

CAPITOLO 3 TEORIA DELL’AFFIDABILITÀ

3.1 Introduzione storica

La disciplina nota con il nome di affidabilità, con i concetti in essa contenuti, è diventata insostituibile nella soluzione di molti problemi e la sua applicazione riguarda diversi settori industriali.

La sua origine risale al periodo tra la prima e la seconda guerra mondiale con la comparsa dei primi aerei a più motori per i quali si doveva decidere quale fosse la migliore configurazione per il sistema di propulsione; inoltre il non funzionamento anche solo di alcune parti dello stesso potevano pregiudicare la missione, e spesso la sicurezza del volo.

Il concetto di affidabilità non era ancora stato definito in modo rigoroso e gli studi inizialmente avevano carattere prettamente sperimentale così come sperimentali erano anche i dati sulla frequenza di guasto di apparecchiature di bordo, espressa in termini di numero medio di sostituzioni della stessa; nella questione sulla probabilità di successo di una missione aerea era comunque sott’inteso il concetto di probabilità di sopravvivenza per un certo periodo di tempo.

Intorno al 1930 questi dati cominciarono ad essere elaborati statisticamente, fornendo utili indicazioni sui miglioramenti da apportare ai progetti.

Conoscere esattamente gli sviluppi di una missione non era e tuttora non è possibile; in un primo tempo è risultato infatti difficile formulare teorie matematiche tradizionali per verificare future avarie, ma facendo memoria degli eventi passati e con l’impiego di tecniche probabilistiche si potevano fare delle serie considerazioni sull’andamento futuro.

Tra il 1943 ed il 1950 sia i tedeschi (Von Braun) sia gli americani che operavano in ambito militare, cercarono di dare una soluzione ingegneristica ai problemi affidabilistici.

I missili tedeschi V1 e V2 furono i primi sistemi sui quali venne applicato con successo il concetto di affidabilità di sistema, partendo dall’affidabilità dei singoli componenti (principio dell’“anello debole”).

La diffusione della disciplina dall’ambito militare a quello civile si ebbe intorno agli anni ’60 con l’aumentare della complessità dei sistemi dei vari settori industriali.

Alla fine degli anni ’80 gli studi affidabilistici entrarono a far parte del TQM (Total Quality Management) ed alcuni metodi di valutazione dell’affidabilità dei sistemi cominciarono ad essere richiesti per ottenere la certificazione di qualità ISO-9000.

Generalità

La teoria dell'affidabilità è stata sviluppata con lo scopo di fornire metodi per valutare se un prodotto o un servizio sarà funzionante per la durata richiesta dall'utilizzatore. Tale materia di studio include un insieme di teorie, di metodi matematici e statistici e di tecniche operative impiegate per determinare cosa potrebbe non funzionare, quali strategie attuare per prevenire il guasto e, nel caso in cui il guasto si verifichi, quali siano gli interventi più adatti a ripristinare rapidamente il funzionamento e limitare le conseguenze; essa ci permette inoltre di distinguere tra sistemi riparabili e non riparabili e di analizzare sistemi a due o più stati di funzionamento (per es. funzionante / parzialmente guasto / guasto). Fa parte della teoria dell'affidabilità anche la "manutenibilità" che, come vedremo in seguito, è una grandezza simile e complementare all'affidabilità.

L'affidabilità non è una grandezza deterministica ma una probabilità che, come una variabile aleatoria, può essere determinata con formule analitiche e il cui valore può essere previsto solo attraverso considerazioni di tipo probabilistico; essa non fornisce quindi la certezza che un guasto si verifichi o meno, ma applicata in modo sistematico su un sistema, ci dà risultati di notevole utilità sui quali è possibile basare importanti decisioni sulle modalità di funzionamento di un impianto.

Nella scienza probabilistica possiamo quindi definire una probabilità vera, che viene generalmente constatata a posteriori e, in alcuni casi calcolata a priori, oppure più comunemente dobbiamo parlare di stima di probabilità che viene calcolata secondo le leggi della statistica: tale stima dell'affidabilità è in genere diversa dalla probabilità vera.

Riassumendo esiste sempre una probabilità effettiva che è raramente nota ma sicuramente stimabile in via sperimentale in modo più o meno approssimato a seconda della numerosità e affidabilità del campione statistico considerato.

Logica Binaria

Nelle definizioni di affidabilità e nelle applicazioni di tale disciplina si fa spesso ricorso alla logica binaria che è indicata per lo studio di apparati o sistemi che possono assumere principalmente due configurazioni: sistema funzionante o sistema non funzionante. Tali sistemi vengono detti bistabili.

Nella realtà si possono presentare delle difficoltà nella applicazione di tali logiche a base due (sistema numerico binario) quando alcuni apparati, in alcuni casi, degradano le loro caratteristiche ma non degradano la loro missione: in questo caso lo stato del sistema non è più definibile in modo immediato; per questo motivo è necessario definire puntualmente, specialmente nel caso di sistemi complessi, il concetto di "corretto funzionamento" o sistema funzionante. Lo stato di guasto verrà definito mediante l'individuazione di un limite ammissibile nelle prestazioni dell'elemento o sistema: oltrepassato il limite prestazionale predefinito l'apparecchiatura in esame viene considerata in stato di guasto. Si possono ad esempio identificare diversi livelli di affidabilità, catalogando i guasti a seconda delle conseguenze che essi determinano nell'ambiente in cui operano.

Condizioni ambientali

Altrettanto importante è la definizione del concetto di “condizioni ambientali”. Qualsiasi oggetto è destinato ad uno specifico uso con determinate condizioni al contorno che vengono definite in fase di progetto. Se le reali condizioni operative sono diverse da quelle previste esse avranno una certa influenza sul normale funzionamento del sistema con conseguente variazione della probabilità di guasto e quindi dell'affidabilità dell'oggetto stesso.

Il tempo di funzionamento

Un altro parametro molto importante, che rientra in qualsiasi studio affidabilistico, è il tempo: l'affidabilità infatti proprio per definizione è strettamente legata ad un prefissato periodo di tempo.

Il funzionamento di un elemento o sistema, progettato e realizzato per svolgere una determinata missione, in generale non è mai continuo nel tempo a causa delle inevitabili difformità che si presentano nel corso della sua vita utile, determinate da svariati fattori umani e ambientali.

Le macchine o i componenti non riparabili presentano un singolo ciclo di vita ma spesso è possibile e necessario ripristinare la funzionalità originaria in particolare per quei dispositivi a cui è richiesto un notevole numero di cicli del tipo rottura-riparazione-ripristino anche più volte nel corso della vita utile.

3.2 Disponibilità

In questo contesto di possibile interruzione della sua funzionalità si inserisce una nuova

funzione detta disponibilità, $A(t)$ (Availability). Nel caso in cui sia previsto un intervento manutentivo, questo deve essere eseguito in intervalli di tempo non coincidenti con i tempi di missione; per sistemi riparabili la manutenzione pone l'apparato in stato di non disponibilità anche per il tempo necessario alla sua riparazione.

La disponibilità è quindi una funzione che tiene conto sia dell'affidabilità del sistema sia degli aspetti manutentivi.

Affidabilità e Disponibilità rappresentano due grandezze mediante le quali si può ottenere una valutazione quantitativa della continuità con cui un elemento o un sistema può garantire il raggiungimento della missione per la quale è stato progettato e costruito; esse vengono garantite, ove possibile, attraverso adeguate politiche manutentive che contribuiscono ad un funzionamento globale regolare e continuativo e rappresentano un onere economico spesso non indifferente, intervenendo in sede di gestione d'impianto e nella progettazione o riprogettazione di parti o insiemi di macchine o nell'installazione di unità di riserva come nel caso dei sistemi ridondanti.

La disponibilità è strettamente correlata all'affidabilità e alla manutenibilità del sistema: aumentando il periodo di tempo intercorrente tra due successivi stati di

guasto e riducendo il tempo di riparazione è possibile ottenere un incremento della disponibilità del sistema stesso.

A livello produttivo l'affidabilità viene spesso sostituita dalla disponibilità attraverso la quale il gestore dell'impianto riesce a monitorare la reale efficienza operativa delle macchine nel corso della loro vita utile.

3.3 Impiego della Teoria dell'Affidabilità

Elenchiamo ora i principali motivi che spingono l'industria ad impiegare le tecniche affidabilistiche.

- aumento della complessità delle macchine e degli impianti con conseguente aumento della probabilità di guasto.
- Esigenza di ridurre il peso e il volume dei prodotti a parità di sicurezza di funzionamento.
- Esigenza di aumentare la durata di funzionamento di una macchina o impianto.
- Difficoltà di manutenzione per le parti meno accessibili di una macchina o impianto.
- Sicurezza

L'affidabilità coinvolge quasi tutti gli aspetti legati al possesso di un bene:

- Costi di gestione: l'affidabilità coinvolge sia il costo di acquisto che quello di manutenzione di un bene: l'impiego di materiali più affidabili spesso comporta un incremento del prezzo. Altre volte accade che l'adozione di tecnologie più affidabili implica un parallelo decremento del costo
- Soddisfazione del cliente: se un componente non corrisponde alle aspettative di affidabilità del cliente, può succedere spesso che ci sia una disaffezione rispetto agli altri prodotti della stessa azienda, con chiari danni di immagine
- Gestione delle risorse: meno un componente si guasta e minore è la quantità di risorse che deve essere dedicata alla gestione delle situazioni di inefficienza causate dai guasti.
- Capacità di vendere i prodotti o i servizi: La maggiore affidabilità dei componenti permette di aumentare la soddisfazione del cliente e di guadagnare nuove fette di mercato
- Sicurezza: L'affidabilità è strettamente correlata ad alcuni aspetti della sicurezza.
- Qualità : Essendo la capacità di essere attinenti alle specifiche di un prodotto, una scarsa qualità può significare una bassa affidabilità
- Manutenibilità

3.4 Manutenibilità

La manutenibilità è la probabilità che al tempo t dal guasto il componente o sistema sia nuovamente funzionante. Se t_r è il tempo di manutenzione complessivo, variabile casuale con distribuzione $m(t_r)$ allora la manutenibilità è data da:

$$M(t) = P[t_r \leq t] = \int_0^{\infty} m(t_r) dt_r$$

il Mean Time To Repair (MTTR) secondo le norme UNI corrisponde al Mean Down Time (MDT) e vale:

$$MTTR = \int_0^{\infty} m(t_r) t_r dt_r$$

Per $m(t_r)$ si usano solitamente distribuzioni esponenziali negative (per semplicità di calcolo), Weibull, Normali, o log-normali (buona approssimazione di una somma di esponenziale negativa, tipica dei fattori accidentali, e normale, tipica delle attività complesse)

3.5 Obiettivi dell'affidabilità

In ambito industriale, per motivi economici, occorre garantire la continuità di funzionamento degli impianti di produzione; per motivi etici ed economici, occorre garantire la qualità dei prodotti ed il funzionamento in sicurezza sia degli impianti sia dei prodotti.

Il campo di interesse di tale disciplina si è progressivamente ampliato, trasformandola da semplice strumento di supporto alla progettazione ed alla produzione dei sistemi o componenti in una scienza che ha ormai assunto un ruolo centrale nella visione più moderna della progettazione dove vengono considerati prioritari ed integrati gli aspetti legati alla sicurezza, alla qualità ed ai costi.

Sicurezza

L'analisi di affidabilità risulta particolarmente importante in quelle tipologie impiantistiche soggette a rischi di incidenti rilevanti, che possono coinvolgere anche aree adiacenti agli stabilimenti produttivi. Con uno studio affidabilistico si può valutare la probabilità che il guasto di un componente o di un sistema di sicurezza possa determinare una sequenza incidentale con gravi conseguenze sulla incolumità delle persone.

Anche in impianti che non sono soggetti a rischi di incidente rilevante un'analisi di affidabilità può avere benefici effetti sulla sicurezza, per esempio per garantire

l'incolumità del personale addetto ad operazioni critiche (sostanze pericolose o macchine particolari) o per valutare l'affidabilità delle procedure operative normali e di quelle di emergenza.

Qualità

La scelta di un bene o servizio tra diverse soluzioni è dettata in generale dalla valutazione del rapporto tra la sua qualità ed il suo costo.

Un prodotto di qualità deve possedere le seguenti caratteristiche

- la durata (per quanto tempo si può utilizzare effettivamente il componente?),
- l'affidabilità (con quale frequenza si guasta il prodotto?),
- la manutenibilità (quanto facilmente il prodotto può essere riparato?).
- se la qualità viene, quindi, intesa in termini di adeguatezza del bene allo scopo al quale è destinato,
- alla sua determinazione contribuiscono principalmente due fattori:
- conformità, che tiene conto della aderenza delle prestazioni alle specifiche progettuali e/o
- commerciali;
- affidabilità, che tiene conto della capacità del prodotto/s
- servizio di mantenere le sue caratteristiche di funzionamento e di manutenibilità nel tempo.

Costi

In un impianto industriale il costo annuo totale delle misure di riduzione del rischio comprende:

- costi di investimento (per esempio, acquisto nuove apparecchiature di sicurezza), da ammortare in un certo periodo di tempo, con un certo tasso;
- costi di manutenzione degli impianti e delle apparecchiature di sicurezza;
- costi operativi (per esempio, per l'aggiunta di personale o per l'addestramento dello stesso).

Normalmente non vengono inclusi ulteriori costi operativi per la realizzazione di procedure operative più sicure, in quanto si assume che questi vengano già considerati tra i costi di realizzazione dell'intervento.

Questi costi vengono, in genere, valutati in funzione dell'affidabilità richiesta al sistema in esame, in quanto questa può essere ottenuta con due diverse strategie:

1. richiedendo al fornitore un prodotto con affidabilità molto elevata; questo comporta costi di progettazione e di produzione elevati e, quindi, un costo d'acquisto piuttosto elevato ma minori costi di manutenzione (parti di ricambio e manodopera);
2. richiedendo al fornitore un prodotto di affidabilità inferiore e, quindi, di costo inferiore ma prevedendo un adeguato programma di manutenzione con un aumento dei costi di manutenzione. Secondo una visione tradizionale il costo totale minimo si

ottiene quando i costi di fornitura e quelli di manutenzione si bilanciano, ovvero quando c'è equilibrio tra il costo dei programmi di sicurezza/affidabilità ed i costi di mancata produzione da sostenere in caso di guasto/incidente,

come mostra la Fig. 3.1

Nella Fig. 3.1 è tracciata una retta verticale che rappresenta il Limite Tecnicamente Raggiungibile (LTR) ovvero quel livello di qualità/sicurezza oltre il quale non è opportuno spingersi per ragioni tecniche: vogliamo infatti sottolineare che la sicurezza totale è impossibile da raggiungere e che l'attuale livello tecnologico, già piuttosto avanzato, consente normalmente solo piccoli miglioramenti sui progetti, mentre non ha senso spingersi troppo oltre nell'adottare sistemi di sicurezza che potrebbero rivelarsi controproducenti in virtù della complessità progettuale e funzionale alla quale conducono.

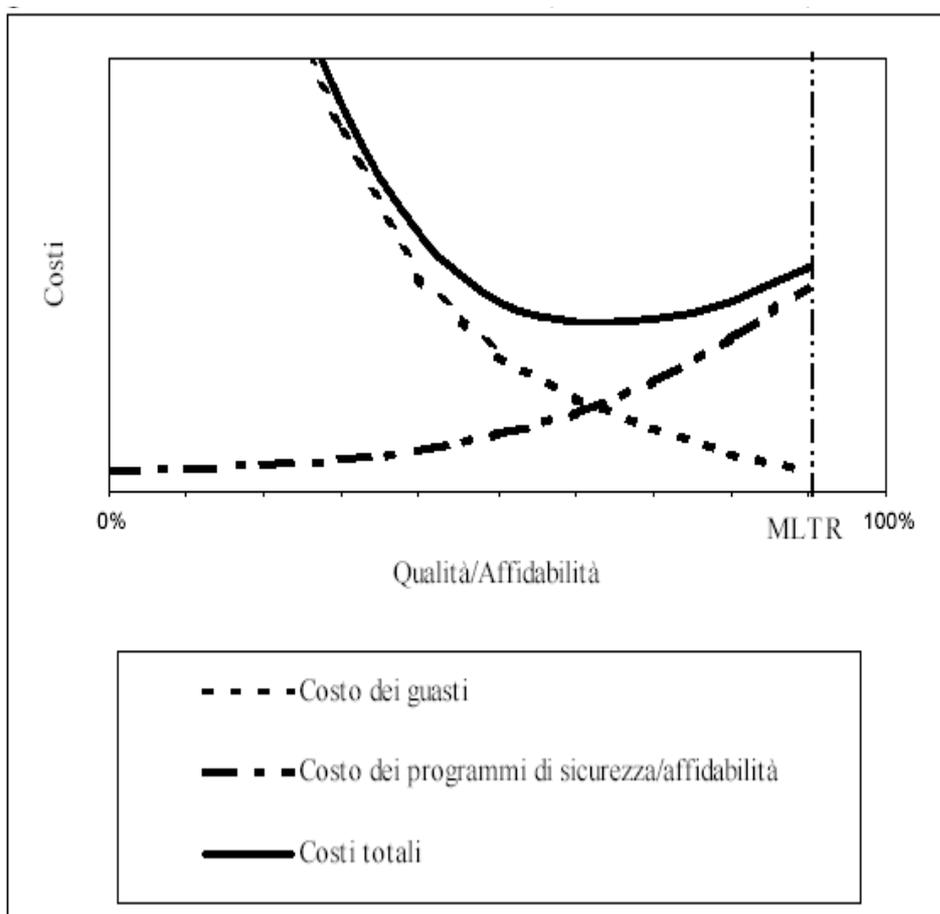


Fig 3.1

Una visione moderna del problema suggerisce, invece, che i costi legati ai guasti divengono molto più elevati se nascono questioni di sicurezza e se si considerano in essi anche fattori difficilmente quantificabili come il costo della vita umana, i costi di

inquinamento dell'ambiente, la perdita d'immagine dell'Azienda. In questa ottica i costi dei programmi di sicurezza divengono dei benefici figurativi in quanto determinano dei “mancati costi”, cioè fanno sì che, in caso di incidente, non si debbano sostenere costi ben maggiori. L'andamento tipico delle curve costo/sicurezza, nella visione moderna è mostrato nella Fig. 3.2

