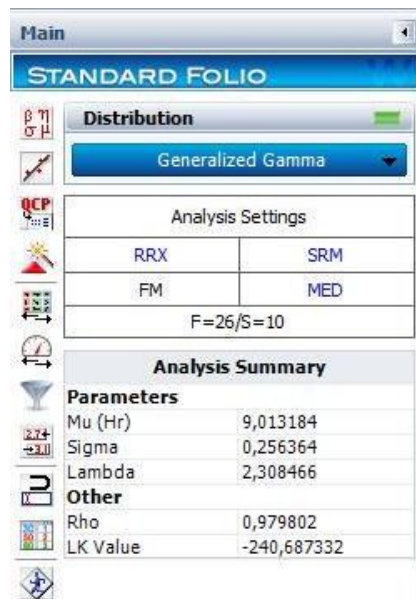


Figura 2.33 Parametri della distribuzione G-Gamma relativa al Codice D

Il grafico della $F(t)$ nel caso di approssimazione tramite la distribuzione G-Gamma è illustrato in Figura 2.34, si può apprezzare l'ottimo *fitting* dei dati.

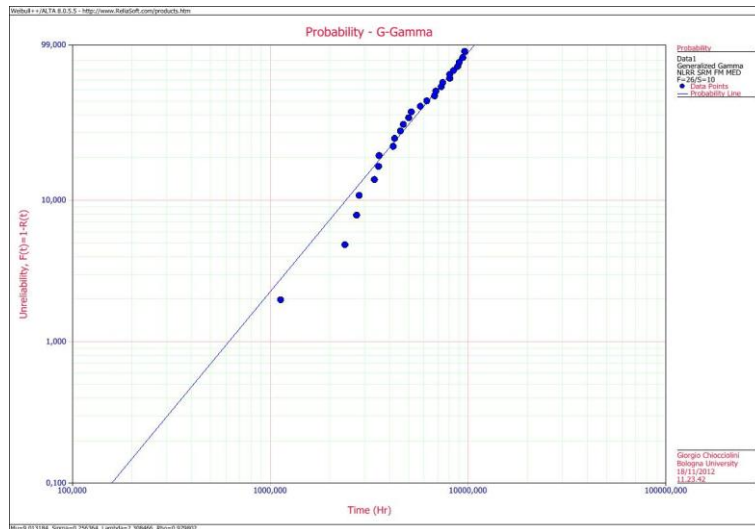


Figura 2.34 Grafico probabilità di guasto con distribuzione G-Gamma del Codice D

I parametri della distribuzione di Weibull-3P esposti in Figura 2.35.

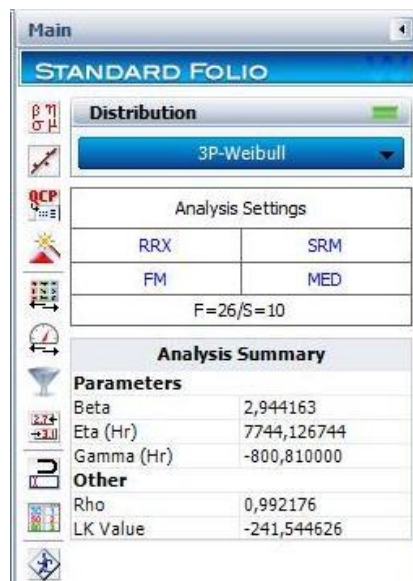


Figura 2.35 Parametri della distribuzione di Weibull-3P relativa al Codice D

In Figura 2.36 il grafico della $F(t)$ tramite approssimato tramite la distribuzione di Weibull-3P.

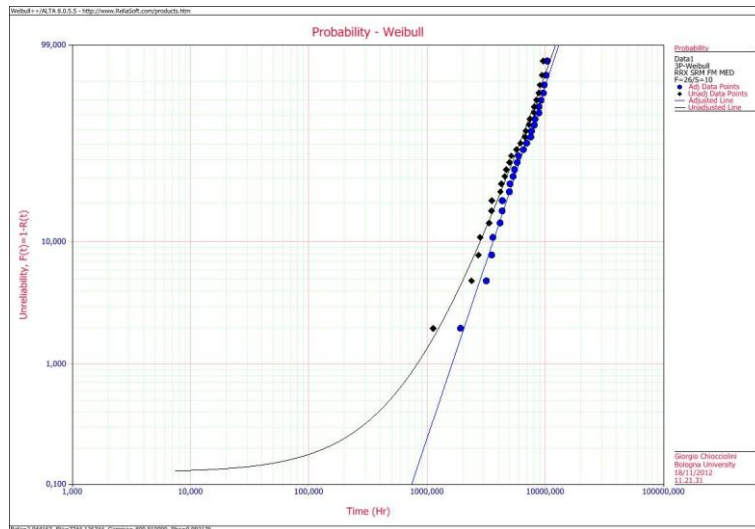


Figura 2.36 Grafico di $F(t)$ con distribuzione di Weibull-3P relativa al Codice D

Si applica anche nel caso del codice E la procedura per i dati censurati, vedi Figura 2.37.

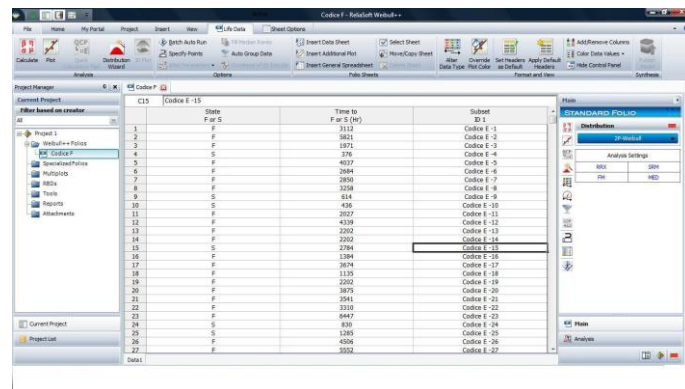


Figura 2.37 Procedura di inserimento dei dati censurati relativi al Codice E

Il ranking delle distribuzioni è illustrato in Figura 2.38. Al primo posto la distribuzione log-normale, al secondo la distribuzione di Weibull-3P.

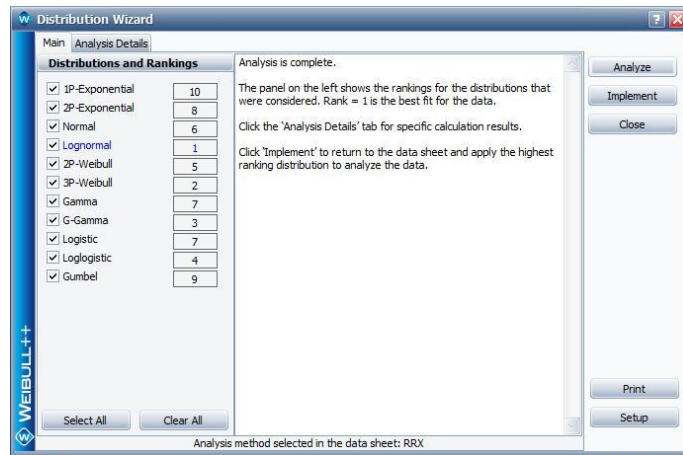


Figura 2.38 Ranking delle distribuzioni relative al Codice E

Il grafico della $F(t)$ nel caso di approssimazione tramite la distribuzione log-normale è illustrato in Figura 2.39.

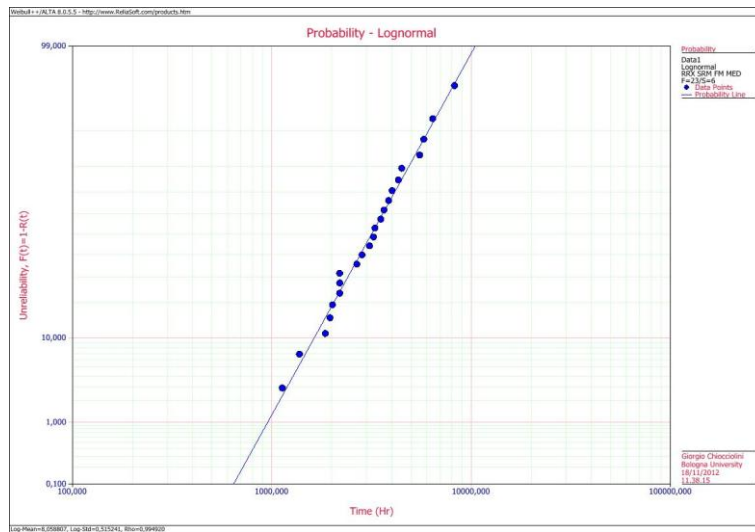


Figura 2.39 Grafico di $F(t)$ con distribuzione log-normale relativo al Codice E

I parametri della distribuzione Weibull-3P sono illustrati in Figura 2.40.

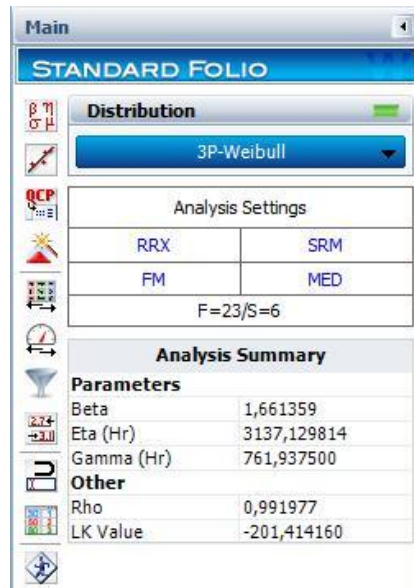


Figura 2.40 Parametri distribuzione Weibull-3P relativa al Codice E

Il grafico della $F(t)$ nel caso della distribuzione di Weibull-3P è quello illustrato in Figura 2.41.

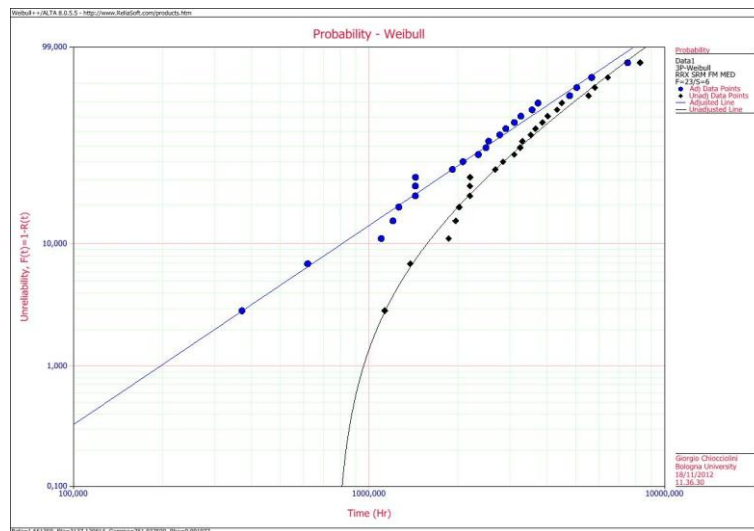


Figura 2.41 Grafico di $F(t)$ con distribuzione di Weibull-3P relativa al Codice E

Si riassumono quindi nella Tabella 2.1 i parametri delle distribuzioni di tutti i codici che hanno ottenuto ranking pari ad 1 nelle elaborazioni illustrate in precedenza.

CODICE	DISTRIBUZIONE	PARAMETRI DISTRIBUZIONE		
A	G-Gamma	Mu[Hr] = 8,781426	Sigma = 0,391330	Lambda = 1,044483
B	G-Gamma	Mu[Hr] = 8,016379	Sigma = 0,287958	Lambda = 1,029647
C	Weibull 3p	Beta = 1,738217	Eta[Hr] = 4036,042786	Gamma[Hr] = 1993,520
D	G-Gamma	Mu[Hr] = 9,013184	Sigma = 0,256364	Lambda = 2,308466
E	Log-Normale	Log Mean [Hr] = 8,058807	Log-Std = 0,515241	/
F	G-Gamma	Mu[Hr] = 7,545073	Sigma = 0,348474	Lambda = 0,694509

Tabella 2.2 Parametri delle rispettive distribuzioni di tutti i codici

I parametri delle distribuzioni ora calcolati verranno utilizzati nelle successive simulazioni effettuate tramite BlockSim[®] per modellare il comportamento a guasto dei componenti.

CAPITOLO 3

STUDIO DELLE POLITICHE MANUTENTIVE

3.1 ANALISI DEI DATI

3.2 SIMULAZIONE DEI COMPONENTI

3.3 SIMULAZIONE DELLE POLITICHE MANUTENTIVE

Si espone nel presente capitolo lo studio delle possibili politiche manutentive applicate ai codici oggetto di studio. Vengono preliminarmente analizzati i dati a disposizione. Di seguito si valuta l'impatto delle possibili politiche manutentive correttive, preventive *type I* e *type II*.

3.1 ANALISI DEI DATI

Oltre ai tempi di guasto dei singoli codici già introdotti nel Capitolo 2, l'azienda produttrice ha fornito i dati relativi ai tempi di riparazione a guasto. L'intervento correttivo è stato modellato tramite una classica distribuzione normale, descrivibile pertanto tramite media e varianza della durata di intervento. Viene inoltre fornito il rapporto tra la durata dell'intervento preventivo e la durata di quello correttivo. In generale l'intervento correttivo presenta logicamente una durata maggiore. L'unico codice che presenta la stessa durata è il Codice C. I dati sono riassunti nella Tabella 3.1.

RIPARAZIONE CORRETTIVA	CODICE A	CODICE B	CODICE C	CODICE D	CODICE E	CODICE F
Media MTTR a guasto (min)	345	210	650	37	738	276
Varianza MTTR a guasto (min)	32	45	67	8	121	45
Dur.Int.Prev./Dur.Int.Corr.	0,8	0,9	1	0,5	0,8	0,7

Tabella 3.11 Media e varianza della durata dell'intervento correttivo dei singoli codici

A partire da questi dati è stata elaborata la durata degli interventi di riparazione preventiva. In base alle indicazioni dell'azienda è stata adottata anche in questo caso una distribuzione normale. Il rapporto tra le medie è quello indicato in Tabella 3.1. Per quanto riguarda le varianze, sono state calcolate in modo da mantenere costante il rapporto percentuale tra media e varianza nel caso correttivo.

Per quanto osservato in precedenza i tempi di riparazione nel caso del codice C non variano. I risultati sono riassunti in Tabella 3.2.

RIPARAZIONE PREVENTIVA	CODICE A	CODICE B	CODICE C	CODICE D	CODICE E	CODICE F
Media MTTR preventiva (min)	276	189	650	18,5	590,4	193,2
Sigma MTTR preventiva (min)	25,6	40,5	67	4	96,8	31,5

Tabella 3.12 Media e varianza della durata dell'intervento preventivo dei singoli codici

Sono inoltre disponibili i tempi di approvvigionamento normale e di emergenza dei codici. I tempi di approvvigionamento sono illustrati in Tabella 3.3.

TEMPI APPROVVIGIONAMENTO	CODICE A	CODICE B	CODICE C	CODICE D	CODICE E	CODICE F
Lead time approv. Normale (gg)	40	20	10	10	40	5
Lead time approv. Emergenza (gg)	10	5	1	1	5	1

Tabella 13.3 Tempi di approvvigionamento dei codici

L'azienda ha fornito inoltre i costi di approvvigionamento normali e in emergenza di tutti i codici. Come prevedibile a notevoli risparmi temporali corrispondono forti aumenti di prezzo. L'unico codice che non varia di prezzo è il Codice D. I costi sono esposti in Tabella 3.4.

