

APPUNTI DI TECNOLOGIE E TECNICHE DI INSTALLAZIONE E MANUTENZIONE

PARTE 3 di 10

**Istituti Professionali
Indirizzo M.A.T.**

Ing. Enrico Cinalli
Rev. 04/19

La Manutenzione

Cosa significa “manutenzione” ?



Potrei cercare l’etimologia del termine ma il primo collegamento che mi viene in mente è la frase che mio nonno Pietro mi diceva ogni qualvolta gli chiedevo in prestito alcuni attrezzi di falegnameria: “*mi te li dei ma tegneli a man*”.

“*Tegnir a man*” nel dialetto bormino significa “*non sperperare risorse*”, “*aver cura delle cose*” e quindi utilizzarle in modo corretto; non significa “*metterle a posto o aggiustarle*” ma, prima di tutto, conservarle utilizzandole in modo che si deteriorino il meno possibile e quindi, conseguentemente, effettuare pulizia e sostituzioni delle parti che naturalmente sono soggette a usura.

A conferma del ragionamento sopra esposto trovo in internet:

Manutenzione: dal lat. mediev. manutentio –onis, der. di manu tenere, tenere con mano (coniugato come tenere), tenere una cosa in modo che duri a lungo, rimanga in essere, in efficienza (Treccani, 1973).

Ah dimenticavo ... mio nonno poi mi diceva: “*si chiamano Pietro*” ... ma questo è un altro argomento.

INDICE

1. PARTIAMO DA UN INTERESSANTE ARTICOLO.....	3
2. DEFINIZIONI DI MANUTENZIONE	5
3. LE ATTIVITÀ DI MANUTENZIONE	7
4. DEFINIZIONE DI GUASTO	10
5. GUASTI SISTEMATICI E NON SISTEMATICI	11
6. DEFINIZIONE DI GUASTO	12
7. GUASTI POTENZIALI	14
8. ANALISI DELLA AFFIDABILITÀ DEI SISTEMI	15
Affidabilità	15
Densità di probabilità di guasto.....	15
Tasso di guasto	16
Tempo medio di guasto (MTTF)	18
Altri parametri di interesse.....	18
Sistemi con tasso di guasto costante.....	21
Sistemi in serie e in parallelo	24
Affidabilità di sistemi in serie	25
Affidabilità di sistemi in parallelo (sistemi ridondanti attivi)	26
Sistemi complessi – SERIE –PARALLELO (sp)	27
Sistemi complessi – PARALLELO –SERIE (ps)	27
Sistemi K out of n (sistemi ridondanti attivi)	28
Sistemi ridondanti in stand-by.....	30
Altre configurazioni	30
Affidabilità di un sistema complesso	31
Tabella dei tipici tassi di guasto (da Appendice 6-A del TNO Red Book, 2005)	32
9. ANALISI DEI GUASTI	35
Come costruire un albero dei guasti	37
10. MANUTENZIONE.....	44
Definizione di manutenzione.....	44
Manutenzione ordinaria e straordinaria	44
Politiche di manutenzione	44
Manutenzione correttiva.....	45
Manutenzione preventiva	45
Scelta della politica manutentiva	46
Esempio pratico di manutenzione.....	46
Organizzazione della manutenzione in azienda	46
Organizzazione della manutenzione: modello centralizzato.....	47
Organizzazione della manutenzione: modello decentralizzato.....	48
La fidatezza	48
11. GESTIONE DEI RIFIUTI	49
Manutenzione e rifiuti	49
Classificazione dei rifiuti	49
La gestione dei rifiuti	49
Direttive RAEE e RoHS	50
12. ESERCIZI RIASSUNTIVI	52

1. PARTIAMO DA UN INTERESSANTE ARTICOLO

Cos'è La Manutenzione?

Luglio 2007, Maurizio Cattaneo

Il titolo può sembrare provocatorio, tuttavia, nella sua costante evoluzione, il dominio della manutenzione sembra allargarsi sempre più sino a diventare un insieme vuoto. Nelle azioni quotidiane la manutenzione è spesso confusa o percepita come il suo campo di applicazione. È necessario pertanto distinguere ciò che propriamente fa parte della scienza manutentiva da ciò che è un contributo derivante da altri domini del sapere.

Daremo in questo testo solo una vista panoramica sul tema, rimandando per i necessari approfondimenti ad una pubblicazione più ampia ed articolata che sto realizzando assieme al Prof. Michele Di Sivo. Da quando l'OCSE, nel 1963, diede una originale definizione di manutenzione, molte cose sono cambiate e almeno fino alla metà degli anni '80, sono state formulate nuove teorie, non ancora compiutamente applicate. La scienza manutentiva si è trasformata, e da queste esperienze oggi è possibile definire con maggiore precisione quell'area del sapere che noi chiamiamo manutenzione. Apparentemente quest'area è vastissima, al punto che non è più chiaro cosa è manutenzione e cosa non lo è e, nel campo formativo, quali percorsi sono necessari per l'addestramento dei manutentori. Una parte di essa chiamata ingegneria di manutenzione è un sottoinsieme ben circoscritto, diffusamente insegnato nelle università, dove la formazione dei manager e più ancora dei tecnici di manutenzione è ormai una realtà consolidata. L'addestramento dei manutentori (coloro che eseguono le azioni manutentive) è invece unanimemente riconosciuto come un aspetto critico che pregiudica la qualità della manutenzione ed i risultati degli interventi.

*Le difficoltà di addestramento sono in gran parte dovute ai numerosissimi campi di applicazione della manutenzione, al punto da renderne vago il concetto. Concetto peraltro non rilevabile nemmeno nei dati ISTAT, che usa un nomenclatore europeo organizzato per settori (ATECO), cioè per i diversi campi di applicazione. Perciò è così difficile avere dati certi sulla dimensione del fenomeno manutenzione. Puntualizzare, e in qualche caso ridefinire, le convenzioni, i principi e le norme operative sulle quali si basa la manutenzione aiuterà ad identificare un confine più preciso, a meglio specificare cosa è manutenzione e cosa invece le è estraneo, seppur interconnesso. Partiamo, ad esempio, dal cosiddetto "ciclo di guasto", la tipica azione manutentiva di ripristino al livello di prestazione originario (o quasi) della funzione compromessa di un sistema. La riparazione si intreccia con numerosissimi campi del sapere: dalla meccanica, all'elettronica, dalla scienza dei materiali alla chimica, alla fisica e a molte altre scienze. **I contenuti dell'intervento manutentivo sono peraltro molto simili all'installazione, alla realizzazione di un prototipo, così come accade che la manutenzione debba riprogettare un elemento di un sistema i cui contenuti non sono dissimili dalla progettazione originaria, sia per gli strumenti che per le logiche progettuali utilizzate.** Difficile quindi distinguere.*

In realtà gran parte del processo manutentivo si è svolto "a monte" dell'intervento. Nella fase diagnostica, sia per intercettare eventuali derive prima del guasto, sia per individuarne le cause, a guasto avvenuto. Nella definizione delle politiche di intervento, nel budget e nel piano di manutenzione, e così via.

L'azione di riparazione, è molto più legata al dominio tecnologico di appartenenza del sistema interessato dall'intervento che non ai principi della manutenzione, per questo la differenziazione fra le possibili azioni manutentive è così elevata.

La varietà di questi sistemi ha indotto a pensare per molto tempo che non esistesse una sola manutenzione, ma molte manutenzioni, in relazione al settore di appartenenza: primario ed estrattivo, manifatturiero leggero e pesante (o di processo), edilizia e costruzioni, genio civile (grandi opere), reti di distribuzione, trasporti, servizi, fino ad arrivare di recente ai beni culturali e ambientali e ai beni archeologici.

Infatti, se osserviamo la manutenzione attraverso la lente dell'azione riparatrice, troveremo una infinità di specializzazioni e di qualifiche, le quali ancorché riconducibili a poche e normalizzate del tipo: elettricista, elettronico, meccanico, strumentista, ecc., non sono facilmente riconducibili ad un'unica radice manutentiva, che in effetti per tali azioni rappresenta piuttosto una sovrastruttura.

L'equivoco di confondere la tecnologia adottata con l'area applicativa della manutenzione può portare ad errori molto grossolani. Ad esempio nella scelta del personale, se devo integrare il gruppo dei manutentori meccanici, spesso cerco un esperto meccanico, senza preoccuparmi che conosca adeguatamente i principi della manutenzione, e questo è un errore. Altresì è un errore l'opposto, cioè pensare che un esperto meccanico, che sa eseguire perfettamente interventi di manutenzione meccanica, sia anche un esperto manutentore.

Perché? Proprio perché la manutenzione è una sovrastruttura che durante l'intervento di riparazione si manifesta marginalmente. Manutenzione è tutto quanto è stato fatto prima.

In realtà se prescindiamo dall'azione riparatrice, la quale è legata soprattutto alla tecnologia del sistema interessato dall'intervento, i principi della manutenzione si articolano allo stesso modo in tutti i settori evidenziati. Semmai la differenziazione è legata al tipo di fabbisogno manutentivo generato dai sistemi (domanda di manutenzione), alla loro longevità, alle loro caratteristiche intrinseche i quali determinano diverse alternative, o strategie, di intervento (politiche di manutenzione).

Tutto torna, così, al suo posto. Le convenzioni adottate per definire le basi della manutenzione ed i principi che ne conseguono, hanno un valore generale ed indipendente dal sistema sottostante e dalla tecnologia da esso adottata.

Sotto questo aspetto gran parte della scienza manutentiva è definita oggi in quell'area chiamata ingegneria di manutenzione che, non a caso, negli ultimi venti anni si è arricchita di prerogative, di metodologie, di compiti, di aree di interesse.

L'ingegneria di manutenzione si è sviluppata ed articolata perché in realtà è il luogo dove la maggior parte dei concetti di manutenzione trovano una sintesi.

Cos'è quindi la manutenzione? Di quali aree di competenza si compone?

Un'area della manutenzione è strettamente legata alla progettazione, i cui elementi fondanti sono l'analisi affidabilistica e/o la revisione dei progetti (RAMS) e la manutenibilità come requisito (non come probabilità). Un'area è legata al cosiddetto progetto della manutenzione, ossia, ai metodi di lavoro, ai piani, alle politiche, alle analisi economiche (LCC, ad esempio, nelle alternative di investimento), al budget tecnico/economico, e via. Un'area è legata alla gestione manutentiva e al controllo prestazionale del sistema.

Infine un'area è collegata all'organizzazione, con i modelli manageriali e strategici, con i processi e il sistema informativo.

Se osserviamo la manutenzione usando il paradigma della piramide di Anthony (1965), al top la manutenzione si confonde sempre più con la sostenibilità, incontrando la tutela dell'ambiente (Ferracuti, 1990) e la sicurezza del lavoro e degli impianti. Ma è al centro che troviamo gran parte dell'impianto teorico: dalla teoria dell'affidabilità e della manutenibilità, al controllo delle prestazioni e dei costi, i metodi di indagine sui fabbisogni manutentivi e sulle modalità di guasto, e, soprattutto, la diagnostica tecnica a supporto sia della preventiva, sia della ricerca della causa di avaria. Alla base della piramide ci sono invece le attività operative e gestionali, la contrattualistica, il global service (inteso come strumento operativo) e il facility management, ad esempio.

Nel corpus disciplinare della manutenzione vi sono tre importanti aree di confine: l'area dell'affidabilità, l'area tecnologica e l'area della diagnostica, che si avvalgono di contributi del tutto esterni, se non estranei, alla manutenzione.

In queste aree buona parte dei concetti provengono e sono sviluppati all'esterno della manutenzione, pur trovando nella manutenzione in qualche caso delle importanti specificità, in altri casi essendo semplicemente collaterali ad essa.

Nei paesi anglosassoni, e particolarmente negli Usa, l'area dell'affidabilità è ben distinta dalla manutenzione che è vista soprattutto come mera attività di riparazione e ripristino funzionale dei sistemi (Barringer, 2001-2007). Nell'Europa continentale, sebbene storicamente la teoria dell'affidabilità nei primi anni '40 nasca in Germania come disciplina indipendente, la troviamo naturalmente integrata nella manutenzione fin dal primo congresso EFNMS di Wiesbaden nel 1972 (dove fu formulata la nota "curva a vasca da bagno" per descrivere l'andamento del tasso di guasto nei sistemi complessi). A mio avviso è bene che sia integrata.

L'area tecnologica, dove risiedono i processi di montaggio, smontaggio, sostituzione e/o riparazione dei componenti appartenenti ai sistemi, è in gran parte estranea alla manutenzione, ed è in stretta correlazione con la tecnologia del sistema sottostante.

Il meccanico quando revisiona una pompa non svolge operazioni molto diverse da quando l'ha montata per la prima volta, il muratore quando ripara un intonaco non svolge operazioni molto diverse dalla sua prima stesura, se non in taluni materiali impiegati. Un elettricista/elettronico quando sostituisce componenti guasti in un rack, non svolge un'attività molto diversa da quando ha installato questi dispositivi la prima volta. Tant'è vero che molte aziende fornitrici o produttrici dei sistemi in questione, sempre più tendono ad offrire anche il servizio di manutenzione. Ciò avviene perché possono riutilizzare gran parte delle risorse impiegate nella fase di montaggio ed installazione del sistema nuovo, con il vantaggio di poterli offrire realizzando margini superiori.

Da sempre poi, nelle industrie, gli addetti alla manutenzione sono impiegati nelle attività di realizzazione di nuovi impianti, che comprendono costruzioni, montaggi, installazioni, piccole attività di progettazione, ecc.

D'altro canto, l'intervento di sostituzione di supporti, ruote dentate, cinghie (meccanico) è molto diverso da un intervento di sostituzione dei tubi di una caldaia o di revisione di un bruciatore (termotecnico), dalla riparazione di un PLC o dalla sostituzione di un fine corsa (elettrico/elettronico), al ripristino dell'intonaco di una parete o di un tetto pericolante (edilizio), alla riparazione di una pompa di grandi dimensioni o di un reattore (chimico/petrochimico), alla riparazione di una turbina avio (aeronautico). Infatti i sistemi, macro o micro, indicati fra parentesi possono essere i più disparati.

Nelle attività descritte la quota di competenze manutentive è una minima parte rispetto alla quota di competenze legate al sistema sul quale si interviene. E questa tendenza cresce con l'aumentare della complessità dei sistemi e con il passare degli anni.

La crescente complessità dei sistemi ha portato a semplificare le azioni manutentive, facendo eseguire ai manutentori sempre più sostituzioni di moduli piuttosto che riparazioni. La cosiddetta "black box", si alza costantemente di livello fino a raggiungere la funzione o addirittura il sistema, se molto serializzato ed economico (vedi telefoni cellulari, piccoli motori elettrici, ecc.). Sul piano organizzativo ciò si traduce nel ricercare sempre più la polivalenza del manutentore piuttosto che la specializzazione. Un'esperienza sul sistema, e sulla tecnologia, piuttosto che di mestiere.

Questi cambiamenti sempre più evidenti in tutti i settori hanno accentuato il distacco fra il sapere manutentivo e le azioni manutentive, dove le conoscenze manutentive sono ormai una sovrastruttura.

Come si diceva la manutenzione si fa prima dell'intervento e non durante.

L'uso degli strumenti diagnostici può essere semplice, o anche molto complesso, come in molti dei controlli non distruttivi, al punto da essere eseguito da chimici o da fisici che hanno delle conoscenze generali di manutenzione ma non si possono definire degli specialisti. Essi sono specialisti dei fenomeni fisici, chimici o elettrici che devono analizzare e spesso delle tecnologie a cui appartengono i sistemi sottostanti. Essi sanno indirizzare queste analisi verso l'individuazione di anomalie presenti nella struttura o nel comportamento dei sistemi e dei loro componenti, pervenendo quindi a delle diagnosi.

Il fatto che oggi molta parte del lavoro di analisi sia svolto da computer non semplifica il processo diagnostico, anzi ne moltiplica le potenzialità e quindi sul piano organizzativo, la tendenza verso la specializzazione sarà sempre più accentuata.

Le considerazioni fatte non escludono che una singola persona sia in grado di realizzare interventi manutentivi, avere una buona conoscenza dei principi di manutenzione e conoscere diverse tecniche diagnostiche, ma sono e saranno sempre delle eccezioni, se non altro per motivi efficienziali. La globalizzazione ha riportato un accentuato taylorismo nelle aziende italiane che sono assai restie all'integrazione delle mansioni, alla delega verso il basso e ad altri strumenti che andavano per la maggiore nel decennio precedente.

È un fatto invece che la scienza manutentiva vada depurata da una buona parte di queste "aree di confine" che sono collaterali e molto importanti per la manutenzione, ma non sono manutenzione.

Ciò non toglie che, sul piano commerciale, si possa vedere la manutenzione, come qualsiasi altro servizio, in una matrice "prodotto/mercato" dove si intersecano diversi settori di intervento con diverse tipologie di servizio più o meno specializzato. Ma questa è un'altra storia.

C'è chi dice che i manutentori che operano dentro questa matrice siano più di un milione, qualcuno dice un milione e mezzo di addetti, qualcuno due milioni (se aggiungiamo i servizi alle famiglie e al terziario). Tuttavia se ad essi togliamo le attività che sono erogate come servizi manutentivi ma che non implicano una conoscenza della manutenzione e/o una differenziazione culturale rispetto alla costruzione, alla installazione o al montaggio, gli addetti che sono "interessati" alla manutenzione sono molti ma molti meno.

Se vogliamo fare chiarezza sulla manutenzione dobbiamo organizzare le conoscenze manutentive in modo che formino un corpus disciplinare razionale e coerente, e soprattutto indipendente dai sistemi sottostanti, e questo è l'obiettivo che ci siamo prefissi.

2. DEFINIZIONI DI MANUTENZIONE

Quali definizioni più dettagliate danno le norme tecniche del termine manutenzione ?



Secondo la norma europea UNI EN 13306, la manutenzione è la "combinazione di tutte le azioni tecniche, amministrative e gestionali, eseguite durante il ciclo di vita di un elemento destinate a preservarlo o a riportarlo in uno stato in cui possa eseguire la funzione richiesta".

Manutenzione è quindi un termine generico che si riferisce a una serie di compiti svolti in settori molto diversi fra loro e in tutti i tipi di ambienti di lavoro.