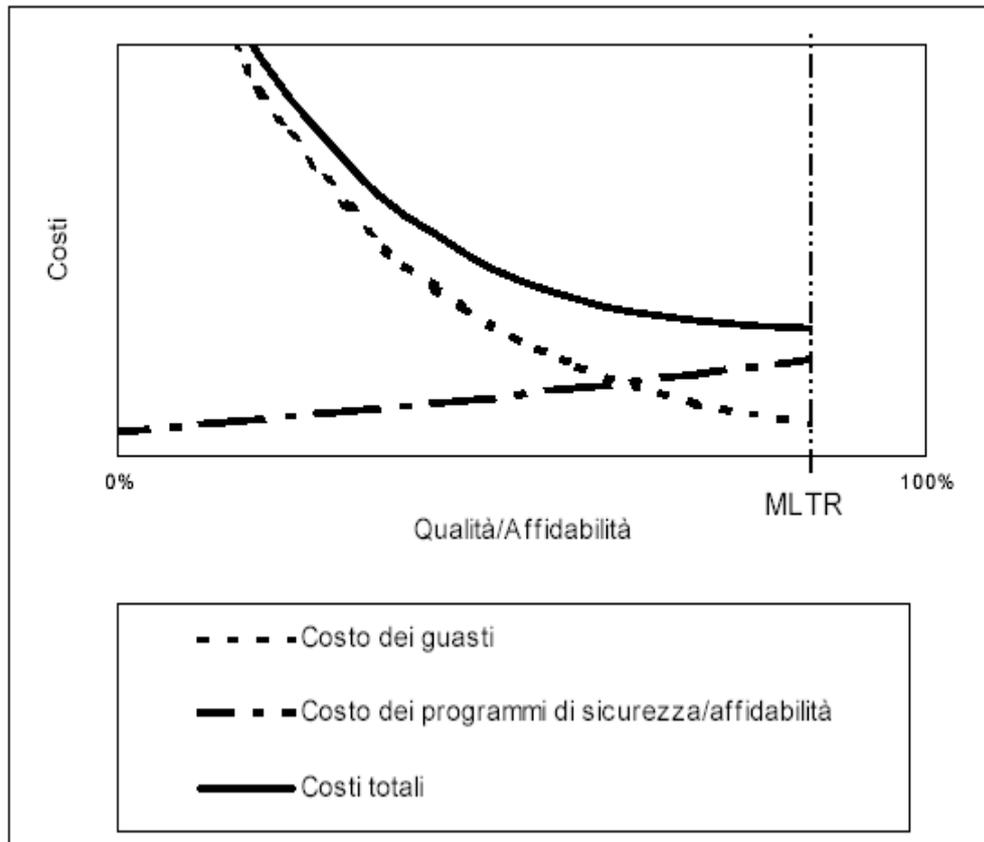


Fig 3.2

L'analisi affidabilistica fornisce risultati utili in qualunque momento essa venga eseguita, anche se uno studio effettuato sin dalle fasi progettuali consente ovviamente di realizzare interventi molto più efficaci (rapporto costi/benefici più basso).

In fase di progettazione possiamo, infatti, individuare i punti deboli del progetto ed i componenti critici del sistema, cioè quelli che influenzano maggiormente l'affidabilità del complesso, e ciò ci consente di scegliere componenti più affidabili o meglio ancora di configurare il sistema in modo da rendere l'affidabilità del complesso meno dipendente dall'affidabilità del componente critico (ridondanza).

In fase di esercizio, invece, possiamo solo stabilire una strategia di manutenzione che riduca al minimo i tempi di fuori servizio del sistema (costi di mancata produzione) ed i costi di manutenzione.

Possiamo quindi concludere che le analisi di affidabilità rappresentano gli studi quantitativi, sia pure in termini probabilistici, da eseguire non solo per realizzare corrette analisi del rischio dei sistemi e soddisfare quindi eventuali adempimenti

richiesti dalle normative vigenti, ma anche per contenere i costi manutentivi ed ottenere prodotti di qualità che risultino competitivi in mercati sempre più esigenti.

3.6 Definizioni

3.6.1 Affidabilità

La definizione più completa è quella che indica l'Affidabilità (in inglese Reliability) di un elemento/sistema come la probabilità che esso funzioni senza guastarsi ad un dato istante e/o per un certo periodo t con riferimento a ben precisate condizioni operative ed ambientali.

Quindi gli elementi necessari alla definizione di affidabilità sono:

- Un criterio univoco per giudicare se un elemento è funzionante o meno
- Esatta definizione delle condizioni ambientali e d'impiego
- Determinazione dell'intervallo di tempo t

Fissate le prime due condizioni l'affidabilità di un elemento diventa funzione solo del tempo e la forma di tale funzione dipende dalla legge probabilistica con cui le condizioni di cattivo funzionamento o di guasto possono verificarsi nel tempo.

L'affidabilità è quindi la scienza di prevedere, analizzare, prevenire e limitare i guasti nel tempo.

Tale disciplina ha principi e basi teoriche ben definite e altrettanto chiare sotto-discipline, tutte legate in qualche modo allo studio e alla conoscenza dei guasti. Il suo legame con la matematica e la statistica, è molto stretto e nel suo studio vengono anche coinvolte altre discipline quali la fisica, la chimica, la meccanica e l'elettronica.

Vediamo alcuni punti importanti contenuti nella definizione di Affidabilità :

- Il concetto di affidabilità può essere applicato a qualsiasi oggetto realizzato dall'uomo, sia esso un oggetto semplice (componente), o uno complesso, costituito dall'insieme di più componenti (sistema).
- Per fare un esempio consideriamo il sistema di controllo di un processo industriale, costituito da un certo numero di sensori ed attuatori, a loro volta controllati da un computer. Il sistema è composto da un certo numero di componenti elettromeccanici, più un computer, più un'applicazione software. Un aspetto molto importante nello studio dell'affidabilità è proprio il calcolo dell'affidabilità di un sistema a partire dall'affidabilità dei suoi componenti. L'affidabilità del sistema dipenderà dall'affidabilità dei singoli componenti (incluso ovviamente il software) e da come essi interagiscono tra di loro. Inoltre l'applicazione software, (componente del sistema di controllo), è a sua volta analizzabile come sistema composto da un certo numero di componenti (moduli) software. Per l'affidabilità globale si applica quindi la regola generale di decomposizione gerarchica di un sistema in sotto-sistemi.

- L'affidabilità è una probabilità ed, in quanto tale, è un numero, adimensionale, compreso tra 0 e 1.
- Per poter definire correttamente l'affidabilità di un qualsiasi oggetto (componente o sistema) è fondamentale definire precisamente le condizioni operative e la durata della sua attività. Questi due termini (condizioni e durata) sono inglobati nel concetto di missione, che risulta essere un concetto basilare nello studio dell'affidabilità.

La definizione data sopra può portarci ad una ulteriore analisi del concetto di affidabilità nel momento in cui cerchiamo di definire con maggior precisione la frase "funzioni correttamente". Infatti non tutti i tipi di malfunzionamento sono ugualmente importanti. Vi sono elementi che anche se da un dato istante di tempo entrano in stato di guasto non comportano una riduzione delle reali funzionalità del sistema, né creano dei rischi per la sicurezza. Al contrario, se si guasta un elemento che definiamo critico il nostro sistema interromperà lo svolgimento delle sue funzioni. Pertanto, fatte queste considerazioni, possiamo sostituire la nostra precedente definizione di affidabilità con la seguente:

l' affidabilità di un qualsiasi dispositivo (sistema o componente) è la probabilità che esso non abbia guasti di un certo tipo durante il periodo di tempo previsto, intendendo con quest'ultimo la durata della missione (ad esempio, un ciclo di funzionamento, tutta la vita dell'impianto, l'intervallo che intercorre fra due successive operazioni di manutenzione, ecc.

La definizione di affidabilità è legata quindi alla specifica funzione che il sistema deve compiere ed alle condizioni operative nelle quali esso si trova.

3.6.2 Diversi tipi di affidabilità

I vari tipi di affidabilità vengono classificati in base al tipo di guasto che considerano. Una classificazione abbastanza comune è la seguente:

- Affidabilità logistica - Probabilità che non capitino alcun guasto (di qualsiasi tipo).
- Affidabilità di missione - Probabilità che non capitino guasti con conseguenze maggiori, tali cioè da pregiudicare la funzionalità del sistema e quindi di impedirgli il completamento della sua missione. Se necessario, si distingue tra guasti significativi (che degradano in modo significativo le funzionalità del sistema, ma non impediscono il completamento della missione) e guasti maggiori (che invece impediscono il completamento della missione).
- Sicurezza - Probabilità che non capitino guasti con possibili conseguenze catastrofiche, tali cioè da produrre danni a persone, cose o al sistema stesso.

Vi è, inoltre, un altro tipo di affidabilità, meno quantificabile a priori:

la probabilità che il sistema funzioni e possa venire usato, in modo sicuro, secondo le esigenze dell'utente, anche in situazioni critiche per l'utente stesso e/o per gli impianti controllati.

La probabilità che le funzioni del sistema siano disponibili a svolgere il loro compito quando se ne manifesta la necessità, anche dopo lunghi periodi di inutilizzo. Definiamo per ora questo tipo di affidabilità, affidabilità di utilizzo. Essa ingloba tutte le categorie affidabilistiche inerenti aspetti umani, di utilizzo, di definizione dei requisiti e delle modalità di utilizzo del sistema, delle competenze necessarie, dell'interazione uomo-macchina, aspetti manageriali, sia di gestione del progetto, sia negoziali e di gestione del contratto.

3.6.3 Livello di affidabilità

In fase di progettazione di un sistema, si può definire il livello di affidabilità che s'intende raggiungere. Dato che l'affidabilità è una probabilità, tale requisito può essere quantificato come un semplice numero. Quando si progetta un sistema si pongono dei requisiti quantitativi diversi per i vari tipi di affidabilità.

Esempio:

- Affidabilità logistica Probabilità $\sim 10^{-3}$
- Affidabilità di missione $10^{-7} < \text{Probabilità} < 10^{-5}$
- Sicurezza (in inglese, safety) Probabilità $< 10^{-9}$

In inglese, la protezione da guasti con possibili conseguenze catastrofiche viene chiamata safety, mentre con il termine security si individua la protezione da accessi non autorizzati e da possibili danneggiamenti volontari. Entrambi i termini si traducono in italiano con il termine sicurezza, e questo a volte può generare confusione. Nel nostro caso, la parola sicurezza sarà sempre associato al concetto di affidabilità e quindi di safety.

3.6.4 Sistema

Il concetto di affidabilità è strettamente legato alla definizione del sistema. Infatti può essere considerato sistema ogni prodotto o servizio che viene impiegato da un utilizzatore. Quindi un sistema è un insieme di elementi materiali e/o non materiali che si comportano come un'unità che si propone la realizzazione di alcune funzioni o servizi. Un sistema può essere sia un insieme assemblato di componenti, che costituisce una parte funzionale di una apparecchiatura, sia una sequenza di operazioni (procedura) per eseguire un servizio:
in breve lo possiamo definire come il risultato delle connessioni fisiche e logiche di componenti

La risposta funzionale dell'insieme è inequivocabilmente influenzata dallo stato del singolo di conseguenza l'affidabilità di un oggetto complesso deriva dalle affidabilità degli elementi che lo compongono e può essere determinata da una loro combinazione più o meno complessa.

3.6.5 Componente

Si definisce componente un oggetto, anche complesso, la cui affidabilità può essere caratterizzata solo applicando direttamente i dati statistici provenienti dall'esperienza.

Ciascun componente di un sistema ha una precisa funzione da assolvere descritta nella "specificazione di un componente" nella quale sono anche indicate le interazioni con altri componenti e le condizioni ambientali nel quale si trova ad operare.

Vediamo i possibili comportamenti di un componente che andranno a influenzare il sistema a vari livelli.

Il Componente:

- assolve la sua funzione correttamente
- non assolve la funzione
- assolve solo parzialmente alla funzione
- Durante l'attività disturba un'altra funzione o un altro componente

Tra i quattro stati principali di funzionamento di un componente solamente il primo risulta pienamente regolare.

3.7 Il Guasto

Nello studio delle attività manutentive il fenomeno oggetto di studi statistici e probabilistici è il guasto.

3.7.1 Definizione

Il guasto è un evento caratterizzato dal passaggio da uno stato ad un altro, in cui l'entità perde la sua funzionalità originaria determinando una variazione inaccettabile delle caratteristiche prestazionali del sistema: si verifica quindi la cessazione dell'attitudine di un'entità a eseguire la funzione richiesta che ne caratterizza l'uso.(ISO 10147/UNI 9910). A seguito del guasto di un'entità, quest'entità entra in stato di avaria.

Qualsiasi oggetto durante il suo funzionamento è naturalmente sottoposto a numerosi tipi e livelli di sollecitazioni, con il tempo tutti gli oggetti perdono, con modalità diverse, la loro capacità di resistere, ma può accadere che nella fase di progetto si siano considerate particolari condizioni ambientali di esercizio non rispettate nella realtà operativa. Il guasto perciò avviene quando le sollecitazioni superano il livello

di resistenza dell'oggetto o perché l'oggetto è invecchiato e perciò ha abbassato le sua soglia di resistenza o perché si trova ad operare in condizioni non previste e con sollecitazioni superiori a quelle a cui era preposto.

Un apparato anche se ben progettato dovrà avere prima o poi dei guasti .

Precisiamo che per guasto non si intende unicamente il collasso totale e complessivo del funzionamento dell'oggetto, ma tale termine assume valenza diverse a seconda dell'oggetto e delle caratteristiche di uso che dell'oggetto si fanno. I guasti in generale sono principalmente di due tipi:

- casuali: legati a sporadiche sollecitazioni non contemplate,
- legati a l'invecchiamento: cioè al naturale degrado degli oggetti.

3.7.2 Categorie di guasto

Una prima classificazione del guasto è quella relativa alla sua entità:

1) Guasto Significativo (Immobilizzazione).

È un guasto che genera un pericolo (hazard) e/o impedisce il movimento o causa ritardo superiore ad una certa soglia e/o genera un costo superiore ad un certo livello

2) Guasto Maggiore.

È un guasto che deve essere corretto affinché il sistema svolga le funzioni preposte secondo le prestazioni specificate e non genera pericolo e/o ritardo o costo superiori alle soglie della categoria precedente

3) Guasto Minore.

È un guasto che consente comunque il raggiungimento delle prestazioni specificate e non rientra nelle categorie precedenti.

Nel caso di guasto maggiore il dispositivo subisce una variazione delle prestazioni che lo rendono inservibile per l'uso al quale esso era destinato. In questi termini risulta guasto anche un dispositivo che non esegue correttamente la funzione per la quale è stato progettato.

In questo senso possiamo considerare un'altra classificazione:

- guasti parziali: appartengono a questa categoria i guasti che determinano una variazione delle prestazioni del dispositivo tale da non compromettere del tutto il funzionamento (degrado delle prestazioni o perdita di qualità del prodotto);
- guasti totali: sono i guasti che determinano una variazione delle prestazioni del dispositivo tale da impedirne del tutto il funzionamento;

- guasti intermittenti: sono i guasti dovuti ad una successione casuale di periodi di guasto e di periodi di funzionamento, senza che ci sia alcun intervento di manutenzione.

La condizione di guasto si riferisce in generale al solo dispositivo preso in esame: se tale dispositivo è inserito in un sistema più complesso, il suo guasto può anche non causare il guasto dell'intero sistema, pur avendo effetti negativi sulla sua affidabilità. Anche in questo caso possiamo allora distinguere:

- guasti di primaria importanza: quelli che riducono la funzionalità dell'intero sistema del quale fanno parte;
- guasti di secondaria importanza: quelli che non riducono la funzionalità dell'intero sistema del quale fanno parte.
- guasti critici: sono quei guasti che rappresentano un rischio per l'incolumità delle persone e per questo motivo risultano ancora più gravi dei guasti di primaria importanza

Il periodo di regolare funzionamento di un dispositivo si conclude quando un qualsiasi fenomeno fisico - chimico prodottosi in una o più delle sue parti determina una o più variazioni inaccettabili delle prestazioni nominali. Per fenomeno fisico - chimico s'intende l'insieme delle cause in grado di generare una incapacità funzionale la cui entità dipende sia dal tipo di dispositivo, sia dall'uso che ne viene fatto; vediamo alcune condizioni che possono condurre al guasto.

3.7.3 Cause di guasto

- Sollecitazioni, Urto, Fatica

Dipendono dalla distribuzione temporale e spaziale delle condizioni di carico e dalla risposta del materiale. In questo caso assumono un ruolo importante le caratteristiche strutturali del componente, che devono essere valutate nella forma più ampia possibile, inglobando anche possibili errori progettuali, realizzativi, difetti del materiale, ecc.

- Temperatura

La temperatura è una variabile operativa che influisce prevalentemente in funzione delle caratteristiche specifiche del materiale (inerzia termica), e della distribuzione spaziale e temporale delle sorgenti di calore.

- Usura

L'usura è uno stato di degradazione fisica del componente che si manifesta in seguito a fenomeni di invecchiamento unitamente alla normale attività (attrito fra materiali, esposizione ad agenti dannosi, ecc.)

- Corrosione

La corrosione è un fenomeno strettamente legato alle caratteristiche dell'ambiente in cui il componente si trova ad operare. Queste condizioni possono comportare processi di degradazione fisica e chimica del materiale capaci di ridurre il livello prestazionale del componente fino a renderlo non idoneo allo svolgimento della funzione preposta.

3.8 Il Tasso (o Rateo) di guasto

Ogni condizione di funzionamento genera una diversa conseguenza nel sistema o sottosistema in studio; per dare una struttura di tipo numerico alla misura dell'affidabilità di un sistema si ricorre a una formulazione del problema che preveda due possibili stati: un componente assolve correttamente alla sua missione (funziona) oppure no (non funziona).

La differenza tra i due stati è strettamente legata alle caratteristiche dell'elemento, del ruolo all'interno del sistema e delle caratteristiche proprie di quest'ultimo.

L'elemento che congiunge i due stati estremi considerati è rappresentato dal rateo (o tasso) di guasto $\lambda(t)$.

$r(t) = \lambda(t)$ = tasso di guasto al tempo t = numero di guasti nell'unità di tempo riferito ai componenti ancora funzionanti in t
--

Il Rateo di guasto è una funzione $\lambda(t)$ tale che la probabilità infinitesima che l'elemento si rompa al tempo t o in un suo intorno infinitesimo dt sia $\lambda(t)dt$, nell'ipotesi che in t sia ancora funzionante.