COSTI	CODICE A	CODICE B	CODICE C	CODICE D	CODICE E	CODICE F
Costo approv. Normale (€/pz)	€ 132,45	€ 1.254,70	€ 534,00	€ 231,50	€ 5.389,00	€ 342,00
Costo approv. Emergenza (€/pz)	€ 150,00	€ 1.700,00	€ 900,00	€ 231,50	€ 8.500,00	€ 700,00
Costo di mancanza per tutti i codici (€/h)	€ 10.500,00	€ 10.500,00	€ 10.500,00	€ 10.500,00	€ 10.500,00	€ 10.500,00

Tabella 3.14 Costi di approvvigionamento normale e in emergenza dei codici

Secondo le indicazioni dell'azienda è possibile considerare il personale addetto alla riparazione come sempre disponibile, non vi sono quindi ritardi nei tempi di intervento che verranno quindi considerati come immediati. Inoltre non vi sarà alcun costo "di chiamata". Non è invece stato comunicato alcun costo orario di riparazione. I base agli stipendi di mercato medi dei manutentori, da considerarsi personale specializzato, è possibile stimare il costo orario in 48 €/h.

3.2 SIMULAZIONE DEI COMPONENTI

Per ogni codice, schematizzato come un semplice blocco, è possibile definire una serie di proprietà che ne descrivono il comportamento affidabilistico. Per prima cosa si definisce il modello dell'affidabilità che, nel caso ad esempio del Codice A, per quanto esposto nel paragrafo 2.3, è rappresentato da una distribuzione Gamma generalizzata. In questo caso si definiscono quindi i tre parametri distintivi della distribuzione μ , σ e λ .

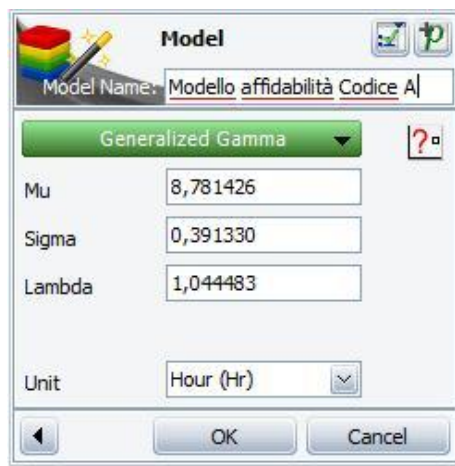


Figura 3.7 Inserimento parametri distribuzione G-Gamma relativa al Codice A

Si ripete quindi la procedura di inserimento dei parametri delle distribuzioni per tutti i codici. I codici sono fisicamente scollegati, tuttavia il guasto di uno solo di questi causa la messa a terra dell'aeromobile. Per quanto esposto nel paragrafo 1.1.10 è quindi possibile schematizzare in Blocksim[®] i codici con un collegamento in serie. La situazione è descritta in Figura 3.2.

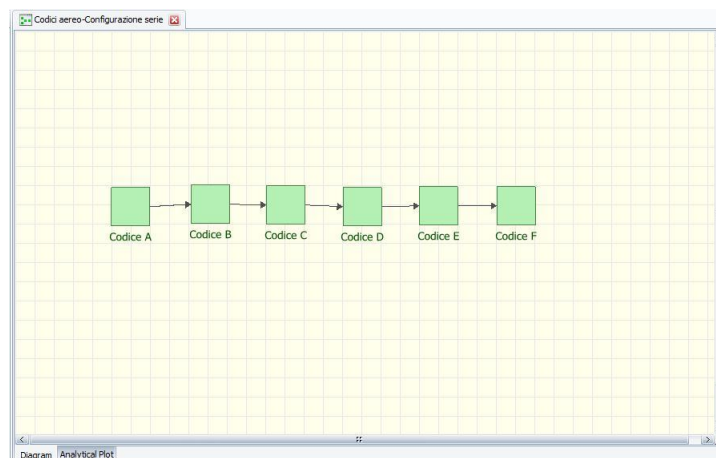


Figura 3.2 Schematizzazione in serie dei codici

Una volta definite le distribuzioni del rateo di guasto e lo schema affidabilistico dei codici è possibile effettuare una serie di calcoli preliminari alla simulazione delle politiche manutentive. Si indaga inizialmente il comportamento dei singoli blocchi. Un primo confronto può essere fatto visualizzando le funzioni di densità di probabilità $f(t)$ come mostrato in Figura 3.3.

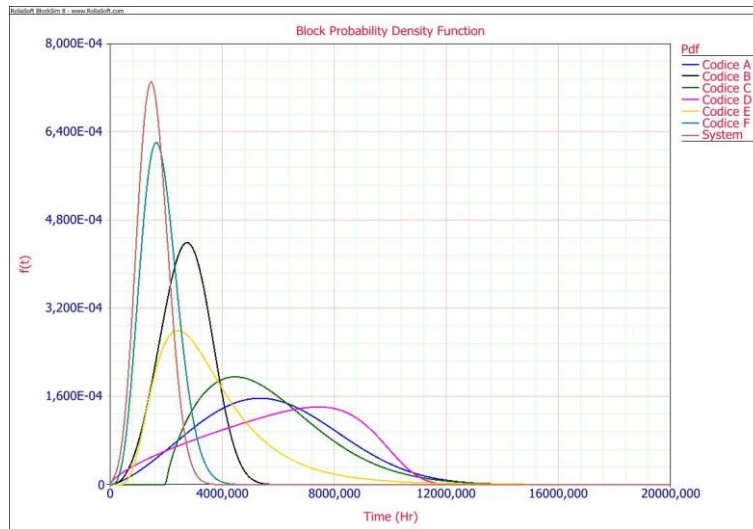


Figura 3.3 Densità di probabilità di guasto dei singoli codici e del sistema a confronto

Un ulteriore confronto può essere fatto visualizzando il tasso di guasto dei singoli blocchi, si noti come il tasso presenta un andamento particolarmente ripido nel caso dei singoli codici B e D. Il tasso di guasto del sistema presenta un andamento più ripido dei singoli blocchi.

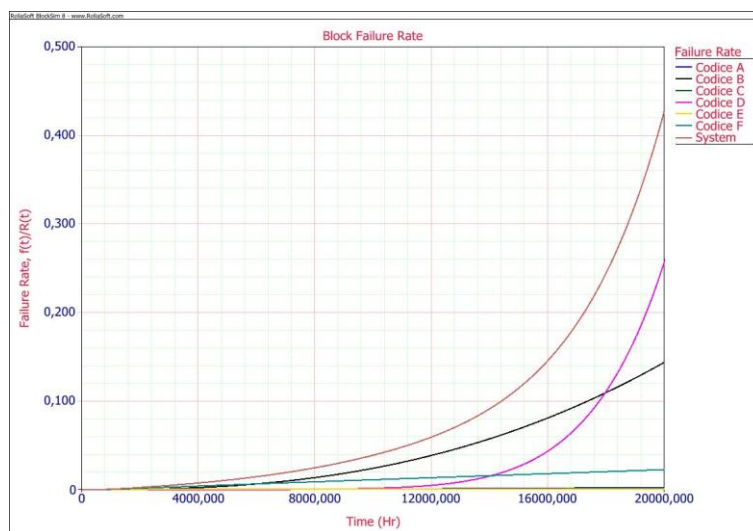


Figura 3.4 Tasso di guasto dei singoli codici e del sistema a confronto

Si precede confrontando il grafico della funzione affidabilità $R(t) = 1 - F(t)$ dei blocchi e del sistema.

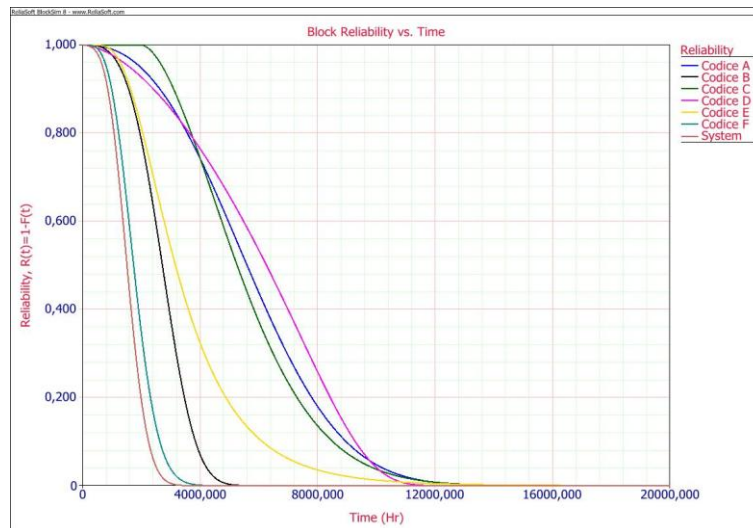


Figura 3.5 Funzione affidabilità dei singoli blocchi e del sistema a confronto

Analogamente si visualizzano i grafici della funzione $F(t) = 1 - R(t)$, probabilità cumulativa di guasto.

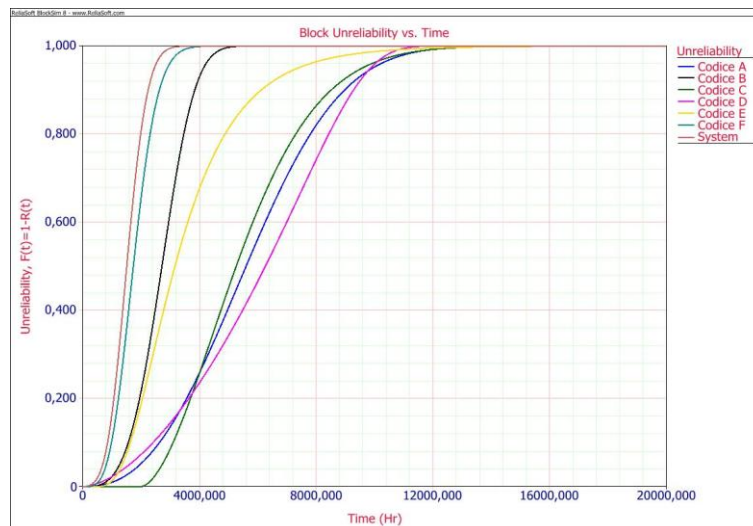


Figura 3.6 Funzione $F(t)$ dei codici a confronto

Per quanto esposto nei paragrafo 1.1.11 e nel paragrafo 2.3 gli andamenti delle funzioni $R(t)$, $F(t)$ e $\lambda(t)$ dei singoli blocchi e del sistema presentano andamenti in linea con le aspettative teoriche.

Sotto l'aspetto dello studio dell'affidabilità è di interesse valutare quale sia il comportamento più critico del sistema, a tal fine il *software* permette di visualizzare la *static reliability importance*. Questa è una misura di quanto l'affidabilità di un singolo componente influenzi l'affidabilità complessiva del sistema [A5]. In uno schema affidabilistico serie è il componente meno affidabile ad influenzare maggiormente l'affidabilità del sistema come esposto in dettaglio nel paragrafo 1.1.11. Nel caso in esame il componente più critico risulta essere il Codice F.

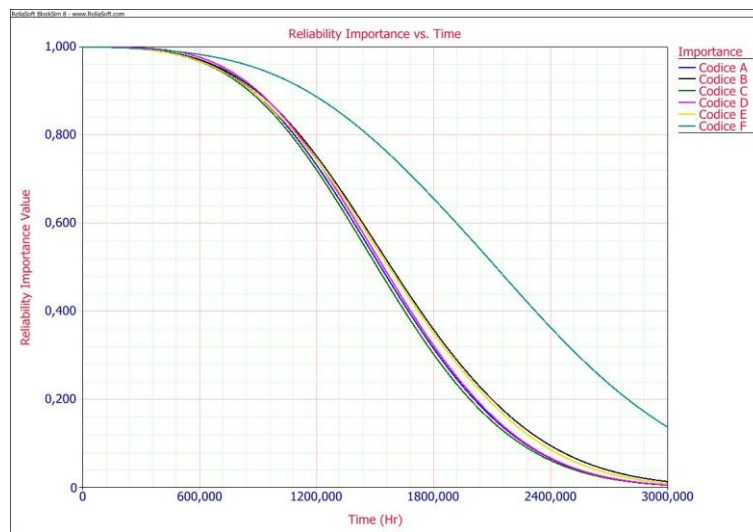


Figura 3.7 Confronto sull'affidabilità dei singoli codici. Il Codice F risulta il più critico

Simulando il funzionamento temporale risulta come il sistema si guasti in media dopo circa 1534 ore, corrispondenti a circa 63 giorni come illustrato in Figura 3.8.

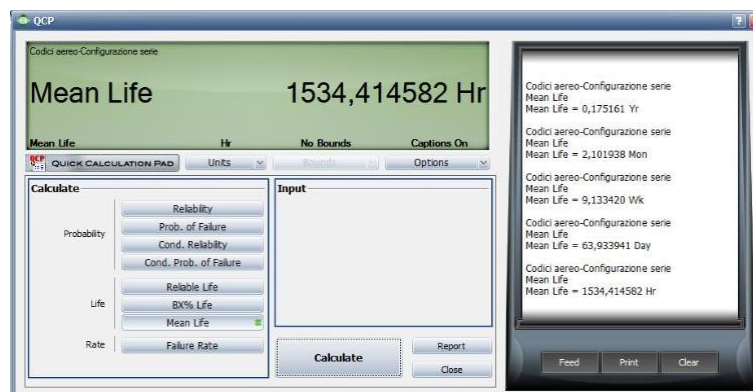


Figura 3.8 Mean life del sistema

In base a questo dato è possibile visualizzare in modo alternativo e maggiormente pratico la Figura 3.7 come illustrato in Figura 3.9 da cui risulta ancor più evidente la maggior criticità del Codice F a distanza che va da 1 a 4 mesi.



Figura 3.9 Confronto tra le affidabilità dei singoli blocchi a confronto ad 1 mese, 2 mesi, 3 mesi e 4 mesi.

Passando dallo studio del comportamento dei singoli codici a quello del sistema è possibile visualizzare la densità di probabilità di guasto $f(t)$ in Figura 3.10.

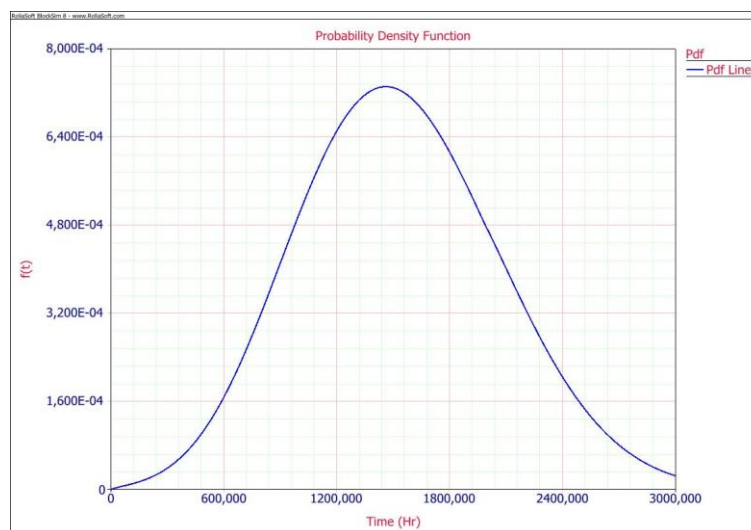


Figura 3.10 Densità di probabilità di guasto del sistema serie

Si illustrano successivamente gli andamenti del tasso di guasto $\lambda(t)$, della funzione affidabilità $R(t)$ e della probabilità cumulata di guasto $F(t)$ del sistema.