La norma **UNI_11063-2003** fornisce la distinzione fondamentale tra manutenzione ordinaria e straordinaria:

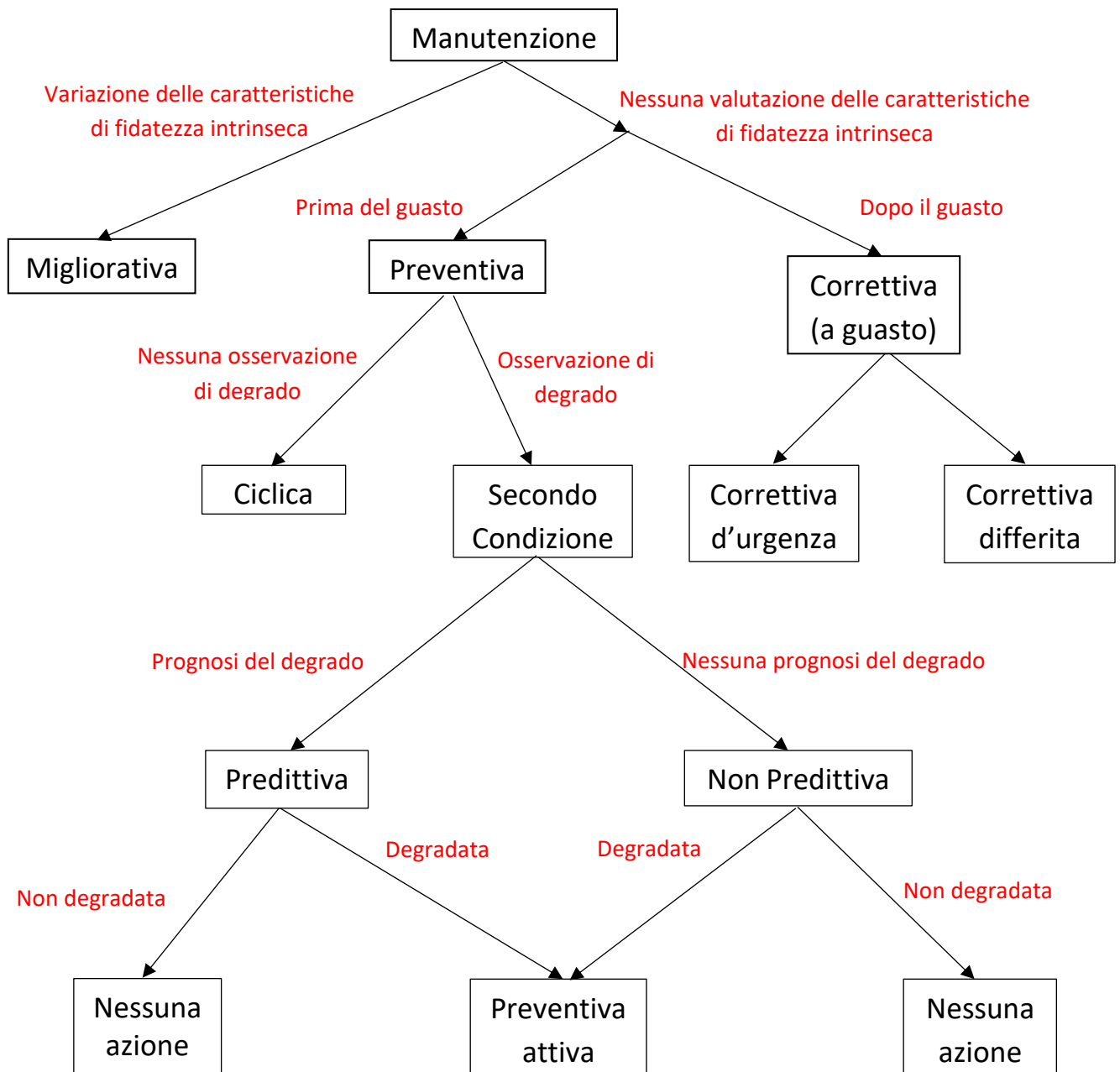
manutenzione ordinaria	manutenzione straordinaria
<p>Tipologia d'interventi manutentivi durante il ciclo di vita, atti a:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ mantenere l'integrità originaria del bene; ✓ mantenere o ripristinare l'efficienza dei beni; ✓ contenere il normale degrado d'uso; ✓ garantire la vita utile del bene; ✓ far fronte ad eventi accidentali. <p>Generalmente gli interventi sono richiesti a seguito di:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ rilevazione di guasti o avarie (manutenzione a guasto o correttiva), ▪ attuazione di politiche manutentive (manutenzione preventiva, ciclica, predittiva secondo condizione), ▪ esigenza di ottimizzare la disponibilità del bene e migliorarne l'efficienza (interventi di miglioramento o di piccola modifica che non comportano incremento del valore patrimoniale del bene). <p>I suddetti interventi non modificano le caratteristiche originarie (dati di targa, dimensionamento, valori costruttivi, ecc.) del bene stesso e non ne modificano la struttura essenziale e la loro destinazione d'uso. [omissis]</p>	<p>Tipologia d'interventi non ricorrenti e d'elevato costo, in confronto al valore di rimpiazzo del bene e ai costi annuali di manutenzione ordinaria dello stesso.</p> <p>Gli interventi inoltre:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ possono prolungare la vita utile e/o, in via subordinata migliorarne l'efficienza, l'affidabilità, la produttività, la manutenibilità e l'ispezionabilità; ✓ non ne modificano le caratteristiche originarie (dati di targa, dimensionamento, valori costruttivi, ecc.) e la struttura essenziale; ✓ non comportano variazioni di destinazioni d'uso del bene. <p>[omissis]</p>

Altre definizioni utili parlando di manutenzione sono:

Miglioramento della fidatezza: Combinazione di tutte le azioni tecniche, amministrative e gestionali previste per migliorare l'affidabilità intrinseca e/o la manutenibilità e/o la sicurezza di una entità senza modificare la funzione originale.

Modernizzazione: Modifica o miglioramento dell'entità, tenendo conto delle innovazioni tecnologiche, per soddisfare requisiti nuovi o modificare.

Un possibile schema che sintetizza i differenti tipi di manutenzione è riportato nella figura sottostante.



3. LE ATTIVITÀ DI MANUTENZIONE

Le attività della manutenzione comprendono:

ispezione e verifica - collaudo – misurazione – sostituzione – regolazione – riparazione – manutenzione – rilevazione - guasti - sostituzione di pezzi - messa a punto – lubrificazione – pulizia – ecc.

La manutenzione è fondamentale per garantire la continuità della produzione, per fabbricare prodotti di alta qualità e mantenere costante il livello di competitività di un'azienda'. Essa, però, incide anche e soprattutto sulla sicurezza e la salute sul lavoro.

Innanzitutto, **una buona manutenzione è essenziale per mantenere macchinari e ambiente di lavoro sicuri e affidabili**. Secondariamente, la manutenzione stessa è **un'attività ad alto rischio e deve essere eseguita in sicurezza**, adottando un'adeguata **protezione per gli addetti alla manutenzione** e per le altre persone presenti sul luogo di lavoro.

Scopo della manutenzione degli impianti e delle macchine è quindi quello di prevenire i guasti al fine di:

1. **RIDURRE I RISCHI DI LAVORO;**
2. **EVITARE FERMI DI PRODUZIONE;**
3. **GARANTIRNE L'EFFICIENZA E L'EFFICACIA ANCHE IN TERMINI ECONOMICI.**

La manutenzione deve prevedere 3 momenti:

- I. **MANUTENZIONE PREVENTIVA:** che consiste nella sostituzione di parti e componenti di macchine e impianti ad intervalli prestabiliti, da norme e/o indicazioni del fabbricante, indipendentemente dallo stato di usura.
- II. **MANUTENZIONE PROGRAMMATA:** che consiste nel controllo ed ispezione per la verifica dello stato di usura dei vari componenti (elettrici e meccanici) anticipando sostituzioni previste nella manutenzione preventiva per ridurre guasti e garantire maggiore efficienza ed efficacia.
- III. **MANUTENZIONE DI EMERGENZA:** per fronteggiare guasti imprevisti.

Una corretta pianificazione della manutenzione oltre a evitare fermi di produzione e quindi limitare i costi dovuti all'interruzione della produzione consente di contenere il costo delle scorte delle parti di ricambio, garantendone sempre la disponibilità spesso non immediata presso i rivenditori di zona.

Per garantire una efficiente ed efficace manutenzione è necessario:

1. Disporre di tutte le informazioni tecniche relative alle macchine ed agli impianti presenti ed in particolare dei "libretti d'uso e manutenzione" previsti dalle normative.
2. Annotare gli interventi di manutenzione effettuati su un apposito "registro" riportando dati e tipologia degli interventi al fine di creare un archivio storico e poter prevedere interventi successivi.
3. Programmare per gli interventi di manutenzione.
4. Affidare la manutenzione a personale qualificato e competente possibilmente con una buona conoscenza storica dell'evoluzione dei processi manutentivi passati.

Poiché la manutenzione nasce dall'esigenza di riparare i **GUASTI** che possono accadere ad un impianto o ad una macchina affronteremo i seguenti argomenti:

- ❖ Definizione di guasto;
- ❖ Distinzione tra guasti sistematici e non sistematici;
- ❖ Analisi dei guasti non sistematici;
- ❖ Tasso di guasto e probabilità di guasto per ora;
- ❖ Guasti potenziali;
- ❖ Analisi dei guasti: Analisi Induttiva (FMECA) – Analisi Deduttiva (FTA) – Analisi dei guasti multipli;

e quindi:

- ❖ Affidabilità dei dispositivi e dei sistemi;

al fine di definire dettagliatamente:

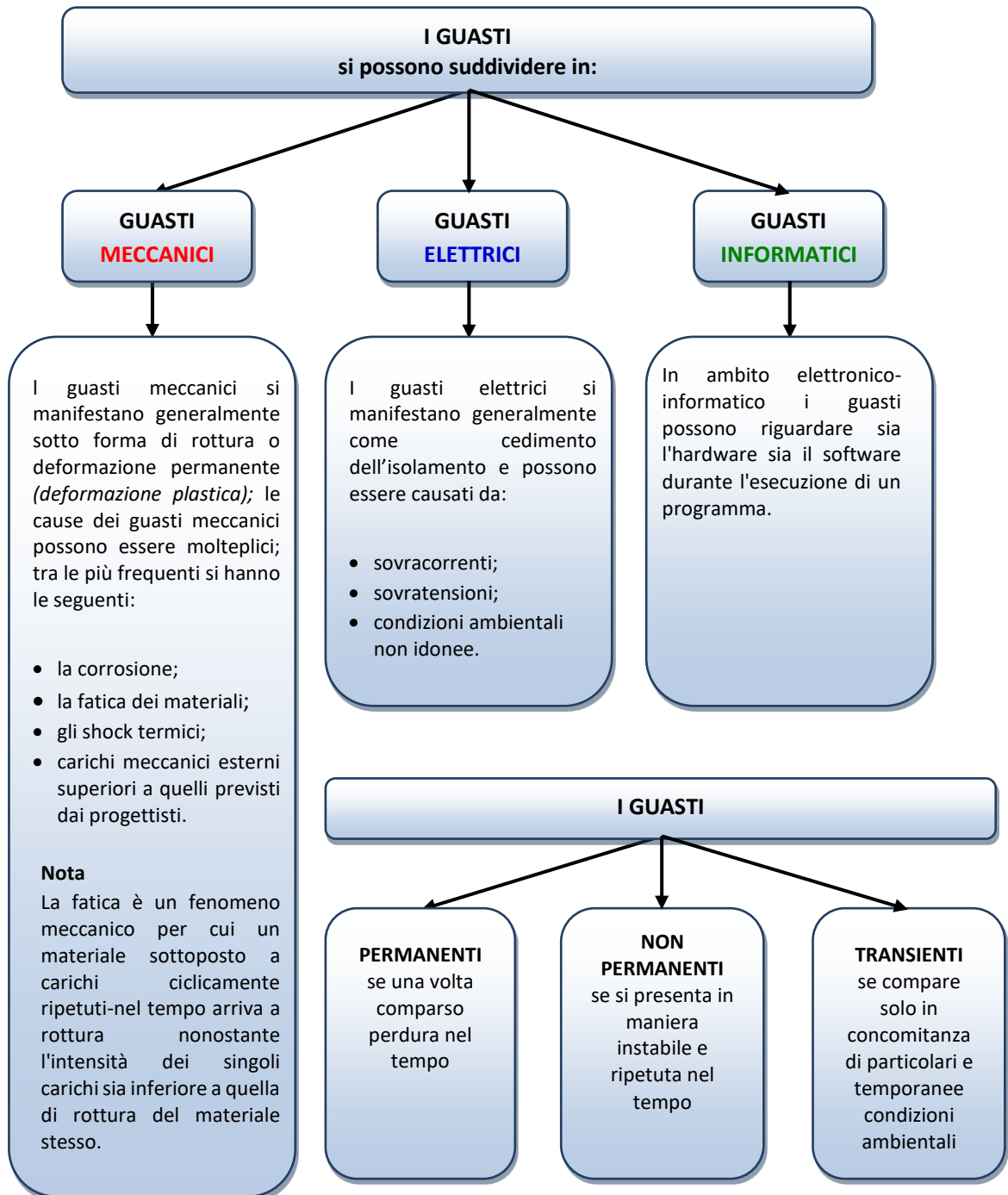
- ❖ Manutenzione e politiche di manutenzione.

4. DEFINIZIONE DI GUASTO

Il **guasto** (in inglese, *failure*) è un evento che consiste nella cessazione dell'attitudine di una entità, (componente, dispositivo, impianto, sistema) a eseguire la funzione richiesta.

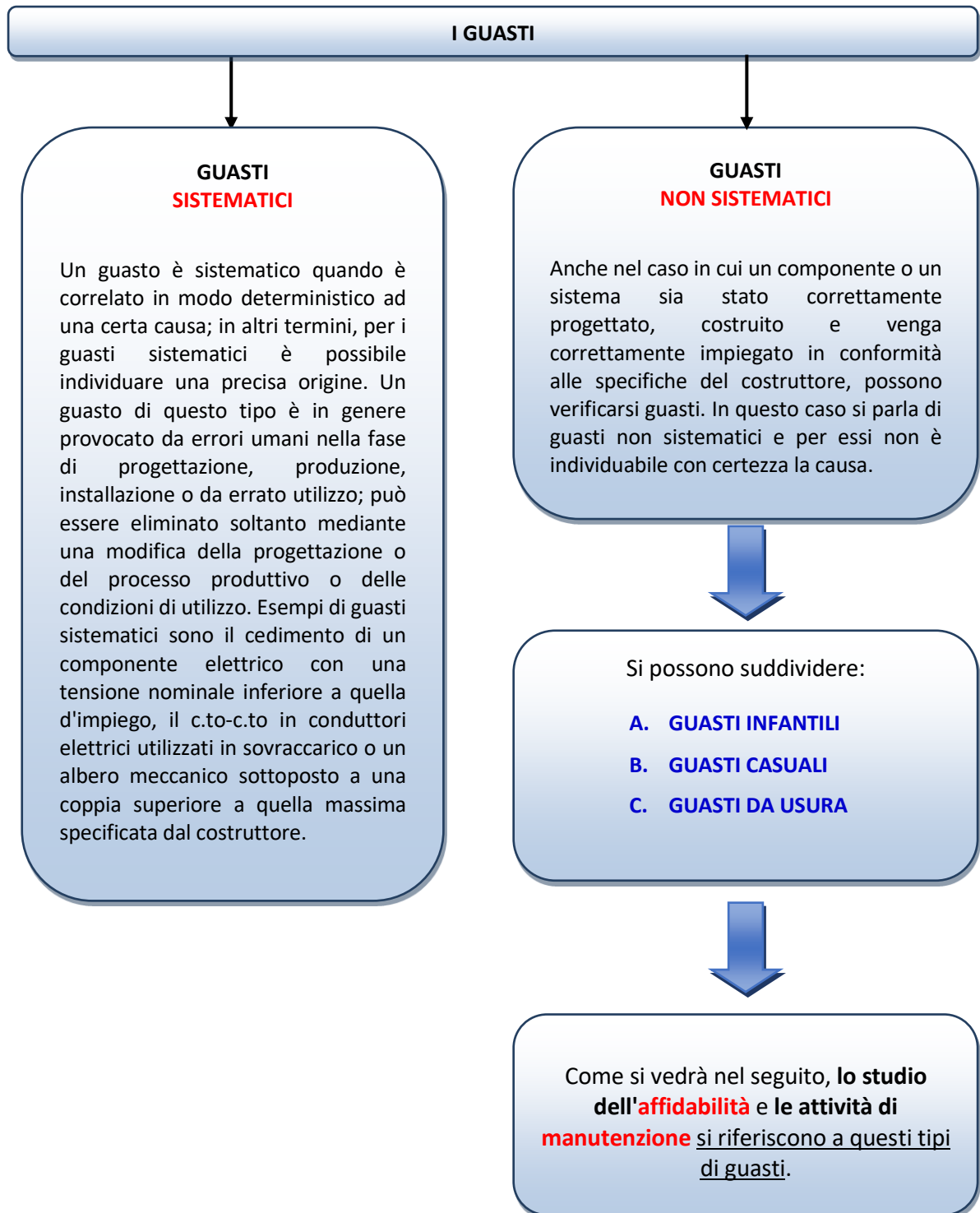
All'origine del guasto è il fatto che ogni entità durante il suo uso, è soggetta a sollecitazioni di varia natura che ne causano il deterioramento e ne riducono la sua resistenza allo stress.

A seconda della tecnologia interessata all'evento i guasti possono essere suddivisi in:



5. GUASTI SISTEMATICI E NON SISTEMATICI

Una distinzione fondamentale riguarda la natura del guasto; si possono avere:



6. DEFINIZIONE DI GUASTO

Se si analizza il comportamento al guasto di apparati o sistemi complessi (ossia sistemi composti da numerosi componenti), oppure di una famiglia costituita da un numero elevato di componenti dello stesso tipo, si è osservato che, nel corso della vita operativa, si verificano guasti di tipo non sistematico suddivisibili nel seguente modo:

- A. guasti infantili;
- B. guasti casuali;
- C. guasti dovuti all'usura.

I **GUASTI INFANTILI** (in inglese, *early failures*) sono caratteristici del primo periodo della vita del sistema o della famiglia di componenti e sono generalmente dovuti a difetti occulti di fabbricazione, errori di assemblaggio o aggiustaggio. In questa fase i guasti sono relativamente numerosi, ma tendono a calare con il trascorrere del tempo.

In campo meccanico, i guasti infantili vengono eliminati mediante un opportuno rodaggio. Durante il rodaggio il componente o il sistema viene fatto funzionare per un certo numero di ore in condizioni simulanti l'impiego. Terminato il rodaggio, eliminati o sostituiti tutti i componenti difettosi, si passa all'effettivo utilizzo.

In campo elettrico-elettronico, i produttori di componenti di alta qualità eseguono dei *burn-in test*, realizzati sottoponendo i componenti a cicli termici opportuni, realizzati in camere climatiche e sottoponendo i componenti anche a opportune prove di tensione. Una corretta progettazione e la gestione in qualità dei processi produttivi può drasticamente ridurre il numero dei guasti infantili.



Dopo la fase dei guasti infantili si passa a quella dei **GUASTI CASUALI** (in inglese, *stress-related failures*), che avvengono durante l'utilizzo ordinario del sistema o dei componenti e sono dovuti a cause aleatorie che provocano l'applicazione all'elemento soggetto al guasto, di sollecitazioni che superano la resistenza di progetto. In questa fase i guasti sono relativamente scarsi.

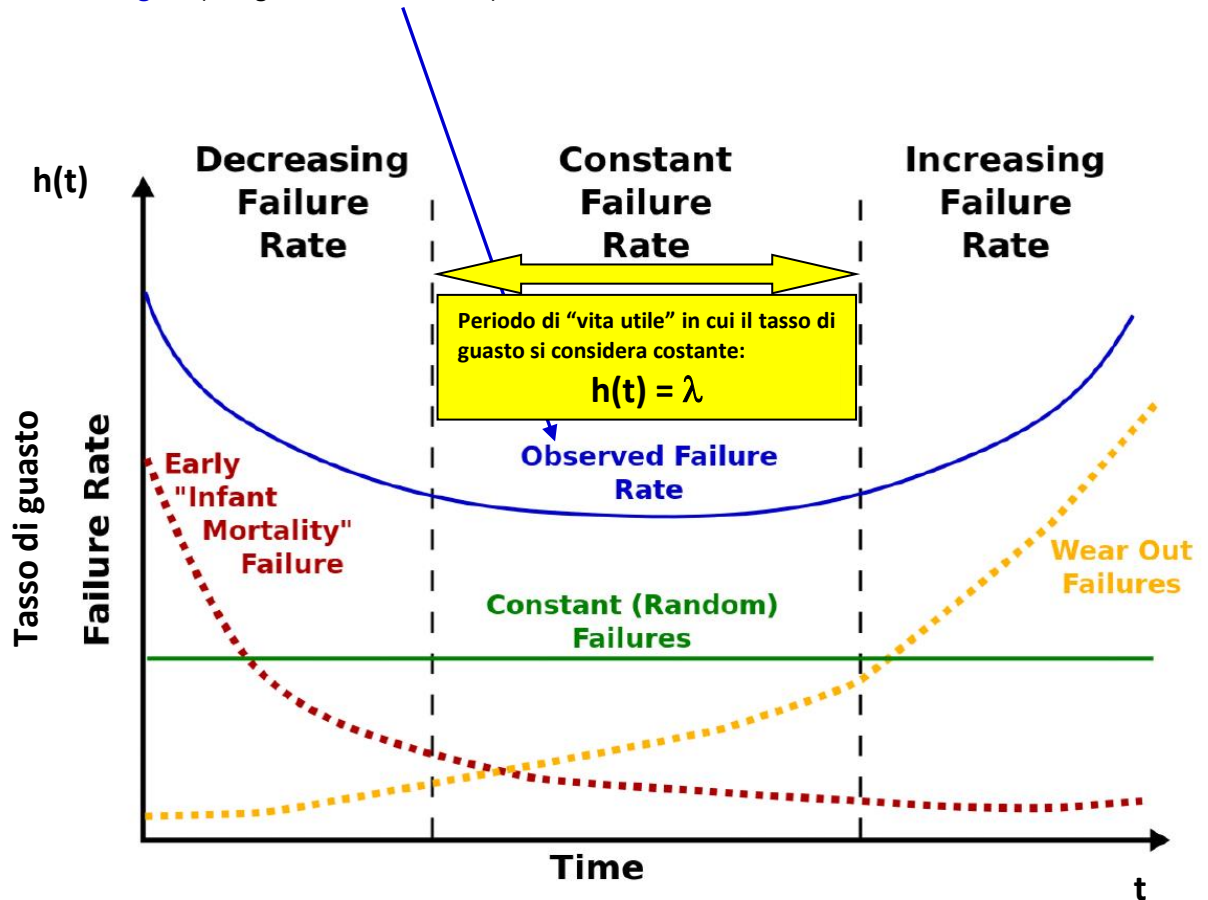
L'intervallo di tempo in cui il sistema o i componenti rientrano nella fase dei guasti casuali è detto **vita utile** del sistema o componente. La vita utile può essere espressa:

- in *ore di funzionamento* per dispositivi ai quali è applicata una sollecitazione in modo continuo (ad esempio, una lampada);
- in *numero di cicli* (migliaia o milioni) per componenti soggetti a sollecitazioni di tipo ciclico, come avviene per molti componenti elettromeccanici o pneumatici (contattori, relè, interruttori di posizione, valvole pneumatiche ecc.). In questo caso i costruttori spesso forniscono la vita utile mediante il **parametro B10** che rappresenta il numero di cicli dopo il quale il 10% dei componenti si è guastato; conoscendo il numero di cicli orari di utilizzo è possibile ricavare la vita utile in ore.