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < \bar{t} < t + \Delta t : \bar{t} > t)}{\Delta t}$$

Dimensionalmente è l'inverso di un tempo e può essere interpretato come il numero di guasti nell'unità di tempo, rappresenta quindi una misura della velocità di verificarsi del guasto ("velocità di guasto")

$\lambda(t)dt$ è la probabilità corrispondente alla frazione della popolazione che si rompe nell'intervallo $(t, t+dt)$, con riferimento ad una popolazione sana al tempo t quindi minore o uguale alla popolazione iniziale cioè al tempo $t=0$.

La conoscenza del tasso di guasto è molto importante in quanto ci permette di risalire a diverse funzioni affidabilistiche che vedremo in seguito.

3.9 Modalità di guasto

Come abbiamo detto, l'affidabilità di un componente è connessa alla variabile tempo per cui è utile fare una distinzione sulle modalità di guasto in funzione del periodo temporale in cui il componente stesso si trova ad operare; in generale la frequenza con cui le macchine si guastano nel corso della vita utile, che come visto può essere rappresentata dall'andamento del tasso di guasto $\lambda(t)$, è raffigurabile con una curva che andremo ad esaminare.

Si distinguono tre tipologie di guasto in base alla loro distribuzione durante la vita di una famiglia di componenti uguali e nelle stesse condizioni operative e ambientali:

Guasti Infantili

Vengono detti infantili (o prematuri) quei guasti che si presentano nel primo periodo di vita dei componenti o del sistema (periodo di rodaggio) e la probabilità che si verificano decresce gradualmente nel tempo. La loro natura è legata a difetti intrinseci dei componenti che non sono emersi durante i collaudi e la dinamica del guasto è legata all'incapacità di resistere alle sollecitazioni esterne a cui sono sottoposti, anche se queste sono in entità nominale; in presenza di una buona progettazione sono dovuti essenzialmente ad errori di costruzione o, più frequentemente, di montaggio. Il periodo durante il quale si manifestano i guasti di questo tipo può variare da poche decine ad alcune centinaia di ore di funzionamento.

In termini di affidabilità un impianto sottoposto alla manifestazione di guasti infantili migliora il proprio stato con l'andare del tempo per effetto delle sostituzioni dei componenti difettosi.

In questa tipologia di guasto l'incidenza di manifestazione (rateo di guasto) è decrescente.

Guasti Casuali

I guasti casuali (o accidentali) sono guasti che si verificano durante l'intera vita dei componenti (vita utile) e presentano una probabilità di verificarsi che è indipendente dal tempo e quindi dal periodo di esercizio accumulato; sono dovuti a fattori incontrollabili che neanche un buon progetto ed una buona esecuzione possono eliminare. Generalmente si presentano in condizioni di esercizio non nominali che determinano forti sollecitazioni sui componenti compromettendone le capacità operative.

In questa tipologia di guasto, denominata anche "mortalità standard", l'incidenza di manifestazione del guasto (rateo di guasto) è stazionaria quindi accompagnata da un rateo costante.

Guasti per Usura

I guasti per usura sono quelli che si verificano solo nell'ultimo periodo della vita utile dei componenti o dell'impianto, corrispondente all'età media di funzionamento, e sono dovuti a fenomeni di invecchiamento e deterioramento strutturale e materiale che tendono a mettere rapidamente fuori uso tutti i componenti sopravvissuti ai precedenti periodi di esercizio; per questo motivo la loro probabilità di accadimento cresce al passare del tempo.

L'inizio del periodo di usura è individuato da una crescita della frequenza dei guasti fino al raggiungimento del valore massimo che andrà poi riducendosi per effetto della scomparsa della popolazione.

Per evitare questa tipologia di guasto si ricorre a un ricambio preventivo della popolazione che comporta però il ritorno dell'insorgenza dei guasti di tipo infantile.

Precisiamo che il degrado può essere suddiviso in degrado naturale, che è in stretta relazione con la durata della vita, e degrado forzato (o indotto) il quale riduce la vita della macchina o elemento ed è provocato dalla negligenza dell'uomo, di conseguenza la vita dell'impianto si riduce notevolmente rispetto a quella che potrebbe avere se il degrado fosse naturale.

Possiamo quindi affermare che le fasi di vita della macchina sono ben visibili nell'andamento del rateo di guasto.

Considerando una popolazione di componenti nuovi, tutti uguali, non riparabili, a parità di condizioni ambientali e di funzionamento ed a partire dal medesimo istante $t = 0$, è possibile tracciare il diagramma mostrato in Fig.3.3. Tale diagramma riporta l'andamento del tasso di guasto istantaneo in funzione dell'età dei componenti.

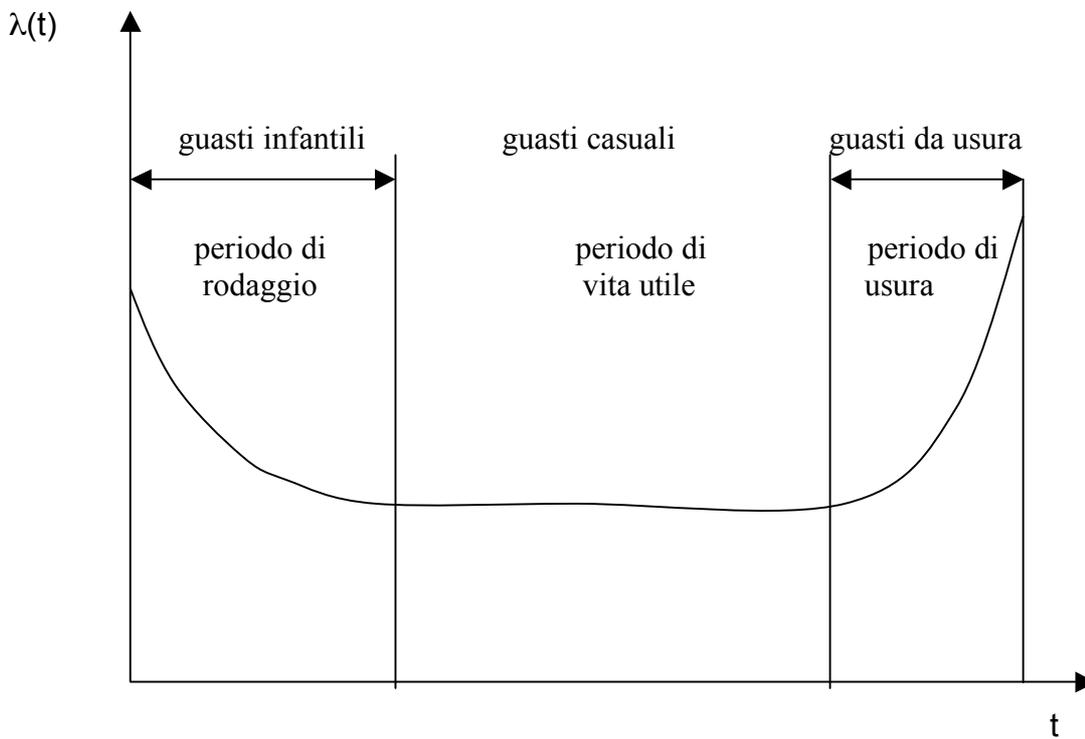
La funzione rappresenta la frequenza con la quale si guastano i componenti e si misura in numero

di guasti rapportato al numero di elementi ancora in vita per unità di tempo di funzionamento.

Data la forma particolare, Il diagramma, viene detto a “vasca da bagno” e consente di visualizzare in modo chiaro la precedente classificazione in guasti infantili, casuali e per usura.

Durante il periodo di rodaggio i guasti di tipo casuale si sovrappongono ai guasti infantili; allo stesso modo, nel periodo finale dei guasti per usura, a questi si sovrappongono ancora i guasti di tipo casuale.

Fig. 3.3 - Tasso di guasto dei componenti in funzione dell'età.



(osservazione: La vita utile dovrebbe essere maggiore della vita di progetto).

Esempi di tassi di guasto

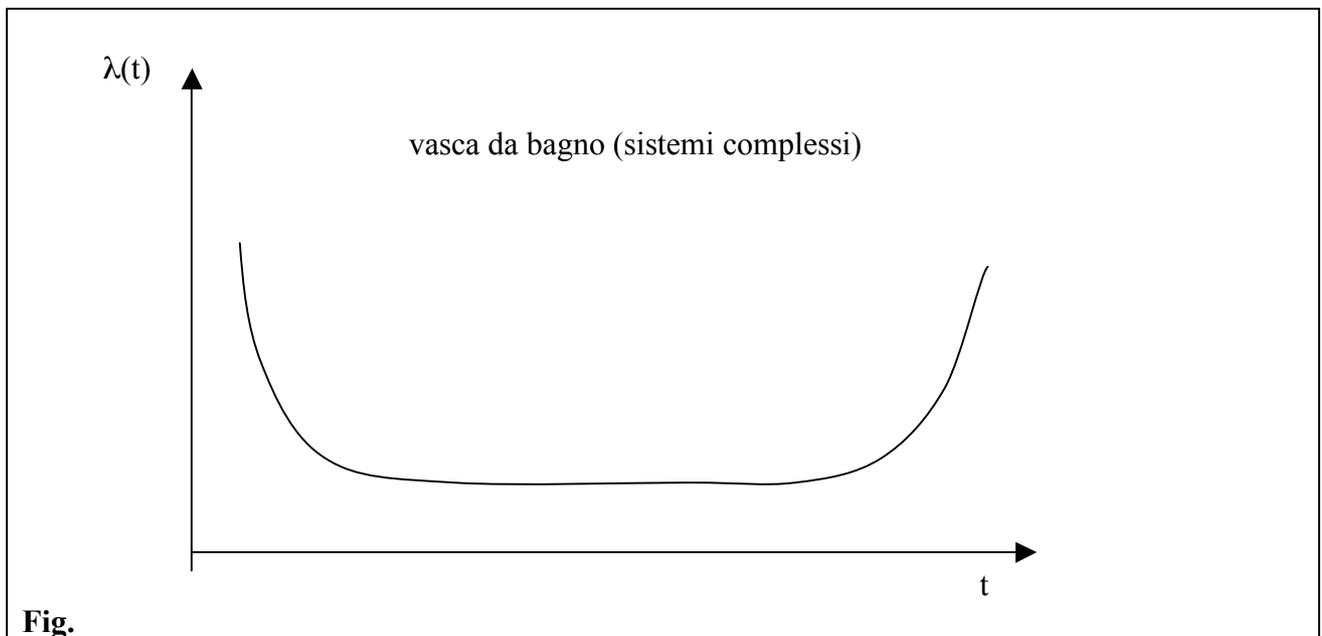
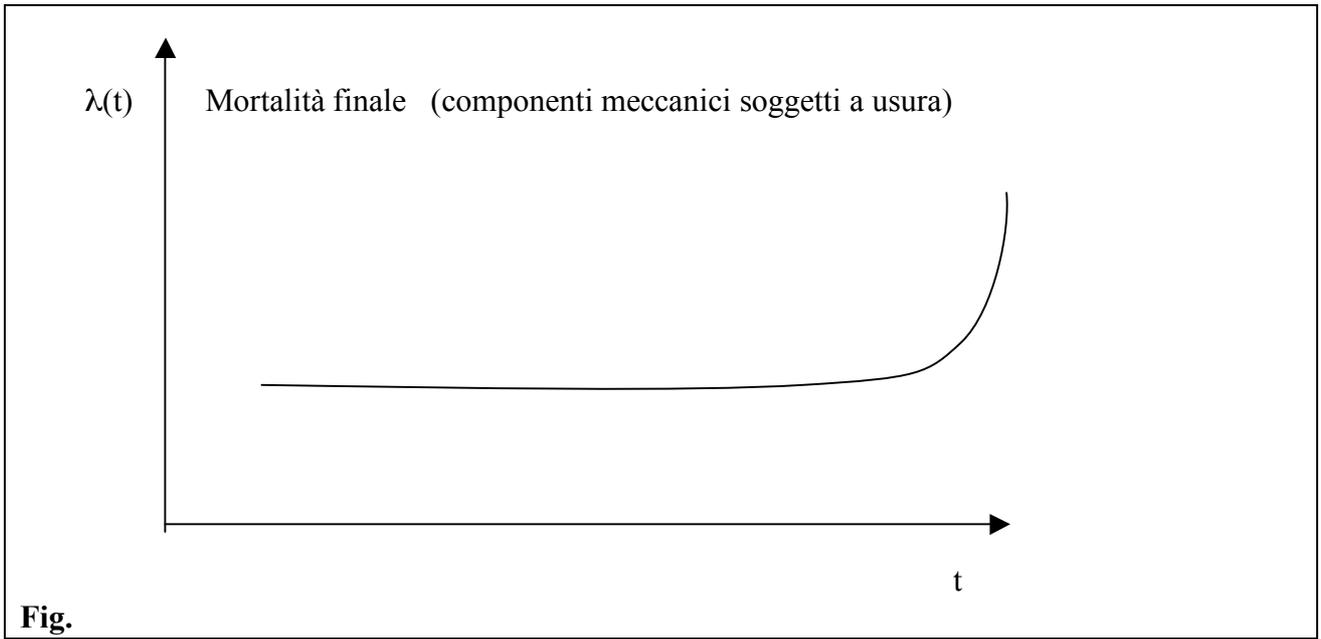
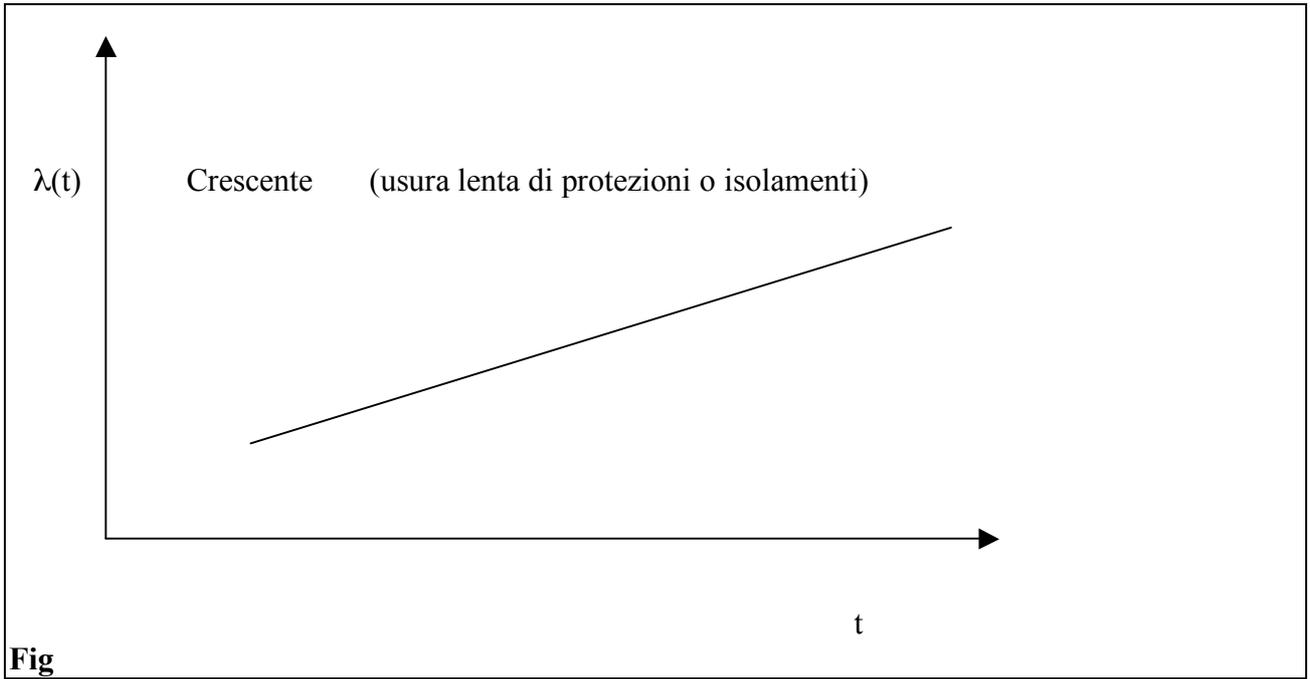
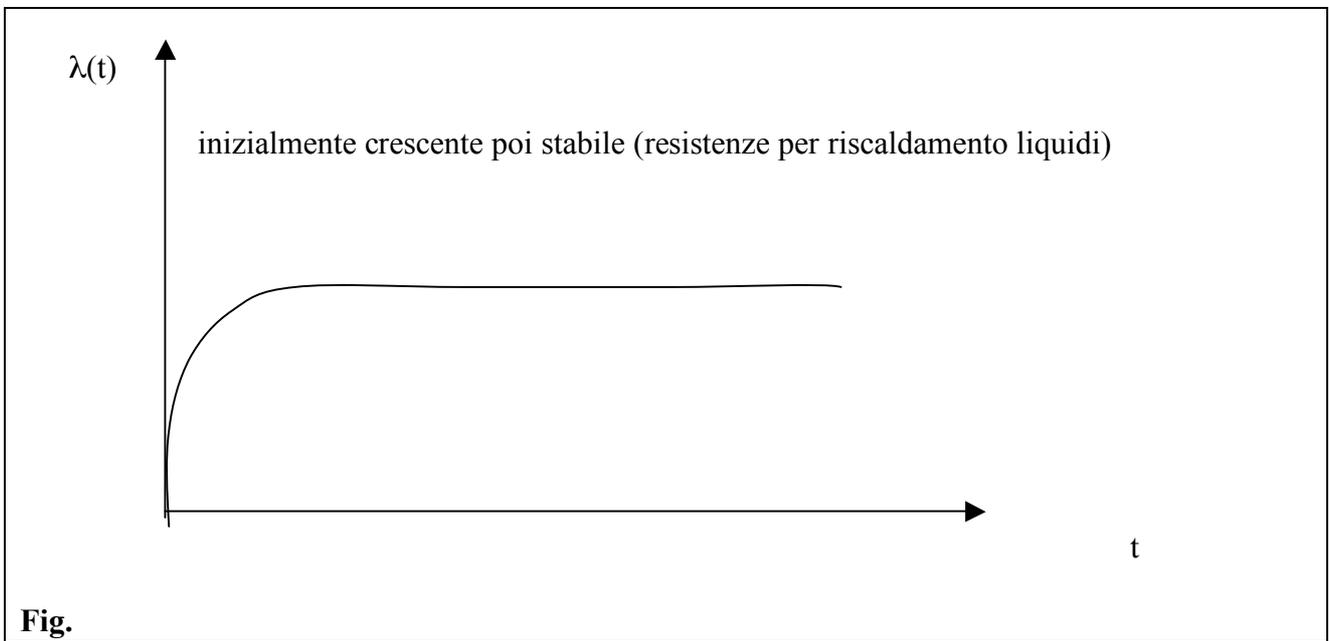
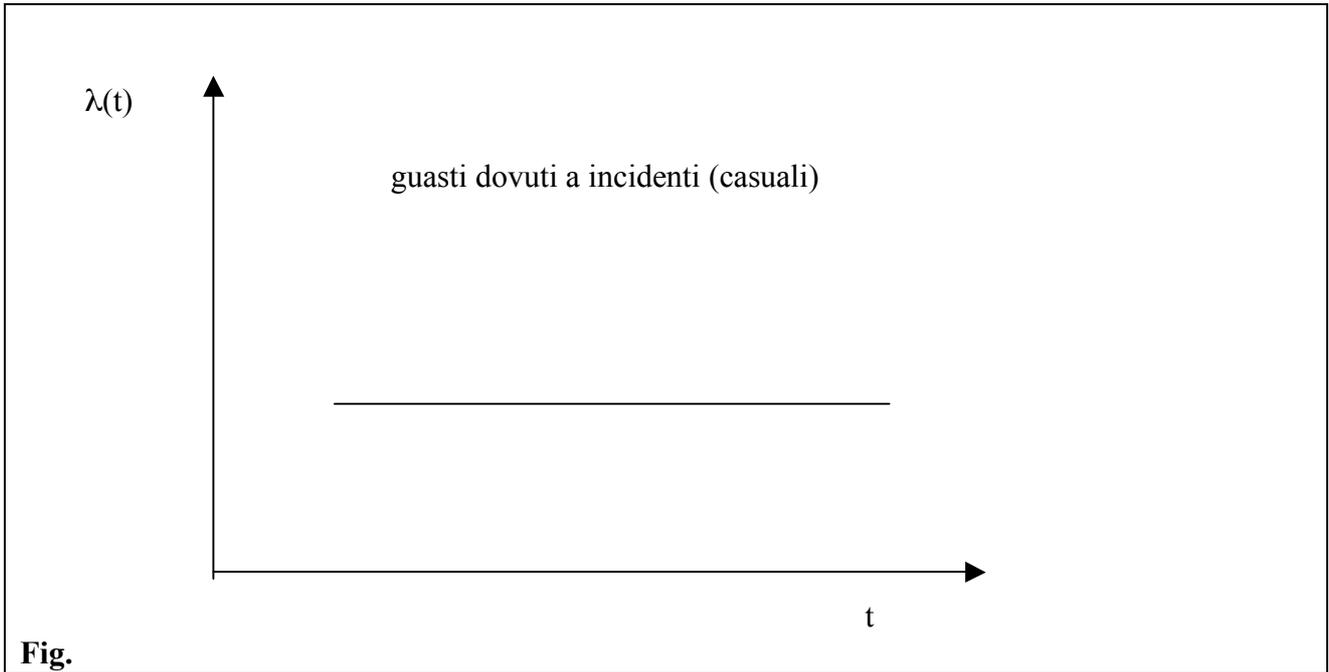
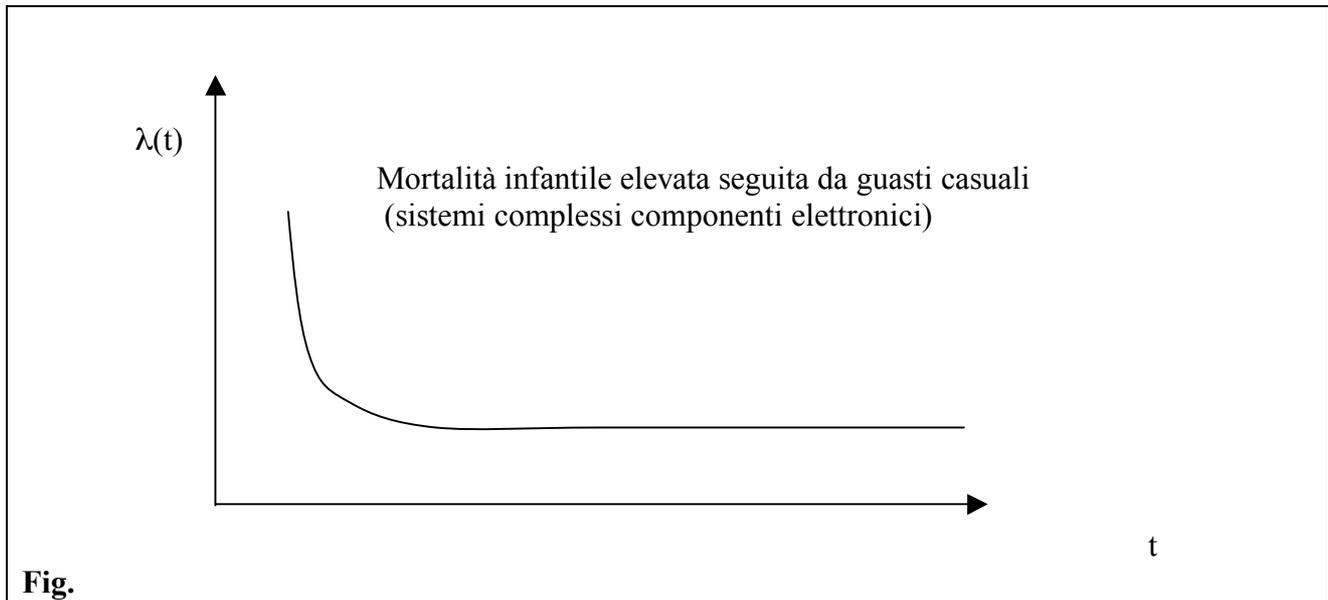