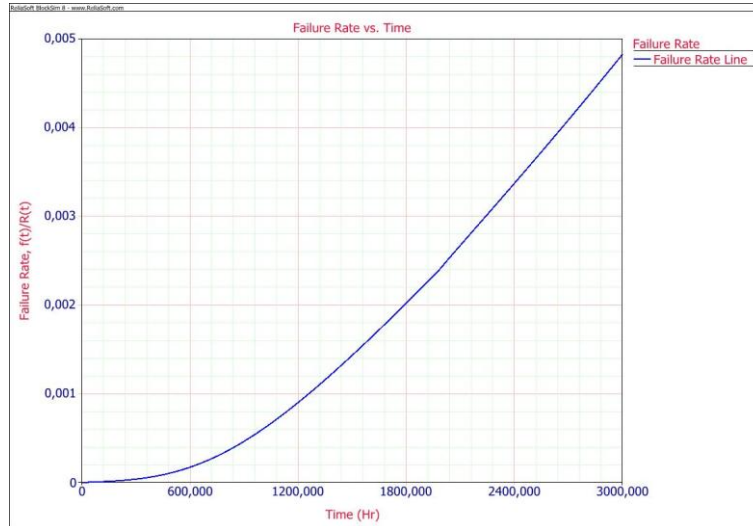


Figura 3.11 Tasso di guasto del sistema

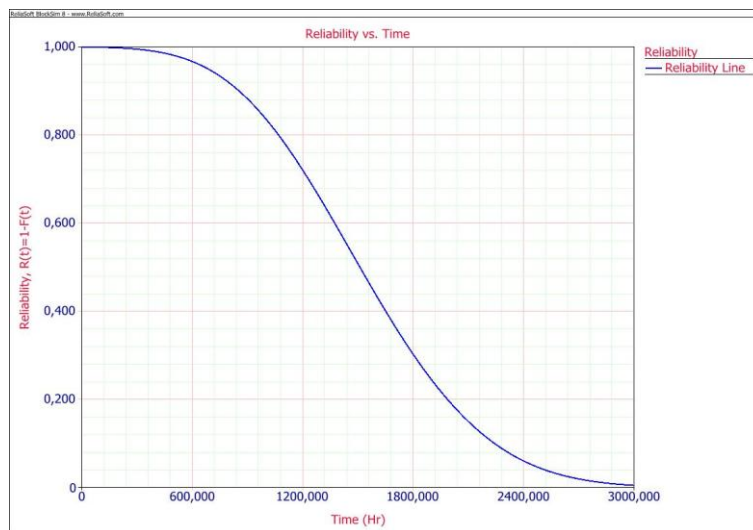


Figura 3.12 Andamento della funzione affidabilità $R(t)$ del sistema

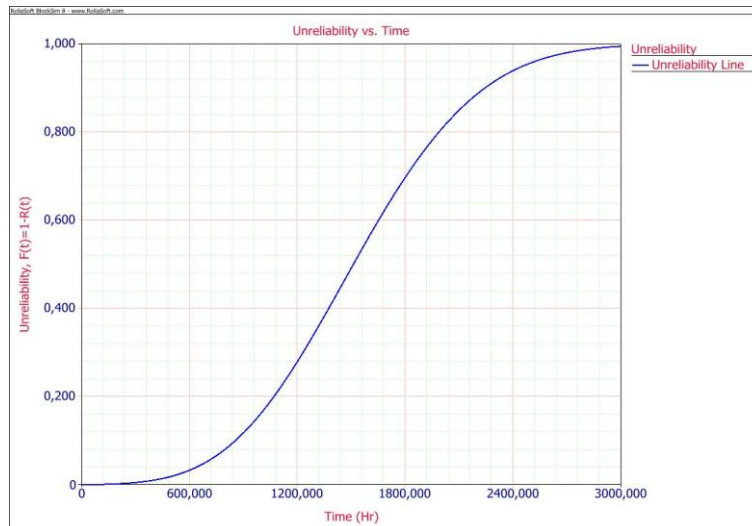


Figura 3.13 Andamento della funzione cumulata di guasto $F(t)$ del sistema

3.3 SIMULAZIONE DELLE POLITICHE MANUTENTIVE

Il *software* permette di definire separatamente la manutenzione correttiva da quella preventiva. A ciascuno dei due tipi di manutenzione è possibile associare diverse squadre di manutentori, differenti livelli di scorta dei magazzini, e distinti modelli descrittivi del tempo di approvvigionamento[A6].

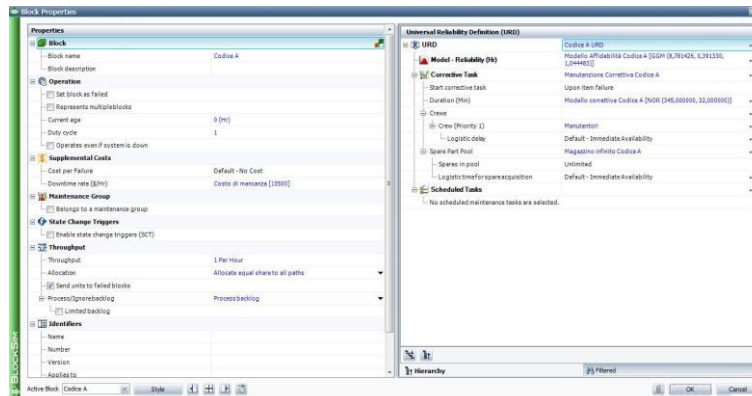


Figura 3.14 Descrizione delle proprietà affidabilistiche del Codice A

In questa prima simulazione si ipotizzerà lo scenario più semplice: manutentori immediatamente disponibili al costo di 48 €/h, in base ai costi correnti di mercato, e immediata presenza a magazzino di ricambi in quantità illimitata. Questa scelta ovviamente comporta un azzeramento dei tempi di approvvigionamento dei ricambi.

L'intervento di manutenzione correttiva viene modellato tramite la distribuzione normale descritta in precedenza nella Tabella 3.1. L'intervento correttivo avviene solo in presenza di guasto. Si sottolinea come dopo ogni intervento manutentivo il componente venga riportato in condizione "as good as new".³ Per verificare la stabilità della simulazione, il calcolo dei costi viene effettuato su intervalli temporali di 1 anno, 3 anni e 5 anni. I risultati sono riassunti in Tabella 3.5.

MANUTENZIONE CORRETTIVA	
ARCO TEMPORALE	COSTO
1 ANNO	€ 807.100,43
3 ANNI	€ 2.740.819,32
5 ANNI	€ 4.665.060,22

Tabella 3.5 Evoluzione temporale del costo della manutenzione correttiva

Limitandosi in questa fase alla mera valutazione del costo complessivo della manutenzione, tralasciando quindi la valutazione di altri fattori come ad esempio la disponibilità, si procede con la simulazione delle politiche manutentive preventive. Per simulare la manutenzione preventiva *type I* si mantiene attiva la manutenzione correttiva illustrata in precedenza ai cui si sovrappongono gli interventi preventivi a scadenza da determinare[A7]. Anche in questo caso per ogni codice gli interventi manutentivi sono modellati secondo la distribuzione normale descritta in Tabella 3.2. Per simulare la manutenzione preventive *type I* e *type II*, BlockSim[®] permette di introdurre due distinte misurazioni del tempo[A8]. Nel primo caso si fa riferimento al cosiddetto *item age*: rappresenta il numero di ore accumulato da ogni blocco che si azzera ogni volta che il blocco è sottoposto ad ogni sorta di intervento manutentivo. Il nuovo intervento manutentivo preventivo avverrà secondo la scadenza prestabilita, a meno che non sopraggiunga un intervento correttivo tra due scadenze. La procedura è visualizzata in Figura 3.15.

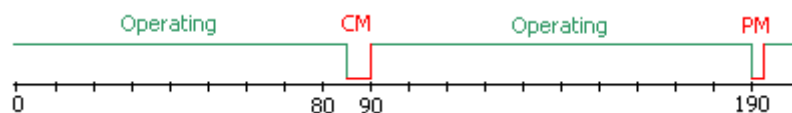


Figura 3.15 Schematizzazione della manutenzione preventiva *type I* in BlockSim[®][A9]

³ Questa condizione viene ottenuta ponendo il *restoration factor* pari ad 1. Si è ipotizzato che ogni tipo manutenzione correttiva o preventiva riporti il componente nella condizione di "as good as new", in analogia con le ipotesi teoriche discusse nel Capitolo 1.

Nel caso della preventiva *type II* si fa invece riferimento al *calendar time*: in questo caso si disaccoppia la scadenza della manutenzione periodica dagli interventi manutentivo di qualsiasi tipo.

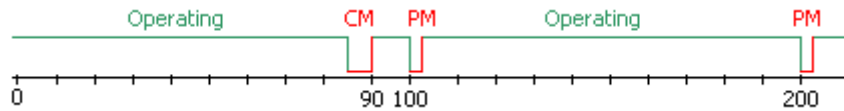


Figura 3.16 Schematizzazione della manutenzione preventiva *type II* in BlockSim®[A9]

Il costo delle politiche manutentive preventive è fortemente influenzato dall'intervallo delle scadenze temporali con le quali vengono effettuati gli interventi. Per questo motivo sono state effettuate delle simulazioni di utilizzo delle politiche *type I* e *type II* con differenti scadenze. Dalle simulazioni è emerso che per entrambe le politiche manutentive presentano il minimo costo in corrispondenza dell'intervallo di intervento $t_{preventiva} = 800$ ore. I risultati sono riassunti nella Tabella 3.6 e in Tabella 3.7.

PREVENTIVA TYPE 1	
INTERVALLO INTERVENTO	COSTO TOTALE ANNUO
500 h	€ 170.481,04
600 h	€ 148.598,41
700 h	€ 140.256,12
800 h	€ 129.275,77
900 h	€ 137.785,84
1000 h	€ 144.608,98
1100 h	€ 156.852,29
1200 h	€ 179.431,49
1300 h	€ 186.172,98
1400 h	€ 216.238,37
1500 h	€ 232.485,38
1600 h	€ 255.398,34

Tabella 3.6 Costo preventiva *type I* al variabile dell'intervallo di intervento

PREVENTIVA TYPE 2	
INTERVALLO INTERVENTO	COSTO TOTALE ANNUO
500 h	€ 170.143,82
600 h	€ 147.233,02
700 h	€ 137.972,56
800 h	€ 132.790,92
900 h	€ 135.842,45
1000 h	€ 139.022,34
1100 h	€ 151.021,63
1200 h	€ 176.600,99
1300 h	€ 183.981,66
1400 h	€ 208.196,06
1500 h	€ 224.851,10
1600 h	€ 243.370,63

Tabella 3.7 Costo preventiva *type II* al variare dell'intervallo di intervento

L'andamento dei costi al variare dell'intervallo di intervento è rappresentato in Figura. 3.15. Si osservi come la politica manutentiva *type II* si rivela generalmente meno costo della *type I* ma nel punto comune di minimo la situazione si inverte.

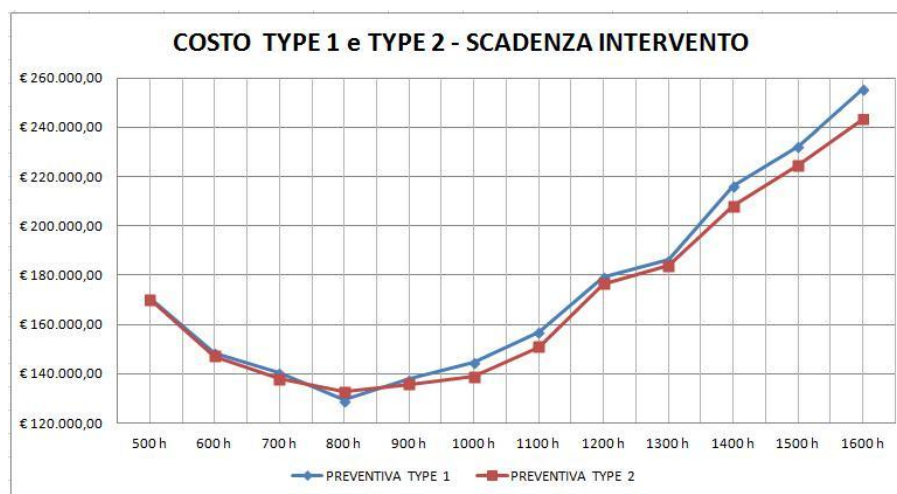


Figura 3.17 Andamento dei costi delle politiche *type I* e *type II* al variare della scadenza dell'intervento manutentivo

Fissata la scadenza di intervento ad 800 ore si valuta l'evoluzione teorica dei costi della *type I* e *type II*. I risultati permettono, oltre che di apprezzare la stabilità della simulazione, di constatare che le due politiche in questa particolare applicazione presentano una differenza di costo piuttosto contenuta.

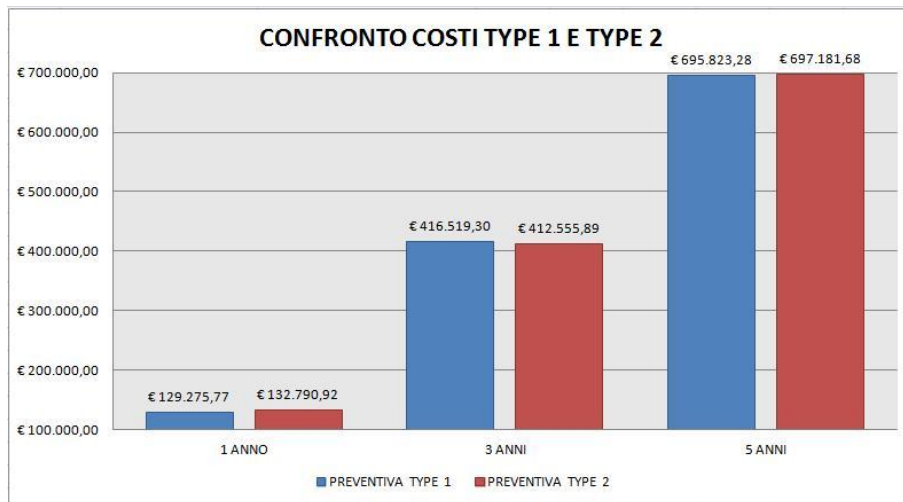


Figura 3.18 Evoluzione dei costi delle *type I* e *type II* su 1 anno, 3 anni, 5 anni

Limitandosi al confronto del costo annuale di correttiva, *type I* e *type II* risulta evidente come la correttiva risulti molto più onerosa delle preventive. La più economica risulta essere la preventiva *type II* con scadenza di intervento pari a 800h. Si considererà quindi di adottare questa politica manutentiva nelle successive analisi relative alla gestione dei ricambi.

CORRETTIVA	€ 807.100,43
PREVENTIVA TYPE 1	€ 129.275,77
PREVENTIVA TYPE 2	€ 132.790,92

Tabella 3.8 Confronto costi annuali delle tre politiche manutentive

CAPITOLO 4

ANALISI DELLA GESTIONE DEL MAGAZZINO

4.1 ANALISI DEI DATI

4.2 SIMULAZIONI DEL MAGAZZINO

Si espone nel presente capitolo lo studio delle possibili strategie di gestione dei codici a magazzino. Vengono richiamati inizialmente dei dati, già introdotti nel Capitolo 3, che verranno utilizzati nella loro completezza nel presente capitolo per lo studio dei ricambi.

4.1 ANALISI DEI DATI

I dati sui tempi di approvvigionamento dei codici sia in condizioni normali, sia in condizione di ordine in emergenza, sono esposti in Tabella 4.1.

TEMPI APPROVVIGIONAMENTO	CODICE A	CODICE B	CODICE C	CODICE D	CODICE E	CODICE F
Lead time approvv. Normale (gg)	40	20	10	10	40	5
Lead time approvv. Emergenza (gg)	10	5	1	1	5	1

Tabella 4.1 Tempi di approvvigionamento dei codici in condizioni normali e emergenza

Si richiamano inoltre in Tabella 4.2 i costi di approvvigionamento normali e in emergenza di tutti i codici.