Successivamente, si passa alla fase dei **GUASTI D'USURA** (in inglese, *wear out failures*) che avvengono a causa del progressivo invecchiamento dei componenti determinato dai processi di naturale degradazione chimico-fisica dei materiali. In questa fase i guasti tendono a diventare più frequenti. I guasti d'usura possono essere causati anche da una mancata manutenzione.

Il complesso dei guasti descritto può essere visualizzato mediante il seguente un grafico detto "a vasca da bagno" (in inglese, bath tub curve).



Sull'asse delle ascisse è riportato il tempo (**Time**) operativo a partire dall'istante di messa in servizio del sistema; il tempo è solitamente espresso in ore [h];

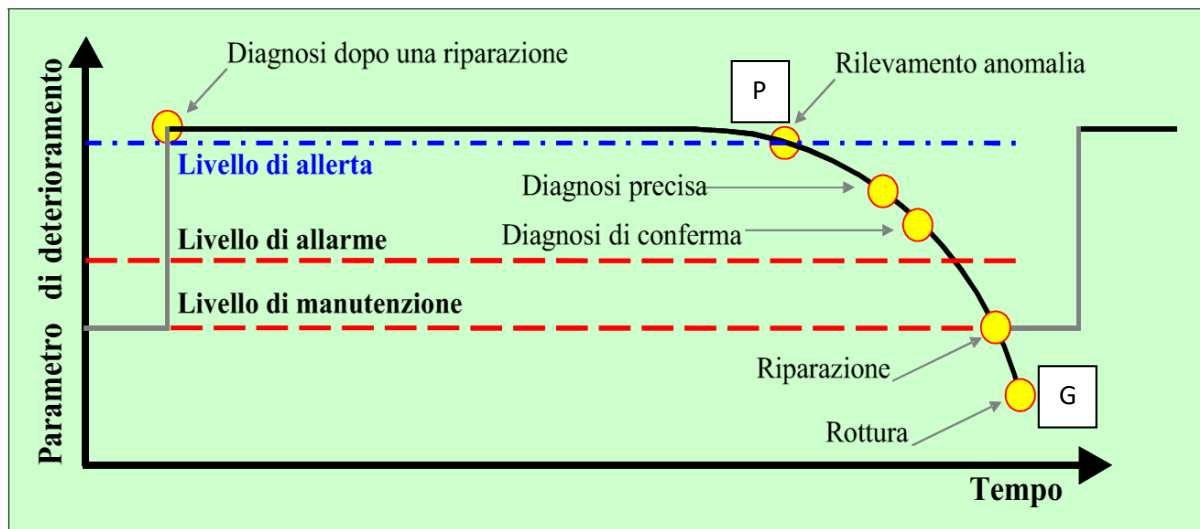
Sull'asse delle ordinate è riportato il **tasso di guasto (Failure Rate)** cioè il rapporto tra il numero di oggetti guasti dopo un tempo t e il numero di quelli che non hanno presentato il guasto. Il tasso di guasto è quindi una funzione dipendente dal tempo ed è indicata generalmente con $h(t)$.

È essenziale comprendere che la curva descritta è di natura statistica e non consente di prevedere con esattezza la comparsa di un guasto in un singolo componente, ma soltanto di prevedere la probabilità dell'effettivo verificarsi del guasto stesso.

7. GUASTI POTENZIALI

In condizioni di funzionamento non corretto, svariate entità (componenti di macchine, impianti, motori ecc.) emettono dei segnali, detti **segnali deboli**, sotto forma di emissioni di varia natura (onde acustiche e vibrazioni, calore, perdite di fluidi refrigeranti o lubrificanti, perdite di prodotto).

Il **segnale debole inviato dall'entità prima della sua rottura è detto guasto potenziale**; la fase finale del deterioramento è rappresentata da una **curva PG** (si veda figura seguente)



dove:

P = punto di guasto potenziale;

G = guasto.

Come si nota dalla figura, il processo di invecchiamento accelera nello stadio finale dell'intervallo PG.

Le logiche per la definizione delle politiche di manutenzione devono essere arricchite dalla considerazione dell'esistenza o meno di segnali deboli, cioè dalla possibilità che il progredire del potenziale guasto mostri o meno dei "segnali" in qualche modo percepibili o misurabili.

In caso affermativo, verificata la fattibilità del controllo, si attiva il monitoraggio del segnale debole per conoscerne l'andamento temporale ed eseguire l'intervento manutentivo nel momento più opportuno, realizzando la situazione tipica della manutenzione su condizione e predittiva.

8. ANALISI DELLA AFFIDABILITÀ DEI SISTEMI

Affidabilità

Supponiamo di testare varie volte, a partire dal tempo $t=0$ un numero N di componenti identici e di verificare al termine delle prove, all'istante t , che N_g componenti si sono guastati mentre $N_f = N - N_g$ siano ancora funzionanti.

Definiamo **affidabilità** del componente al tempo T :

$$R(t) = \frac{N_f(t)}{N}$$

e quindi definiamo **inaffidabilità**:

$$F(t) = \frac{N_g(t)}{N} = \frac{N - N_f(t)}{N} = 1 - R(t)$$

È evidente che i valori assunti da $R(t)$ sono sempre compresi tra 0 (in forma percentuale: 0% = totale inaffidabilità) e 1 (in forma percentuale: 100% = totale affidabilità).

Inoltre, dal momento che $R(t)$ è una funzione del tempo, quando si fornisce l'affidabilità di una entità occorre sempre specificare a quale momento della vita operativa del dispositivo è riferita.

Esempio:

Se un componente ha una affidabilità di 0,75 a 10000 ore (in forma abbreviata: $R(10000)=0,75$), significa che il 75% dei componenti sarà ancora funzionante dopo 10000 ore; detto in altro modo, dopo 10000 h si ha una probabilità del 75% di trovare un singolo componente funzionante.

Densità di probabilità di guasto

Prende il nome di **densità di probabilità di guasto (o frequenza di guasto)** la funzione $f(t)$ la relazione:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \equiv F'(t) \quad [h^{-1}]$$

quindi:

$$f(t) = \frac{1}{N} \frac{dN_g(t)}{dt} = \frac{1}{N} \frac{d(N - N_f)}{dt} = \frac{1}{N} \left(0 - \frac{dN_f}{dt} \right) = -\frac{dR(t)}{dt} \equiv -R'(t)$$

Essendo:

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt$$

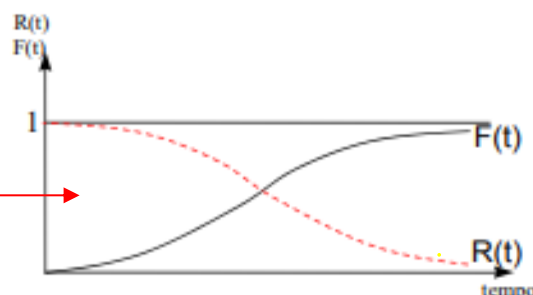
si ha anche che:

$$R(t) = 1 - F(t)$$

e quindi:

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = \int_t^\infty f(t) dt$$

L'area sottesa dalla curva $R(t)$ è
il Tempo Medio di Guasto
(MTTF)



Tasso di guasto

Prende il nome di **tasso di guasto** la funzione $h(t)$ che definisce la probabilità che un componente, che al tempo t sia funzionante, si guasti in un intervallo di tempo compreso tra t e $t+dt$.

$$h(t) = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} \equiv -\frac{R'(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}$$

e si ha inoltre che:

$$f(t) = h(t) \cdot R(t)$$

Il tasso di guasto è “il numero di guasti nell’unità di tempo” cioè la velocità con la quale si verifica il guasto di un determinato componente.

Noi studieremo i sistemi con tasso di guasto costante cioè con:

$$h(t) = \lambda$$

Differenza tra $f(t)$ e $h(t)$

$f(t)$: fa riferimento ad un insieme di componenti tutti funzionanti all’istante $t=0$.

$h(t)$: fa riferimento ad un sotto-insieme di componenti funzionanti all’istante $t>0$.

Analisi con intervalli di tempo discreti: $\Delta t = t_f - t_i$

$$\text{Affidabilità: } R(t_i) = \left[\frac{N_f(t_i)}{N} \right] \quad R(t_f) = \left[\frac{N_f(t_f)}{N} \right]$$

$$\text{Inaffidabilità: } F(t_i) = \left[\frac{N_g(t_i)}{N} \right] = 1 - R(t_i) \quad F(t_f) = \left[\frac{N_g(t_f)}{N} \right] = 1 - R(t_f)$$

$$\text{Densità di guasto: } f(\Delta t) = \left[\frac{N_g(\Delta t)}{N} \right] / \Delta t = [R(t_i) - R(t_f)] / \Delta t$$

$$\text{Tasso di guasto: } h(\Delta t) = \left[\frac{N_g(\Delta t)}{N_f(t_i)} \right] / \Delta t = f(\Delta t) / R(t_i)$$

Esempio:



Dopo un test su 16 lampadine sono stati ricavati i seguenti dati:

- Nelle prime 1000 ore si sono guastate 2 lampadine;
- Nell'intervallo tra 1000 e 2000 ore si sono guastate 3 lampadine;
- Nell'intervallo tra 2000 e 3000 ore si sono guastate 4 lampadine;
- Nell'intervallo tra 3000 e 4000 ore si sono guastate 3 lampadine;
- Nell'intervallo tra 4000 e 5000 ore si sono guastate 3 lampadine;
- Nell'intervallo tra 5000 e 6000 ore si è guastata 1 lampadina.

Ricaviamo $f(t)$, $h(t)$ nell'intervallo tra 2000 e 3000 ore ed $R(t)$ a 2000 ore.

Soluzione:

$$\Delta t = t_f - t_i$$

con

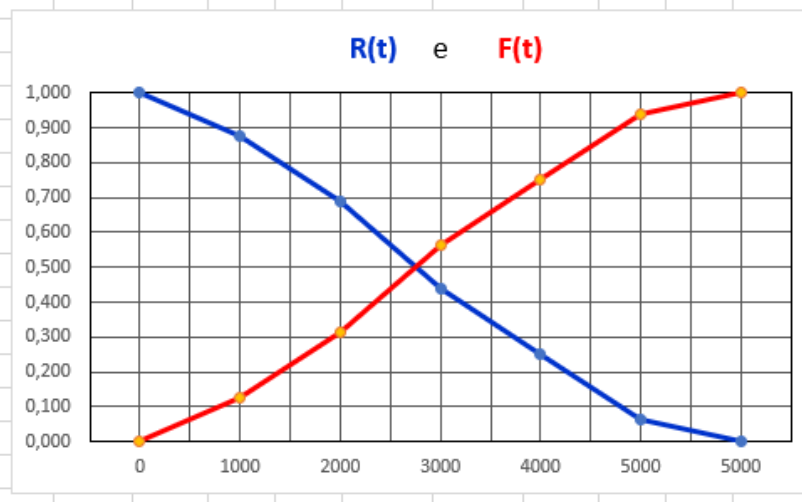
$$t_f = 3000 \quad t_i = 2000 \quad \Delta t = 3000 - 2000 = 1000$$

$$R(2000) = \left(\frac{N_f(2000)}{N} \right) = \left(\frac{11}{16} \right) = 0,6885$$

$$f(\Delta t) = \left(\frac{N_g(\Delta t)}{N} \right) / \Delta t = \left(\frac{4}{16} \right) / 1000 = 0,00025$$

$$h(\Delta t) = \left(\frac{N_g(\Delta t)}{N_f(t_i)} \right) / \Delta t = \left(\frac{4}{16 - 5} \right) / 1000 = 0,00036$$

N =	16	t_i	N_{g_i}	N_{f_i}	$R(t_i)$	$F(t_i)$	t_f	N_{g_f}	N_{f_f}	$R(t_f)$
		0	0	16	1,000	0,000	1000	2	14	0,875
		1000	2	14	0,875	0,125	2000	5	11	0,688
		2000	5	11	0,688	0,313	3000	9	7	0,438
		3000	9	7	0,438	0,563	4000	12	4	0,250
		4000	12	4	0,250	0,750	5000	15	1	0,063
		5000	15	1	0,063	0,938	6000	16	0	0,000
		5000	16	0	0,000	1,000				



Tempo medio di guasto (MTTF)

Prende il nome di **tempo medio di guasto (MTTF)**:

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

L'**MTTF** (acronimo dall'inglese Mean Time To Failure) rappresenta il **tempo medio di funzionamento** atteso, prima che si verifichi il guasto.

L'MTTF è espresso in ore o anni (attenzione a non confondere l'MTTF con la durata di vita del dispositivo!).

Per convertire in ore il dato espresso in anni è sufficiente moltiplicare il valore dato per 8760, pari al numero di ore in un anno.

Maggiore è il valore di MTTF, maggiore è l'affidabilità del dispositivo.

Si tratta di un parametro particolarmente adatto a descrivere l'affidabilità di dispositivi non riparabili e costruiti in serie.

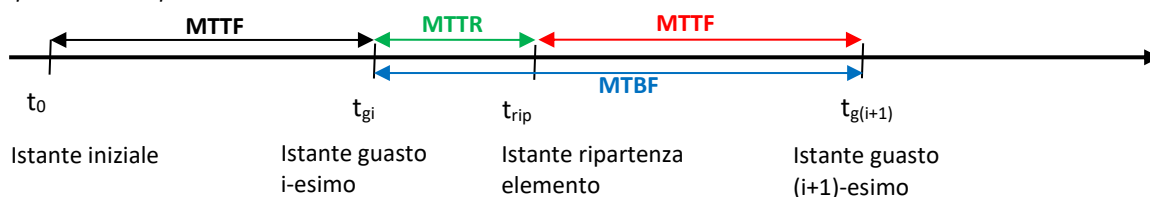
Altri parametri di interesse

Nel caso di apparati o sistemi riparabili (di tecnologia meccanica, elettrica ed elettronica e anche in applicazioni software), si utilizzano i seguenti parametri:

- **MTTR** (Mean Time To Repair): rappresenta il **tempo medio al ripristino** e rappresenta l'intervallo di tempo durante il quale l'apparato o sistema è in uno stato di indisponibilità a causa di un guasto; è un parametro utile per valutare l'efficacia del servizio di manutenzione;
- **MTBF** (Mean Time Between Failures) che rappresenta il **tempo tra un guasto e il successivo**; è dato dalla somma di MTTF e MTTR.

$$MTBF = MTTF + MTTR$$

MTBF coincide (praticamente) con MTTF quando MTTR è trascurabile rispetto a MTTF cosa che si verifica in presenza di sistemi altamente affidabili (quindi con MTTF molto elevato), di sistemi riparabili rapidamente oppure nel caso di componenti non riparabili.



Valori tipici per alcuni componenti utilizzati nei sistemi di comando e controllo sono riportati nella tabella seguente.

Valori di MTTF per alcuni componenti elettrici-elettronici (da norma ISO 13849-1).

Componenti	MTTF [anni]
Transistor bipolare di potenza	5708
FET	22831
Diodo raddrizzatore	57078
Ponti raddrizzatori	11415
Tiristori	2283
Triac	1484
Condensatore elettrolitico (elettrolita solido)	37671
Potenzimetro	3767
Trasformatore a frequenza industriale	11415

Nel caso di dispositivi pneumatici o elettromeccanici (quali contattori, relè, interruttori di posizione, valvole pneumatiche ecc.) λ dipende dalla vita utile (espressa in numero di cicli) e dalla frequenza di utilizzo. Si può utilizzare la seguente formula:

$$\lambda = 0,1 \cdot \frac{C}{B_{10}}$$

dove:

λ = tasso di guasto del dispositivo elettromeccanico;

C = cicli di funzionamento per unità di tempo;

B_{10} = numero di cicli dopo il quale il 10% dei componenti si è guastato.

Esempio



Il costruttore di un interruttore di posizione (finecorsa) dichiara un valore di $B_{10} = 10^7$ cicli.

L'interruttore di posizione è installato in una macchina che lavora per 16 ore al giorno per 220 giorni di funzionamento all'anno per complessive 3520 ore/anno con un azionamento ogni 5 sec corrispondente a 720 azionamenti/ora; conseguentemente, in un anno, il dispositivo è utilizzato per un numero di cicli C pari a:

$$C = 3520 \cdot 720 = 2534400 = 2,5 \cdot 10^6 \text{ cicli}$$

La vita utile T [anni] del componente risulta dalla formula: $T = \frac{B_{10}}{C} = \frac{10^7}{2,5 \cdot 10^6} = 4 \text{ anni}$

quindi: $\lambda = 0,1 \cdot \frac{C}{B_{10}} = 0,1 \cdot \frac{2,5 \cdot 10^6}{10^7} = 2,5 \cdot 10^{-2} = 0,025 \text{ anni}$

ne consegue che: $MTTF = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0,025} = 40 \text{ anni}$

Si noti che questo dato indica l'affidabilità, mentre bisogna comunque tenere conto del limite di vita utile per cui l'utilizzo dell'interruttore di posizione non deve superare i 40 anni, trascorsi i quali deve essere sostituito in quanto entrerebbe nella fase dei guasti d'usura. Naturalmente un cambio dei cicli orari di lavorazione o del numero delle ore giornaliere lavorate avrebbe l'effetto di cambiare sia MTTF sia la vita utile del componente.

N.B.

1 giorno = 24 h

1 mese = 30 gg = 720 h

1 anno = 12 mesi = 360 gg = 8640 h

Esempio



Dopo aver calcolato gli indicatori di affidabilità MTTR, MTTF e MTBF di un sistema meccanico durante il periodo di vita utile avendo a disposizione i seguenti dati:

- | | |
|---|-------------------------------|
| ▪ il sistema è stato fermo per guasto e riparazione per 5 ore | poi ha funzionato per 40 ore; |
| ▪ il sistema è stato fermo per guasto e riparazione per 3 ore | poi ha funzionato per 30 ore; |
| ▪ il sistema è stato fermo per guasto e riparazione per 1 ora | poi ha funzionato per 10 ore; |
| ▪ il sistema è stato fermo per guasto e riparazione per 2 ore | poi ha funzionato per 20 ore; |

determinare dopo quanto tempo il sistema avrà una affidabilità del 90 %.