Fig.







Concetto giapponese di Guasto

Guardando all'etimologia della parola "guasto" in giapponese, si scopre che "guasto è un disagio provocato deliberatamente da una persona" [...] dietro un guasto c'è sempre la responsabilità di una persona fisica. Potrebbe essere del progettista, del gestore che non ha realizzato le procedure di controllo, dell'azienda che non ha concesso i tempi per adempiervi, o anche dell'operaio che negligenzemente non le ha osservate.

(Japan Institute of Plant Maintenance, "Applichiamo il TPM. Guida operativa alla realizzazione del Total Productive Maintenance" Ed. It. Peluzzi V.)

3.10 Elementi di teoria dell'affidabilità

L'analisi di affidabilità, effettuata mediante concetti e strumenti matematici e numerici di tipo probabilistico, è uno strumento che si rivela determinante sia in fase progettuale che in fase di collaudo e di manutenzione di elementi o sistemi di qualsiasi tipo, e nelle analisi costi-benefici.

La misura dell'affidabilità mediante parametri numerici avviene, di norma, mediante la quantificazione del tasso di guasto λ oppure tramite MTBF che andremo a definire.

Vediamo ora i principali parametri affidabilistici:

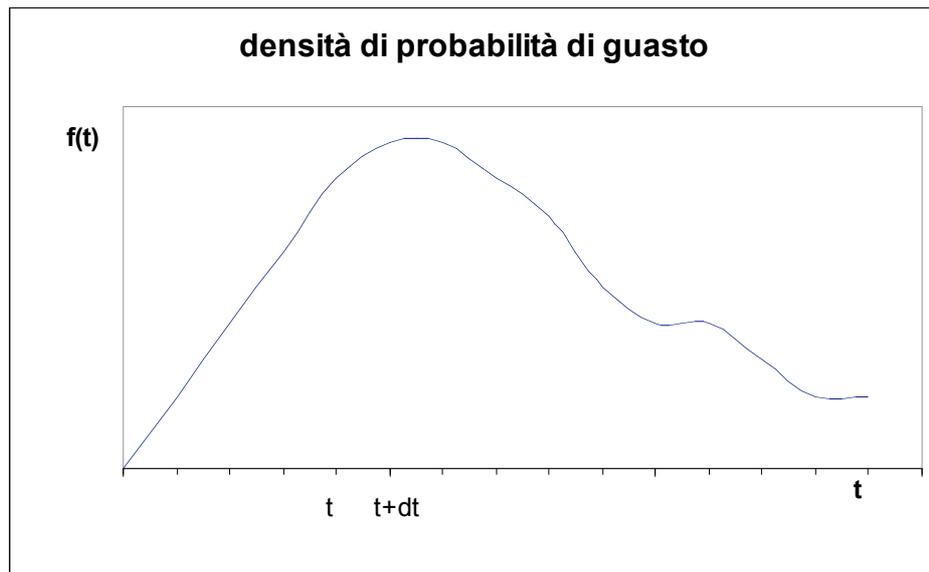
Densità di probabilità di guasto $f(t)$

Consideriamo un sistema bistabile cioè che può assumere due diversi stati possibili: stato di guasto o stato funzionante; prendendo come variabile il tempo consideriamo

inoltre una determinata popolazione ed una funzione $f(t)$ denominata densità di probabilità di guasto.

La probabilità di avere un guasto nell'intervallo di tempo infinitesimo compreso tra t e $t+dt$, in riferimento alla situazione di guasti nulli (popolazione completa) quando $t=0$, è $f(t)dt$.

L'area sottesa alla $f(t)$ è uguale all'unità se il limite temporale superiore è posto all'infinito in quanto elemento tende prima o poi a guastarsi.

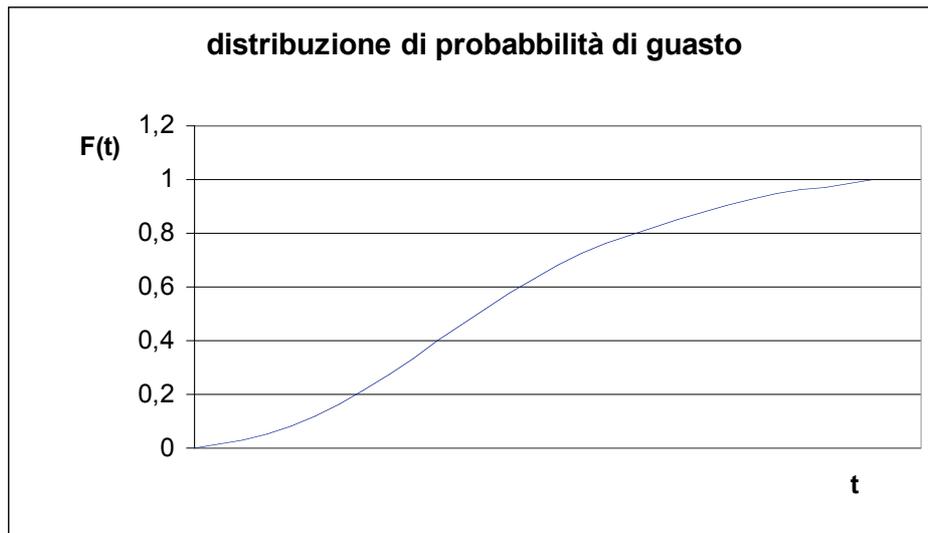


$$\int_0^{\infty} f(t)dt = 1$$

Distribuzione di probabilità di guasto: Guastabilità $F(t)$

la funzione $F(t) = \int_0^t f(t)dt$ è la distribuzione di probabilità di guasto (o curva cumulata di probabilità di guasto) e rappresenta la probabilità che l'elemento sia in stato di guasto al tempo t , osserviamo che:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = 1$$



Affidabilità $R(t)$

Indicando con R (Reliability) l'affidabilità essa risulta in generale funzione di tre variabili:

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

Dove con C si intende il criterio per giudicare se l'elemento è funzionante o non funzionante il quale dovrà essere fissato in modo univoco; per sistemi bistabili (2 soli stati di funzionamento possibili) tale criterio è ovvio, per altri sistemi è possibile individuare anche stati di funzionamento parziale che rappresentano vari livelli di prestazione; in questi casi lo stato di guasto è definibile una volta che venga fissato un limite ammissibile al di sotto del quale si parla di guasto

Con A si intendono le condizioni ambientali d'impiego che devono essere stabilite e mantenute durante il periodo di funzionamento dell'elemento o sistema.

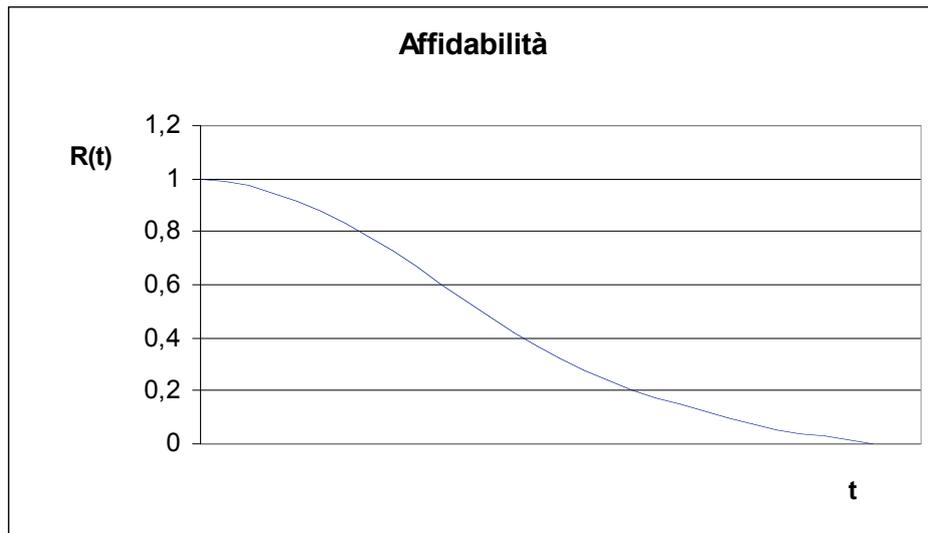
In fine t è il tempo di missione durante il quale è richiesto il funzionamento del sistema. Fissati C ed A si ha:

$$R = R(t)$$

L'affidabilità (Reliability) al tempo t e quindi la probabilità che al tempo t l'oggetto sia in buon funzionamento coincide con la probabilità che l'elemento stesso si rompa da t a ∞

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

l'affidabilità è il complemento a 1 della guastabilità F(t).



osserviamo che:

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

Relazioni generali

Consideriamo $M(0)$ la popolazione iniziale (al tempo $t=0$) $M(t)$ la popolazione funzionante al tempo t m il numero di elementi che si guastano tra t e $t+dt$

$$f(t)dt = \frac{m}{M(0)}$$

$$\lambda(t)dt = \frac{m}{M(t)}$$

$$R(t) = \frac{M(t)}{M(0)} \quad \longrightarrow \quad R(t) = \frac{M(t)}{m} \cdot \frac{m}{M(0)} = \frac{f(t)}{\lambda(t)}$$

(determinabile anche con Bayes) abbiamo così ottenuto la relazione tra la densità di guasto $f(t)$ e il rateo di guasto $\lambda(t)$:

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

esprimiamo tutto in funzione di $\lambda(t)$

$$R(t) = \frac{f(t)}{\lambda(t)} = -\frac{dR(t)}{dt} \cdot \frac{1}{\lambda(t)} \quad \text{vediamo alcuni passaggi}$$

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

$$\int_0^t \frac{dR(t)}{R(t)} = \ln R(t) - \ln R(0) \quad R(0) = 1$$

Riscrivendo l'equazione in un'altra forma e procedendo all'integrazione, abbiamo ottenuto la legge generale, che consente di calcolare la funzione di affidabilità partendo dalla conoscenza, o quanto meno dall'ipotesi di conoscenza, del rateo di guasto della famiglia dei componenti di interesse.

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

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

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

3.11 Parametri di affidabilità

La teoria di misura dell'affidabilità di un componente è affiancata da una serie di parametri, detti parametri di affidabilità, che forniscono un utile strumento per la definizione dei ratei di guasto.

3.11.1 MTTF (Mean Time To Failure)

Un importante parametro è il tempo che intercorre tra due guasti consecutivi denominato MTTF (Mean Time To Failure). Quando ci si riferisce ad oggetti non riparabili si definisce il tempo medio di "buon" funzionamento, calcolato statisticamente su una popolazione, in un predeterminato periodo.

Il MTTF rappresenta quindi la vita media dell'elemento.

Si definisce il tempo medio fino al guasto il rapporto fra il tempo cumulativo rivelato per il campione considerato ed il numero totale di guasti che si sono manifestati durante il periodo specificato, in condizioni di lavoro prefissato.

Il tempo cumulativo di prove è definito dalla seguente equazione:

$$T = \sum_{i=1}^r t_i + (N_0 - r) \cdot t_p$$

dove:

t_i = tempo nel quale si è verificato il guasto

r = numerosità dei componenti che hanno manifestato un guasto nel periodo di prova

t_p = Tempo di prova

L'ipotesi di base è che la numerosità del campione rimanga invariata durante l'intero periodo di prova. Quindi il MTTF è dato dal rapporto T/r .

La caratteristica intrinseca del parametro consente la sua applicazione a quei componenti che non possono essere riparati. In termini probabilistici, questo parametro descrive la speranza matematica o valore atteso dell'evento considerato; vediamo ora una sua formulazione rigorosa.

Ricordiamo che il valore medio M di una variabile aleatoria discreta è dato dalla seguente relazione:

$$M = \sum_{i=1}^n x_i p_i$$

mentre per una variabile continua:

$$M = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x) dx$$

il tempo medio di guasto sarà la media di tutti i tempi che abbiamo per arrivare ad un guasto.