COSTI	CODICE A	CODICE B	CODICE C	CODICE D	CODICE E	CODICE F
Costo approvv. Normale (€/pz)	€ 132,45	€ 1.254,70	€ 534,00	€ 231,50	€ 5.389,00	€ 342,00
Costo approvv. Emergenza (€/pz)	€ 150,00	€ 1.700,00	€ 900,00	€ 231,50	€ 8.500,00	€ 700,00
Costo di mancanza per tutti i codici (€/h)	€ 10.500,00	€ 10.500,00	€ 10.500,00	€ 10.500,00	€ 10.500,00	€ 10.500,00

Tabella 4.2 Costi di approvvigionamento normale e in emergenza dei codici

Si osservi l'elevato costo di mancanza, comune a tutti i codici. Questo comporta un rapido aumento dei costi non appena l'aeromobile non è operativo a causa della manutenzione di qualsiasi tipo, o dell'attesa della consegna di un ricambio.

A seguito dello studio sulle politiche manutentive svolte nel Capitolo 3, dove si era ipotizzato un magazzino infinito, è risultato come la strategia che garantisce il minor costo annuo è la politica manutentiva *type I* con scadenza di intervento pari a 800 ore. Si considera quindi di ottimizzare lo studio del magazzino per l'utilizzo di tale politica. Risulta inoltre che l'azienda adotti una politica una gestione del magazzino tipica del settore aeronautico: spesso i pezzi, quando non disponibili, vengono reperiti smontandoli da altri aeromobili.

4.2 SIMULAZIONI DEL MAGAZZINO

Per determinare la gestione dei ricambi ottima si effettua, in prima battuta, uno studio semplificato sul numero indicativo di ricambi. Si suppone inizialmente di tenere lo stesso numero di ricambi a magazzino per tutti i codici. In particolare si effettuiamo sei simulazioni in cui si prevede di tenere a magazzino da zero a cinque ricambi per ciascun codice. I risultati sono esposti in Tabella 4.3.

SIMULAZIONE	IPOTESI	DISPONIBILITÀ - A	COSTO TOTALE	DIFFERENZE DI COSTO
Simulazione 1	0 ricambi per codice	76%	€ 716.144,22	$\Delta s_1-s_2 = 56.655\text{€}$
Simulazione 2	1 ricambio per codice	78%	€ 659.489,30	$\Delta s_2-s_3 = 35.874\text{€}$
Simulazione 3	2 ricambi per codice	80%	€ 623.615,40	$\Delta s_3-s_4 = 67.686\text{€}$
Simulazione 4	3 ricambi per codice	82%	€ 555.929,23	$\Delta s_4-s_5 = 40.498\text{€}$
Simulazione 5	4 ricambi per codice	84%	€ 515.431,19	$\Delta s_5-s_6 = 89.907\text{€}$
Simulazione 6	5 ricambi per codice	86%	€ 425.524,16	/

Tabella 4.3 Andamento del costo di manutenzione e dei ricambi al variare del numero dei codici

Nel caso di zero codici a magazzino l'ordine viene sempre effettuato in condizioni di emergenza. Adottando questa modalità si verificano di conseguenza elevati costi d'ordine e un inevitabile *downtime*. In Figura 4.1 Si può osservare il rapido e prolungato calo della disponibilità in corrispondenza dei guasti.

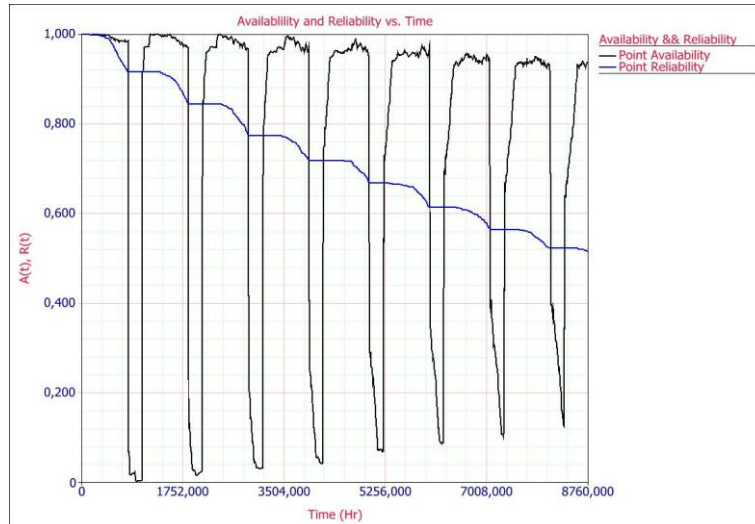


Figura 4.1 Evoluzione temporale di affidabilità e disponibilità

Il fattore di costo principale è rappresentato dal blocco frequente dell'impianto a causa dei prolungati periodi di sosta in attesa dell'arrivo dei ricambi. In Figura 4.2 Si può notare come, tra tutti i codici, la fonte principale di costo sia il Codice A.

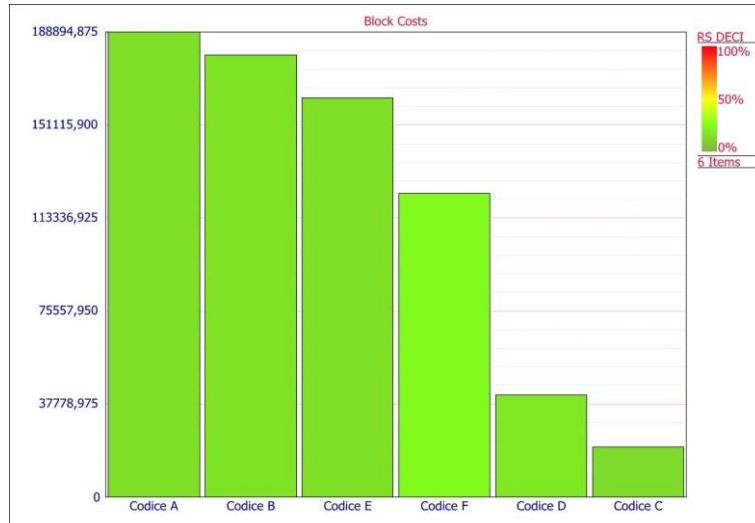


Figura 4.2 Costo complessivo dei singoli codici

Dalla Figura 4.3 si può apprezzare come sia proprio il Codice A a subire maggiormente il fermo prolungato.

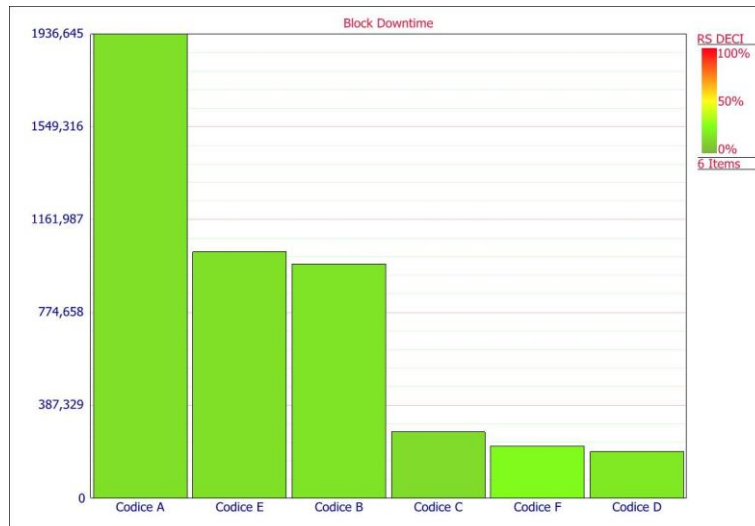


Figura 4.3 Confronto tra i periodi di fermo dei diversi codici

Le ricadute che i guasti dei codici causano sull'operatività del sistema complessivo sono espone in Figura 4.4. I periodi di fermo maggiori sono quelli del Codice E, del Codice A e del Codice B.

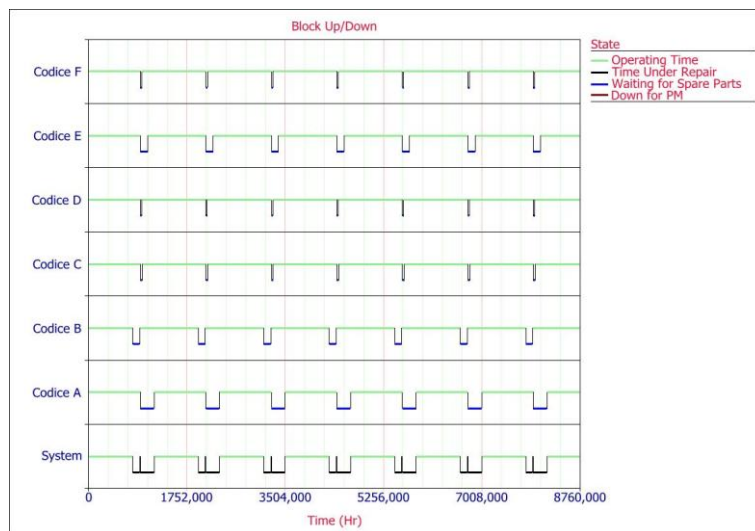


Figura 4.4 Alternanza dei periodi di operatività e di fermo dei codici e dell'aeromobile

L'analisi dei costi di manutenzione in Figura 4.5 mostra un prevedibile andamento crescente e "a scala" in corrispondenza dei singoli eventi di guasto. Si osservi come il costo del lavoro, superi il costo dell'approvvigionamento per i ricambi a magazzino.

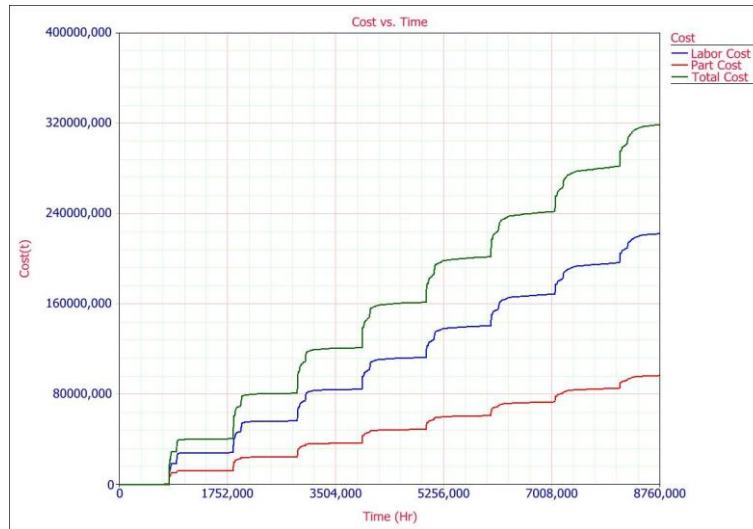


Figura 4.5 Analisi dei costi

Nelle successive simulazioni la disponibilità A cresce sempre e con essa il costo complessivo. L'andamento del costo non presenta un minimo perché non sono disponibili i costi per la tenuta a magazzino dei codici. Non avendo inserito nel modello tale costo non si verifica quello che avviene nella realtà: si riscontrerebbe un valore ottimo dei ricambi che minimizza il costo complessivo. In generale infatti il costo di acquisto e di tenuta a magazzino crescono al crescere del numero di ricambi, ma questo viene compensato dalla diminuzione dei costi di mancanza (Cfr. 1.2). Si prende in esame nelle immagini successive il caso della Simulazione 3: ogni codice dispone di due ricambi a magazzino.

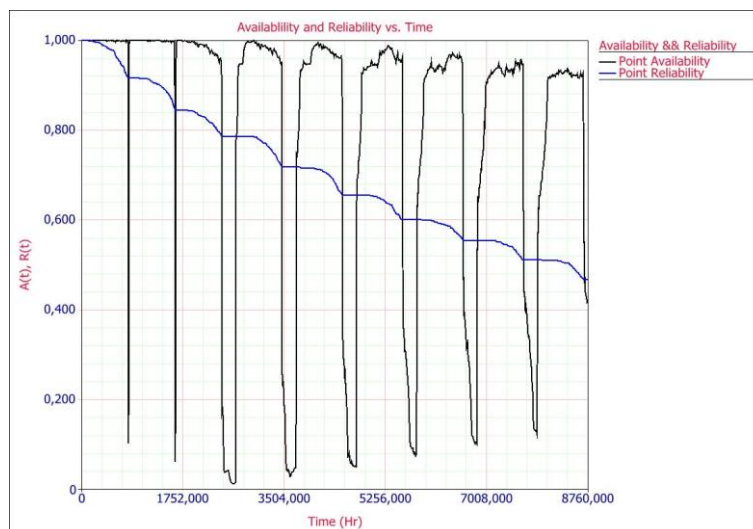


Figura 4.6 Profilo temporale dell'affidabilità e della disponibilità

Dalla Figura 4.7 Si può apprezzare la diminuzione dei periodi di fermo per i codici B ed E, mentre il Codice A presenta ancora dei periodi di fermo più prolungati.

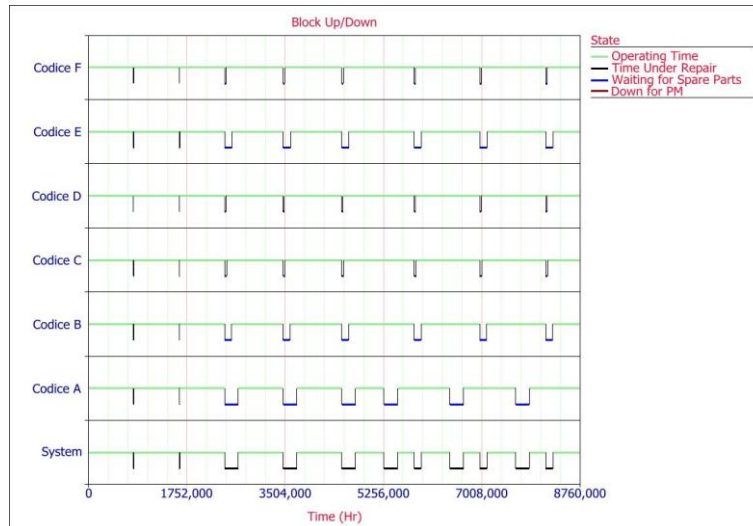


Figura 4.7 Periodi di operatività e di fermo dei codici e dell'aeromobile

L'analisi dei costi mostra ancora una prevalenza del costo del lavoro sul costo dei ricambi, vedi Figura 4.8.

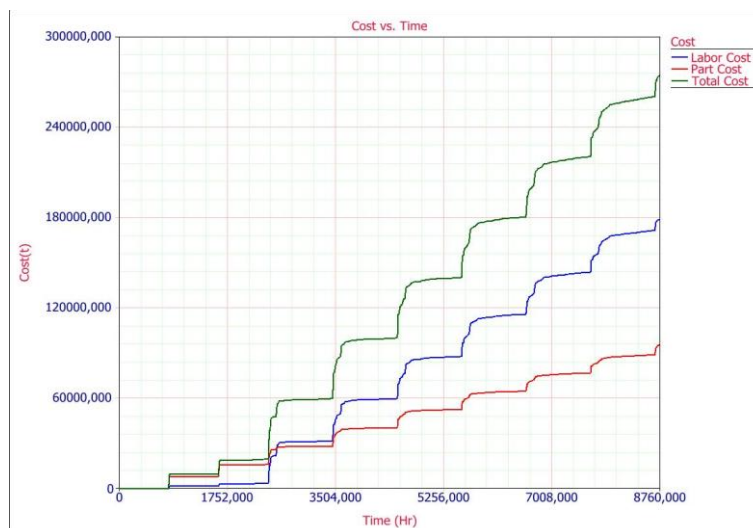


Figura 4.8 Analisi dei costi

Dalla Figura 4.9 si può notare come la maggior fonte di costo complessivo continui ad essere il Codice A.