Soluzione:

Calcolo del tempo medio di ripristino: $MTTR = \frac{5+3+1+2}{4} = \frac{11}{4} = 2,75 \text{ h}$

Calcolo del tempo medio di funzionamento: $MTTF = \frac{40+30+10+20}{4} = \frac{100}{4} = 25 \text{ h}$

Calcolo del tempo medio tra un guasto e il successivo: $MTBF = MTTR + MTTF = 2,75 + 25 = 27,75 \text{ h}$

Calcolo il tasso di guasto: $\lambda = \frac{1}{MTTF} = \frac{1}{25} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ h}^{-1}$

Quindi:

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

$$0,9 = e^{-4 \cdot 10^{-2} t}$$

da cui:

$$\ln 0,9 = -4 \cdot 10^{-2} t$$

$$t = \frac{\ln 0,9}{-4 \cdot 10^{-2}}$$

L'affidabilità si riduce al 90% dopo un tempo t pari a: $t \cong 2,634 \text{ h}$

Sistemi con tasso di guasto costante

Molti sistemi presentano un tasso di guasto costante cioè $h(t) = \text{costante}$.

Abbiamo anche già osservato, dal grafico a “vasca da bagno”, che nella fase dei guasti casuali il tasso di guasto è pressoché costante.

Il tasso di guasto può essere calcolato semplicemente calcolando il MTTF (come precedentemente visto) ed invertendo quindi tale valore essendo:

$$\lambda = \frac{1}{MTTF}$$

Per il calcolo si veda anche il successivo esercizio n.1.

Quando il tasso di guasto è costante (cioè $h(t) = \text{costante} = \lambda$) valgono le regole di seguito riportate:

Quando $\lambda = \text{costante}$ allora si ha:

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

dove $e \cong 2,718$ (è un numero irrazionale detto “numero di Nepero”)

e si ha:

1) **affidabilità** fino all'istante t : $R(t) = e^{-\lambda t}$ che rappresenta la probabilità di sopravvivenza all'istante t

2) **inaffidabilità** fino all'istante t : $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ che rappresenta la probabilità di guasto all'istante t

3) **MTTF**: $MTTF = \frac{1}{\lambda}$ che rappresenta il tempo medio atteso di funzionamento.

Esercizio 1



Si consideri un gruppo di 30 motori elettrici identici e funzionanti (nella fase dei guasti casuali); se in un intervallo di funzionamento di 1000 h, si verificano 4 guasti (rispettivamente dopo 500, 650, 800, 950 h (e di conseguenza alla fine sono rimasti 26 motori funzionanti), si può calcolare il tasso di guasto λ nel seguente modo:

$$\lambda = \frac{4}{500+650+800+950+26 \cdot 1000} = \frac{4}{28900} = 1,38 \cdot 10^{-4} \text{ [h}^{-1}\text{]}$$

Che equivale a dire che si ha 1 guasto ogni 7246,37 ore:

$$MTTF = \frac{1}{1,38 \cdot 10^{-4}} = \frac{10000}{1,38} = 7246,37 \text{ [h]}$$

Come si è visto l'unità di misura del tasso di guasto è il reciproco dell'ora h^{-1} ; in ambito elettrico-elettronico questo parametro assume valori numerici molto piccoli e per questo motivo è stata definita un'unità di misura chiamata **FIT** che indica **1 guasto ogni miliardo di ore di funzionamento**.

$$1FIT = 10^{-9} \text{ [h}^{-1}\text{]}$$

Esercizio



Un microprocessore ha un $\lambda = 500 \text{ FIT}$: ciò significa che statisticamente, considerati due milioni di processori funzionanti, per ogni ora di funzionamento si verifica un guasto ($10^9 / 500 = 2.000.000$)

Esercizio 3



Si consideri un componente con le seguenti caratteristiche dichiarate dal costruttore:

- vita utile = 1000 [h]
- $\lambda = 10^{-4} \text{ [h}^{-1}\text{]}$

L'affidabilità del componente per un utilizzo di 10 ore vale:

$$R(10) = e^{-0,0001 \cdot 10} = e^{-0,001} = 0,999 = 99,9 \text{ \%}$$

Ripetendo il calcolo per un periodo di 500 ore, si trova che l'affidabilità scende al 95%.

Infine, per 1000 ore, ovvero se si considera l'intera vita utile, l'affidabilità vale 90%.

Occorre però notare come il tasso di guasto rimane sempre costante e quindi non varia se si considerano le prime in ore di funzionamento o le ultime 10.

Così, se l'apparecchio è sopravvissuto per 990 ore, allora la sua affidabilità durante le ultime 10 ore di funzionamento vale ancora 99,9%.

OSSERVAZIONI:

1. Osserviamo che l'affidabilità dopo un tempo pari al MTTF è:

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

essendo

$$MTTF = 1/\lambda$$

allora:

$$R(MTTF) = e^{-\lambda \cdot \frac{1}{\lambda}} = e^{-1} = 0,368$$

Ciò significa che **l'affidabilità dopo un tempo pari al tempo medio di funzionamento (MTTF) è pari a 0,368 cioè è ridotta al 36,8 % (circa 1/3 dell'affidabilità iniziale).**

2. Si può anche evidenziare che quando l'affidabilità si è ridotta al 50 % cioè $R(t) = 0,5$ allora è trascorso un tempo t (definito t_{med}) determinato dalla seguente espressione:

$$0,5 = e^{-\lambda \cdot t_{med}}$$

$$\ln 0,5 = -\lambda \cdot t_{med}$$

essendo

$$\lambda = \frac{1}{MTTF}$$

si ottiene:

$$\ln(0,5) = -\frac{1}{MTTF} \cdot t_{med}$$

$$t_{med} = -MTTF \cdot \ln(0,5)$$

$$t_{med} = 0,693 \cdot MTTF$$

Ciò indica che **a circa il 70% del tempo medio di funzionamento l'affidabilità si è dimezzata** [$R(t)=0,5$].

3. **Le parti meccaniche (in assenza di dati del costruttore) vengono considerate con MTTF= 150 anni.**

Sistemi in serie e in parallelo

Si immagini ora di voler calcolare l'affidabilità di un sistema costituito da più dispositivi per i quali sia individualmente nota l'affidabilità (in termini di MTTF): l'affidabilità complessiva dipende, oltre che da quella dei singoli componenti, anche dal modo in cui gli stessi sono operativamente collegati.

Al riguardo le due configurazioni fondamentali sono:

- A. **configurazione serie** (fig. A), nella quale il guasto di uno qualunque dei dispositivi provoca la perdita di funzionalità di tutto il sistema;
- B. **configurazione parallelo** (fig. B), nella quale solo il guasto di tutti i componenti determina la perdita di funzionalità di tutto il sistema. Occorre precisare che, per questa configurazione, è fondamentale che i guasti ai vari componenti si producano indipendentemente uno dall'altro (guasti indipendenti). Qualora questo non si verifichi si parla di guasti per cause comuni (*indicate con l'acronimo CCF dall'inglese, Common Cause Failures*) e le considerazioni relative alla configurazione parallelo vanno modificate (un esempio tipico di guasto per cause comuni potrebbe essere rappresentato, nel caso di componenti elettronici, da una sovratensione, provocata da un fulmine, che distrugge tutti i componenti).



fig. A

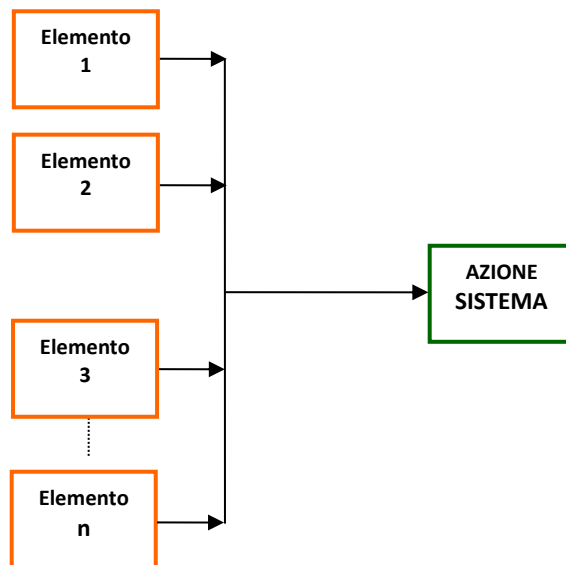
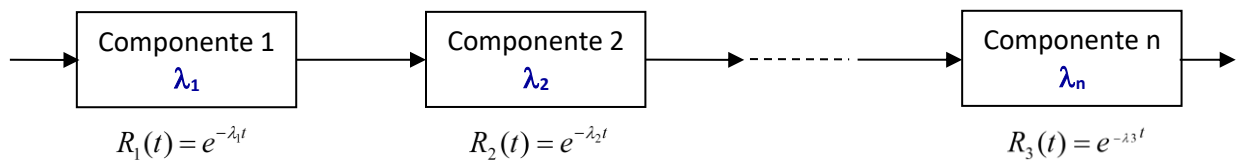


fig. B

Affidabilità di sistemi in serie

Nel caso di componenti in serie tutti con tasso di guasto costante:



L'affidabilità complessiva del sistema è:

$$R_{serie}(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t)$$

che equivale a:

$$R_{serie}(t) = e^{-\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right) \cdot t}$$

Definita λ_{serie} :

$$\lambda_{serie}(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

allora:

$$R_{serie}(t) = e^{-\lambda_{serie} \cdot t} \quad \text{affidabilità dell'intero sistema}$$

e si ha:

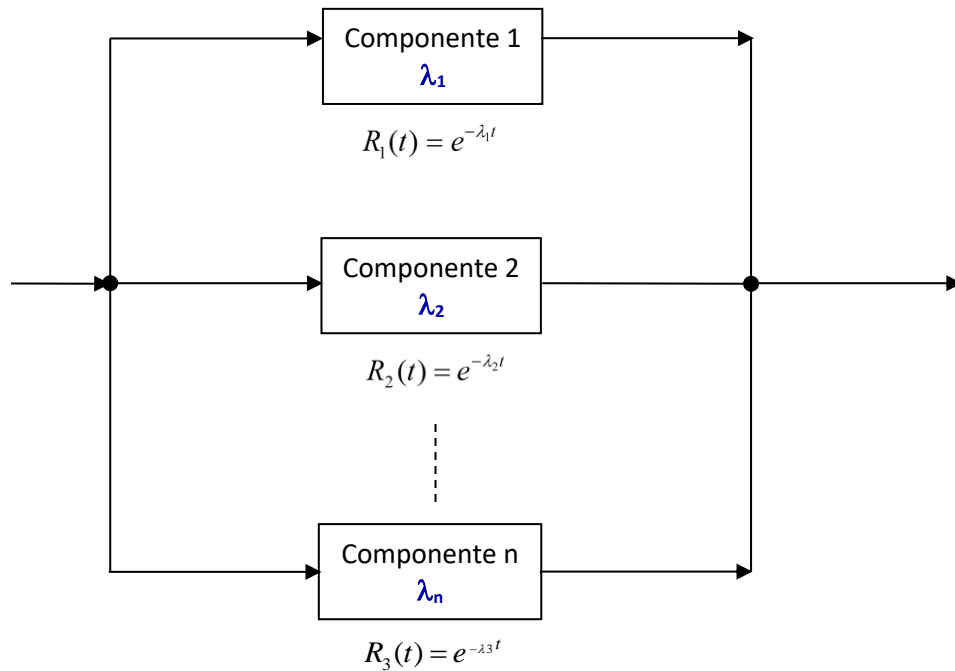
$$MTTF_{serie} = \frac{1}{\lambda_{serie}} \quad \text{tempo medio di guasto dell'intero sistema (pari alla somma dei MTTF dei vari componenti)}$$

OSS.

- L'affidabilità dell'intero sistema serie migliora di più intervenendo sul componente meno affidabile.

Affidabilità di sistemi in parallelo (sistemi ridondanti attivi)

Nel caso di componenti in parallelo, tutti funzionanti contemporaneamente ma tali che il sistema possa funzionare anche se uno solo non si guasta (detta “*ridondanza attiva*”), e tutti i componenti con tasso di guasto costante allora:



L'affidabilità complessiva del sistema è:

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

Mentre l'inaffidabilità è il prodotto delle singole inaffidabilità e quindi vale:

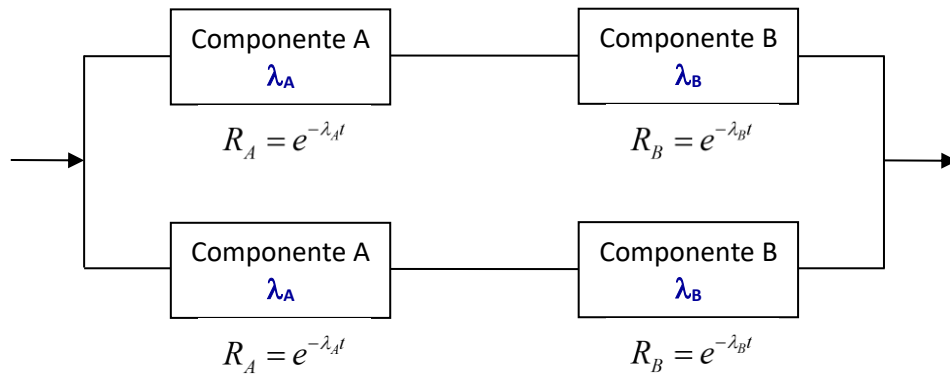
$$F_{parallela}(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t)$$

OSS.

- L'affidabilità dell'intero sistema parallelo migliora di più intervenendo sul componente più affidabile.
- In questi sistemi la funzionalità è garantita se anche un solo componente è funzionante.

Sistemi complessi – SERIE –PARALLELO (sp)

Schematicamente:



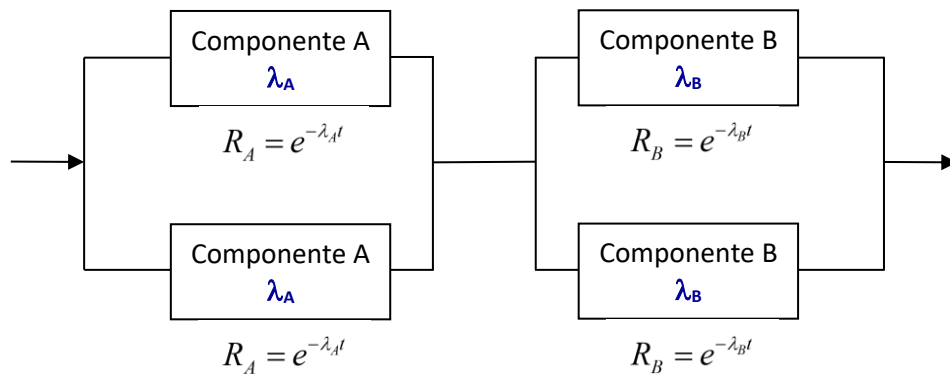
L'affidabilità complessiva del sistema è:

$$R_{sp} = 1 - [(1 - R_A R_B) \cdot (1 - R_A R_B)]$$

$$R_{sp} = R_A R_B (2 - R_A R_B)$$

Sistemi complessi – PARALLELO –SERIE (ps)

Schematicamente:



L'affidabilità complessiva del sistema è:

$$R_{ps} = [1 - (1 - R_A) \cdot (1 - R_A)] \cdot [1 - (1 - R_B) \cdot (1 - R_B)]$$

$$R_{ps} = R_A R_B [4 - 2(R_A + R_B) + R_A R_B]$$

Si può dimostrare che $R_{ps} > R_{sp}$ il che significa che la ridondanza “per componenti” è più favorevole di quella “per linea”.

Sistemi K out of n (sistemi ridondanti attivi)

Sono tipologie di sistemi con **n** componenti in parallelo sempre attivi la funzionalità del sistema è comunque garantita solo se almeno **k** componenti degli **n** posti in parallelo sono funzionanti (ovviamente **k ≤ n**).

Questi sistemi vengono indicati con la notazione:

k out of n

Si evidenzia che:

- 1) Se **K = 1** ed **n > 1** allora il sistema è “pienamente” di tipo ridondante e si ricade nell’analisi dei sistemi paralleli già esaminati
- 2) Se **K = n** allora il sistema è di tipo serie e si ricade nell’analisi dei sistemi già esaminati.

Se tutti i componenti del sistema (**k out of n**) sono identici e hanno lo stesso **tasso di guasto costante λ** e quindi la stessa affidabilità **R(t)** allora:

$$R_{K_out-of_n} = \sum_{x=k}^n \binom{n}{x} \cdot R(t)^x \cdot [1 - R(t)]^{n-x}$$

e

$$MTTF_{k_out-of_n} = \frac{1}{\lambda} \cdot \sum_{x=k}^n \frac{1}{x}$$

N.B. *****

Si ricorda che il termine $\binom{n}{x}$ è detto coefficiente binomiale (si legge “*n sopra x*”) ed è dato dalla seguente formula:

$$\binom{n}{x} = \frac{n!}{x! \cdot (n-x)!} \quad \text{con } 0 \leq x \leq n$$

e si ricorda inoltre che:

$$x! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdots (x-1) \cdot x \quad \text{e} \quad 0! = 1 \quad \text{con } x \text{ intero positivo}$$

Esercizio 4



Una azienda prevede di installare 3 generatori elettrici uguali che erogano ciascuno metà della potenza richiesta dall'azienda. Sapendo che il tasso di guasto dei generatori $\lambda = 3 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1}$, calcolare l'affidabilità del sistema ed il tempo medio di guasto dopo un anno di funzionamento.

$$R_{\text{generatore}}(8760) = e^{-\lambda \cdot 8760} \cong 0,97 \quad (\text{cioè circa pari al } 97\%)$$

Nel caso in esame si ha:

$$k = 2 \quad \text{ed} \quad n = 3$$

quindi:

$$\begin{aligned} R_{2_{\text{out-of-3}}}(8760) &= \sum_{x=2}^3 \binom{3}{x} \cdot 0,97^x \cdot [1 - 0,97]^{3-x} \\ &= \binom{3}{2} \cdot 0,97^2 \cdot [1 - 0,97]^{3-2} + \binom{3}{3} \cdot 0,97^3 \cdot [1 - 0,97]^{3-3} \\ &= \binom{3}{2} \cdot 0,9409 \cdot [0,03]^1 + \binom{3}{3} \cdot 0,912673 \cdot [0,03]^0 \\ &= \binom{3}{2} \cdot 0,9409 \cdot 0,03 + \binom{3}{3} \cdot 0,912673 \cdot 1 \\ &= \binom{3}{2} \cdot 0,028227 + \binom{3}{3} \cdot 0,912673 \\ &= \frac{3!}{2! \cdot (3-2)!} \cdot 0,028227 + \frac{3!}{3! \cdot (3-3)!} \cdot 0,912673 \\ &= \frac{3 \cdot 2 \cdot 1}{2 \cdot 1 \cdot 1} \cdot 0,028227 + \frac{3 \cdot 2 \cdot 1}{3 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 1} \cdot 0,912673 \\ &= \frac{6}{2} \cdot 0,028227 + \frac{6}{6} \cdot 0,912673 \\ &= 0,084831 + 0,912673 \\ R_{2_{\text{out-of-3}}}(8640) &= 0,997505 \cong 0,99 \end{aligned}$$

e

$$\begin{aligned} MTTF &= \frac{1}{3 \cdot 10^{-6}} \cdot \sum_{x=2}^3 \frac{1}{x} \\ &= \frac{1}{3 \cdot 10^{-6}} \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} \right) \\ &= \frac{10^6}{3} \cdot \left(\frac{5}{6} \right) \end{aligned}$$

$$MTTF = 277777,7778h \quad \text{pari a circa } 32 \text{anni}$$

Sistemi ridondanti in stand-by

Sono tipologie di sistemi con componenti in parallelo ma non contemporaneamente attivi bensì alcuni “dormienti” che vengono attivati in caso di necessità (per esempio in caso di guasto del componente primario).

Un tipico esempio è quello dei sistemi di emergenza (elettrica o antincendio).