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt \quad \text{integrando per parti si ottiene}$$

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

3.11.2 MTBF (mean time between failure)

Nel caso in cui l'oggetto sia riparabile si prende in considerazione il tempo medio del buon funzionamento tra guasti denominato MTBF (Mean Time Between Failure); praticamente è il parametro precedente qualora si identificasse come nuovo l'oggetto riparato. In altre parole ipotizzando di partire al tempo $t = 0$ ogni volta che si effettua una riparazione si pone

$$MTBF = MTTF$$

Si definisce tempo medio tra guasti (*mean time between failure*) il valore medio degli intervalli di tempo tra guasti consecutivi relativamente ad un periodo di vita specificato di un dispositivo. Tale valore viene calcolato come rapporto tra il tempo medio cumulativo

osservato ed il numero di guasti rilevati nelle condizioni precisate.

$$MTBF = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r t_{fi}$$

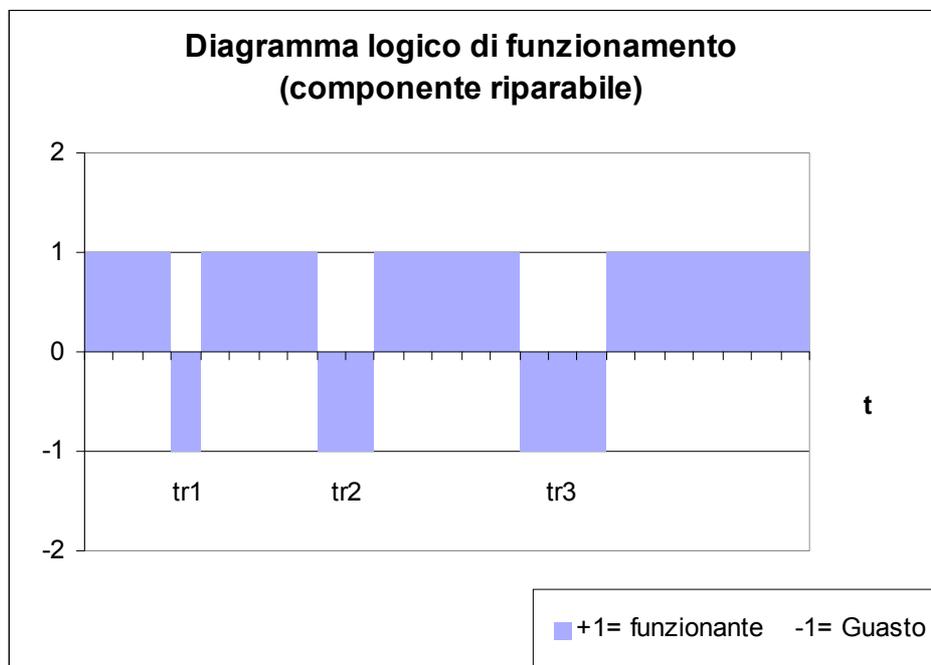
r = numerosità dell'insieme dei componenti che hanno presentato un mal funzionamento

t_{fi} = tempo di funzionamento del componente i -esimo

3.12 Comportamento di un componente riparabile

Consideriamo un dispositivo riparabile e vediamo una rappresentazione schematica del suo comportamento nel tempo.

oltre al noto t_f compare il tempo t_r che rappresenta il tempo in cui il componente resta inattivo che include i tempi necessari alla riparazione.



Si osserva infine che MTTF e MTBF per una distribuzione di guasti accidentali possono essere sostituiti con l'inverso del rateo di guasto.

3.12.1 MTTR (mean time to repair)

In cascata al MTBF si definisce il tempo medio di riparazione MTTR come rapporto fra la somma dei tempi di riparazione dei componenti in analisi ed il numero di componenti che hanno manifestato un mal funzionamento nello stesso intervallo.

$$MTTR = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r t_{ri}$$

r = numerosità dell'insieme dei componenti che hanno presentato un mal funzionamento

t_{ri} = tempo di riparazione del componente i -esimo

Nel caso di componenti riparabili diventa fondamentale il parametro che esprime il tempo medio che intercorre tra l'insorgenza di un guasto ed il completamento della sua riparazione; esso viene detto appunto "Mean Time To Repair" e si indica con la sigla MTTR.

Per poterlo definire in analogia al MTTF possiamo fare riferimento a funzioni che sono le analoghe di quelle già definite per l'affidabilità.

Questo parametro può essere preso come indice di manutenibilità del dispositivo e si può facilmente intuire che per avere un'affidabilità buona occorre che risulti molto minore del MTBF.

In cascata a questo si indica, in contrapposizione al concetto di affidabilità, la disponibilità, intesa come la probabilità che un componente sia funzionante al tempo t , in determinate condizioni di impiego.

La disponibilità (availability) parte da valori iniziali unitari per poi giungere, in tempi molto

lunghi, ad un valore minimo costante definito dal seguente rapporto:

$$A(\infty) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

3.13 Funzioni

Le relazioni esistenti tra le funzioni $\lambda(t)$, $f(t)$, $F(t)$, $R(t)$ ci permettono, nota almeno una di esse, di determinare immediatamente anche le altre tre, risultando in questo modo intercambiabili.

La funzione rateo di guasto $\lambda(t)$ può presentare infinite forme diverse raggruppabili però in tre principali andamenti: $\lambda(t)$ può essere infatti costante, crescente o decrescente; in seguito vedremo la forma delle funzioni $\lambda(t)$, $f(t)$, $F(t)$, $R(t)$ in funzione dell'andamento del tasso di guasto; più elevato è il numero di elementi testati e più precisa risulta la valutazione della probabilità di funzionamento. Solo provando infiniti elementi per un tempo infinito si avrebbe l'esatta legge di guasto

quindi utilizzandone un numero limitato anche la precisione nella valutazione dell'affidabilità sarà limitata.

Esistono molte leggi che caratterizzano la probabilità di guasto nel tempo e quindi l'affidabilità per diversi tipi di componenti. Vediamo i principali modelli matematici impiegati In ambito manutentivo:

3.13.1 Gaussiana (normale)

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

3.13.2 Esponenziali negative

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

3.13.3 Lognormali

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\log_{10}(t-\mu)}{\sigma}\right)^2}$$

3.13.4 la funzione di Weibull

La distribuzione di *Weibull* è una funzione a due parametri positivi α e β . Grazie alla sua duttilità, tale modello viene usato per esprimere la funzione affidabilità sia durante la fase dei guasti infantili, sia durante la vita utile.

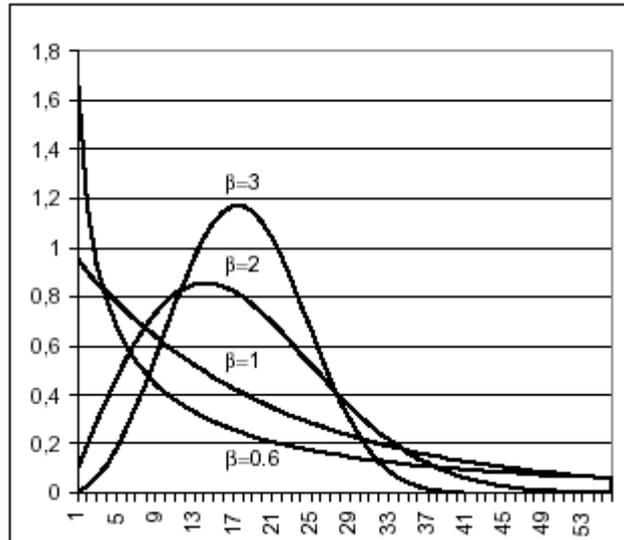
α è la vita caratteristica, (tempo)

β è il parametro di forma ed è un numero puro. Generalmente varia tra 0.5 e 5. Se $\beta < 1$ la

funzione è monotona decrescente, se $\beta > 1$ λ , prima cresce e poi decresce.

$$y(x) = e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta}$$

Al variare del fattore di forma β , la funzione assume aspetti ben diversi, come visibile nella seguente figura.



3.14 Fasi di vita

Vita Utile

Per ognuna delle tre fasi di vita della macchina è necessario individuare dei modelli teorici che descrivano l'andamento delle funzioni

$f(t)$; $\lambda(t)$; $R(t)$

La zona più interessante ai fini dell'affidabilità è quella riferibile al periodo di vita utile corrispondente alla zona centrale del diagramma a "vasca da bagno".

In questa zona per semplicità si assume $\lambda(t)$ costante e l'affidabilità può essere espressa con una legge esponenziale negativa del tipo

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

e si dimostra che il tempo medio di guasto MTBF assume un valore coincidente con l'inverso del tasso di guasto.

$$MTBF = 1/\lambda$$

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

La costanza di λ implica infatti un valore medio dell'intervallo di tempo tra due guasti anch'esso costante, per cui è possibile stimare con una certa precisione il momento in cui la macchina o elemento si guasterà in futuro. Una progressiva diminuzione dell'intervallo medio di buon funzionamento è indicativa del

raggiungimento del termine della vita utile dell'apparato rappresentata dall'ultima zona (zona 3) del diagramma.

Per ridurre il tasso di guasto e quindi per aumentare l'affidabilità e la disponibilità si ricorre generalmente ad una politica manutentiva di prevenzione basata su operazioni eseguite ad intervalli di tempo programmati tali da assicurare l'affidabilità e la disponibilità richieste prevenendo il verificarsi del guasto.

La determinazione del corretto intervallo di intervento preventivo dipende quindi dall'andamento del tasso di guasto λ e conseguentemente dall'andamento del MTBF nella zona di vita utile.

Guasti Infantili

La fase iniziale di vita della macchina viene descritta con una distribuzione di Weibull della funzione affidabilità $R(t)$.

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

e la percentuale di popolazione che si guasta al tempo t viene rappresentata dalla seguente forma:

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

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

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

Esempio

L'affidabilità $R(t)$ di un condensatore è rappresentata da una distribuzione di Weibull con $\alpha = 100000$ ore e $\beta = 0.5$. Dopo un anno di servizio (8760 ore) la probabilità di cedimento è:

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

$$F(2\text{anni}) = 1 - e^{-\left(\frac{17520}{100000}\right)^{0.5}} = 0.34 = 34\% \rightarrow R(2\text{anni}) = 66\%$$

Nella fase di vita utile la macchina o il componente ha un comportamento indipendente dalla sua storia precedente, diciamo quindi che non ha “memoria” e i guasti sono la conseguenza di eventi unicamente casuali (eventi alla Poisson). Per rappresentare tale fase viene spesso impiegata la distribuzione esponenziale negativa corrispondente ad un rateo di guasto costante.

Il modello offre un’ottima interpretazione dei componenti elettronici, e una buona approssimazione per i componenti meccanici ed elettromeccanici.

Per i componenti meccanici sollecitati a fatica, l’evento esterno di natura casuale non è separabile da un incremento del danneggiamento interno, così che il parametro di danno, definito come il rapporto tra vita spesa e spendibile, cresce senza che ci sia alcun cedimento apparente dell’elemento.

Con tasso di guasto costante si ha:

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

che rappresenta la più semplice funzione di distribuzione dell’affidabilità definita da un solo parametro λ , detta distribuzione esponenziale negativa. E

vediamo ora le forme assunte dalle altre funzioni:

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

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

$$MTBF(t) = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) \cdot dt = \frac{1}{\lambda} \quad \text{uguaglianza che si ottiene integrando per parti}$$

La distribuzione di *Weibull* con $\beta=1$ diventa:

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

con $\lambda = 1/\alpha$, ricordando che $MTBF=1/\lambda$, otteniamo $MTBF=\alpha$ da cui il nome di “vita caratteristica per α ”

$\lambda = 15E10-6$			
Tempo di funzionamento (ore)	Numero di guasti nel periodo t: λt	Probabilità cumulata di guasto F(t)	Affidabilità (probabilità di sopravvivenza) R(t)
100	0,0015	0,0015	0,999
500	0,0075	0,0075	0,993
1000	0,015	0,0149	0,985
5000	0,075	0,0723	0,928
10000	0,15	0,1393	0,861
100000	1,5	0,7769	0,223
500000	7,5	0,9994	0,001

Calcolo delle probabilità di guasto F(t) e dell'affidabilità R(t) nell'ipotesi di un tasso di guasto costante e pari a $\lambda = 15 \cdot 10^{-6}$ [1/ore]
 possiamo ora calcolare il tempo in cui l'affidabilità si dimezza:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \rightarrow \frac{1}{2} = e^{-15 \cdot 10^{-6} \cdot t} \rightarrow t = \frac{\ln 2}{15 \cdot 10^{-6}} = 46210 \text{ h}$$

Il tempo in cui si raggiunge l'affidabilità del 99.5% è 334 ore

Usura

La fase di vita corrispondente al periodo di usura viene frequentemente descritta mediante la distribuzione normale della densità di probabilità di guasto $f(t)$

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

dove μ = valor medio e σ = deviazione standard (scarto quadratico medio)

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(t_i - \mu)^2}{n-1}$$

Adimensionalizzando tramite la variabile z (detta variabile ridotta) si ottiene:

$$Z = \frac{t - \mu}{\sigma}$$

$$f(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}z^2}$$

Che è una funzione simmetrica rispetto all'asse delle ordinate, massima per $z=0$

La funzione cumulata ci da la probabilità di ottenere misure con valori inferiori o uguali a z .

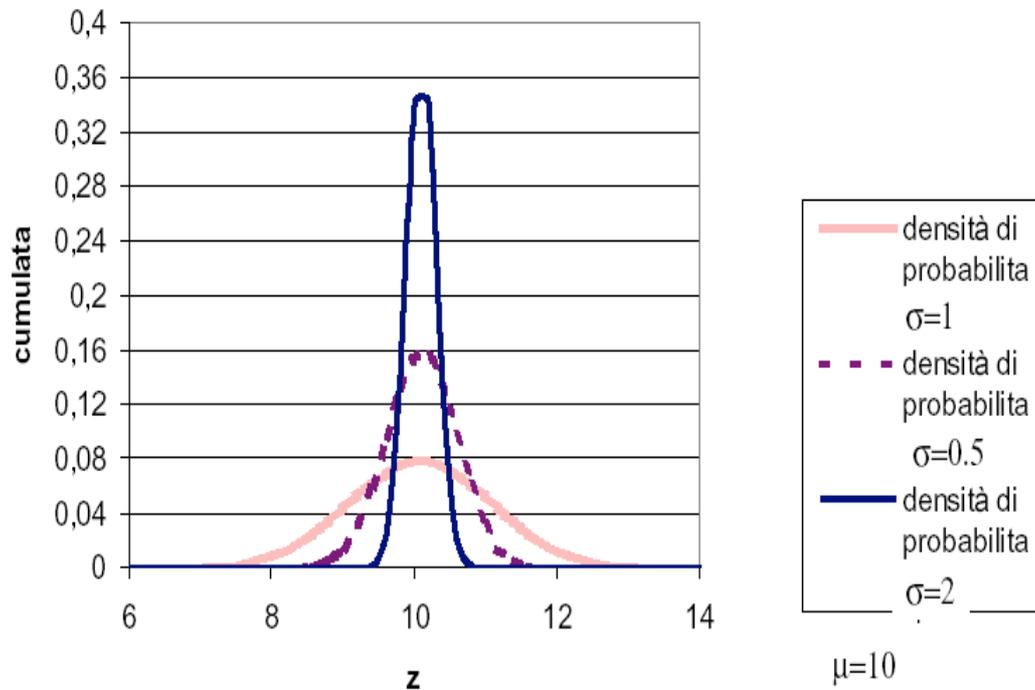
$$F(z) = \int_{-\infty}^z \sigma \cdot f(\xi) \cdot d\xi$$

Funzione cumulata: probabilità di ottenere misure con valori inferiori o uguali a z .

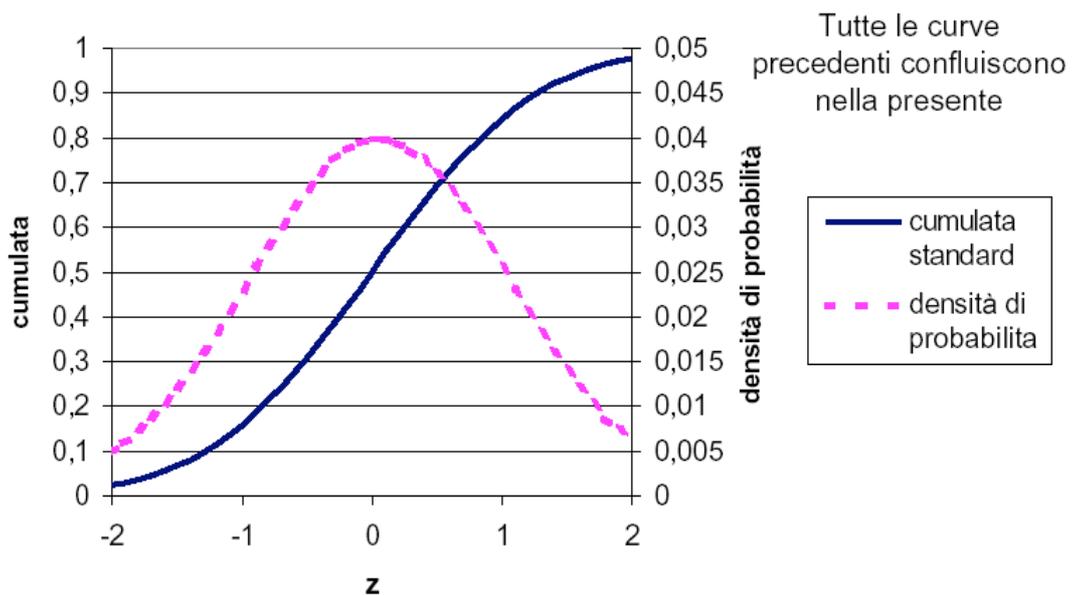
Tale funzione è simmetrica per cui vale la proprietà

$$F(-z) = 1 - F(z)$$

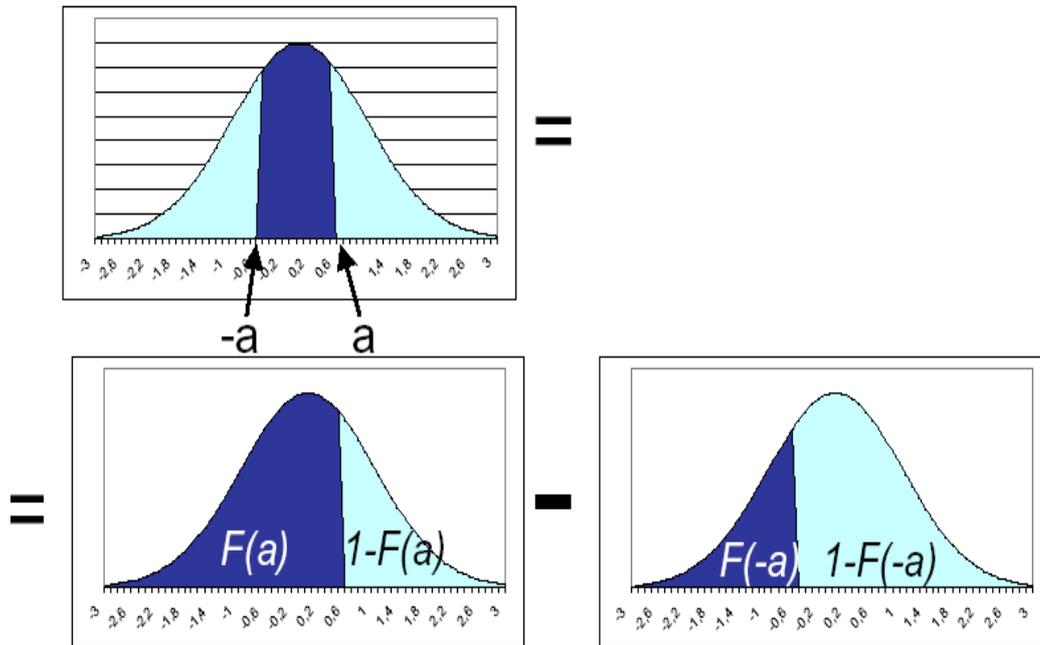
Distribuzione normale



Distribuzione normale standardizzata



La probabilità che z sia compreso tra $\pm a$ è:
 $F(a)-F(-a)=F(a)-[1-F(a)]=F(a)-1+F(a)=2F(a)-1$



Alcuni valori di $F(z)$:
 $z=1 F(z)=0.84135$
 $z=2 F(z)=0.97726$
 $z=3 F(z)=0.99867$

$$P(-1 \leq z \leq 1) = 2 \cdot 0.84135 - 1 = 68.26\% \quad -1 \leq z \leq 1 \Rightarrow -1 \leq \frac{t-\mu}{\sigma} \leq 1 \Rightarrow \mu - \sigma \leq t \leq \mu + \sigma$$

$$P(-2 \leq z \leq 2) = 2 \cdot 0.97726 - 1 = 95.45\% \quad \mu - 2\sigma \leq t \leq \mu + 2\sigma$$

$$P(-3 \leq z \leq 3) = 2 \cdot 0.99867 - 1 = 99.73\% \quad \mu - 3\sigma \leq t \leq \mu + 3\sigma$$

Nel caso di rotture per fatica, risulta spesso più appropriata la distribuzione log-normale

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\log_{10}(t-\mu)}{\sigma} \right)^2}$$

In mancanza di altre indicazioni, l'analisi su un sistema viene eseguita facendo riferimento alla vita utile dell'impianto, intendendo con questo termine il periodo dei guasti accidentali; in questo modo vengono esclusi sia i guasti infantili che quelli per usura: i primi possono essere eliminati attraverso una adeguata selezione un periodo

di rodaggio e mediante una politica di manutenzione preventiva, ed i secondi attraverso una programmazione della manutenzione con sostituzione preventiva.