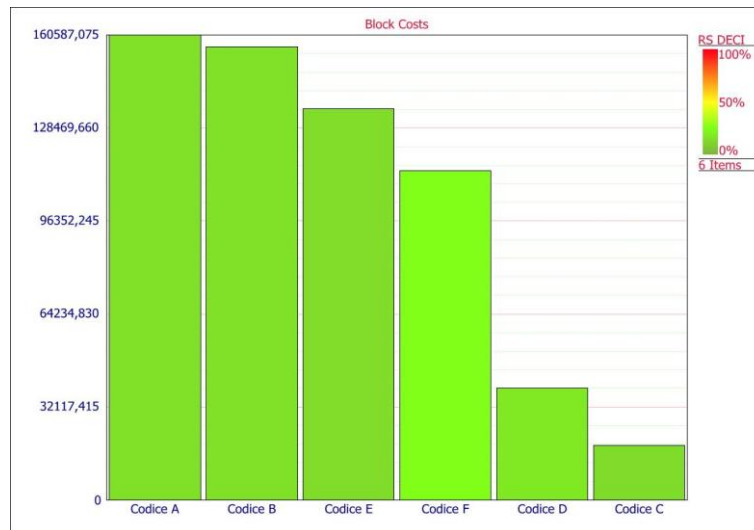


Figura 4.9 Confronto dei costi complessivi dei singoli codici

Il motivo risiede sempre nei periodi di fermo dello stesso Codice A, come mostrato in Figura 4.10.

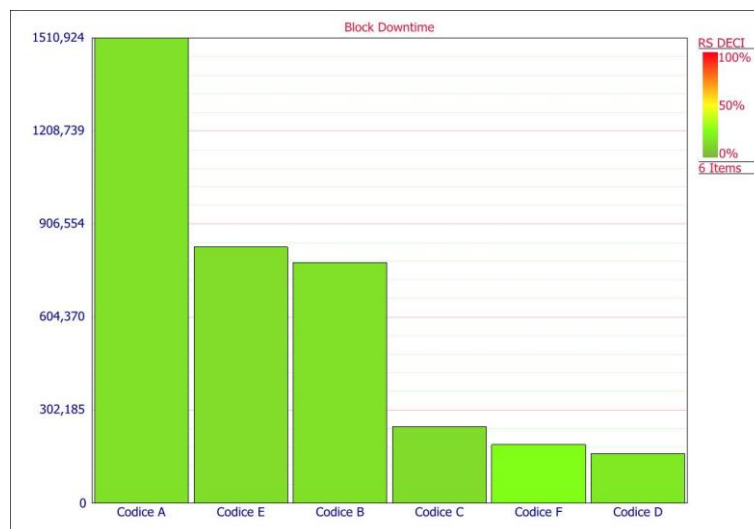


Figura 4.10 Confronto tra i periodi di fermo dei codici

Concentrandosi sui soli costi di magazzino emerge come il maggior costo sia da attribuire al codice E, il quale presenta il più elevato costo si acquisto ed un elevato *lead time*, vedi Figura 4.11. Al contrario il Codice A presenta i costi minori.

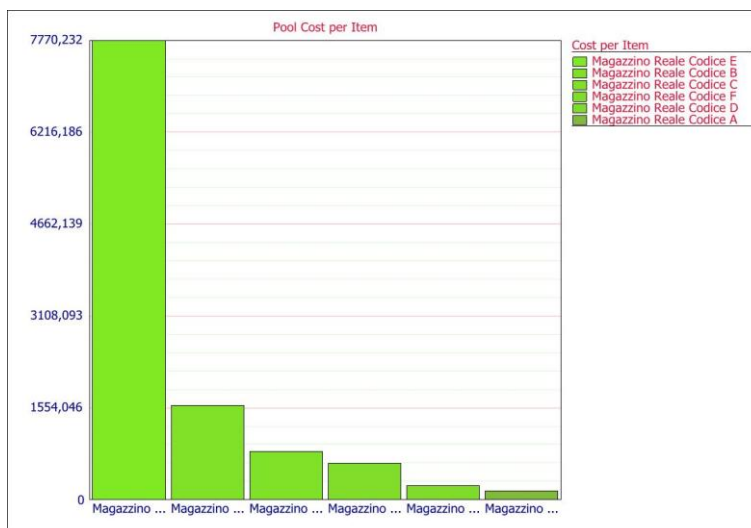


Figura 4.11 Analisi dei costi di magazzino dei codici

Non conoscendo la natura dei codici non risulta possibile stimare il costo di tenuta a magazzino. Nonostante questo si prosegue cercando di simulare una gestione il più realistica possibile. Si ipotizza, per quanto detto in precedenza, che vi sia a magazzino un aeromobile identico a quello oggetto di studio. Si ricade quindi nel caso della Simulazione 2 ovvero un codice a magazzino. Si stabilisce inoltre l'approvvigionamento automatico nel caso in cui un codice venga esaurito. Il *lead time* è in tutti i casi quello di approvvigionamento normale. Scegliendo questa configurazione si ottiene un netto miglioramento sia in termini di disponibilità sia sotto l'aspetto della diminuzione dei costi rispetto ai casi precedenti: la disponibilità A raggiunge il 96% mentre il costo totale è pari a € 196.433,53. Dalla Figura 4.12 Si può constatare come la disponibilità dell'aeromobile si mantenga a livelli bassi per un prolungato periodo di tempo in corrispondenza di un solo evento di fermo.

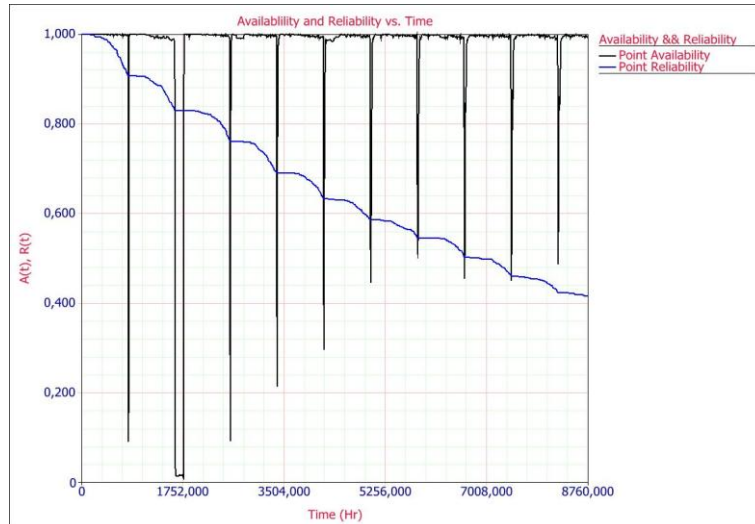


Figura 4.12 Evoluzione dell'affidabilità e della disponibilità

Dalla Figura 4.13 si nota come adottando questa politica, per la prima volta, si ottiene un calo del costo del lavoro, tale da rendere il costo di approvvigionamento la componente prevalente.

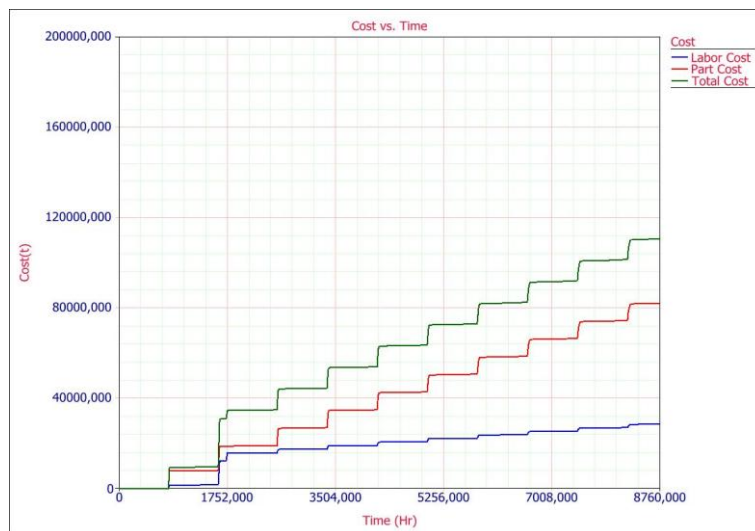


Figura 4.13 Analisi dei costi

Dalla Figura 4.14 si può notare come vengano minimizzati i periodi di fermo relativi al Codice B, mentre permangono quelli relativi ai codici E ed A.

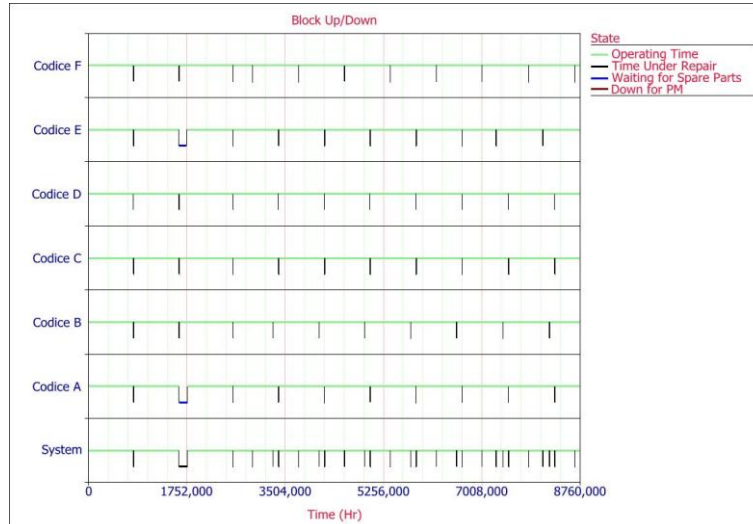


Figura 4.14 Evoluzione dei periodi di fermo e di operatività dei codici e del sistema

Da evidenziare come il livello medio di disponibilità raggiunga il 96%.

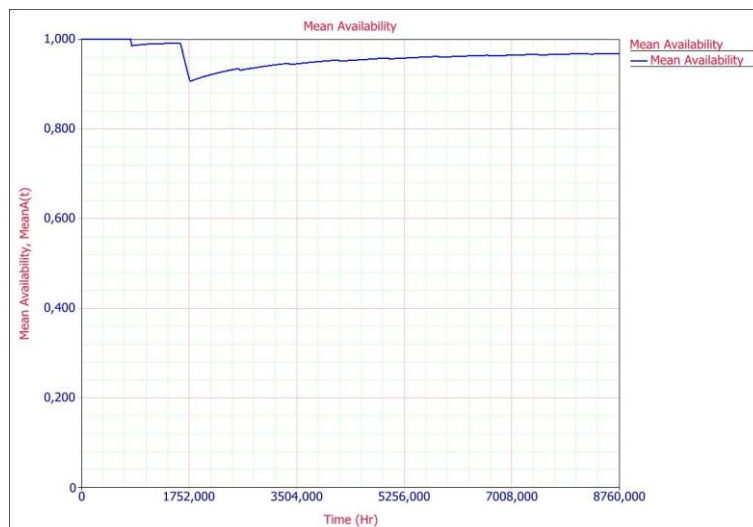


Figura 4.15 Disponibilità media del sistema

Dal confronto dei costi complessivi per codice si nota come per la prima volta il codice che rappresenta la maggior fonte di costo diventi il Codice E, seguito dal Codice A.

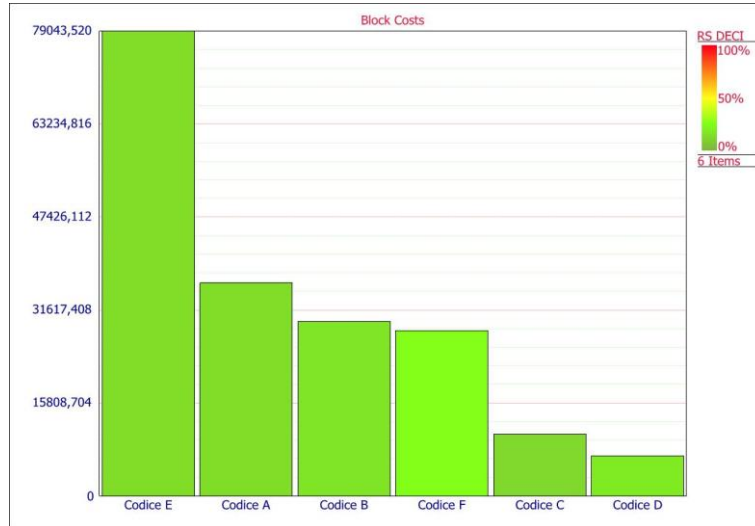


Figura 4.16 Confronto tra i costi complessivi dei codici

Questo è dovuto al fatto che, a differenza degli altri codici, questi presentano un dei periodi in cui è necessario l'approvvigionamento di emergenza, lo *stock* infatti è arrivato a zero e quindi l'aeromobile è a terra in attesa dei ricambi.

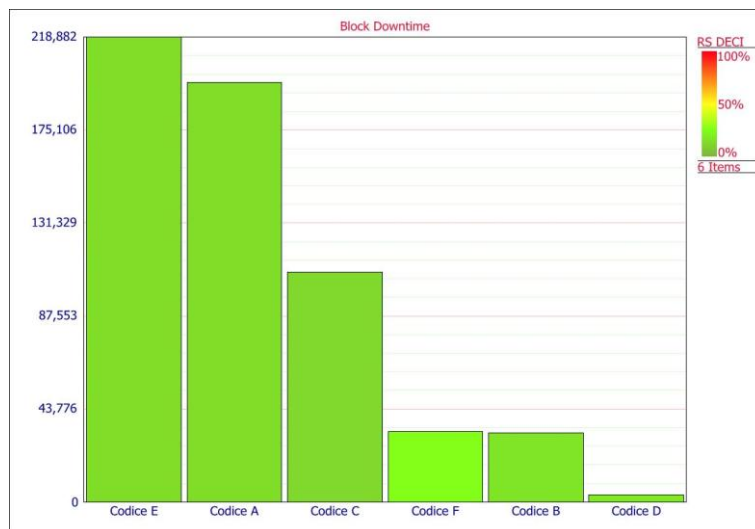


Figura 4.17 Comparazione tra i periodi di fermo dei codici

Costi di approvvigionamento e *lead time* elevati rendono il Codice E il più dispendioso anche dal solo punto di vista del magazzino.

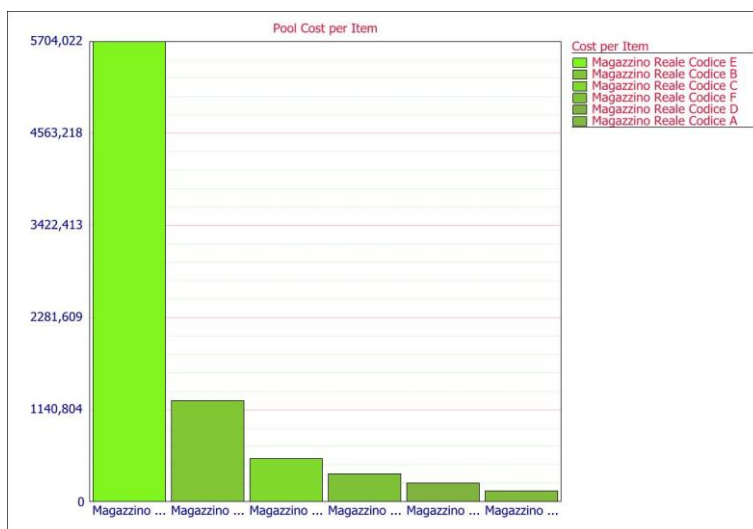


Figura 4.18 Confronto dei costi complessivi di magazzino dei singoli codici

Per cercare di intervenire in modo mirato si ipotizza una variante della simulazione precedente: si lascia invariato lo *stock* ad uno per tutti i codici e, solo per i codici A ed E, si innalza lo *stock* a due ricambi. Si prosegue inoltre ad effettuare il *restock* automatico quando i codici a magazzino sono esauriti. In questa scelta si ottiene un livello di disponibilità A del 96% ed un costo totale pari a € 172.277,22. In questa configurazione è ancora presente un periodo di fermo prolungato, come riscontrabile in Figura 4.19.