Tale configurazione ha una maggiore affidabilità dei sistemi ridondanti attivi poiché i componenti “dormienti” operano per limitati periodi di tempo.

Nel caso di 2 componenti di cui 1 principale ed 1 di riserva posto in stand-by l’affidabilità è data dalla seguente formula:

$$R_{stand-by}(t) = e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2 + \lambda_3} \cdot [e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_3)t}]$$

con:

λ_1 = tasso di guasto del componente principale

λ_2 = tasso di guasto del componente d’emergenza

λ_3 = tasso di guasto del componente d’emergenza quando in stato di riposo

Esercizio 5



Un generatore elettrico possiede un tasso di guasto $\lambda_1 = 0,00042 \text{ h}^{-1}$. Un vecchio generatore è posto a protezione del generatore principale in modalità stand-by e presenta i seguenti dati affidabilistici:

$$\lambda_2 = 0,0042 \text{ h}^{-1}$$

$$\lambda_3 = 4,2 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1}$$

Determinare l’affidabilità del sistema dopo 30 giorni di funzionamento.

$$R(720) = e^{-0,00042 \cdot 720} + \frac{0,00042}{0,00042 - 0,0042 + 4,2 \cdot 10^{-6}} \cdot [e^{-0,0042 \cdot 720} - e^{-(0,00042 + 4,2 \cdot 10^{-6}) \cdot 720}]$$

$$= 0,8162$$

Cioè una affidabilità del 81,62%.

Altre configurazioni

Formule relative ad alcune configurazioni più complesse di uso ricorrente sono reperibili, ad esempio, nella norma EN 62061.

Affidabilità di un sistema complesso

L'affidabilità di un sistema complesso dipende in generale dai seguenti fattori:

- affidabilità dei singoli componenti il sistema;
- architettura del sistema, ossia la configurazione del sistema (cioè il modo in cui i vari componenti sono tra loro interconnessi).

Per quanto concerne l'affidabilità dei singoli componenti, questa può variare sia in base alla qualità degli stessi, sia in base alla tecnologia utilizzata (meccanica, pneumatica, elettrica); così, ad esempio, può accadere che la stessa funzione realizzata con componenti elettronici abbia un'affidabilità minore rispetto alla realizzazione con tecnologia elettrica.

Per quanto concerne l'architettura del sistema, si è già visto che l'adozione di architetture serie (cioè senza ridondanza, dette anche architetture a singolo canale), comporta, a parità di affidabilità dei singoli componenti, un livello di affidabilità inferiore rispetto a sistemi realizzati con architetture tipo parallelo (cioè con ridondanza): in questo caso si parla di architetture a doppio canale (o triplo, quadruplo ecc.). Si ribadisce che nel caso di architetture ridondanti occorre prestare attenzione a eliminare possibili cause di guasto comune.

Un altro aspetto dell'architettura di sistema in grado di aumentare l'affidabilità è la presenza di funzioni diagnostiche: con questo termine si intende la presenza di funzioni svolte da appositi componenti o sottosistemi finalizzate ad individuare guasti (o più in generale avarie).

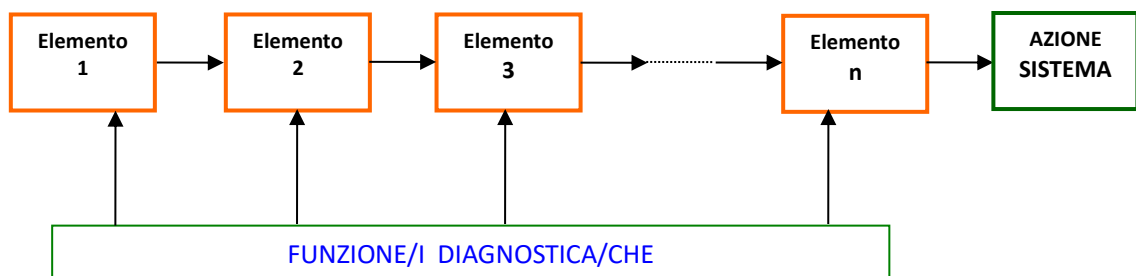
La diagnostica è solitamente in grado di rilevare solo una parte dei guasti: per tale motivo si parla di copertura diagnostica che rappresenta il rapporto tra la frequenza dei guasti rilevati e la frequenza di tutti i possibili guasti che possono interessare il sistema.

La copertura diagnostica è espressa in forma percentuale: così dire che un sistema ha una copertura diagnostica del 60% significa affermare che il 60% dei guasti che possono interessare la macchina è diagnosticato in modo automatico dal sistema stesso.

A seguito di guasto individuato dalla diagnostica del sistema possono essere intraprese azioni differenti, a seconda dei casi: dalla semplice segnalazione alla sospensione automatica del funzionamento.

Nota

Un esempio di copertura diagnostica è dato dal controllo ciclico effettuato mediante i moduli di sicurezza utilizzati nei circuiti di comando dell'equipaggiamento elettrico delle macchine per gestire funzioni critiche sotto il profilo della sicurezza.



Sistema con copertura diagnostica (Rif. Norma EN 60261)

Tabella dei tipici tassi di guasto (da Appendice 6-A del TNO Red Book, 2005)

COMPONENTI e/o SISTEMI	TASSO DI GUASTO (λ) [h^{-1}]			
	Media	Mimimo	Mediana	Massimo
Sensori di pressione				
<i>Guasto operativo</i>	6,30E-07	6,50E-08	3,20E-07	1,60E-06
Sensori di temperatura				
<i>Guasto operativo</i>	2,60E-06	8,50E-08	8,30E-07	8,00E-06
Sensori di flusso				
<i>Guasto operativo</i>	2,70E-06	2,40E-07	1,50E-06	9,90E-06
Sensori di livello				
<i>Guasto operativo</i>	6,90E-07	2,00E-07	4,80E-07	1,20E-06
Trasmettitori di pressione				
<i>Mancato ottenimento del segnale</i>	7,30E-07	2,40E-07	5,90E-07	1,40E-06
Tramettitori di temperatura				
<i>Mancato ottenimento del segnale</i>	5,30E-07	9,60E-08	3,90E-07	1,60E-06
Trasmettitori di flusso				
<i>Mancato ottenimento del segnale</i>	3,20E-06	1,40E-06	2,70E-06	5,40E-06
Trasmettitori di livello				
<i>Mancato ottenimento del segnale</i>	8,90E-07	1,20E-07	5,20E-07	2,30E-06
Valvole azionate ad aria				
<i>Guasto operativo</i>	1,70E-05	5,50E-06	1,20E-05	2,80E-05
Valvole azionate a solenoide				
<i>Guasto operativo</i>	2,60E-07	8,20E-08	1,90E-07	4,20E-07
Valvole azionate a motore				
<i>Guasto operativo</i>	6,80E-06	2,20E-06	5,10E-06	1,20E-05
Valvole di regolazione				
<i>Guasto operativo</i>	5,90E-06	3,70E-06	5,90E-06	9,50E-06
Valvole di non ritorno				
<i>Guasto operativo</i>	1,10E-07	9,60E-09	5,20E-08	2,80E-07
Valvole di sicurezza (molla)				
<i>Guasto operativo</i>	6,20E-08	3,30E-09	3,30E-08	3,40E-07
Valvole di sicurezza (pilotate)				
<i>Guasto operativo</i>	4,80E-07	1,00E-08	1,30E-07	1,80E-06
Pompe centrifughe azionate da motore elettrico				
<i>Guasto all'avvio</i>	2,60E-05	6,00E-06	1,70E-05	4,70E-05
<i>Guasto in esercizio</i>	6,40E-05	1,70E-06	2,40E-05	3,30E-04
Pompe alternative azionate da motore elettrico				
<i>Guasto all'avvio</i>	2,30E-05	5,00E-06	1,50E-05	4,80E-05
<i>Guasto in esercizio</i>	4,30E-05	1,20E-05	3,20E-05	9,00E-05
Pompe azionate da turbina				
<i>Guasto all'avvio</i>	9,90E-06	1,20E-06	6,20E-06	3,30E-05
<i>Guasto in esercizio</i>	5,60E-04	5,40E-05	2,40E-04	1,10E-03
Motopompe diesel				
<i>Guasto all'avvio</i>	5,10E-05	6,00E-06	2,00E-05	6,80E-05
<i>Guasto in esercizio</i>	2,50E-03	1,00E-04	1,60E-03	2,50E-02

COMPONENTI e/o SISTEMI	TASSO DI GUASTO (λ) [h^{-1}]			
	Media	Mimimo	Mediana	Massimo
Compressori azionati da motore elettrico				
<i>Guasto all'avvio</i>	1,40E-05	2,80E-06	1,40E-05	7,00E-05
<i>Guasto in esercizio</i>	1,00E-04	1,00E-05	1,00E-04	1,00E-03
Compressori azionati da turbina				
<i>Guasto all'avvio</i>	1,80E-05	3,20E-06	9,90E-06	3,00E-05
Batterie				
<i>Guasto nella fornitura di potenza</i>	1,20E-06	2,30E-07	9,20E-07	3,60E-06
Raddrizzatore				
<i>Perdite in uscita</i>	9,90E-07	2,30E-07	6,70E-07	2,00E-06
Inverter				
<i>Perdite in uscita</i>	1,40E-05	1,50E-06	8,20E-06	4,30E-05
Relè				
<i>Guasto operativo</i>	3,50E-08	2,40E-09	2,90E-08	3,40E-07
Finecorsa elettronico				
<i>Guasto operativo</i>	5,90E-08	6,40E-09	2,90E-08	1,30E-07
Sezionatore, 6-10 kV				
<i>Guasto operativo</i>	2,50E-06	2,80E-07	1,10E-06	4,10E-06
Sezionatore, < 1 kV				
<i>Guasto operativo</i>	1,90E-07	8,50E-08	1,80E-07	3,90E-07
Blindosbarra, 6-20 kV				
<i>Guasto nella fornitura di potenza</i>	4,10E-07	1,10E-07	3,10E-07	8,60E-07
Blindosbarra, < 1 kV				
<i>Guasto nella fornitura di potenza</i>	1,70E-07	7,60E-08	1,50E-07	3,00E-07
Gruppo elettrogeno diesel				
<i>Guasto all'avvio</i>	1,50E-04	2,80E-05	9,80E-05	3,50E-04
<i>Guasto in esercizio</i>	3,40E-03	6,30E-04	3,60E-03	2,00E-02
Trasformatori di potenza				
<i>Guasto nella fornitura di potenza</i>	1,70E-06	2,30E-07	1,20E-06	6,10E-06
Trasformatori di misura				
<i>Guasto nella fornitura di potenza</i>	6,70E-07	1,00E-07	7,60E-07	5,50E-06
Fusibili				
<i>Mancata apertura</i>	2,80E-09	2,80E-10	2,80E-09	2,80E-08
<i>Apertura prematura</i>	3,70E-07	1,60E-08	1,60E-07	1,70E-06

COMPONENTI e/o SISTEMI	TASSO DI GUASTO (λ) [h^{-1}]			
	Media	Mimimo	Mediana	Massimo
Tubazione, < 75 mm				
<i>Trafilamento</i>	5,70E-10	2,10E-11	2,10E-10	2,10E-09
<i>Rottura</i>	1,10E-10	4,50E-13	1,30E-11	4,00E-10
Tubazione, 75-150 mm				
<i>Trafilamento</i>	2,30E-10	8,60E-12	8,60E-11	8,60E-10
<i>Rottura</i>	3,40E-11	1,30E-13	4,00E-12	1,20E-10
Recipienti in pressione				
<i>Rateo base di guasto</i>	1,10E-10	4,30E-13	1,30E-11	3,90E-10
<i>Guasto catastrofico con rilascio istantaneo</i>	5,70E-11	2,20E-13	6,70E-12	2,00E-10
<i>Guasto catastrofico con breve rilascio continuo</i>	5,70E-11	2,20E-13	6,70E-12	2,00E-10
<i>Perdita da foro di 10 mm</i>	1,10E-09	4,10E-11	4,10E-10	4,10E-09
Parete di contenimento statico				
<i>Guasto catastrofico</i>	1,10E-09	4,30E-12	1,30E-10	3,90E-09
Reattori e contenimenti di processo				
<i>Rateo base di guasto</i>	1,10E-09	4,30E-12	1,30E-10	3,90E-09
<i>Guasto catastrofico con rilascio istantaneo</i>	5,70E-10	2,20E-12	6,70E-11	2,00E-09
<i>Guasto catastrofico con breve rilascio continuo</i>	5,70E-10	2,20E-12	6,70E-11	2,00E-09
<i>Perdita da foro di 10 mm</i>	1,10E-08	4,10E-10	4,10E-09	4,10E-08
Filtri				
<i>Ostruzione</i>	7,50E-06	1,20E-06	6,50E-06	3,40E-05
<i>Apertura causata da guasto</i>	3,10E-06	4,30E-07	3,80E-06	3,30E-05

9. ANALISI DEI GUASTI

Nei vari campi dell'ingegneria, al fine di migliorare i prodotti, ricopre un ruolo importante l'analisi dei guasti, indicata anche con la sigla FA (dall'inglese, **Failure_Analysis**).

La FA consiste essenzialmente nel recuperare i componenti o apparati guasti e nell'analizzarli per individuarne le cause.

la FA utilizza varie metodologie d'indagine (tra le quali la microscopia o la spettroscopia) unitamente a tecniche non distruttive quali i raggi X, i liquidi penetranti ecc.

Quando un apparato o un sistema è costoso o il suo funzionamento è di grande importanza, occorre già in sede di progetto ridurre la probabilità di guasto a livelli accettabili: a tal fine sono state sviluppate le metodologie preventive di analisi dei guasti.

Le metodologie preventive adottate sono di due tipi:

1. **INDUTTIVE** (di tipo "Bottom Up"):

1.a **FMEA** (acronimo dall'inglese Failure Mode Effect Analysis);

1.b **FMECA** (acronimo dall'inglese Failure Mode Effect and Criticality Analysis);

2. **DEDUTTIVE**

FTA o Albero dei guasti (acronimo dall'inglese Fault Tree Analysis);

9.1 FMEA e FMECA

La FMEA e FMECA sono analisi di tipo induttivo (dette anche *bottom-up* ossia dal basso all'alto). Nella FMEA si parte da un componente e si risale agli effetti di un suo guasto sul sistema; la procedura seguita è la seguente:

- a) viene stesa una lista di tutti i componenti del sistema;
- b) per ogni componente vengono individuati tutti i possibili modi di guasto;
- c) per ognuno dei guasti si valuta:
 - la gravità delle conseguenze del guasto sull'intero sistema;
 - la probabilità che il guasto accada;
- d) dopo aver effettuato l'analisi per tutti i componenti si esprime una valutazione dell'affidabilità del sistema. Viene considerato un guasto per volta, ritenendo poco probabile la situazione in cui se ne verificano molteplici. L'indagine descritta è di tipo verticale (comunemente definita induttiva) dal basso (il guasto), all'alto (l'evento finale) in modo che l'analista possa prevedere la risposta del sistema in conseguenza di un particolare guasto di un componente.

La FMECA si differenzia dalla FMEA perché permette di determinare anche la criticità del guasto (da qui la consonante C aggiunta all'acronimo FMEA).

Nota: Il metodo FMEA è descritto dettagliatamente nella norma CEI 56-1 - Metodi di analisi per l'affidabilità dei sistemi. Procedura di analisi dei modi e degli effetti di guasto (FMEA).

9.2 FTA

L'Albero dei guasti è un'analisi di tipo deduttivo (detta anche *top-down* ossia dall'alto al basso): partendo da un'avaria, l'indagine cerca di individuarne le cause correlandole ai guasti dei singoli componenti. Grazie a questa metodologia di analisi, è possibile identificare gli eventi che possono causare un malfunzionamento del sistema, valutare la tolleranza ai guasti dello stesso, disporre meccanismi in grado di superare la criticità, definire sistemi di diagnostica dei guasti e la strategia di manutenzione. In questo modo l'indagine è svolta dall'alto al basso e l'analista si pone il problema opposto all'analisi induttiva e cioè: quali guasti, combinazioni di guasti o altre situazioni causano l'avaria del sistema?

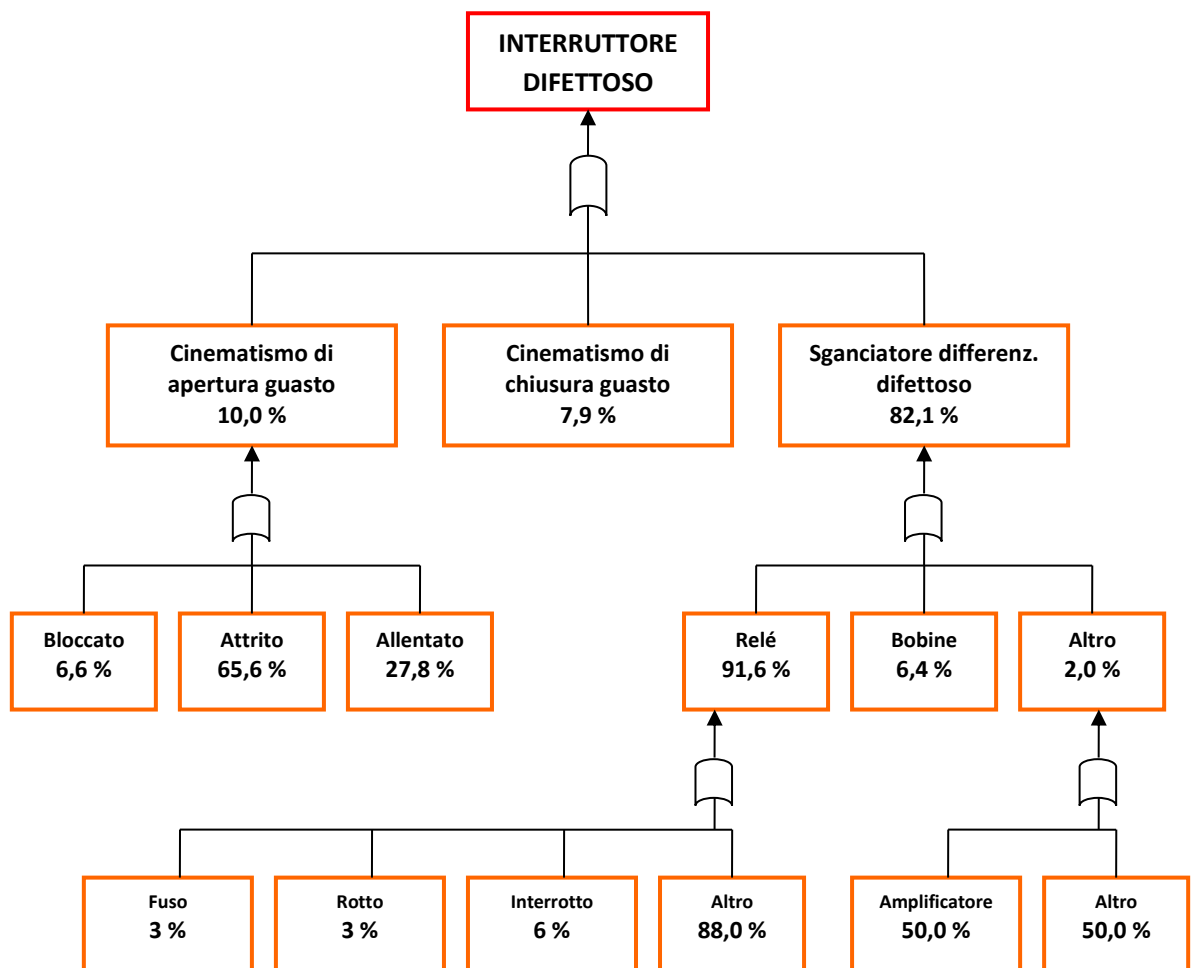
L'albero è costruito concatenando tra loro gli eventi con operatori logici di tipo Booleano (AND, OR ecc.) e risolvendo le equazioni ottenute.

Il metodo è descritto nella norma IEC 61025 (CEI 56-31) "Fault TREE Analysis" (FTA).

La FTA permette di determinare per un determinato sistema il suo tasso di guasto; tale tasso di guasto potrà quindi essere convertito in MTTF (tempo medio di guasto del sistema).