Ciclo di funzionamento

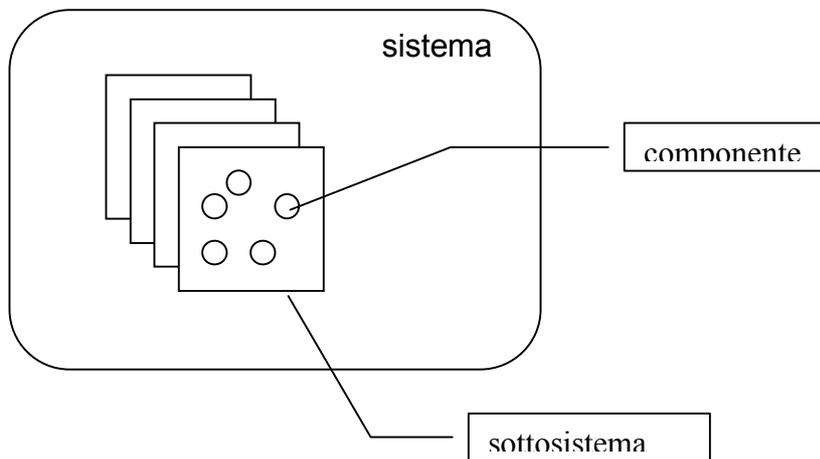
Nel caso in cui si voglia calcolare l'affidabilità di un componente nel rispondere ad una chiamata (come nel caso di un componente di emergenza), occorre dare una formulazione diversa del rateo di guasto, connessa ad una misura di probabilità di guasto per ciclo di funzionamento ; in questo modo l'equazione dell'affidabilità (funzionamento nel periodo di vita in cui $\lambda = \text{costante}$), diventa:

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

3.15 Affidabilità di un sistema

Un sistema è definito come una unità costituita da più componenti, ciascuno con una propria identità funzionale, che concorrono al buon funzionamento e al compimento della missione del sistema stesso. Abbiamo visto che l'affidabilità dei singoli componenti viene determinata mediante studi statistici più o meno approfonditi: per l'affidabilità di un sistema si ricorre a un'analisi dal punto di vista delle logiche di guasto.

Mentre in precedenza abbiamo trattato l'affidabilità del singolo componente o elemento, a prescindere dalla sua complessità, ora andremo ad individuare le relazioni che legano l'affidabilità di un sistema costituito da più elementi, interagenti tra loro a causa delle diverse connessioni fisiche e logiche.



3.15.1 Analisi di affidabilità combinatoria

Mediante l'analisi di affidabilità combinatoria si ottengono modelli molto utili per lo studio delle diverse strutture di connessioni che caratterizzano un dato sistema.

Le connessioni fisiche tra gli elementi dipendono da come è strutturato il sistema mentre le connessioni logiche si fondano sulle risposte fornite dai vari componenti nel corso delle diverse fasi operative;

l'obiettivo dell'analisi di affidabilità combinatoria è quello di determinare la relazione che lega l'affidabilità dei singoli componenti con l'affidabilità del sistema complessivo;

per la ricerca della affidabilità d'insieme si deve quindi analizzare l'influenza che un guasto di ciascun componente ha sulla funzionalità di quelli di contorno o sull'intero sistema.

Indicando con R_s l'affidabilità del sistema complesso e con R_i l'affidabilità del componente i -esimo possiamo scrivere la seguente uguaglianza:

$$R_s = f(R_i) \quad \text{con } i = 1, 2, \dots, n$$

la determinazione della funzione e quindi del legame intercorrente tra il sistema e i componenti è fondamentale per l'impostazione di una corretta politica manutentiva in termini di prevenzione dei guasti. Tramite la $f(R_i)$ è infatti possibile vedere l'effetto che si produce sulle caratteristiche dell'intero sistema intervenendo su uno o più elementi; la stessa funzione ci permette di analizzare le cause di guasto o di mal funzionamento dei singoli componenti aiutandoci nella scelta delle azioni correttive più efficaci in un'ottica d'insieme.

Un altro effetto importante lo ritroviamo sulla progettazione: la $f(R_i)$ ci aiuta nella individuazione dei punti critici del sistema che potranno essere modificati mediante la riprogettazione di alcune parti in modo da pervenire a valori ottimali di affidabilità.

I principi che regolano la combinazione delle affidabilità sono gli stessi che regolano la combinazione delle probabilità di eventi qualsiasi.

Dal punto di vista affidabilistico i singoli componenti possono comportarsi in modo dipendente o indipendente di conseguenza I guasti degli elementi di un sistema possono essere più o meno correlati.

Considerando due parti generiche distinte a e b appartenenti a uno stesso sistema si hanno due possibilità:

- il verificarsi di un guasto della parte a è un evento casuale statisticamente indipendente dal verificarsi di un guasto della parte b
- il verificarsi di un guasto della parte a è un evento casuale statisticamente dipendente dal verificarsi di un guasto della parte b

Inoltre la definizione di confine che in una parte del sistema separa lo stato di funzionamento dallo stato di guasto può essere dipendente o non dipendente dalla modalità di funzionamento di altre parti del sistema stesso; nel caso vi sia indipendenza è possibile definire analiticamente l'affidabilità di una parte risalendo da quella dei singoli componenti, ipotesi che può essere soddisfatta limitando opportunamente la suddivisione del sistema nei sottoelementi che lo costituiscono.

3.15.2 Reliability Block Diagram - RBD

Dal punto di vista affidabilistico il funzionamento di un sistema può essere raffigurato graficamente con uno o più schemi a blocchi opportunamente interconnessi dove ogni blocco rappresenta un sottosistema o un componente.

Questi schemi in generale non corrispondono con la dislocazione fisica dei singoli componenti ma servono a visualizzare la dipendenza logica intercorrente tra il guasto del sistema e il guasto di un sottosistema o componente.

3.15.3 Esempio Logiche di guasto - Serbatoi e Valvole

Consideriamo un sistema costituito da tre serbatoi e tre valvole comandate con una disposizione in parallelo come rappresentato nello schema funzionale di figura .

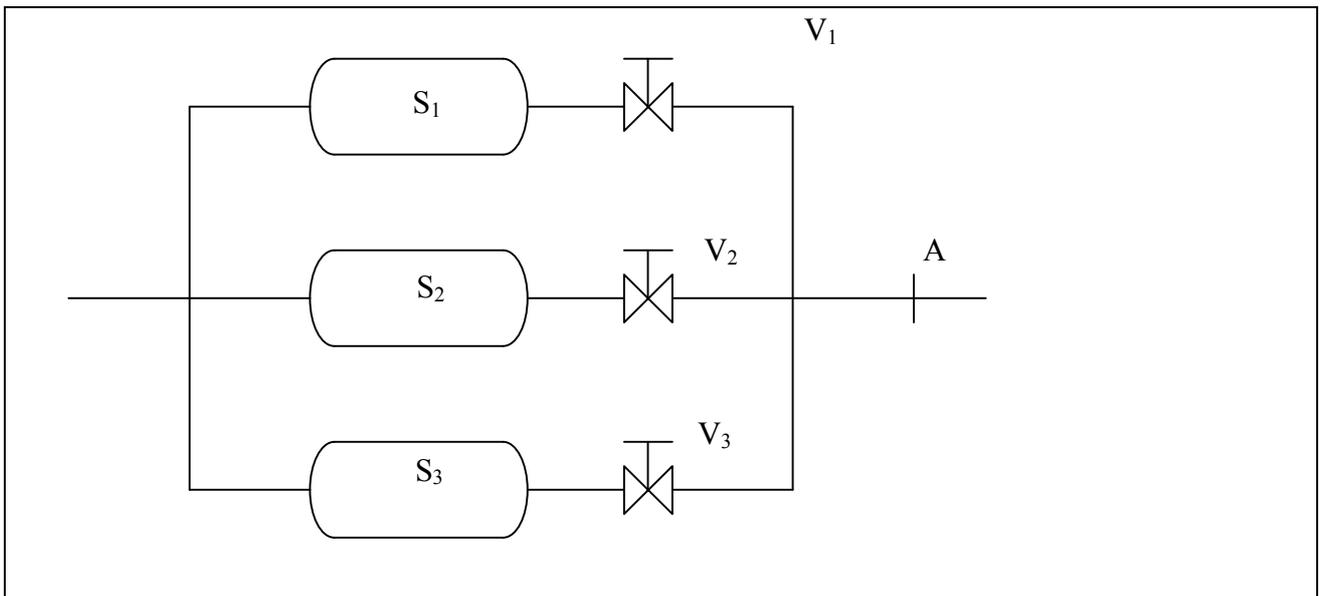
Consideriamo come evento di guasto la perdita di controllo della portata di fluido in A; tale guasto può verificarsi secondo due distinte tipologie che andiamo ad elencare:

1. flusso in A sempre presente (impossibilità di interruzione del flusso)
2. flusso in A non presente (impossibilità di avviamento del flusso)

i due tipi di guasto sono riconducibili a un guasto degli elementi valvole comandate V_1 , V_2 e V_3 disposte all'uscita dei serbatoi S_1 , S_2 e S_3 che per semplicità verranno considerati perfetti e quindi non guastabili, così come non guastabili verranno considerate le condotte interessate dal flusso.

Vediamo ora le cause che determinano il guasto così come definito nel caso 1) e successivamente nel caso 2).

schema funzionale



Caso 1)

Questa tipologia di guasto si verifica quando almeno una delle tre valvole si blocca, per una qualsiasi causa, in posizione aperta.

In questo caso lo schema logico di guasto è il seguente:

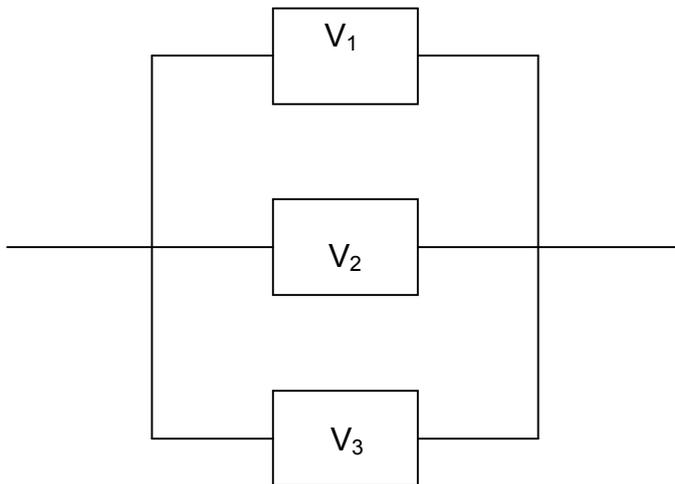


_____ V₁ _____ V₂ _____ V₃ _____

Caso 2)

Questa tipologia di guasto si verifica quando tutte le valvole si bloccano, per una qualsiasi causa, in posizione chiusa.

In questo caso lo schema logico di guasto è il seguente:



Osserviamo che a parità di schema funzionale si ottengono due diversi schemi logici a seconda del tipo di guasto considerato e solo nel caso 2) lo schema logico coincide con lo schema di impianto.

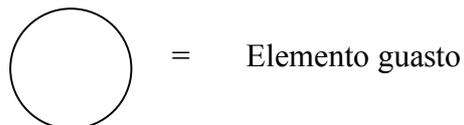
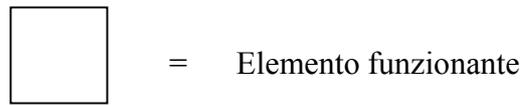
Possiamo quindi dire che se un elemento di un sistema si trova in una posizione di parallelo nello schema logico

Gli elementi di un sistema possono assumere, all'interno dello schema logico, due possibili configurazioni in relazione alla reciproca posizione logica, denominate serie e parallelo.

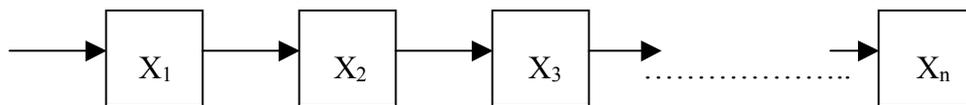
3.16 Sistema serie

Consideriamo un sistema composto da n elementi connessi in modo tale che il guasto (considerato come evento indipendente) di uno qualsiasi di essi determina lo stato di

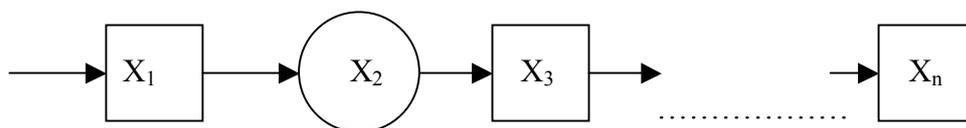
guasto dell'intero sistema: una tale configurazione comporta uno schema logico di tipo serie corrispondente al sistema che viene così denominato "sistema in serie".



Sistema funzionante



Sistema guasto



Un sistema complesso di tipo serie si dice funzionante se e solo se tutti i suoi elementi o sottosistemi svolgono la funzione richiesta che ne caratterizza l'uso.

$$S = X_1 \otimes X_2 \otimes \dots \otimes X_n \quad (X_i = \text{funzionante}) \quad (\overline{X_j} = \text{Guasto})$$

$$(S = \text{sistema funzionante})$$

$$(\overline{S} = \text{sistema guasto})$$

Affidabilità del sistema R_s

La probabilità che il sistema funzioni è data dal prodotto delle probabilità di funzionamento di ogni sottosistema o componente;

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

da cui:

$$R_s(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot R_3(t) \cdot \dots \cdot R_n(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t)$$

sviluppiamo l'espressione sostituendo la relazione dell'affidabilità:

$$R_s(t) = e^{-\int_0^t \lambda_s(\tau) d\tau} = \prod_{i=1}^n R_i(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\int_0^t \lambda_i(\tau) d\tau} = e^{-\int_0^t \sum_{i=1}^n \lambda_i(\tau) d\tau}$$

da cui si deduce che

$$\lambda(t)_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t)$$

con $\lambda_s(t)$ = tasso di guasto del sistema

e $\lambda_i(t)$ = tasso di guasto del generico sottosistema

Se $\lambda_i(t)$ = costante (fase di vita utile) per ogni $i = 1, 2, \dots, n$ allora anche $\lambda_s(t)$ = costante e possiamo scrivere:

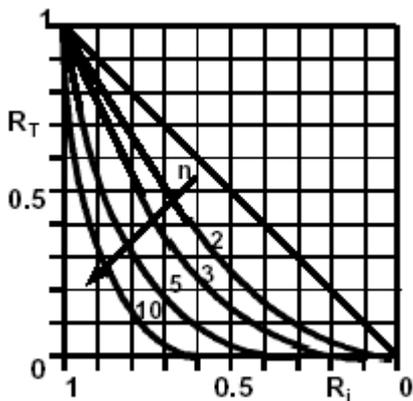
$$R_s(t) = e^{-\lambda_s t} = e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i t} \quad \longrightarrow \quad \lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

$$MTBF_i = \frac{1}{\lambda_i}$$

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

osservazione

Siccome ogni misura di affidabilità è un numero minore o uguale a 1, il prodotto risulta essere minore di tutti i suoi fattori, cioè l'affidabilità del sistema è minore della più piccola affidabilità dei componenti.



A parità di costo si dovrà intervenire sull'elemento a più bassa affidabilità.