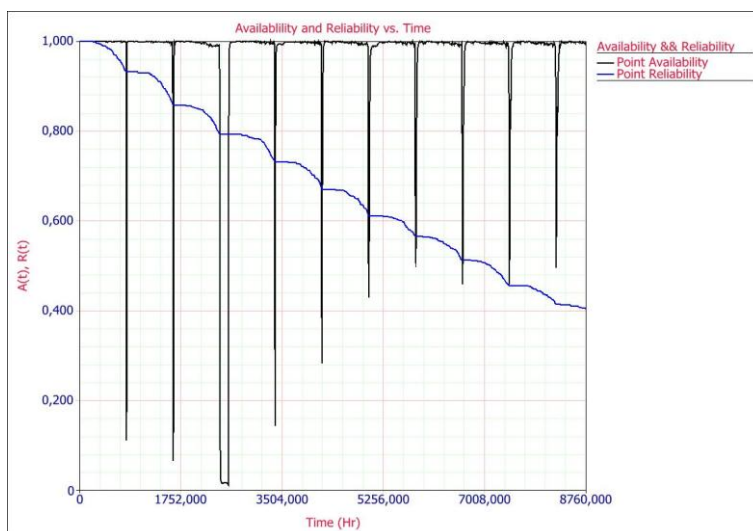


Figura 4.19 Profilo della disponibilità e dell'affidabilità

Si può osservare in Figura 4.20 come le principali cause dei periodi di fermo non dovute alla manutenzione programmata siano ancora i codici E ed A.

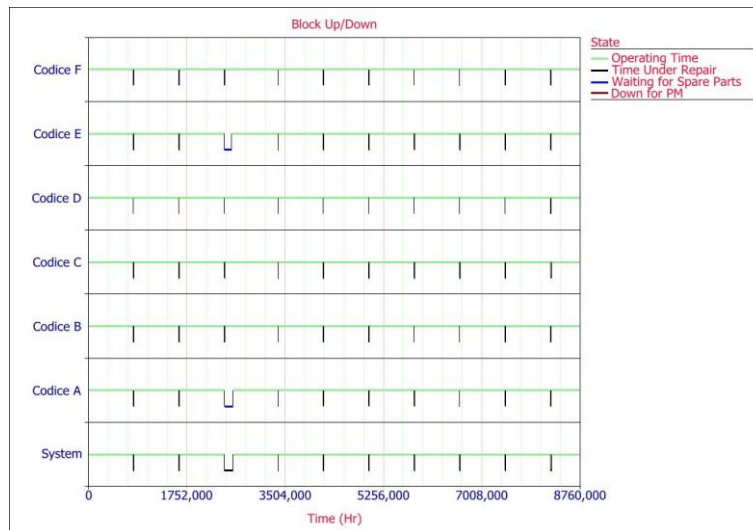


Figura 4.20 Evoluzione dei periodi di fermo e di operatività dei codici e dell'aeromobile

Dall'analisi dei costi si riscontra una diminuzione del costo totale annuo, ed il mantenimento dei costi del lavoro al di sotto del costo degli approvvigionamenti.

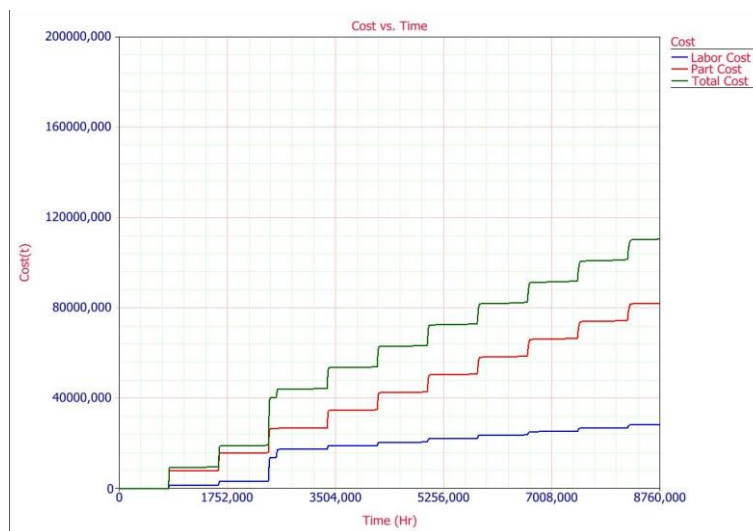


Figura 4.21 Analisi dei costi

Risulta evidente dalla Figura 4.22 Come sia ancora necessario, nel caso si voglia aumentare la disponibilità dell’impianto, diminuire i tempi di fermo dei codici A ed E: si deve cercare quindi di eliminare tutti i possibili periodi di fermo causati dall’attesa dei ricambi.

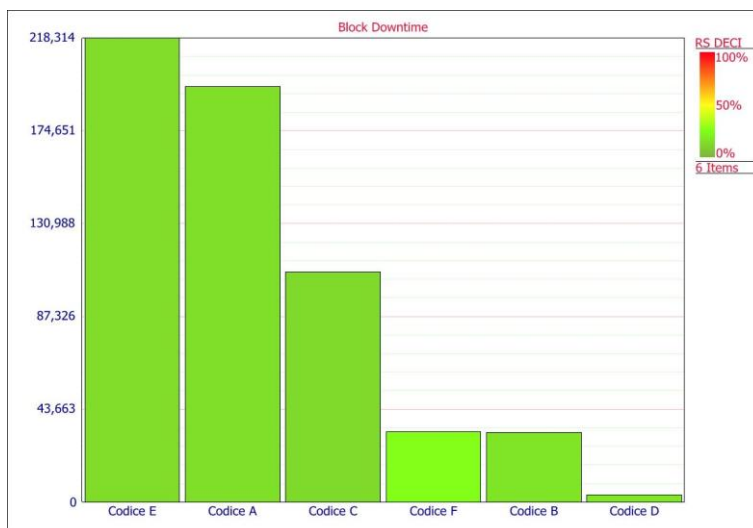


Figura 4.22 Confronto tra i periodi di fermo dei codici

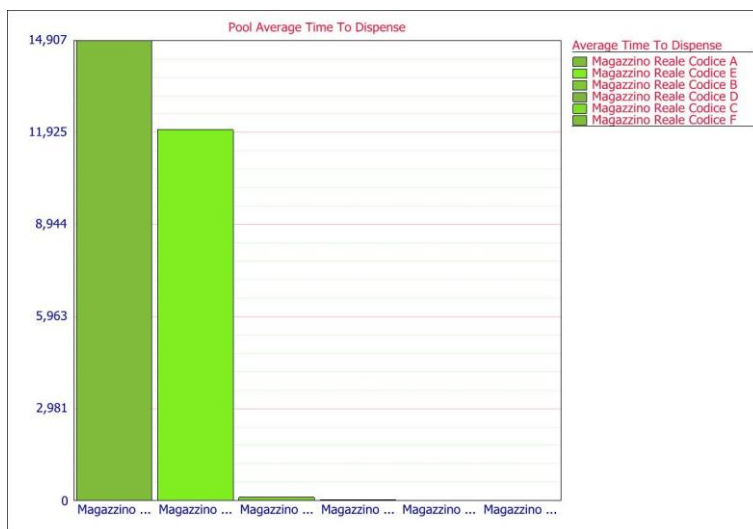


Figura 4.23 Tempo medio di approvvigionamento dei codici

Analizzando infatti le chiamate di emergenza causate dai guasti dei componenti di nota come siano proprio i codici E ed A a richiedere la totalità degli interventi.

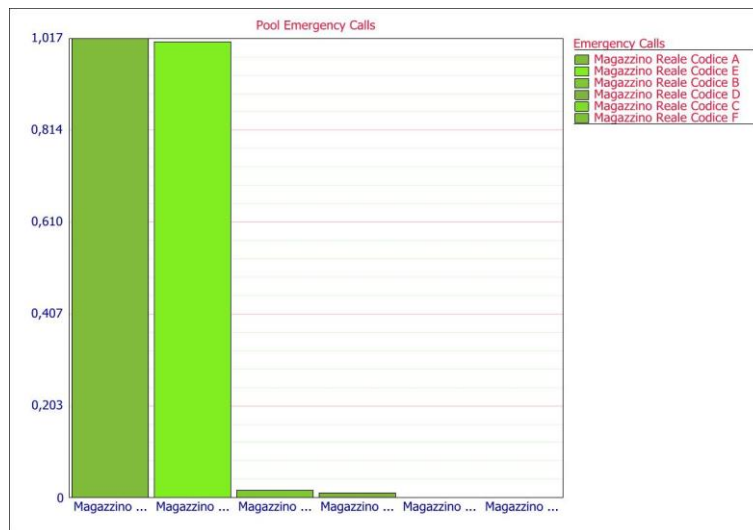


Figura 4.24 Chiamate in emergenza dei codici

Questo ha rilevanti ripercussioni sui costi di magazzino: il codice E ha infatti un costo di approvvigionamento in emergenza particolarmente elevato.

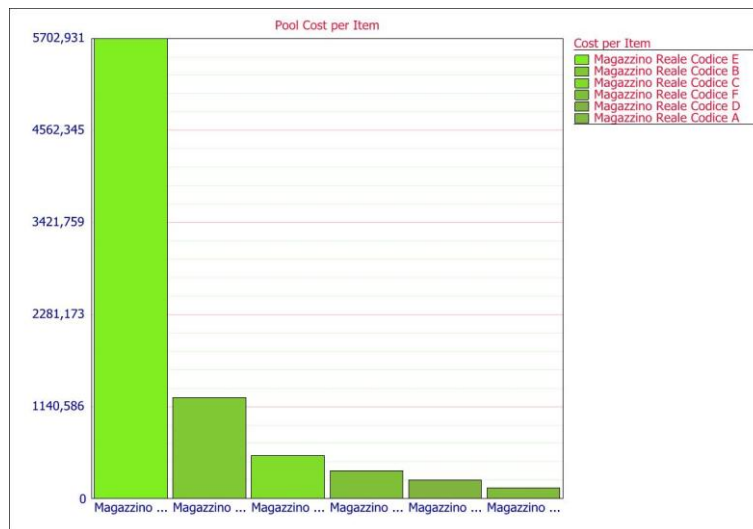


Figura 4.25 Costi di gestione del magazzino dei codici

Come ulteriore variante si ipotizza di mantenere, solo codici A ed E, lo *stock* iniziale pari a due unità in magazzino e *restock* automatico non appena sia rimasto a magazzino un solo codice. Adottando questa configurazione otteniamo si raggiungono i risultati migliori: la disponibilità A raggiunge il

98% e contemporaneamente costo totale diminuisce a € 145.599,14. Si espongono di seguito i risultati completi della simulazione.

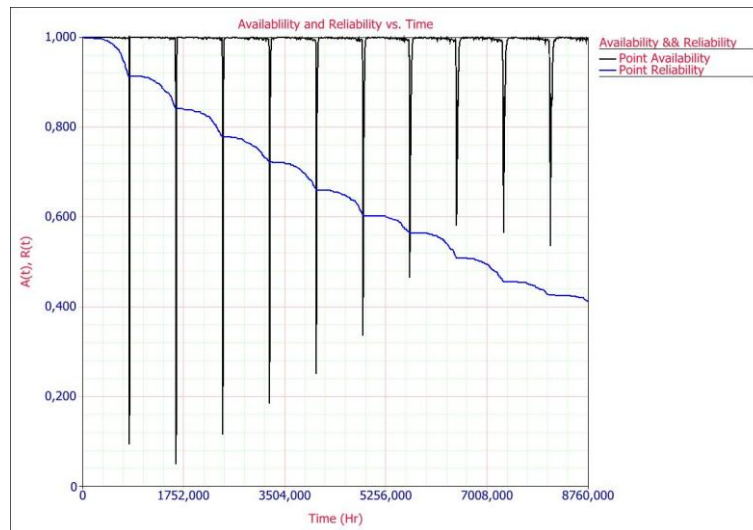


Figura 4.26 Evoluzione temporale dell'affidabilità e disponibilità del sistema

Il numero di guasti del sistema non raggiunge l'unità in un anno di funzionamento.



Figura 4.27 Evoluzione temporale dei guasti del sistema complessivo

Come si evince dalla Figura 4.28 con l'impiego di questa strategia si riesce a raggiungere un livello di disponibilità A del 98%.

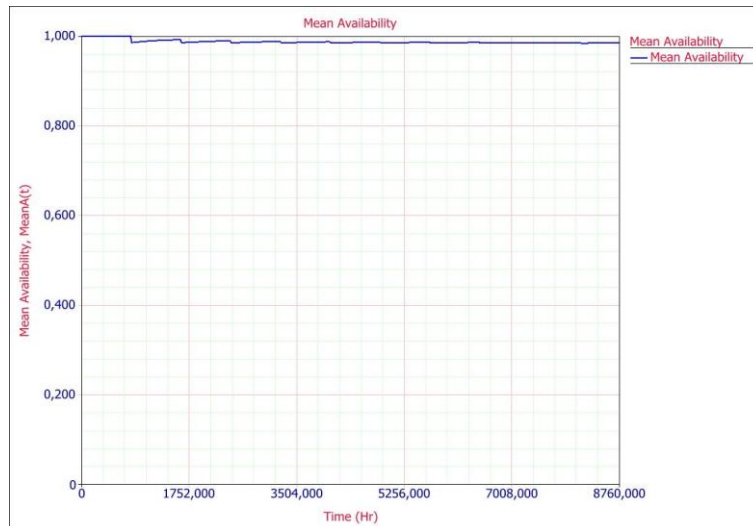


Figura 4.28 Evoluzione del livello medio dell' disponibilità

Come riscontrabile dalla Figura 4.29 questa strategia di manutenzione consente di eliminare i tempi di fermo dovuti all'attesa dei ricambi per tutti i codici. La durata degli eventi di fermo del sistema è così minimizzata e connessa esclusivamente al tempo necessario per effettuare la riparazione o la manutenzione preventiva.