Il modello grafico dell'FTA utilizza porte logiche ed eventi di guasto per modellare le relazioni causali coinvolte nella genesi dell'evento indesiderato.

Tale modello grafico può essere tradotto in un modello matematico per il calcolo delle probabilità di guasto del sistema.



La quantificazione e la valutazione numerica di una FTA genera almeno quattro risultati che permettono una scelta maggiormente consapevole sia delle strategie di prevenzione e protezione, sia di quelle manutentive.

Le informazioni in uscita da un FTA sono, dunque, le seguenti:

1. Probabilità di accadimento di un evento indesiderato (TOP EVENT).
2. Probabilità e significatività degli eventi di guasto intermedi che causano il TOP EVENT.
3. Significatività del rischio determinato derivante dall'utilizzo del sistema.
4. Importanza dei componenti alla luce dell'affidabilità complessiva del sistema.

Come costruire un albero dei guasti

La simbologia di costruzione di un FTA è riportata in Tabella 5.2 ed a questa faremo riferimento.

Tab. 5.2 – Simbologia costruttiva di un albero di guasto

SIMBOLO/PORTA LOGICA	RAPPRESENTAZIONE	DESCRIZIONE
Porta logica AND		<p>La porta logica AND indica che l'evento TOP EVENT può aver luogo solo quando tutti gli eventi di livello inferiore sono verificati. Essa configura un collegamento in parallelo tra i componenti di livello inferiore.</p> <p>AND a due ingressi $F_S = F_A \times F_B = F_{AB}$</p> <p>AND a tre ingressi $F_S = F_A \times F_B \times F_C = F_{ABC}$</p>
Porta logica OR		<p>La porta logica OR indica che l'evento TOP EVENT può avere luogo se solo uno (o più d'uno) degli eventi di livello inferiore risulta verificato. Essa configura un collegamento in serie tra i componenti di livello inferiore.</p> <p>OR a due ingressi $F_S = F_A + F_B - F_A \times F_B = F_A + F_B - F_{AB}$</p> <p>OR a tre ingressi $F_S = F_A + F_B + F_C - (F_{AB} + F_{AC} + F_{BC}) + F_{ABC}$</p>
Porta logica koon		<p>La porta logica k out of n (koon) indica che l'evento TOP EVENT può avere luogo solo se risultano verificati k degli n eventi di livello inferiore.</p>
Evento base		<p>L'evento base rappresenta il guasto del componente o sottosistema che non richiede ulteriori approfondimenti delle cause.</p>
Evento trasferito		<p>L'evento trasferito indica che l'evento di guasto viene sviluppato in altra analisi.</p>
Evento non sviluppato		<p>L'evento non sviluppato rappresenta un evento non esaminato perché le informazioni risultano insufficienti oppure perché le conseguenze risultano insignificanti.</p>

In particolare dovranno essere implementate le seguenti fasi fino al completamento dell'albero:

- FASE 1: Identificazione del TOP EVENT indesiderato.
- FASE 2: Identificazione degli eventi di primo livello.
- FASE 3: Collegamento degli eventi di primo livello al TOP EVENT con porta logica opportuna (AND, OR, koon).
- FASE 4: Identificazione degli eventi di secondo livello.
- FASE 5: Collegamento degli eventi di secondo livello a quelli di primo livello con porte logiche opportune (AND, OR, koon).
- FASE 6: Iterazione delle precedenti 4 e 5 fino al raggiungimento degli eventi base.

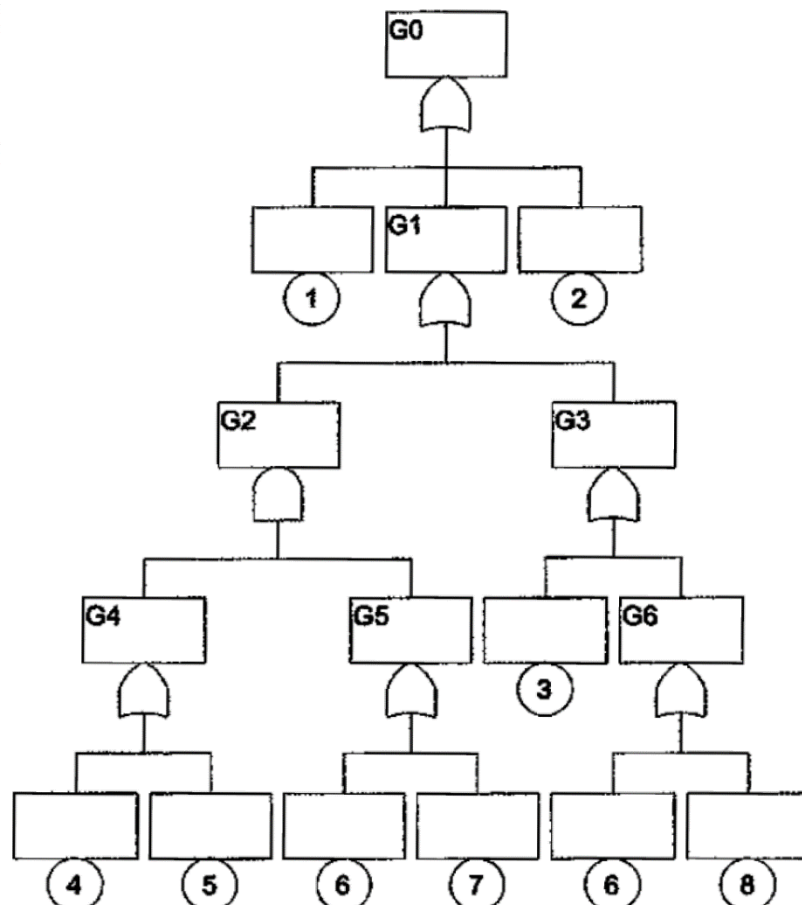
Un albero di guasto fornisce utili informazioni sulla possibile combinazione di eventi di guasto che possono sfociare nel TOP EVENT.

Tale combinazione di eventi di guasto è chiamata *cut set* (=insieme di taglio). Più in generale possiamo asserire che un *cut set* in un albero di guasto è un insieme di eventi di base la cui presenza contemporanea determina il TOP EVENT.

Un *cut set* è detto *minimo* (*minimal cut set*) se tale insieme non può essere ulteriormente ridotto senza perdere le proprie caratteristiche (=insieme necessario e sufficiente alla genesi del TOP EVENT).

ESEMPIO

L'esempio seguente illustra un algoritmo utile a definire i cut set minimi in alberi di guasto comunque complessi (cfr. Figura 5.6).



REGOLE:

1. se GX è una porta logica OR, ogni evento in ingresso è riportato in righe separate
2. se invece GX è una porta AND, gli eventi in ingresso sono annotati in colonne separate.

L'algoritmo ha inizio a partire dalla porta GO, rappresentante il TOP EVENT.

Nel nostro esempio **GO** è una porta **OR** e, di conseguenza, riportiamo gli eventi in colonna:

OR allora espansione righe

1		
G1		
2		

La procedura andrà successivamente a rimpiazzare ogni porta logica con in suoi input secondo le regole 1 e 2.

A procedura completata, le righe rappresenteranno i cut set dell'albero di guasto.

Procediamo dunque alla sostituzione della prima porta **G1** la quale, essendo una **OR** determina l'ulteriore allungamento della colonna iniziale:

1		
G2		
G3		
2		

La porta **G2** è una **AND**, quindi:

AND allora espansione colonne

1		
G4	G5	
G3		
2		

La porta **G3** è una **OR**, quindi si ha:

1		
G4	G5	
3		
G6		
2		

A questo punto, la porta **G4** è una **OR**, di conseguenza si ottiene:

1		
4	G5	
5	G5	
3		
G6		
2		

Anche la porta **G5** è una **OR**:

1		
4	6	
4	7	
5	6	
5	7	
3		
G6		
2		

Pure la porta **G6** è una **OR**, quindi:

1		
4	6	
4	7	
5	6	
5	7	
3		
6		
8		
2		

I **9 cut set** dell'albero di guasto sono: **(1) – (4,6) – (4,7) – (5,6) – (5,7) – (3) – (6) – (8) – (2).**

Ottenuta la tabella con soli elementi "Base" (cioè senza più OR o AND) si costruisce la tabella contenente, al posto del nome dell'elemento base, la sua **INAFFIDABILITÀ** ($F_i = 1 - e^{-\lambda_i t}$ al tempo t desiderato) e quindi due ulteriori colonne a destra contenenti: la prima il prodotto delle singole inaffidabilità riportate a sinistra e la seconda la relativa **AFFIDABILITÀ** ($R = 1 - F_i$). Si conclude determinando l'**AFFIDABILITÀ del sistema moltiplicando fra loro le R ottenute**.

					Prodotti di F_i	e relativa R
1			F_1		F_1	$1 - F_1$
4	6		F_4	F_6	$F_4 \cdot F_6$	$1 - F_4 \cdot F_6$
4	7		F_4	F_7	$F_4 \cdot F_7$	$1 - F_4 \cdot F_7$
5	6		F_5	F_6	$F_5 \cdot F_6$	$1 - F_5 \cdot F_6$
5	7		F_5	F_7	$F_5 \cdot F_7$	$1 - F_5 \cdot F_7$
3			F_3		F_3	$1 - F_3$
6			F_6		F_6	$1 - F_6$
8			F_8		F_8	$1 - F_8$
2			F_2		F_2	$1 - F_2$
AFFIDABILITÀ del sistema moltiplicando fra loro le R =						Prodotti di R

Esercizio 6



In alcuni ambiti industriali sono presenti reattori chimici aventi le caratteristiche illustrate nella Figura 5.7. Questi reattori possiedono un allarme di sovrappressione finalizzato a proteggere il contenimento da pressioni eccessive causate da manovre errate di riempimento oppure da reazioni fuggitive. In entrambi i casi è necessario prevedere barriere di sicurezza passive che prevedano l'installazione di dischi di rottura e/o valvole di sicurezza; in aggiunta a questo è possibile prevedere l'installazione di elettrovalvole di sicurezza che intercettino l'afflusso del fluido di alimento al reattore.

Nel reattore oggetto di analisi sono installati due sistemi di sicurezza tra loro indipendenti:

- Sensori di pressione in continuo collegati ad allarme ottico acustico che allerta il personale addetto.
- Sensori di elevata pressione i quali, bloccano un'elettrovalvola che intercetta la tubazione di alimento del reattore.

Si vuole determinare, attraverso una valutazione con albero di guasto, la probabilità che entrambi i sistemi di sicurezza risultino inattivi nel corso di un anno [8640 h] sapendo che i tassi di guasto sono i seguenti:

Tassi di guasto dei componenti installati sono riportati nella tabella 5.3:

COMPONENTI	TASSO DI GUASTO (λ) [h^{-1}]
Switch di sovrappressione guasto	$1,6 \cdot 10^{-5}$
Allarme ottico acustico	$5,0 \cdot 10^{-5}$
Elettrovalvola di shutdown	$4,8 \cdot 10^{-5}$

Tab. 5.3

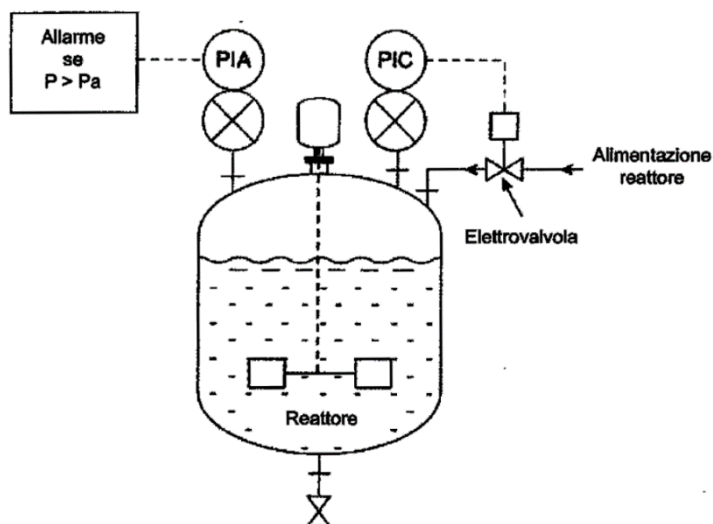
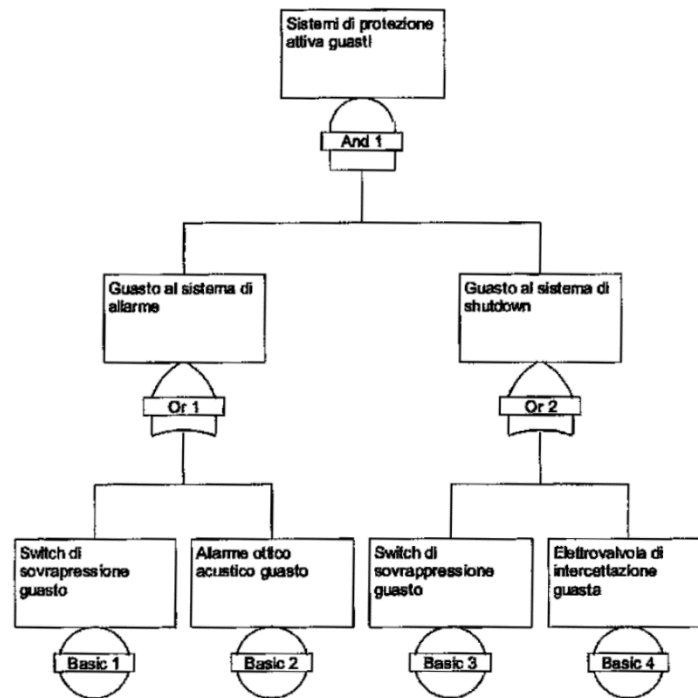


Fig. 5.7

Dai tassi di guasto della tabella 5.3 si possono ricavare le rispettive affidabilità e inaffidabilità:

COMPONENTI	TASSO DI GUASTO (λ) [h^{-1}]	AFFIDABILITÀ ($R=e^{-\lambda 8640}$) [h^{-1}]	INAFFIDABILITÀ ($F=1-R$) [h^{-1}]
Switch di sovrappressione guasto	$1,6 \cdot 10^{-5}$	0,87	0,13
Allarme ottico acustico	$5,0 \cdot 10^{-6}$	0,96	0,04
Elettrovalvola di shutdown	$4,8 \cdot 10^{-5}$	0,66	0,34

L'albero di guasto relativo ai sistemi di protezione attiva installati sul reattore risulta schematizzato in Figura 5.8. Si assume che i sensori di sovrappressione si mantengano funzionanti ed attivi.



La determinazione dei cut set dell'albero di guasto indicato è calcolata a partire dalla porta **AND 1**, posta in corrispondenza del TOP EVENT.

Si ha:

OR 1	OR 2	
------	------	--

La porta **OR 1** fa riferimento a due eventi base, **B1** e **B2**. Si ha:

B1	OR 2	
B2	OR 2	

La porta **OR 2** fa anch'essa riferimento a due eventi base, **B3** e **B4**. Quindi:

B1	B3	
B1	B4	
B2	B3	
B2	B4	

I 4 cut set dell'albero di guasto sono: **(B1,B3) – (B1,B4) – (B2,B3) – (B2,B4)**

Il calcolo dell'inaffidabilità, **F(8760)**, di ciascun cut set sarà pertanto la seguente:

		F_i	R
B1	B3	$F_{B1,B3} = 0,13 \cdot 0,13 = 0,0169$	$1 - 0,0169 = 0,9831$
B1	B4	$F_{B1,B4} = 0,13 \cdot 0,34 = 0,0442$	$1 - 0,0442 = 0,9558$
B2	B3	$F_{B2,B3} = 0,04 \cdot 0,13 = 0,0052$	$1 - 0,0052 = 0,9948$
B2	B4	$F_{B2,B4} = 0,04 \cdot 0,34 = 0,0136$	$1 - 0,0136 = 0,9864$
AFFIDABILITÀ del sistema moltiplicando fra loro le R =			0,9220

$$F_{sistema}(8640) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - F_i(t)] \cong 0,078$$

$$R_{sistema}(8640) = 1 - 0,08 = 0,922$$

Tale valore risulta leggermente sovrastimato rispetto al valore teorico di inaffidabilità ottenuto attraverso la precisa applicazione delle relazione viste in Tabella 5.2. Si ha, infatti:

$$F_{sistema}(8640) = (F_{B1} + F_{B2} - F_{B1,B2}) \cdot (F_{B3} + F_{B4} - F_{B3,B4}) \cong 0,07$$

Esercizio 7
proposto



Determinare l'affidabilità del sistema rappresentato dal seguente albero dei guasti dati i seguenti tassi di guasto dopo un anno di funzionamento:

$$\lambda_{B1} = 10^{-6} [h^{-1}]$$

$$\lambda_{B2} = 2 \cdot 10^{-6} [h^{-1}]$$

$$\lambda_{B3} = 3 \cdot 10^{-6} [h^{-1}]$$

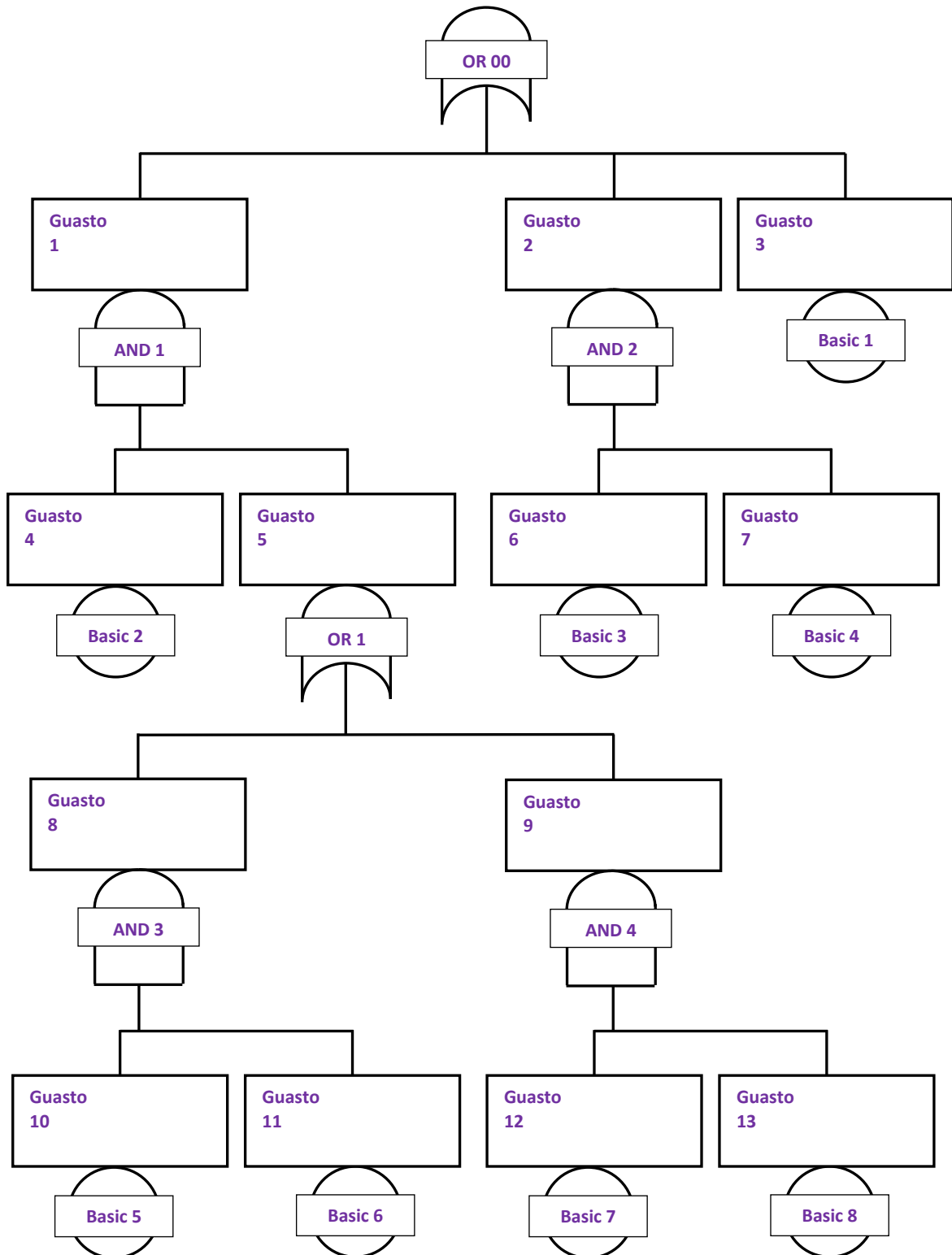
$$\lambda_{B4} = 4 \cdot 10^{-6} [h^{-1}]$$

$$\lambda_{B5} = 5 \cdot 10^{-6} [h^{-1}]$$

$$\lambda_{B6} = 6 \cdot 10^{-6} [h^{-1}]$$

$$\lambda_{B7} = 7 \cdot 10^{-6} [h^{-1}]$$

$$\lambda_{B8} = 8 \cdot 10^{-6} [h^{-1}]$$



10. MANUTENZIONE

Definizione di manutenzione

La manutenzione nasce originariamente dall'esigenza di riparare i guasti che possono accadere a un'entità (sistema, apparato, componente ecc.). Nel tempo il concetto di manutenzione si è notevolmente evoluto e oggi ha lo scopo generale di conservare nel tempo sia la fruibilità sia il valore delle entità.