3.17 Sistemi ridondanti

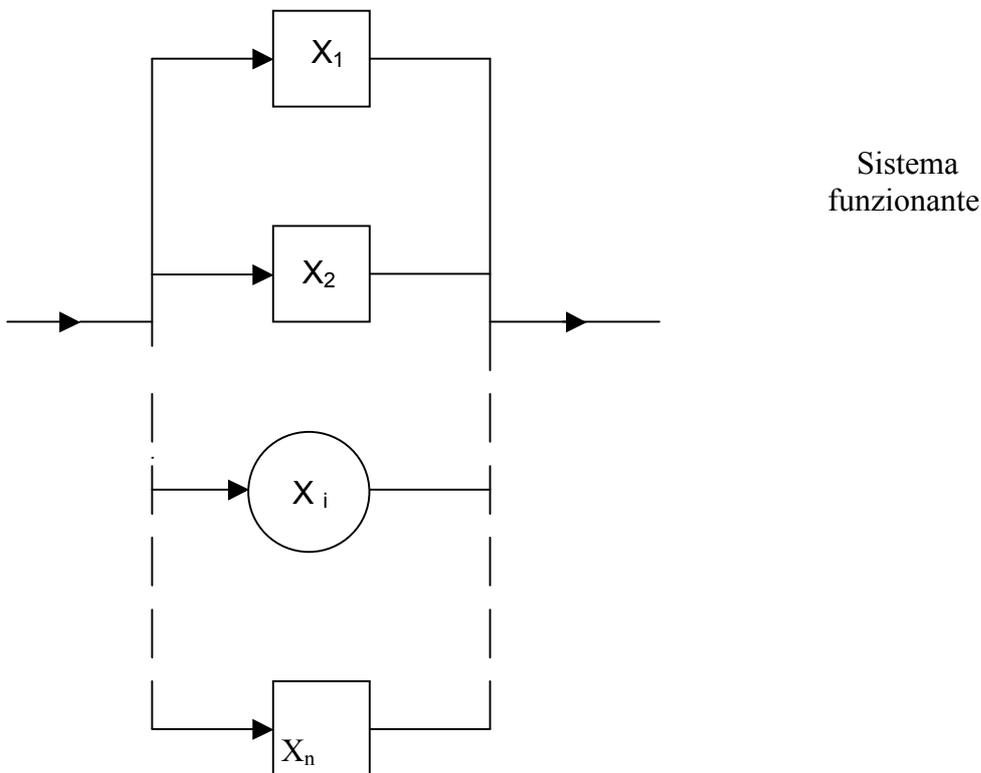
I sistemi nei quali alcune funzioni vengono moltiplicate (duplicate, triplicate, ecc.), con lo scopo di ottenere una migliore affidabilità, vengono detti ridondanti e il loro schema di base è quello parallelo.

Di contro, a parità di prestazioni funzionali, un sistema ridondante presenta una maggiore complessità e un maggiore costo.

3.17.1 Sistema parallelo a funzionamento permanente

Prendiamo in considerazione un sistema composto da n elementi: la configurazione di tale sistema sarà di tipo parallelo se la sua funzionalità è garantita anche quando sia attivo un solo componente; in altre parole il guasto (considerato come evento indipendente) si verifica solo per n elementi guasti. In questo caso il sistema è denominato “sistema in parallelo”.

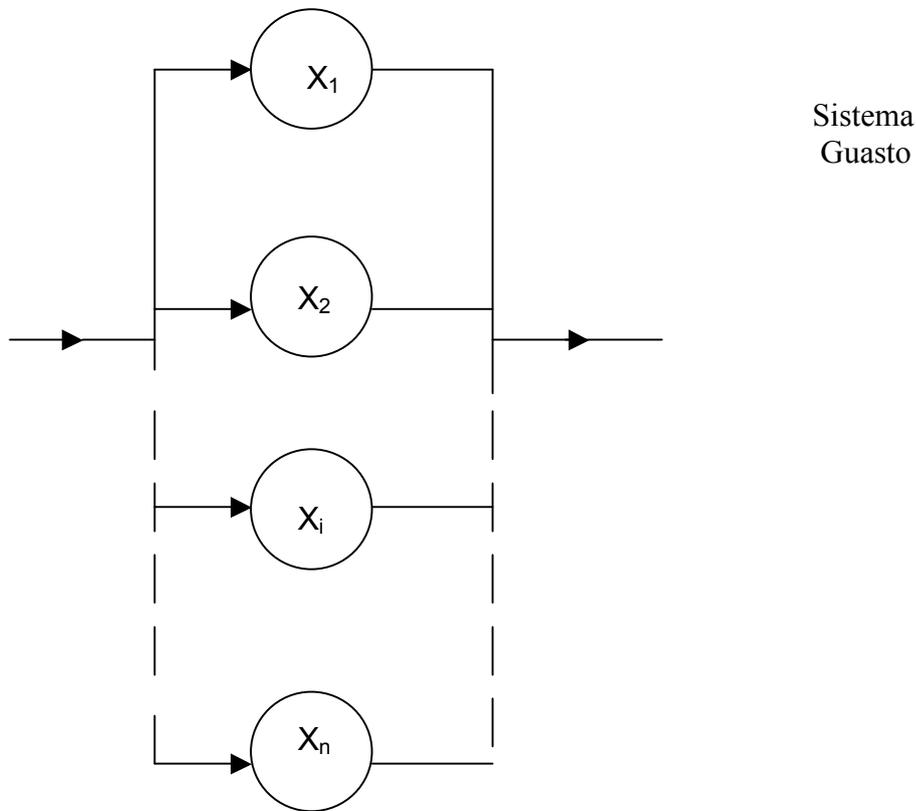
Mantenendo la simbologia impiegata per il sistema serie rappresentiamo una connessione parallelo a funzionamento permanente attraverso uno schema di flusso RBD (Reliability Block Diagram)



$$S = X_1 \oplus X_2 \oplus \dots \oplus X_n \quad (X_i = \text{funzionante}) \quad (\overline{X_j} = \text{Guasto})$$

$(S = \text{ sistema funzionante })$

$(\bar{S} = \text{ sistema guasto })$



$$\bar{S} = \bar{X}_1 \oplus \bar{X}_2 \oplus \dots \oplus \bar{X}_n$$

Affidabilità del sistema R_s

Nell'ipotesi in cui gli eventi siano stocasticamente indipendenti (il guasto di un componente non dipende dal guasto degli altri) possiamo determinare l'affidabilità del sistema.

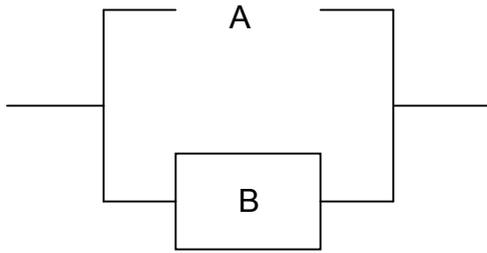
$$R_s = P(X_1 + X_2 + \dots + X_n) = 1 - P(\bar{X}_1 \cdot \bar{X}_2 \cdot \dots \cdot \bar{X}_n) = 1 - \prod_{i=1}^n F_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i)$$

(De Morgan)

dove, ricordiamo, $F_i(t)$ è la probabilità di guasto (guastabilità) dell'elemento i-esimo. Si vede subito che se il numero n di elementi in parallelo aumenta allora l'affidabilità R_s aumenta.

Per semplicità di trattazione consideriamo un sistema costituito da solo due elementi A e B in parallelo; i risultati potranno essere estesi al caso generale di n elementi in parallelo.





In tabella riportiamo le possibili configurazioni del sistema funzionante

A	B	Probabilità di funzionamento del sistema
Funzionante	Funzionante	$R_A \cdot R_B$
Funzionante	Non Funzionante	$R_A \cdot (1 - R_B)$
Non Funzionante	Funzionante	$(1 - R_A) \cdot R_B$

Da cui si determina la affidabilità complessiva del sistema a partire dall'affidabilità dei singoli componenti secondo le leggi del calcolo delle probabilità.

$$R_S = R_A \cdot R_B + R_A \cdot (1 - R_B) + R_B \cdot (1 - R_A) = R_A + R_B - R_A \cdot R_B$$

come abbiamo detto il sistema sarà guasto solo nel caso in cui entrambi gli elementi costituenti siano guasti.

I calcoli si possono semplificare considerando la probabilità di guasto (inaffidabilità) $F(t)$ che per un sistema di tipo parallelo (relativamente alla connessione logica di guasto) è data dal prodotto delle inaffidabilità.

$$F_S = F_A \cdot F_B = (1 - R_A) \cdot (1 - R_B) = 1 - R_A - R_B + R_A \cdot R_B$$

confrontando con la relazione precedente si ottiene:

$$R_S = 1 - F_S = R_A + R_B - R_A \cdot R_B$$

consideriamo il caso particolare di due componenti uguali: $A = B$ e rateo di guasto costante λ e quindi $MTBF = 1/\lambda$.

$$R_A = R_B = e^{-\lambda t} \longrightarrow R_S = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}$$

$$MTBF_s = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} (2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}) dt = \frac{3}{2\lambda}$$

da cui il rateo di guasto del sistema:

$$\lambda_s = \frac{1}{MTBF_s} = \frac{2}{3} \lambda$$

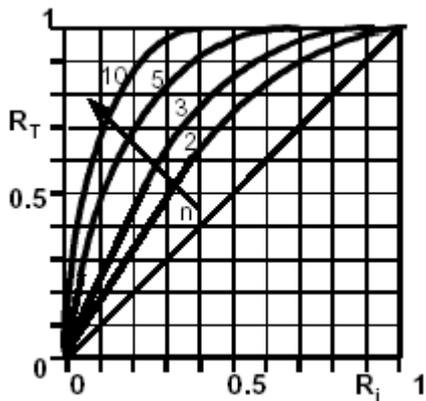
da cui:

$$\frac{1}{MTBF_s} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{MTBF} \quad \longrightarrow \quad MTBF_s = 1,5 \cdot MTBF$$

cioè il $MTBF_s$ è superiore del 50% a quello dei singoli componenti.

Osserviamo che il tasso di guasto del sistema non è più costante ma crescente nel tempo.

L'affidabilità del sistema nel suo complesso è più grande della maggiore affidabilità dei componenti.

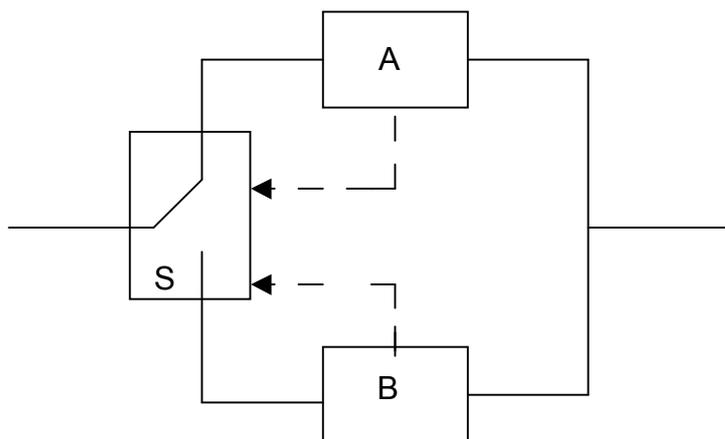


3.17.2 Sistema parallelo a funzionamento sequenziale (Stand – by)

In questo caso abbiamo che solo m elementi su n totali, con $m < n$, sono funzionanti in un certo istante, mentre i restanti $n-m$ elementi fungono da riserva stand – by e lo schema funzionale varia nel tempo in funzione del verificarsi di un guasto. La variazione dello schema di collegamento è determinata da un sistema di rilevazione del guasto (linea tratteggiata) che comanda un commutatore S (switch). Questa soluzione viene spesso adottata negli impianti per aumentare l'affidabilità.

2 Elementi

Per semplicità di trattazione consideriamo un sistema costituito da due elementi A e B di cui A è sotto carico mentre B è pronto ad intervenire nel caso di guasto in A e calcoliamo l'affidabilità di tale sistema.

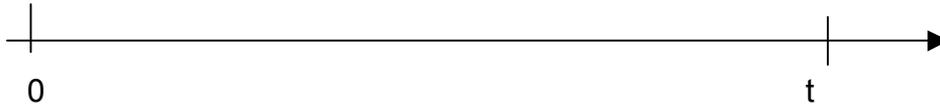


Affidabilità del sistema R_s

Consideriamo che il sistema di rilevazione del guasto e di commutazione abbia una affidabilità del 100% ($R_C = 1$).

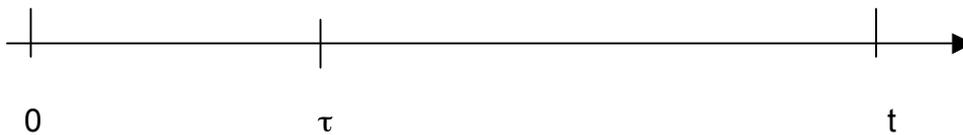
Il buon funzionamento del sistema è garantito per due possibili casi:

1) A funziona da $t = 0$ a t (B non interviene)



in questo caso $R_{s1}(t) = R_A(t)$

2) A funziona da $t = 0$ a $t = \tau$ dopo di che entra in funzione B che funzionerà da $t = \tau$ a t



in questo caso $R_{s2} = \int_0^t f_A(\tau) \cdot R_B(t - \tau) \cdot d\tau$

dove $f_A(\tau) \cdot d\tau$ è la probabilità che l'elemento A si guasti in τ

e $R_B(t - \tau)$ è la probabilità che l'elemento B funzioni da τ a t

Complessivamente l'affidabilità del sistema, che sarà indifferentemente in stato di funzionamento in configurazione 1 o 2, è data dall'unione delle affidabilità del sistema nei due possibili casi, risultando ovviamente maggiore che in assenza di riserva stand - by.

$$R_s(t) = 1 \cup 2 = R_{s1} + R_{s2} = R_A(t) + \int_0^t f_A(\tau) \cdot R_B(t - \tau) \cdot d\tau$$

Consideriamo il caso particolare in cui $\lambda_A = \lambda_B = \text{costante}$

$$\longrightarrow f_A(\tau) = \lambda \cdot e^{-\lambda\tau}$$

$$R_s(t) = e^{-\lambda t} + \int_0^t \lambda \cdot e^{-\lambda\tau} \cdot e^{-\lambda(t-\tau)} \cdot d\tau = e^{-\lambda t} (1 + \lambda t)$$

Mediante la formula di Poisson è possibile pervenire alla stessa espressione dell'affidabilità del sistema, sempre nell'ipotesi $\lambda_A = \lambda_B = \text{costante}$.

$$P(N)_t = \frac{(\lambda t)^N}{N!} \cdot e^{-\lambda t}$$

la probabilità di buon funzionamento del sistema è data dalla somma della probabilità di avere zero guasti e della probabilità di avere un guasto al tempo t.

quindi: per $N = 0$ $P(0)_t = e^{-\lambda t}$

per $N = 1$ $P(1)_t = \lambda t \cdot e^{-\lambda t}$

$$R_s(t) = P(0)_t + P(1)_t = e^{-\lambda t} \cdot (1 + \lambda t)$$

possiamo ora determinare il MTBF del sistema.

$$MTBF_s = \int_0^{\infty} R_s(t) \cdot dt = \frac{2}{\lambda}$$

osserviamo che il $MTBF_s = 2 \cdot MTBF_A$ (dove $MTBF_A = MTBF_B = 1/\lambda$ con $\lambda = \text{costante}$)

N Elementi

Nel caso generale di N componenti si ottiene:

$$R_s(t) = e^{-\lambda t} \left[1 + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!} \right] = e^{-\lambda t} \left[1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \dots + \frac{(\lambda t)^{(N-1)}}{(N-1)!} \right]$$

il termine nella parentesi è lo sviluppo in serie di $e^{\lambda t}$ quindi per $N \rightarrow \infty$ $R_s(t) = 1$ per ogni t come intuibile.

Inoltre $MTBF_s = \frac{N}{\lambda}$

L'affidabilità del sistema con n elementi in Stand – by è maggiore rispetto all'affidabilità della configurazione parallelo a funzionamento permanente.

Affidabilità del commutatore

Nell'ipotesi che il dispositivo S di rilevazione guasto e commutazione abbia una affidabilità che indichiamo con $R_C \neq 1$ possiamo esprimere l'affidabilità globale del sistema: R'_S

$$R'_S(t) = R_C(t) \cdot R_S(t)$$

3.17.3 Sistema parallelo parzialmente ridondante

Prendiamo ora in considerazione un sistema parallelo costituito da n elementi in cui la funzionalità del sistema stesso è garantita quando sono attivi almeno K componenti. (K out of n); l'affidabilità del Sistema è rappresentata dalla seguente espressione.

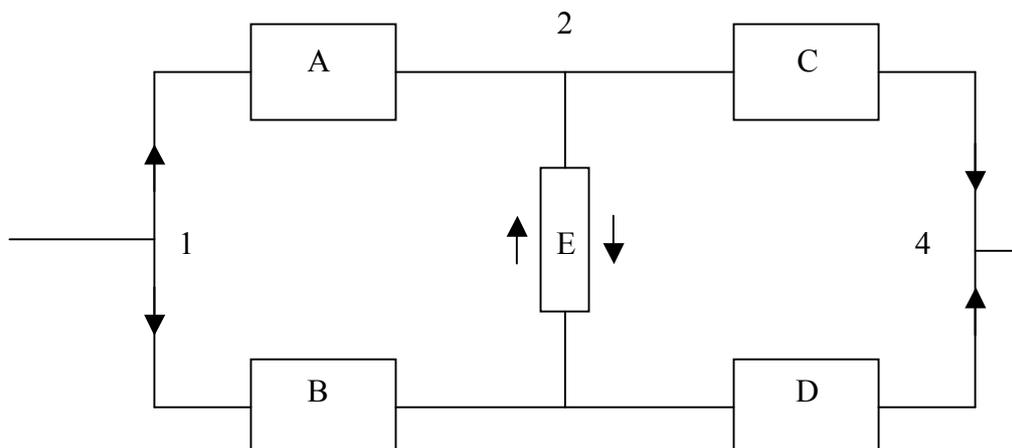
$$R_S(t) = \sum_{i=K}^n \binom{n}{i} [R(t)]^i [1 - R(t)]^{n-i}$$

nel caso in cui $\lambda = \text{costante}$ e quindi $R(t) = e^{-\lambda t}$ si ottiene:

$$MTBF_S = \sum_{i=K}^n \frac{1}{\lambda \cdot i}$$

3.18 Tecniche per sistemi complessi

Nella realtà applicativa si presentano spesso delle situazioni in cui le schematizzazioni serie parallelo non sono applicabili: in questo caso si deve ricorrere ad altri strumenti di analisi.



Matrice di connessione

Per creare la matrice di connessione si definiscono innanzitutto i nodi:

	1	2	3	4
1	1	A	B	0
2	0	1	E	C
3	0	E	1	D
4	0	0	0	1

Tale matrice verrà moltiplicata per se stessa fino a che non diventa invariabile:

	1	2	3	4
1	1	A+BE	B+AE	AC+BD+BEC+AED
2	0	1	E	C+DE
3	0	E	1	EC+D
4	0	0	0	1

AC+BD+BEC+AED indica la condizione tale per cui il sistema funziona:

$$S = (A \otimes C) \oplus (B \otimes D) \oplus (B \otimes E \otimes C) \oplus (A \otimes E \otimes D)$$

Per la valutazione della affidabilità di sistemi complessi esistono numerose tecniche legate sia alle richieste che queste devono soddisfare sia alle tipologie del sistema stesso.