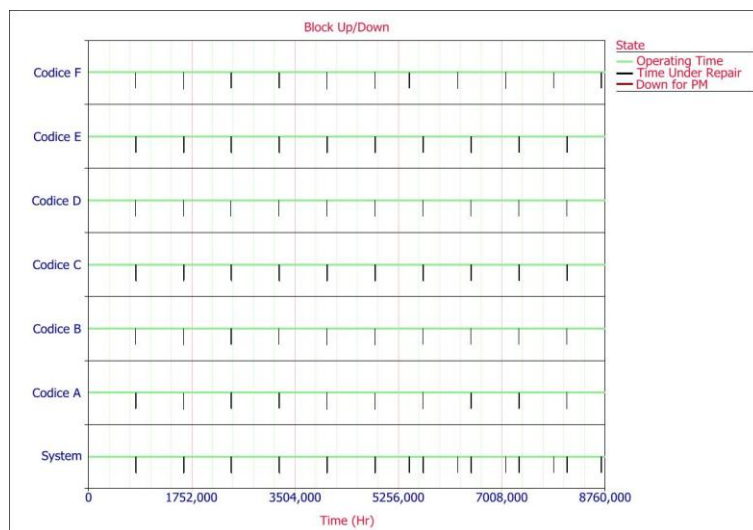


Figura 4.29 Funzionamento e fermo dei singoli codici e del sistema complessivo

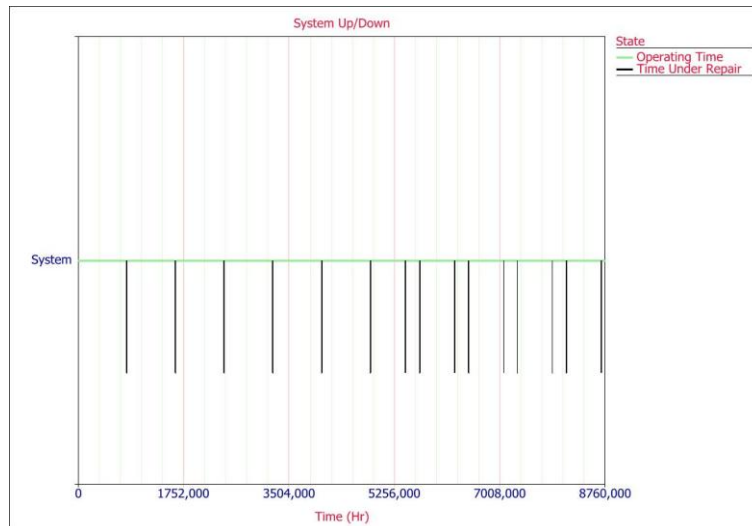


Figura 4.30 Alternanza dei momenti di funzionamento (*up*) e di fermo dell'aeromobile (*down*)

Dal grafico di Figura 4.31 È possibile apprezzare le caratteristiche affidabilistiche dei codici in termini di *trade off* tra MTBF e *uptime*.

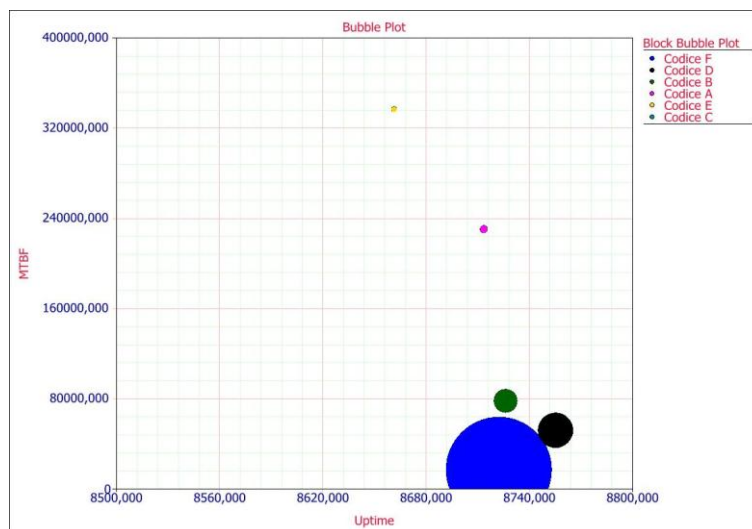


Figura 4.31 Grafico a bolle di MTBF e *uptime* dei codici

L'eliminazione dei tempi morti contribuisce notevolmente all'abbattimento dei costi del lavoro: il costo di manutenzione è rappresentato per la gran parte dal costo degli approvvigionamenti, vedi Figura 4.32.

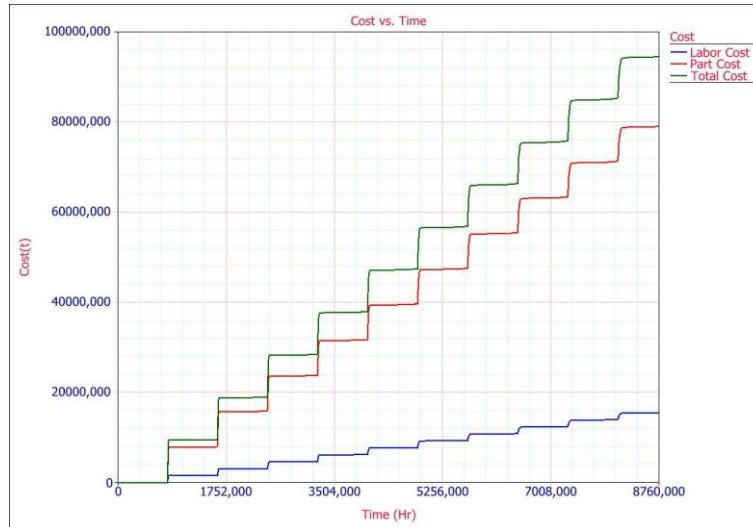


Figura 4.32 Evoluzione temporale del costo del lavoro e di approvvigionamento

A dimostrazione della validità della strategia si possono osservare le figure 4.33 e 4.34. Il codice E rappresenta sempre il codice dal costo più elevato ma ciò è dovuto solo al fatto che presenta il costo di approvvigionamento maggiore.

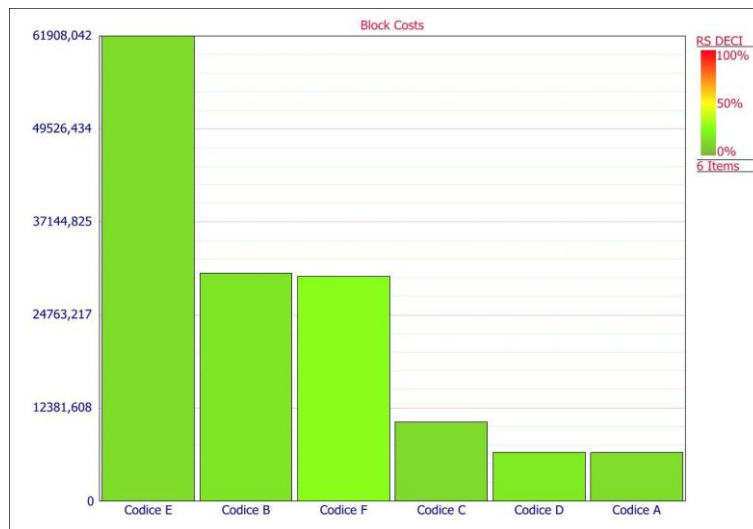


Figura 4.33 Costi complessivi ripartiti per singoli codici

Si riscontra infatti in Figura 4.34 come il tempo di *downtime* maggiore sia ora imputabile al Codice C.

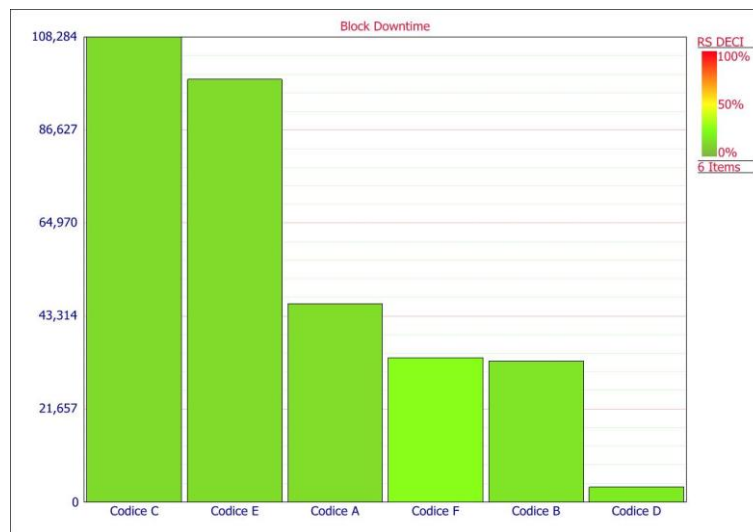


Figura 4.34 Tempo di fermo dei codici a causa di guasti o manutenzioni

Come confermato da analisi precedenti il numero di guasti maggiore si verifica per il Codice F. Tuttavia il costo di acquisto è basso ed il *lead time* in condizioni di ordine normale è basso, quindi non risulta problematico.

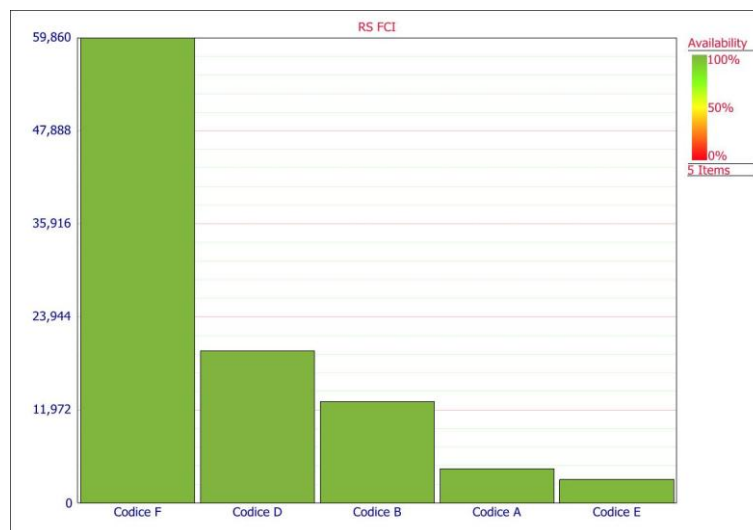


Figura 4.35 Criticità dei singoli codici

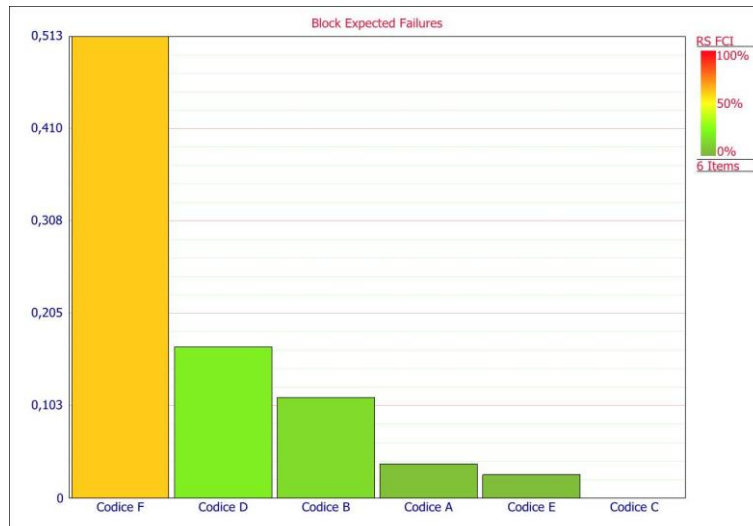


Figura 4.36 Previsioni di guasto per ciascun codice

A conferma della validità della strategia gli ordini in emergenza non raggiungono l'unità nel corso dell'anno, vedi Figura 4.37.

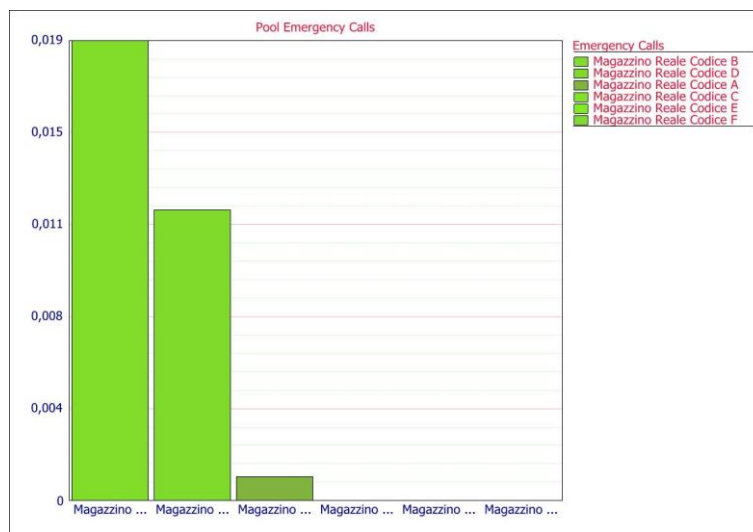


Figura 4.37 Ordini in emergenza

Il codice E rappresenta il costo di magazzino più elevato, ma questo è ora imputabile solo al suo costo di acquisto.

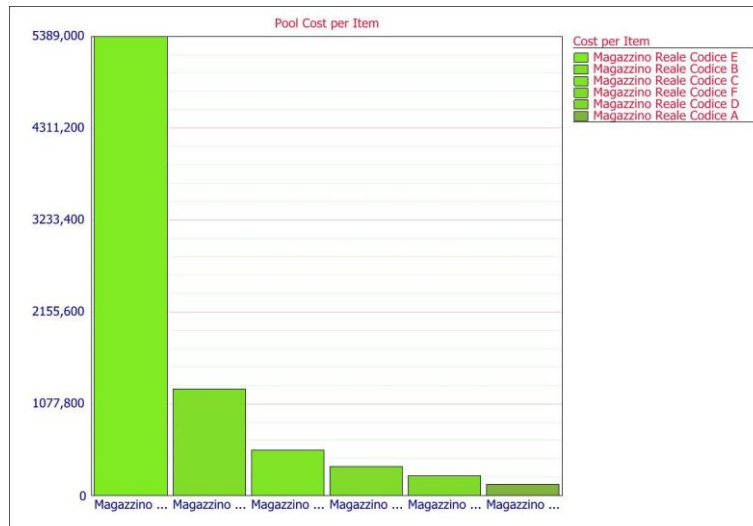


Figura 4.38 Costi di mantenimento a magazzino dei codici

Dalla Figura 4.39 si nota come i tempi di approvvigionamento vengano annullati grazie alla immediata disponibilità a magazzino.

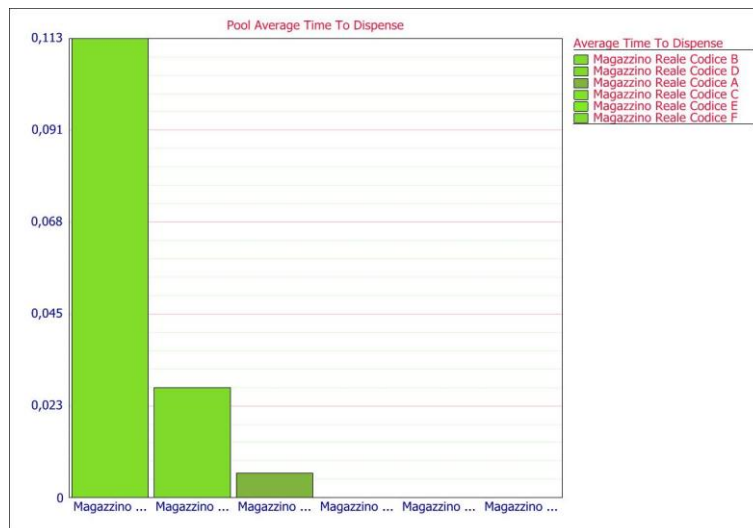


Figura 4.39 Tempo medio di rifornimento

Non si ritiene opportuno proseguire oltre incrementando ulteriormente gli stock in quanto già adottando questa strategia si eliminano del tutto i periodi di attesa di tutti i codici compresi i codici A ed E. Inoltre rimangono valide le considerazioni iniziali sui costi di mantenimento a magazzino. I risultati ottenuti nell'ultima simulazione appaiono soddisfacenti, considerando che il numero di codici a magazzino e la scadenza degli ordini da effettuare appare piuttosto realistica considerando l'abituale gestione del magazzino dell'azienda.