Una proprietà importante di una entità è la manutenibilità che esprime un importante requisito di una certa entità e definisce la sua capacità di essere facilmente ripristinato qualora sia necessario realizzare un intervento di manutenzione.

Manutenzione ordinaria e straordinaria

Una prima distinzione fondamentale è tra manutenzione ordinaria e straordinaria (definite nella norma UNI 11063):

- **manutenzione ordinaria** ha lo scopo di mantenere o ripristinare l'integrità originale dell'entità, contenere il normale degrado d'uso e far fronte a eventi accidentali;
- **manutenzione straordinaria** comprende quegli interventi non ricorrenti e di elevato costo in confronto al valore di rimpiazzo dell'entità e ai costi annuali di manutenzione della stessa.

Politiche di manutenzione

Con il termine politiche di manutenzione si intendono i criteri secondo i quali si effettuano gli interventi di manutenzione.

La manutenzione può seguire i seguenti criteri:



1. Riparare i guasti dopo che sono avvenuti;
2. Impedire l'insorgenza dei guasti;
3. Migliorare l'entità soggetta a manutenzione con piccole modifiche intraprese allo scopo di aumentare l'affidabilità (o anche semplicemente facilitare l'attività stessa di manutenzione). In questa categoria rientrano anche interventi tesi all'eliminazione delle cause accertate di guasti di tipo sistematico.

Le norme UNI 9910 e UNI 10147 definiscono nel seguente modo le politiche di manutenzione sopra individuate:

1. **manutenzione correttiva** (o a guasto);
2. **manutenzione preventiva**;
3. **manutenzione migliorativa**.

Manutenzione correttiva

La manutenzione correttiva interviene a seguito della rilevazione di un guasto (o di un'avaria). Applicando questo tipo di manutenzione, si lascia funzionare un'entità sino a quando si verifica la sospensione della funzionalità. La manutenzione correttiva presenta il vantaggio che non si hanno sospensioni di funzionamento sino a quando l'entità funziona; per contro si evidenziano i seguenti svantaggi:

il guasto (o avaria) avviene in modo imprevedibile (e può accadere in un momento critico);

i costi di riparazione sono generalmente elevati, anche perché il guasto può interessare altre parti dell'entità.

La manutenzione correttiva risulta vantaggiosa solo nei confronti di tipologie di guasto facilmente riparabili e nel caso in cui la sospensione di funzionalità dell'entità provochi pochi danni; risulta anche vantaggiosa nel caso di guasti poco prevedibili.

Esempio 3.1

In un'automobile la sostituzione del motorino d'avviamento è un tipico intervento di manutenzione correttiva, nel senso che viene effettuato solo in caso di rottura dello stesso: non è infatti ragionevolmente possibile prevedere l'evento e le sue conseguenze, in generale, non sono gravi.

Manutenzione preventiva

La manutenzione preventiva è eseguita a intervalli di tempo predeterminati oppure in base a opportuni criteri allo scopo di ridurre le possibilità di guasto o avaria di un'entità; in conseguenza si possono individuare i seguenti tipi di manutenzione preventiva:

- manutenzione **ciclica**;
- manutenzione **su condizione**;
- manutenzione **predittiva**.

Nella manutenzione ciclica gli interventi sono effettuati a tempi fissati (manutenzione a data costante o clock-based) oppure a valori fissati di età o utilizzo dell'entità (manutenzione a età costante o age-based).

Nella manutenzione su condizione l'intervento è effettuato al raggiungimento di un valore limite predeterminato di un segnale debole che indica l'approssimarsi della condizione di guasto (guasto potenziale).

La manutenzione predittiva rappresenta un'evoluzione della manutenzione su condizione: si procede ancora al monitoraggio di segnali deboli, ma la necessità dell'intervento è determinata non dal raggiungimento di un valore di soglia, bensì sulla base di una previsione dell'evoluzione del degrado di una certa entità; la stima è ottenuta applicando ai segnali deboli opportuni modelli di valutazione.

Tra le tecniche utilizzate per la manutenzione predittiva, è particolarmente diffusa in campo elettrico e meccanico la termografia infrarossa. La termografia infrarossa consente di studiare l'emissione di calore (sotto forma di radiazione elettromagnetica nella lunghezza d'onda dell'infrarosso) e individuare tempestivamente anomali "punti caldi", prima che si verifichino guasti.

Scelta della politica manutentiva

La scelta della politica manutentiva viene effettuata con l'obiettivo di ridurre al minimo il costo globale di riparazione dell'entità (impianto, sistema apparato o componente). Nel costo globale occorre includere il costo della riparazione vera e propria e i costi indotti (fermo lavorazioni, ulteriori danni arrecati ecc.).

Inoltre occorre tenere conto dei seguenti aspetti:

- la frequenza dei guasti;
- la fattibilità e i costi legati alle attività ispettive (necessarie per poter attuare manutenzioni su condizione o predittive).

In generale si può dire che si attua la manutenzione correttiva solo per guasti poco frequenti e poco gravi.

Esempio pratico di manutenzione

È interessante osservare come nella **manutenzione di un'automobile** trovano applicazione praticamente tutte le politiche di manutenzione viste:

- **manutenzione correttiva**: la sostituzione di una lampada bruciata;
- **manutenzione preventiva ciclica** (age based): la sostituzione della cinghia di distribuzione dopo un certo tempo/chilometraggio o la sostituzione periodica dell'olio del motore;
- **manutenzione preventiva su condizione**: la spia che segnala il livello dell'olio nella coppa e che avverte della necessità di un rabbocco per ripristinare la quantità necessaria di lubrificante;
- **manutenzione preventiva predittiva**: il conduttore elettrico annegato nelle pastiglie freno (che determina l'accensione della relativa spia sul cruscotto) fornisce un'indicazione della vita residua delle stesse;
- **manutenzione migliorativa**: un richiamo effettuato dal costruttore per porre rimedio a un difetto costruttivo (possibile causa di guasti sistematici) oppure l'utilizzo di lubrificanti di qualità superiore a quella standard per aumentare gli intervalli di sostituzione (miglioramento della manutenzione).

Organizzazione della manutenzione in azienda

Nella moderna organizzazione aziendale la manutenzione non è più concepita come una funzione importante ma accessoria alla produzione, bensì come una parte integrante della stessa. Per questo motivo all'interno delle aziende (soprattutto di media o grande dimensione) esiste un servizio manutenzione la cui organizzazione può fondamentalmente seguire due modelli:

- **il modello centralizzato;**
- **il modello decentralizzato.**

L'organizzazione della manutenzione è in particolare responsabile della logistica della manutenzione, che rappresenta l'attitudine di una organizzazione di manutenzione a offrire le risorse necessarie alla manutenzione preventivamente concordata.

Organizzazione della manutenzione: **modello centralizzato**

Questo modello rappresenta un metodo tipico ormai radicato; lo schema a blocchi (si veda figura sotto riportata) mette in luce come la direzione di manutenzione funziona come una cerniera filtro tra le trasformazioni che provengono dalla produzione e quelle che sono di nuovo trasmesse, dopo le correzioni ai manutentori.

Il responsabile della manutenzione interagisce, infatti, contestualmente e in modo contemporaneo con:

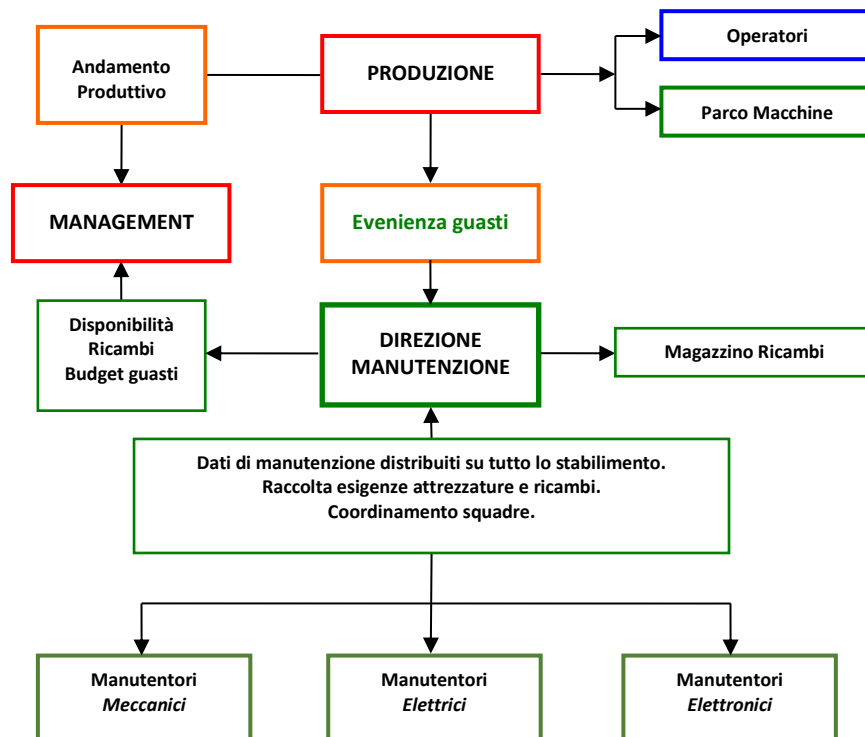
- la produzione;
- i manutentori;
- il magazzino;
- i management.

Questo sistema rappresenta quindi un modello centralizzato la cui funzionalità ha senso solo quando il livello dei collaboratori è piuttosto basso e la motivazione al lavoro è scarsa.

Il sistema non prevede deleghe ma impone obbedienza senza alcun coinvolgimento di tipo personale.

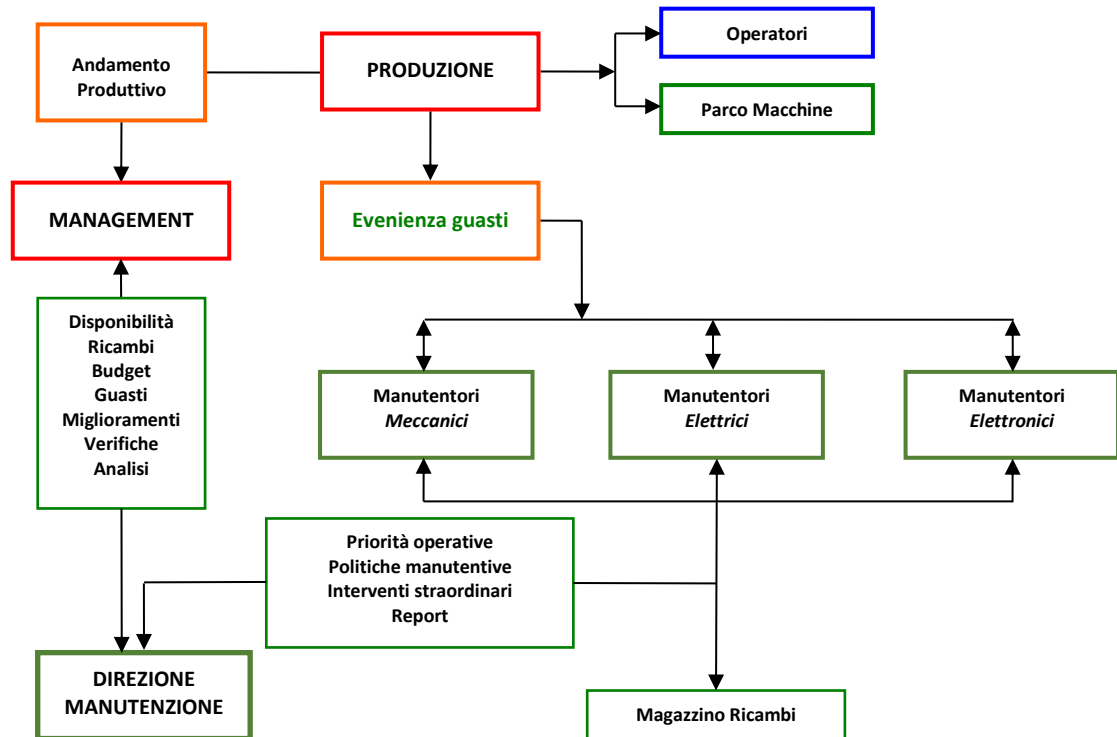
Il risultato è quello di avere risorse altamente specializzate (elettrotecnici, meccanici, elettronici, ecc.) ma scarsamente flessibili e quindi l'effetto più rilevante è la rigidità del modello.

Da un certo punto di vista tutto ciò può essere definito standardizzante e vantaggioso ai fini di alcune procedure operative (es. ISO 9000).



Organizzazione della manutenzione: **modello decentralizzato**

Nel modello manutentivo di tipo decentralizzato (fig. 3.3), il direttore della manutenzione interviene con potere decisionale solo quando ogni singolo manutentore non è più in grado di risolvere il problema autonomamente. Il direttore acquista quindi il ruolo di gestore del personale e il personale diventa più autonomo, assumendo la responsabilità di un intero settore aziendale (nella figura: Alfa, Beta, Gamma), con azioni più flessibili dovendo gestire autonomamente alcune priorità relative a un piccolo budget.



Per ottenere tutto ciò occorre despecializzare ovvero, far acquisire al personale le competenze in più discipline tecniche (personale multispecializzato o multiskillness). Questo KNOW-HOW deve essere trasferito allo sviluppo di un piano di manutenzione lungo tutto il ciclo di vita della macchina, dalla progettazione alla produzione e installazione; in proposito la macchina è corredata da un manuale d'uso e istruzioni per l'utente ai fini del mantenimento delle caratteristiche di sicurezza.

Il KNOW-HOW rappresenta la somma di ogni esperienza acquisita, positiva o negativa.

La fidatezza

Con questo termine, nelle norme UNI 9910, si intende l'insieme delle proprietà che descrivono la disponibilità di una entità a svolgere una determinata funzione o apparato e i fattori che la condizionano.

La disponibilità dipende da tutti gli aspetti precedentemente trattati, cioè:

- affidabilità;
- manutenibilità;
- logistica della manutenzione.

11. GESTIONE DEI RIFIUTI

Manutenzione e rifiuti

L'attività manutentiva genera rifiuti (ossia sostanze od oggetti di cui occorre disfarsi), derivanti dalla sostituzione di componenti, lubrificanti ecc. e dall'utilizzo di materiali di consumo inquinanti (ad esempio, solventi).

Il manutentore diviene così un produttore di rifiuti. È fondamentale gestire correttamente i rifiuti, per evitare che essi vadano ad inquinare l'ambiente.

Dei rifiuti e della loro gestione si occupa, in Italia, il D.Lgs. 152/06 "*Norme in materia di rifiuti e di bonifica dei siti inquinati*" (più volte modificato). I produttori di rifiuti, quindi anche i manutentori, sono soggetti agli obblighi stabiliti da questo decreto.

Classificazione dei rifiuti

I rifiuti, in base al D.Lgs. 152/06, sono classificati in base all'origine in:

- rifiuti urbani;
- rifiuti speciali.

Un'altra distinzione, introdotta dalla legge, è quella in base alla pericolosità; possono aversi:

- rifiuti pericolosi;
- rifiuti non pericolosi.

I rifiuti prodotti a seguito dell'attività di manutenzione sono in genere rifiuti speciali; possono inoltre rientrare nella lista dei rifiuti pericolosi (la lista è allegata al decreto). Ogni tipo di rifiuto è contraddistinto da un **codice** denominato **CER**; i rifiuti pericolosi sono contraddistinti da un codice CER asteriscato.

Esempio

Il codice CER 15 01 contraddistingue gli imballaggi (non contenenti sostanze pericolose) mentre il codice CER 20 01 21 contraddistingue rifiuti (pericolosi) contenenti mercurio (come ad esempio tubi fluorescenti o lampade a basso consumo).*

La gestione dei rifiuti

Il principio sancito dalla legislazione italiana ed europea è che il produttore dei rifiuti deve occuparsi della loro gestione. In particolare il manutentore, in qualità di produttore di rifiuti, deve occuparsi delle seguenti fasi:

- Suddividerli in base al codice CER;
- Stoccarli temporaneamente;
- Conferirli ai centri di raccolta autorizzati.

Il conferimento dei rifiuti ai centri di raccolta autorizzati è una fase particolarmente critica in relazione al rischio di smaltimento abusivo (e connessi traffici illeciti). Per tale motivo, in attuazione del Decreto 152/06 è stato implementato un sistema di tracciabilità dei rifiuti denominato **SISTRI** (acronimo di Sistema di controllo della Tracciabilità dei Rifiuti). Il SISTRI è stato istituito dal Ministero dell'Ambiente ed è gestito dal Comando dell'Arma dei Carabinieri per la tutela ambientale.

Chiunque produca rifiuti speciali pericolosi è obbligato all'iscrizione al SISTRI; l'iscrizione al SISTRI è richiesta in molti casi anche se si è produttori di rifiuti speciali non pericolosi o rifiuti domestici (pericolosi o non pericolosi).



Esempi di cartelli che contraddistinguono i contenitori per la raccolta differenziata dei rifiuti.

Il SISTRI comporta una serie di obblighi in fase di movimentazione dei rifiuti, tra cui quello di dotare gli automezzi utilizzati per il trasporto di una scatola nera in grado di registrare tutti i percorsi effettuati. Inoltre i trasportatori (sia di rifiuti pericolosi che non pericolosi) devono essere iscritti all'Albo Nazionale dei Gestori Ambientali. Per tali motivi la fase di trasporto dei rifiuti ai centri autorizzati è in genere effettuata da trasportatori specializzati.

Nei casi in cui non è richiesta al produttore di rifiuti l'iscrizione al SISTRI, la tracciabilità deve essere comunque assicurata mediante appositi registri di carico-scarico.

Direttive RAEE e RoHS

I rifiuti di apparecchiature elettrico-elettroniche pongono problemi connessi alla presenza di sostanze tossiche (come rame, ferro, acciaio, alluminio, vetro, argento, oro, piombo, mercurio e altre) e non biodegradabili con conseguenti rischi di inquinamento ambientale: si tratta, in molti casi, di rifiuti pericolosi.

Per comprendere la dimensione del problema si consideri che, ogni anno, in Europa, si generano 6 milioni di tonnellate di rifiuti di questo tipo che costituiscono il 4% di tutti i rifiuti prodotti, con un tasso di crescita di circa il 5% l'anno.

L'Unione europea ha emanato sull'argomento due Direttive:

- la Direttiva 2002/96 CE detta Direttiva RAEE (Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche);
- la Direttiva 2002/95/CE detta Direttiva RoHS (Restrizione dell'uso di determinate sostanze pericolose nelle apparecchiature elettriche ed elettroniche).

Entrambe le Direttive sono state recepite dalla legislazione italiana.