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Al termine dell'analisi svolta nel presente documento sono note tutte le caratteristiche affidabilistiche dei codici. Dal punto di vista del solo rischio di guasto le analisi mostrano come il componente più critico sia il Codice F. Il sistema, in assenza di interventi manutentivi, subisce un guasto in media ogni sessantatre giorni. Si è inoltre dimostrato come, sotto l'aspetto del costo, la miglior politica manutentiva sia la preventiva *type I*. Tuttavia le differenze di costo con la *type II* sono limitate, sia nell'arco di un anno sia in un periodo più lungo di tre o cinque anni. Si è quindi ipotizzato, nel successivo studio concernente i ricambi, l'utilizzo della politica manutentiva preventiva *type I*. Le analisi della gestione del magazzino sono influenzate principalmente dalla necessità di limitare allo stretto necessario i costi di mancanza causati dal *downtime* dell'aeromobile. Infatti proprio il Codice F, che presenta il numero di guasti più elevato, non diviene problematico in quanto presenta costi contenuti e un breve *lead time* anche in condizioni di approvvigionamento normali. I codici più problematici risultano invece i codici A ed E che presentano entrambi elevati *lead time*. Il codice E in particolare risulta anche il codice con il costo di acquisto più elevato. Si è dimostrata la validità economica delle strategie di gestione che incrementano, anche se limitatamente, le scorte dei codici A ed E. I maggiori costi dovuti all'acquisto, sono infatti ampiamente compensati dal forte calo dei costi di mancanza. La validità delle strategie è sostenuta inoltre dal fatto che permettono di discostarsi in modo limitato dall'uso del settore aeronautico da reperire componenti da altri aeromobili a disposizione. La scelta della politica da adottare tra quelle prospettate dipende inoltre da altre considerazioni, come la disponibilità attesa dall'azienda, che esulano dagli scopi del presente documento. Si sottolinea come le politiche proposte presentino comunque livelli di disponibilità A dell'ordine del 96% - 98%. Tra i possibili sviluppi futuri si sottolinea, in particolare, l'opportunità dell'inserimento nelle simulazioni dei costi di mantenimento a magazzino al fine di aumentare il realismo dei risultati ottenuti. In base alla natura dei codici e alla possibilità di ispezione sarebbe inoltre giustificato valutare l'opportunità di impiego di politiche ispettive.

APPENDICE A

MTTF DEI CODICI

MTTF (h)					
CODICE A	CODICE B	CODICE C	CODICE D	CODICE E	CODICE F
9506	1348	8641	8887	3112	2428
2400	2725	3684	1134	5821	3918
2082	1741	7532	4721	1971	1856
6137+	2111	5697	2990+	376+	1860
2082	2723	5876	4197	4037	1444
9661	3082	3648	5000+	2684	1285
8789	3474	2576	3564	2850	1212
7452	3658+	8469	7464	3258	1811
4303	3843	6738	5766	614+	1063
3279	3207	2975	9653	436+	1371
3279	3346	6482	2486+	2027	921
5250+	3453	5973	6797	4339	3800
4590	2329	3688	5000+	2202	2309
7125	3394	6794	7346	2202	2539
4874	2637	4238	5187	2784 +	1592
4495	3718	7568	2745	1384	1500
5629	3037	6892	3541	3674	1271
9208	2309	3876	6028+	1135	2356
3000+	3002	3976	8112	2202	1046
7233	3818	4855	5029	3875	1133
1444	2903		2828	3541	2149
7125	2073		3378+	3310	3298
5721	1200+		4271	6447	2162
6012	2693		1134+	830+	1915
2930	2568		8112	1285+	2400
4968	1809		3378	4506	2009
6000+	2963		6210	5552	1766
8926	2478		6902	8286	1655
8397	2633		9446	1865	908
6914	1804		3225+		1912
6810	3151		872+		2138
3166	1438		2395		1520
6207	1888		9064		1095
8789	3170		4345+		2011
3050	2887		4570		1391
9506	1513		8475		1999

8272	2622				918
2478	1792				
6109	1606				
7792	1927				
2677	3360				
4108	1859				
6207	1897				
5687	1647				
6666	3421				
6405	1953				
8000+	2257				
8234+	3890				
4590	3075				
4009	2053				
2400	2414				
8789	2557				
1693	2275				
7677	3323				
3568	2170				
4798	1781				
6914	3118				
5897	2128				
9715	3406				
6207	3471				
3808	2107				
4495	3444				
8341	2974				
6012	3110				
4590	1957				
9985	3500+				
4399	3500+				
2806	3500+				
7341	3500+				
6874	3500+				
9820	3500+				
5534	3500+				
5200+	2893				
9820	3042				
5200+	1901				
8210	1448				
7233	2140				
4444	1624				
6505	2375				
5062	2853				
3909	2901				

4206	2409				
4685	1537				
4206	3403				
3874	2313				
6207	1851				
4780	2068				
9355	3196				
4685	2209				
1693	3517				
5820	1526				
6537	3298				
4578	3752				
2677	3356				
3256+	2669				
2082	3472				
4009	3418				
4009	3477				
4108	2546+				
6387	1626				
3564	1836				
3166	3235				
5345	2224				
4399	2147				
7341	3330				
2677	1976				
1444					
7909					
5916					
2082					
5534					
5724					
5843					
6000+					
5788					

APPENDICE B

DATI SIMULAZIONI

Simulazione con tutti i codici con *stock* iniziale = 1 e *restock* automatico a 0.

System Overview	
General	
Mean Availability (All Events):	0,968547
Std Deviation (Mean Availability):	0,000683
Mean Availability (w/o PM, OC & Inspection):	0,999131
Point Availability (All Events) at 8760:	0,996
Reliability(8760):	0,416
Expected Number of Failures:	0,87
Std Deviation (Number of Failures):	0,063432
MTTFF (Hr):	9976,22973
System Uptime/Downtime	
Uptime (Hr):	8484,46987
CM Downtime (Hr):	7,609206
Inspection Downtime (Hr):	0
PM Downtime (Hr):	267,920922
OC Downtime (Hr):	0
Total Downtime (Hr):	275,530127
System Downing Events	
Number of Failures:	0,87
Number of CMs:	0,87
Number of Inspections:	0
Number of PMs:	13,657
Number of OCs:	0
Number of OFF Events by Trigger:	0
Total Events:	14,527
Costs	
Total Costs:	190433,457
Throughput	
Total Throughput:	N/A

Crew Summary					
Crew	Calls	Accepted	Rejected	Time Used (Hr)	Cost
Manutentori	60,167	60,167	0	593,713638	28498,2546

System Cost Summary		
Misc. Corrective Costs:	0	
Costs for Parts (CM):	587,3029	
Costs for Crews (CM):	365,241873	
<u>Total CM Costs:</u>		<u>952,544773</u>
Misc. Preventive Costs:	0	
Costs for Parts (PM):	81451,2397	
Costs for Crews (PM):	28133,0128	
<u>Total PM Costs:</u>		<u>109584,252</u>
Misc. On Condition Costs:	0	
Costs for Parts (OC):	0	
Costs for Crews (OC):	0	
<u>Total OC Costs:</u>		<u>0</u>
Misc. Inspection Costs:	0	
Costs for Crews (IN):	0	
<u>Total Inspection Costs:</u>		<u>0</u>
<u>Downtime Costs:</u>		<u>79896,6598</u>
<u>Indirect Pool Costs:</u>		<u>0</u>
<u>Total Costs:</u>		<u>190433,457</u>

Simulazione con *stock* iniziale codici A ed E = 2 e *restock* automatico a 0.
Tutti gli altri codici *stock* = 1 e *restock* automatico a zero.

System Overview	
<u>General</u>	
Mean Availability (All Events):	0,96896
Std Deviation (Mean Availability):	0,000184
Mean Availability (w/o PM, OC & Inspection):	0,999328
Point Availability (All Events) at 8760:	0,999
Reliability(8760):	0,405
Expected Number of Failures:	0,872
Std Deviation (Number of Failures):	0,063132
MTTFF (Hr):	10069,7415
<u>System Uptime/Downtime</u>	
Uptime (Hr):	8488,08553
CM Downtime (Hr):	5,88784
Inspection Downtime (Hr):	0
PM Downtime (Hr):	266,026631
OC Downtime (Hr):	0
Total Downtime (Hr):	271,914471
<u>System Downing Events</u>	
Number of Failures:	0,872
Number of CMs:	0,872
Number of Inspections:	0
Number of PMs:	13,368
Number of OCs:	0
Number of OFF Events by Trigger:	0
Total Events:	14,24
<u>Costs</u>	
Total Costs:	172277,222
<u>Throughput</u>	
Total Throughput:	N/A

Crew Summary					
Crew	Calls	Accepted	Rejected	Time Used (Hr)	Cost
Manutentori	60,199	60,199	0	591,350501	28384,824

System Cost Summary		
Misc. Corrective Costs:	0	
Costs for Parts (CM):	560,16025	
Costs for Crews (CM):	282,616322	
<u>Total CM Costs:</u>		<u>842,776572</u>
Misc. Preventive Costs:	0	
Costs for Parts (PM):	81509,9176	
Costs for Crews (PM):	28102,2077	
<u>Total PM Costs:</u>		<u>109612,125</u>
Misc. On Condition Costs:	0	
Costs for Parts (OC):	0	
Costs for Crews (OC):	0	
<u>Total OC Costs:</u>		<u>0</u>
Misc. Inspection Costs:	0	
Costs for Crews (IN):	0	
<u>Total Inspection Costs:</u>		<u>0</u>
<u>Downtime Costs:</u>		<u>61822,3205</u>
<u>Indirect Pool Costs:</u>		<u>0</u>
<u>Total Costs:</u>		<u>172277,222</u>

Simulazione con *stock* codici A ed E = 2 e *restock* automatico ad 1. Tutti gli altri codici *stock* = 1 e *restock* automatico a zero.

System Overview	
General	
Mean Availability (All Events):	0,985487
Std Deviation (Mean Availability):	0,000162
Mean Availability (w/o PM, OC & Inspection):	0,999445
Point Availability (All Events) at 8760:	0,994
Reliability(8760):	0,412
Expected Number of Failures:	0,857
Std Deviation (Number of Failures):	0,03717
MTTFF (Hr):	9996,54649
System Uptime/Downtime	
Uptime (Hr):	8632,86372
CM Downtime (Hr):	4,865688
Inspection Downtime (Hr):	0
PM Downtime (Hr):	122,270591
OC Downtime (Hr):	0
Total Downtime (Hr):	127,136279
System Downing Events	
Number of Failures:	0,857
Number of CMs:	0,857
Number of Inspections:	0
Number of PMs:	13,564
Number of OCs:	0
Number of OFF Events by Trigger:	0
Total Events:	14,421
Costs	
Total Costs:	145599,143
Throughput	
Total Throughput:	N/A

Crew Summary					
Crew	Calls	Accepted	Rejected	Time Used (Hr)	Cost
Manutentori	60,387	60,387	0	322,826906	15495,6915

System Cost Summary		
Misc. Corrective Costs:	0	
Costs for Parts (CM):	508,43275	
Costs for Crews (CM):	233,553022	
<u>Total CM Costs:</u>		<u>741,985772</u>
Misc. Preventive Costs:	0	
Costs for Parts (PM):	78505,2951	
Costs for Crews (PM):	15262,1385	
<u>Total PM Costs:</u>		<u>93767,4336</u>
Misc. On Condition Costs:	0	
Costs for Parts (OC):	0	
Costs for Crews (OC):	0	
<u>Total OC Costs:</u>		<u>0</u>
Misc. Inspection Costs:	0	
Costs for Crews (IN):	0	
<u>Total Inspection Costs:</u>		<u>0</u>
<u>Downtime Costs:</u>		<u>51089,7235</u>
<u>Indirect Pool Costs:</u>		<u>0</u>
<u>Total Costs:</u>		<u>145599,143</u>

NOMENCLATURA E LISTA DEGLI ACRONIMI

ADI: Average Interdemand Interval

CV: Coefficient of Variation

DDP: Distribuzione Di Probabilità

ENF: Expected Number of Failure

MTBF: Mean Time Between Failure

MTTF: Mean Time To Failure

MTTR: Mean Time To Repair

RBD: Reliability Block Diagram

TTF: Time To Failure

URD: Universal Reliability Definition

BIBLIOGRAFIA

TESTI

[T1] – Riccardo Manzini, Alberto Regattieri, “Manutenzione dei sistemi di produzione – Modelli e metodi per la gestione della produttività della qualità e della sicurezza”, Società Editrice Esculapio, Bologna, 2007.

[T2] – Luciano Furlanetto, Marco Garetti, Marco Macchi, “Principi generali della gestione della manutenzione”, Franco Angeli, 2006.

[T3] – Emilio Ferrari, Arrigo Pareschi, Alessandro Persona, Alberto Regattieri, “Logistica integrata e flessibile per i sistemi produttivi dell’industria e del terziario”, Società Editrice Esculapio, Bologna, 2009.

[T4] – Arrigo Pareschi, “Impianti Meccanici per l’industria”, Società Editrice Esculapio, Bologna, 2009.

DISPENSE

[D1] – Arrigo Pareschi, Dispense del corso di Impianti Meccanici LM, 2012.

[D2] – Alberto Regattieri, Dispense del corso di Manutenzione dei sistemi di produzione M, 2008-2009.

ARTICOLI

[A1] – Life Data Analysis Reference Book, Weibull Distribution, eMagazine Reliability HotWire, ReliaSoft's Reliability Publications.

[A2] – Life Data Analysis Reference Book, The Generalized Gamma Distribution and Reliability Analysis, eMagazine Reliability HotWire, ReliaSoft's Reliability Publications.

[A3] – Life Data Analysis Reference Book, Life Data Classification, eMagazine Reliability HotWire, ReliaSoft's Reliability Publications.

[A4] – “Location Parameter of the Weibull Distribution”, Issue 15, May 2002, eMagazine Reliability HotWire, ReliaSoft's Reliability Publications.

[A5] – “Component Reliability Importance in System Reliability Analysis”, Issue 62, April 2006, eMagazine Reliability HotWire, ReliaSoft's Reliability Publications.

[A6] – “Maintenance policies in BlockSim”, Issue 89, July 2008, eMagazine Reliability HotWire, ReliaSoft's Reliability Publications.

[A7] – “Modeling a complex maintenance scenario in BlockSim”, Issue 89, July 2008, eMagazine Reliability HotWire, ReliaSoft's Reliability Publications.

[A8] – “Using maintenance policies”, Issue 31, September 2003, eMagazine Reliability HotWire, ReliaSoft's Reliability Publications.

[A9] – Help on line, Synthesis8, Task Scheduling.

[A10] – “The effect of inspection intervals”, Issue 28, June 2003, eMagazine Reliability HotWire, ReliaSoft's Reliability Publications.

[A11] – “On-condition maintenance using P-F interval or failure detection threshold (FDT)”, Issue 76, June 2007, eMagazine Reliability HotWire, ReliaSoft's Reliability Publications.

[A12] – “Life cycle cost analysis”, Issue 47, January 2005, eMagazine Reliability HotWire, ReliaSoft's Reliability Publications.

[A13] – “Preventive maintenance and the cost per unit time equation”, Issue 96, February 2009, eMagazine Reliability HotWire, ReliaSoft's Reliability Publications.

[A14] – “Using BlockSim 6 for Planning Just-In-Time Ordering of Spare Parts”, Issue 70, December 2006, eMagazine Reliability HotWire, ReliaSoft's Reliability Publications.

MANUALI

[M1] – Reliability Synthesis Elements – Weibull++/Alta 8 Quick Start Guide, Reliasoft Publishing, Tucson.

[M2] – Reliability Synthesis Elements – BlockSim 8 Quick Start Guide, Reliasoft Publishing, Tucson.