La Direttiva RAEE si rivolge ai produttori ma anche ai distributori, agli installatori e agli enti locali (ad esempio i Comuni). La Direttiva si applica alle apparecchiature progettate per funzionare a tensione fino a 1000 AC o 1500 V DC; le apparecchiature sono suddivise in due categorie principali:

- RAEE provenienti da nuclei domestici (o di provenienza industriale, commerciale ma analoghi a quelli di origine domestica);
- RAEE di origine professionale, cioè derivanti da attività economiche.

I RAEE devono riportare un apposito simbolo che avverte della necessità di raccolta differenziata.



Simbolo che indica l'obbligo di raccolta differenziata per RAEE

Deve essere obbligatoriamente riportato sugli apparecchi elettrici, sulle relative istruzioni d'uso e confezioni

In generale i RAEE di tipo domestico sono elettrodomestici, apparecchi di illuminazione ecc.

Per questi l'installatore o il venditore che fornisca un nuovo apparecchio è obbligato ad assicurare il ritiro gratuito dell'apparecchio che viene sostituito (uno contro uno); l'obbligo del ritiro gratuito vale comunque solo per le utenze strettamente domestiche). Il venditore o l'installatore ha l'obbligo di gestire i rifiuti.

Il trattamento dei RAEE, svolto dai centri di raccolta autorizzati comprende le seguenti fasi:

- asportazione dei componenti pericolosi;
- smontaggio e separazione dei materiali;
- recupero dei materiali.

La Direttiva RAEE è basata sul principio secondo il quale chi inquina paga. Per ottemperare a questo principio, il finanziamento e l'organizzazione della raccolta e del trattamento dei RAEE sono posti in capo ai produttori di apparecchiature elettriche ed elettroniche. Per sostenere questi costi, i produttori maggiorano il prezzo delle apparecchiature di un eco-contributo, pagato dal compratore al momento dell'acquisto di un'apparecchiatura nuova.

Per rispondere alle richieste della normativa, i fabbricanti delle apparecchiature rientranti nel campo di applicazione del Decreto RAEE hanno costituito dei consorzi volontari suddivisi per tipo di apparecchiatura o per tipo di mercato servito (elettrodomestici, lampade, apparecchiature informatiche ecc.).

La direttiva RoHS si rivolge ai costruttori (o agli importatori) di apparecchiature elettriche e impone l'eliminazione oppure, quando non possibile, la riduzione delle seguenti sostanze pericolose: piombo, mercurio, cadmio, cromo esavalente, bifenili polibromurati (PBB), etere di difenile polibromurato (PBDE).

12. ESERCIZI RIASSUNTIVI

ESERCIZI RIASSUNTIVI
PROPOSTI

QUESITO N.1

In uno stabilimento industriale sono presenti 40 motori elettrici uguali funzionanti nella fase di guasti casuali. Supposto che in un intervallo di tempo di 2000 ore si verifichino 5 guasti e precisamente dopo 400, 700, 1100, 1300 e 1750 ore, il candidato determini il tasso di guasto dei motori esaminati e calcoli l'affidabilità nel lasso di tempo preso in considerazione. Il candidato rappresenti inoltre la curva del tasso di guasto e ne descriva le varie fasi individuabili.

R.1

Il tasso di guasto nel periodo dei guasti casuali si ricava mediante la seguente espressione:

$$\lambda = \frac{5}{400 + 700 + 1100 + 1300 + 1750 + 35 \cdot 2000} = \frac{5}{75250} = 6,64 \cdot 10^{-5} \quad [\text{h}^{-1}]$$

Si può dimostrare che nel periodo dei guasti casuali l'affidabilità $R(t)$ si può ricavare utilizzando la seguente funzione:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad \text{con} \quad e = 2,718$$

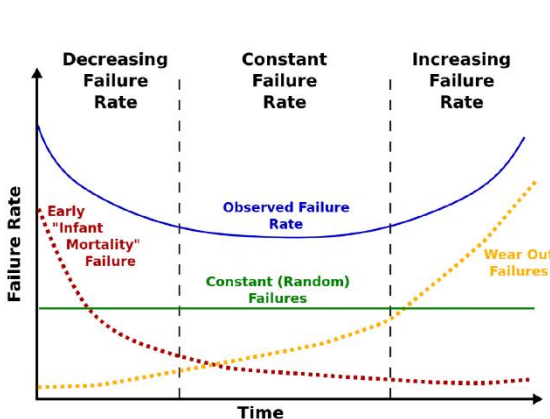
Quindi sostituendo il valore del tasso di guasto λ e calcolando $R(t)$ per $t = 2000$ si determina l'affidabilità dopo 2000 ore:

$$R(2000) = e^{-6,64 \cdot 10^{-5} \cdot 2000} = 0,87556$$

Esprimendo l'affidabilità in percentuale si ottiene:

$$R(2000)\% = 0,87556 \times 100 = 87,556\%$$

La curva del tasso di guasto può essere rappresentato mediante il seguente grafico detto "a vasca da bagno" (in inglese, bath tub curve) . (cfr. appunti 5.3 pag. 10 e 11)



Sull'asse delle ascisse è riportato il tempo (**Time**) operativo a partire dall'istante di messa in servizio del sistema; il tempo è solitamente espresso in ore [h];

Sull'asse delle ordinate è riportato il **tasso di guasto** cioè il rapporto tra il numero di oggetti guasti dopo un tempo t e il numero di quelli che non hanno presentato il guasto (**Failure Rate**). Il tasso di guasto è quindi una funzione dipendente dal tempo ed è indicata generalmente con $z(t)$. La curva descritta è di natura statistica e non consente di prevedere con esattezza la comparsa di un guasto in un singolo componente, ma soltanto di prevedere la probabilità dell'effettivo verificarsi del guasto stesso.

I **GUASTI INFANTILI** (in inglese, **early failures**) sono caratteristici del primo periodo della vita del sistema o della famiglia di componenti e sono generalmente dovuti a difetti occulti di fabbricazione, errori di assemblaggio o aggiustaggio. In questa fase i guasti sono relativamente numerosi, ma tendono a calare con il trascorrere del tempo.

Dopo la fase dei guasti infantili si passa a quella dei **GUASTI CASUALI** (in inglese, **stress-related failures**), che avvengono durante l'utilizzo ordinario del sistema o dei componenti e sono dovuti a cause aleatorie che provocano l'applicazione all'elemento soggetto al guasto, di sollecitazioni che superano la resistenza di progetto. In questa fase i guasti sono relativamente scarsi.

Successivamente, si passa alla fase dei **GUASTI D'USURA** (in inglese, **wear out failures**) che avvengono a causa del progressivo invecchiamento dei componenti determinato dai processi di naturale degradazione chimico-fisica dei materiali. In questa fase i guasti tendono a diventare più frequenti. I guasti d'usura possono essere causati anche da una mancata manutenzione.

QUESITO N.2

Il candidato descriva le politiche di manutenzione e le tipologie di manutenzione secondo le norme UNI. Si richiede inoltre di riportare in funzione delle proprie esperienze acquisiti anche in contesti operativi, un esempio applicativo che riporti ad una tipologia di manutenzione. Indichi la documentazione che dovrà essere redatta in funzione dell'esempio descritto.

R.2

Con il termine politiche di manutenzione si intendono i criteri secondo i quali si effettuano gli interventi di manutenzione. La manutenzione può seguire i seguenti criteri (cfr. appunti 5.3 pag. 29-30-31 e 34):

1. Riparare i guasti dopo che sono avvenuti;
2. Impedire l'insorgenza dei guasti;
3. Migliorare l'entità soggetta a manutenzione con piccole modifiche intraprese allo scopo di aumentare l'affidabilità (o anche semplicemente facilitare l'attività stessa di manutenzione). In questa categoria rientrano anche interventi tesi all'eliminazione delle cause accertate di guasti di tipo sistematico.

Le norme UNI 9910 e UNI 10147 definiscono nel seguente modo le politiche di manutenzione:

- A. manutenzione correttiva (o a guasto);
- B. manutenzione preventiva;
- C. manutenzione migliorativa.

Nella mia esperienza lavorativa attuata nel percorso di alternanza scuola-lavoro ho rilevato che nella manutenzione di un'automobile trovano applicazione praticamente tutte le politiche di manutenzione sopra elencate.

Esempio ("meccanici"):

- A. **manutenzione correttiva:** la sostituzione di una lampada bruciata;
- B. **manutenzione preventiva:** la sostituzione della cinghia di distribuzione dopo un certo tempo/chilometraggio o la sostituzione periodica dell'olio del motore;
- C. **manutenzione migliorativa:** un richiamo effettuato dal costruttore per porre rimedio a un difetto costruttivo (possibile causa di guasti sistematici) oppure l'utilizzo di lubrificanti di qualità superiore a quella standard per aumentare gli intervalli di sostituzione (miglioramento della manutenzione).

Esempio ("elettrici"):

- A. **manutenzione correttiva:** la sostituzione di un fusibile bruciato;
- B. **manutenzione preventiva:** la spia di una centralina di controllo di un impianto di rilevazione incendi di tipo wireless che segnala che una batteria di funzionamento di un rilevatore è esaurita o la spia di un apparecchio di illuminazione di emergenza che indica che la batteria tampone di una lampada di emergenza è esaurita;
- C. **manutenzione migliorativa:** la sostituzione di lampade fluorescenti con lampade a led.

In tutti i casi occorre documentare l'avvenuta manutenzione riportando sull'apposito libretto dell'autovettura ("meccanici") o sul registro presente nell'attività in cui è stato effettuato l'intervento ("elettrici") la tipologia di intervento con i dati (quantità e relativi codici) dei dispositivi nuovi installati, la data dell'intervento apponendo infine il nominativo e la firma dell'operaio che ha effettuato il lavoro riportando anche i dati della Ditta manutentrice. Occorre inoltre consegnare al Committente eventuali documenti di certificazione dei prodotti installati e, se l'intervento ricade tra quelli indicati nel DM 37/08, la necessaria "Dichiarazione di Conformità". Da Ditta installatrice deve quindi consegnare al Committente la relativa fattura. Poiché l'attività manutentiva genera rifiuti, derivanti dalla sostituzione di componenti, lubrificanti ecc. e dall'utilizzo di materiali di consumo inquinanti (ad esempio, oli, lampade, batterie, ecc.) è fondamentale gestire correttamente i rifiuti secondo quanto previsto dal D.Lgs 152/06 per evitare che essi vadano ad inquinare l'ambiente.

QUESITO N.3

All'interno di un impianto di depurazione delle acque reflue sono presenti diversi corpi illuminanti dotati di lampade a vapori di mercurio e posizionati su pali di altezza variabile tra 3,0 e 5,5 metri. Ad una ditta di manutenzione viene affidato l'incarico di sostituire le lampade a vapori di mercurio con lampade a vapori di sodio. Il candidato, fatte le opportune considerazioni, pianifichi l'intervento di riqualificazione energetica avendo cura di descrivere quali mezzi, attrezzature e risorse umane prevede di inviare. In funzione delle scelte effettuate, analizzi la tipologia dei possibili rischi valutandone la probabilità e il danno per ciascun pericolo individuato. Indichi inoltre, le misure di prevenzione e protezione e la tipologia del DPI (Dispositivi di Protezione Individuale) necessari per effettuare l'intervento in sicurezza.

R.3

Osservazioni:

Sostituire le sorgenti ai vapori di mercurio, altamente inefficienti ed inquinanti, in luogo di sorgenti luminose ad elevata efficienza e minore potenza installata è certamente un ottimo investimento.

L'emissione luminosa delle **lampade a vapori di mercurio** è dovuta ai vapori contenuti in un tubo di quarzo che vengono ionizzati dalla corrente di elettroni e ioni che si produce tra due elettrodi. La discreta resa dei colori di queste lampade è controbilanciata da una scarsa efficienza [lumen/watt], inoltre creano un disturbo e un inquinamento luminoso rilevante.

Le **lampade a vapore di sodio ad alta pressione** le cosiddette "SAP" possiedono una resa cromatica discreta consentendo una migliore distinzione dei colori, mantenendo alti livelli di efficienza luminosa. Il loro utilizzo è ideale in tutti i contesti in cui serve illuminare risparmiando energia. La sostituzione delle vecchie lampade ai vapori di mercurio con moderne lampade a vapori di sodio ad alta pressione, consente di ottenere risparmi anche del 40-50%.

Caratteristiche lampade SAP

- Efficienza luminosa : 70-150 lumen/watt
- Indice di resa cromatica (IRC): 20-80
- Vita media: 12'000-20'000

Per la sostituzione delle lampade a vapori di mercurio con lampade a vapori di sodio (SAP) è necessario inoltre sostituire i seguenti dispositivi:

- L'alimentatore, possibilmente elettronico "intelligente". (Maggior risparmio energetico)
- L'accenditore per la scarica iniziale che può essere esterno oppure già incorporato nella lampada.

Mezzi, Attrezzature e Risorse umane previste per l'intervento di sostituzione		Note
Mezzi	<ul style="list-style-type: none"> • Furgone impresa • Scala modulare • Trabattello modulare mobile 	L'utilizzo del trabattello è necessario viste le altezze elevate delle lampade da sostituire (altezza trabattello componibile da 1,70 a 13,70 m; Ingombro: m 2,00 x 1,20)
Attrezzature	<ul style="list-style-type: none"> • Borsa degli attrezzi • Guanti di protezione • Casco di protezione • Proiettore mobile da cantiere • Segnaletica di pericolo • 500m di nastro di segnalazione di pericolo bianco e rosso 	<ul style="list-style-type: none"> • Considerata la scarsa illuminazione nell'area d'intervento di manutenzione • Per non creare intralci ostacoli
Risorse umane	<ul style="list-style-type: none"> • 1 Operaio specializzato • 1 Apprendista 	

QUESITO N.4

Un manutentore è chiamato per la sostituzione di una pompa di ricircolo a servizio di un impianto di riscaldamento. La nuova elettropompa ha un costo di listino pari a 2.200,00 euro. Per eventuali accessori si consideri un 10% del prezzo di listino dell'elettropompa. Il candidato facendo le opportune considerazioni, effettui un preventivo dettagliato da esporre al committente che tenga conto dei costi di materiale, manodopera, e dell'utile d'impresa. Rediga inoltre, un rappresentazione su scala temporale o reticolare di tutte le fasi necessarie.

R.3

La stesura di un preventivo parte dalla determinazione del prezzo unitario ("analisi prezzi unitari") da cui si ricava inoltre, per ogni voce di computo, il relativo "utile di impresa". Procedendo in questo modo nella risoluzione del quesito proposto si ottiene quanto riassunto nelle seguenti tabelle.

Dati:

Elettropompa (prezzi listino)	€ 2.200,00	+	Accessori (10%)	€ 220,00
-------------------------------	------------	---	-----------------	----------

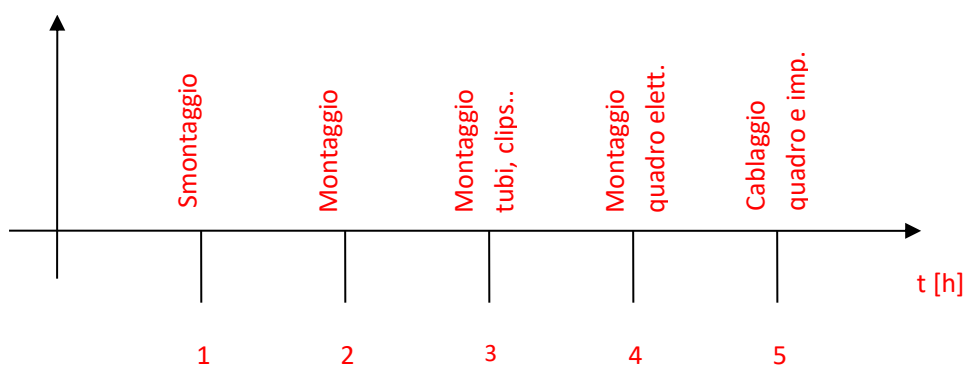
Analisi prezzo unitario

Costo manodopera operaio	€ 30,00
--------------------------	---------

Prezzo di listino pompa	Accessori (10%)	Totale	Sconto (%)	Costo materiali all'Impresa (M)	Temp [h]	Costo manodopera (O)	Totale manodopera + materiale (A=M+O)	Ricarico (utile di impresa in % su A)	Utile della Impresa (B)	Prezzo unitario (A) + (B)
€ 2.200,00	€ 220,00	€ 2.440,00	€ 847,00 (35%)	€ 1.593,00	2	€ 60,00	€ 1.653,00	25,00%	€ 413,25	€ 2.066,25

Codice	Descrizione	U.M.	Q.tà	Prezzo unitario	Totale
L002	Fornitura e posa in opera di elettropompa completa di accessori e quant'altro necessario a dare il lavoro finito a perfetta regola d'arte.	cad.	1	€ 2.066,25	€ 2.066,25
Totale (IVA esclusa)					€ 2.066,25
IVA 22%					€ 454,58
Totale (IVA inclusa)					€ 2.520,83

Cronoprogramma lavori



QUESITO N.5

Un interruttore di posizione (finecorsa) presenta un valore di $B_{10} = 10^7$ cicli.

L'interruttore di posizione lavora per 10 ore al giorno per 220 giorni di funzionamento all'anno con un azionamento ogni 5 sec. Il candidato calcolato il numero totale di cicli determini la vita utile (T) espressa in anni del componente e dopo aver determinato il tasso di guasto λ [1/anni] del componente determini il tempo medio di funzionamento atteso MTTF espresso anch'esso in anni.

Volendo sostituire il suddetto finecorsa con un modello differente di costo pari al doppio (80 euro) e con $B_{10} = 10^8$ cicli determini il risparmio percentuale probabile annuo nel caso di sostituzione di 200 finecorsa.

QUESITO N.6

In uno stabilimento industriale sono presenti 50 motori elettrici uguali funzionanti nella fase di guasti casuali. Supposto che in un intervallo di tempo di 3000 ore si verifichino 5 guasti e precisamente dopo 400, 800, 1200, 1600 e 2000 ore, il candidato determini il tasso di guasto dei motori esaminati e calcoli l'affidabilità fino al tempo di 2500 ore.

QUESITO N.7

Un manutentore è chiamato per la sostituzione di 60 apparecchi di illuminazione in un reparto di produzione meccanica posti ad una altezza di 4,5 metri. I nuovi apparecchi a LED hanno un costo di listino pari a 400,00 euro/cad. Per eventuali accessori di montaggio si consideri un 5% del prezzo di listino degli apparecchi. Il candidato facendo le opportune considerazioni, effettui un preventivo dettagliato da esporre al committente che tenga conto dei costi di materiale, mano d'opera e dell'utile d'impresa. Rediga inoltre, un rappresentazione su scala temporale o reticolare di tutte le fasi necessarie.

QUESITO N.8

Si deve sostituire una vecchia caldaia a gasolio con una nuova a metano dotata di centralina di regolazione automatica.

La realizzazione dell'opera può essere suddivisa nelle attività riportate in tabella fra le quali esistono vincoli di precedenza del tipo F.S. (Finish to Start).

Per ogni attività è indicata la durata ed il numero necessario di risorse umane per la realizzazione.

La squadra di lavoro disponibile per l'Impresa è di due unità.

Rappresentare l'intero processo lavorativo fino al collaudo mediante un diagramma di Gantt cercando di ottimizzare i tempi di realizzazione compatibilmente con le risorse disponibili.

NOME	DESCRIZIONE	DURATA	RISORSE NECESSARIE	ATTIVITA' PRECEDENTI
A	Sconnessione vecchia caldaia	4 gg	1	-
B	Smontaggio quadri elettrici	1 gg	1	-
C	Ordinazione nuova caldaia, centralina ed elettrovalvole	40 gg	--	-
D	Asporto vecchia caldaia	2 gg	2	A
E	Opere edili	8 gg	2	B, D
F	Montaggio quadri elettrici	2 gg	1	E
G	Montaggio nuova caldaia	3 gg	2	C, E
H	Montaggio tubazioni ed elettrovalvole	3 gg	2	C, G
I	Montaggio e collegamento centralina	1 gg	1	C, H
L	Collegamento impianto gas	11 gg	1	E
M	Collaudo e messa in esercizio	1 gg	2	F, I, L