Possiamo individuare due categorie principali di appartenenza:

a) Tecniche di tipo induttivo:

le tecniche di tipo induttivo studiano la propagazione di un guasto dal livello di complessità più basso per risalire ai livelli superiori.

Con questo modo di procedere, oltre a ricercare le origini del guasto, si studiano le condizioni di comunicazione fra i vari livelli strutturali,

La procedura prevede una fase preliminare che consiste nella frammentazione del sistema in unità elementari o comunque ritenute tali (Functional Analysis) ed una fase secondaria che provvede all'individuazione delle caratteristiche principali di funzionamento, delle modalità di mutua interazione e delle condizioni di mal funzionamento. Si procedere infine ad una ricomposizione logica del sistema

attraverso la definizione dei percorsi con cui un mal funzionamento si ripercuote sull'intero sistema.

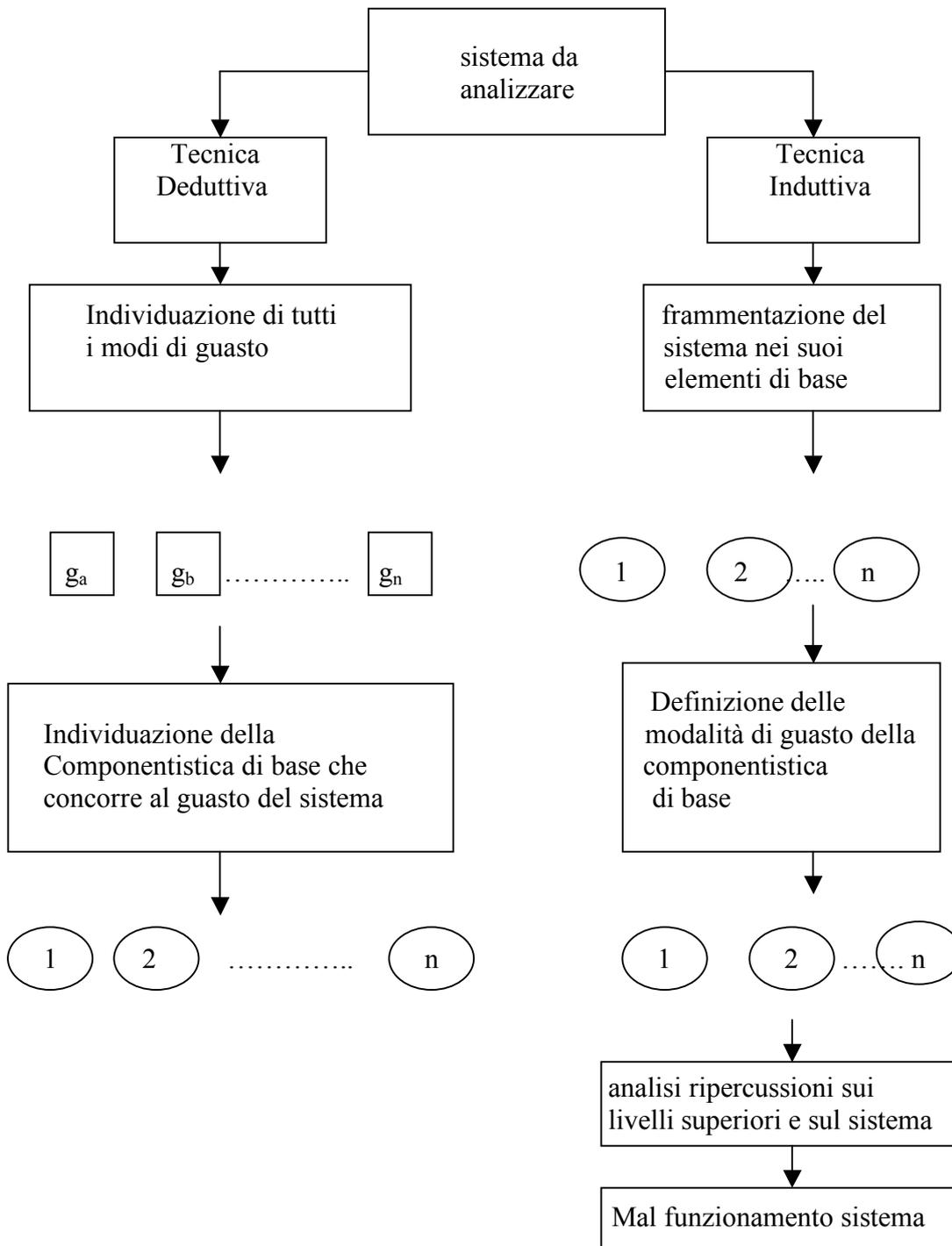
b) Tecniche di tipo deduttivo:

si procede in modo inverso rispetto a quello precedentemente descritto:

si fanno le ipotesi di guasto sul sistema preso per intero e successivamente si procede alla ricerca delle cause che hanno prodotto il distacco dalle intenzioni progettuali.

In questo modo si passa dal livello di complessità maggiore fino alle strutture di base definendo in modo diretto la modalità di propagazione del guasto dai componenti elementari ai livelli superiori.

Analisi sistema



Vediamo un'altra classificazione:

- tecniche di tipo qualitativo
hanno il compito principale di studiare le interdipendenze fra i guasti di componenti diversi e fra questi ed il guasto di tutto il sistema

- tecniche di tipo quantitativo.
impongono la costruzione di un modello matematico di affidabilità capace di studiare il comportamento temporale del sistema per via analitica.
La scelta della tecnica avviene in relazione alle caratteristiche strutturali del sistema in analisi, alla quantità di informazioni disponibili e all'obiettivo che la tecnica si propone di raggiungere;

Sistema in fase di progettazione

Per un sistema in fase di progettazione, del quale si voglia effettuare una previsione sulla futura affidabilità, si utilizzano tecniche di tipo qualitativo, dato che i dati a disposizione sono pochi e comunque legati alle sole intenzioni progettuali.

Impianto in attività

Per un impianto in attività, data la presenza di informazioni legate anche alla conduzione (che va dalle serie storiche dei guasti all'esperienza del personale acquisita durante la gestione) e preferibile un approccio di tipo quantitativo. In realtà per quest'ultimo caso viene seguita una procedura mista che da completezza al processo di valutazione; in una prima fase viene applicata una tecnica qualitativa che consente l'individuazione dei possibili modi di guasto, consente una presa di familiarità con il sistema e, fondamentale, di scartare quegli eventi che per loro natura vengono considerati improbabili.

Punti fissi in fase preliminare:

- valutazione delle effettive prestazioni funzionali richieste al sistema;
- condizioni operative richieste;
- modalità di impiego.

La conoscenza di questi punti si acquisisce dall'attenta valutazione dei progetti strutturali e funzionali e dei manuali operativi.

3.19 Functional Analysis (FA)

Per conoscere in modo approfondito un sistema complesso e necessario ricorrere ad una rappresentazione formale di parti o funzioni, mediante la costruzione di modelli

descrittivi delle caratteristiche del sistema ritenute rilevanti al fine dell'analisi, in modo da prevedere i comportamenti e le risposte ai vari stimoli esterni.

La modellazione generalmente impiegata in questo tipo di analisi, si basa su una scomposizione di carattere gerarchico in cui le connessioni tra i vari livelli (NHA - Next Higher Assembly e NLA -Next Lower Assembly) sono stabilite in base a relazioni di tipo fisico-strutturale e funzionale. Il modello fisico mette in evidenza moduli, sottoassiemi, componenti che costituiscono la struttura statica del sistema, insieme alle relative interconnessioni. La sua rappresentazione è di tipo grafico ed è generalmente suggerita, almeno in fase preliminare, da una attenta valutazione del P&I (Part and Instrument) dell'oggetto o sottosistema da esaminare, sul quale, successivamente, vengono operate delle restrizioni o esplosioni in funzione del livello di dettaglio con cui affrontare l'analisi.

Questo concetto sottolinea la necessità, per l'analista, di focalizzare e circoscrivere il problema, attraverso la definizione di un grado di risoluzione della scomposizione in ordine agli obiettivi da raggiungere, delineando i confini fisici, le condizioni al contorno e le entità ausiliarie con cui l'oggetto in esame è interfacciato.

scomposizione funzionale

La scomposizione funzionale descrive l'utilizzo e la funzione svolta dai moduli più significativi del sistema; articolato secondo una logica process-oriented si limita ad evidenziare l'insieme di azioni e funzioni per cui il sistema è stato progettato.

In questa fase di studio il blocco funzionale in esame viene isolato dall'architettura in cui è inserito, dalla sequenza temporale del processo e dalla missione prevista.

Dopo aver valutato l'effettivo peso, in termini di affidabilità, delle variabili di processo e delle funzioni ad esse associate si procede alla modellizzazione funzionale che consiste nella realizzazione di uno schema a blocchi funzionali (FBD - Functional Block Diagram) che rappresenta una sequenza ordinata di moduli caratterizzati da precise funzioni di trasferimento.

Definizione delle Significant Items

La selezione delle entità significative (SI è Significant Item) è il processo con cui si determina l'insieme di sottosistemi, moduli, apparati, che saranno soggetti all'analisi in base alle loro caratteristiche inerenti la sicurezza, la funzionalità del processo e il costo.

In questa fase la scelta viene applicata a funzioni o guasti funzionali e componenti strutturali

identificati da un Functional Block Diagram e uno Structural Block Diagram e queste entità significative realizzeranno la classica struttura ad albero, sulla quale costruire l'analisi FMEA o FMECA che vedremo in seguito.

La scelta dei criteri di significatività da applicare all'impianto dipende ancora una volta dal

motivo per il quale si applicano le tecniche di analisi e dalle caratteristiche intrinseche del

processo o del sistema in oggetto.

3.20 Banche Dati

La conoscenza dell'affidabilità dei singoli componenti è una questione fondamentale per lo studio di un sistema.

Per determinare l'affidabilità dei componenti si parte dalla conoscenza del Rateo di Guasto.

Generalmente la grandi imprese (es settore aeronautico) si costruiscono una propria banca dati, in base alla loro esperienza di guasto, in cui sono catalogati i ratei di guasto per i diversi componenti.

Ricordiamo che l'Affidabilità è la probabilità di buon funzionamento a un certo istante e in determinate condizioni al contorno e spesso le condizioni di funzionamento non rispondono alla definizione.

Esistono diverse banche dati sui ratei di guasto dei singoli componenti.

- banche dati fatte a livello aziendale
- banche dati fatte tra aziende similari
- banche dati a livello nazionale(da organismi nazionali)

possono quindi sorgere problemi di interpretazione dei valori dati ai vari livelli che possono avere un intervallo di variabilità.

Quanto più questo intervallo è ampio tanto più l'analisi sarà qualitativa.

Rilevazioni totali e rilevazioni per campioni

Una rilevazione si dice:

- totale se è estesa a tutti gli elementi di una popolazione statistica;
- per campione se è fatta solo su alcuni elementi della popolazione, scelti con criteri opportuni.

Indubbiamente una rilevazione totale ha il pregio di fornire risultati completi e precisi sul fenomeno indagato; tuttavia se la popolazione è molto numerosa, comporta costi elevati e tempi di realizzazione molto lunghi. Nella realtà si ricorre molto spesso a indagini parziali, dette rivelazioni campionarie, quando:

- occorre contenere i costi (il costo di un'indagine campionaria è minore di quello di un'indagine totale);
- occorre ottenere più tempestivamente i risultati
- non è possibile procedere diversamente (ad esempio gli studi sulla durata dei prodotti industriali possono comportare la distruzione delle unità esaminate).

La scelta del campione deve essere fatta in modo che esso sia rappresentativo, deve cioè possedere le stesse caratteristiche della popolazione da esaminare.

3.21 Valutazione dell’Affidabilità

L’affidabilità è funzione di più parametri che si intrecciano e che fanno parte di varie fasi della vita del sistema, dalla progettazione alla realizzazione, alla gestione. Esistono vari approcci per valutare l’affidabilità di una macchina:

1. Utilizzare le informazioni che provengono per un lungo periodo di tempo da molte macchine uguali nelle stesse condizioni di funzionamento
2. Utilizzare le informazioni che provengono dal funzionamento per un breve periodo di tempo di poche macchine. I dati possono fornire una stima del comportamento avente un certo grado di confidenza, ovvero una certa probabilità di risultare vera
3. Utilizzare la conoscenza, se esiste, dell’affidabilità dei componenti per fare previsioni sull’affidabilità dell’intera macchina.

3.22 Alberi di guasto

I componenti di un qualsiasi sistema meccanico, elettrico o elettronico, ai fini del funzionamento dell’impianto, si possono presentare in due stati fondamentali:

1. stato di funzionamento
2. stato di guasto

si dovrà quindi considerare un sistema costituito da componenti binari, i quali potranno assumere le due configurazioni principali di funzionamento o di guasto a cui verrà attribuito il numero 1 o 0 rispettivamente.

In questo contesto è possibile, dopo aver rappresentato il sistema (o una parte di esso) con uno schema sequenziale logico, impiegare i principi e le regole dell’algebra di Boole.

3.22.1 Algebra di Boole

L’algebra di Boole, ottenuta in modo deduttivo partendo dalla teoria assiomatica degli insiemi, definisce le operazioni fondamentali sui numeri binari.

I concetti fondamentali dell’algebra Booleana sono:

- Classe (K): è definita come l’insieme costituito da tutti e solo gli elementi 0 e 1 (elementi binari)

- OR (+) somma binaria: è un'operazione definita sui due elementi 0 e 1 della classe
- AND (x) (·) prodotto binario: è un'operazione definita sui due elementi della classe (0,1)
- NOT ($\bar{\quad}$) negazione: è un'operazione definita su un solo elemento della classe.

Principali postulati

A e B siano due elementi (0,1) in classe K :

$$A \cdot A = A$$

$$A + A = A$$

$$A \cdot (B + C) = A \cdot B + A \cdot C$$

$$A + (B \cdot C) = (A + B) \cdot (A + C)$$

$$A + (A \cdot B) = A$$

$$A \cdot (A + B) = A$$

$$A \cdot (A \cdot B) = A \cdot B$$

$$A + \bar{A} = 1$$

$$A \cdot \bar{A} = 0$$

Tipologie di schema sequenziale logico

Le principali tipologie di schema sequenziale logico sono:

- grafi di flusso
- schema elettrico analogico
- alberi di guasto

Prendiamo in considerazione la rappresentazione ad alberi di guasto che, oltre a rappresentare un metodo relativamente semplice da realizzare da interpretare ed eventualmente da modificare, è più agevolmente traducibile in algoritmi matematici da implementare nel sistema informativo di manutenzione.

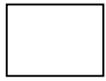
L'albero dei guasti è un metodo che ci permette di evidenziare i possibili punti deboli del sistema. Dopo aver ipotizzato il verificarsi di un certo guasto si procede a ritroso allo scopo di individuare le cause possibili che lo hanno generato.

Simboli unificati

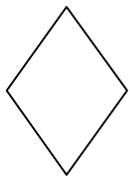
eventi



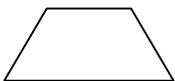
Evento Primario: (non suscettibile di ulteriore sviluppo, cioè per il quale non è possibile chiedersi perché si è verificato)



Evento Secondario: risultante dalla combinazione logica di altri eventi. (sono possibili indagini sulle cause per le quali si è verificato)



Evento Primario che “potrebbe” essere analizzato nelle sue cause. (il mancato sviluppo è dovuto alla mancanza di notizie sulla probabilità di guasto dei componenti o per eccesso di particolari.



Blocco gerarchico

Relazioni tra gli eventi

Vediamo ora i simboli che collegano gli eventi in un rapporto di causa effetto.

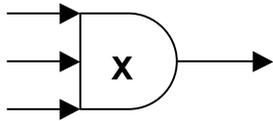


operazione logica per la quale l’evento di uscita si produce quando si presenta all’ingresso uno qualunque degli eventi. È l’equivalente di un sistema serie.

$$P_U = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) \quad \text{Probabilità che l'evento si verifichi in uscita.}$$

Tabella della verità nel caso di due ingressi A e B

A	B	A+B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1



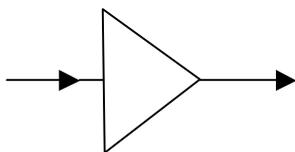
Porta logica (Gate) AND

Operazione logica per la quale l'evento in uscita si verifica solo se sono verificati tutti gli eventi in ingresso. È l'equivalente di un sistema parallelo.

$$P_U = \prod_{i=1}^n P_i \quad \text{Probabilità che l'evento si verifichi in uscita.}$$

Tabella della verità nel caso di due ingressi A e B

A	B	A·B
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1



Porta logica NOT

Operazione logica di negazione.

Tabella della verità

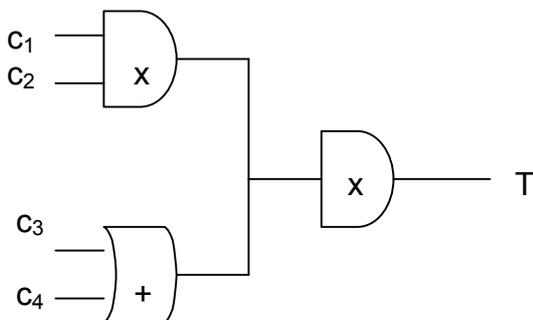
A	\bar{A}
0	1
1	0



operazione logica per la quale l'evento in uscita è verificato solo se gli eventi in ingresso si manifestano secondo la sequenza indicata.

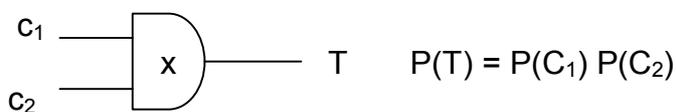
Mediante l'algebra di Boole è possibile analizzare e semplificare gli alberi di guasto.

esempio



$$T = C_1 C_2 (C_1 + C_2) = C_1 C_2 C_1 + C_1 C_2 C_3 = C_1 C_2$$

Quindi lo schema può essere semplificato in:



P(T) probabilità di verificarsi dell'evento T

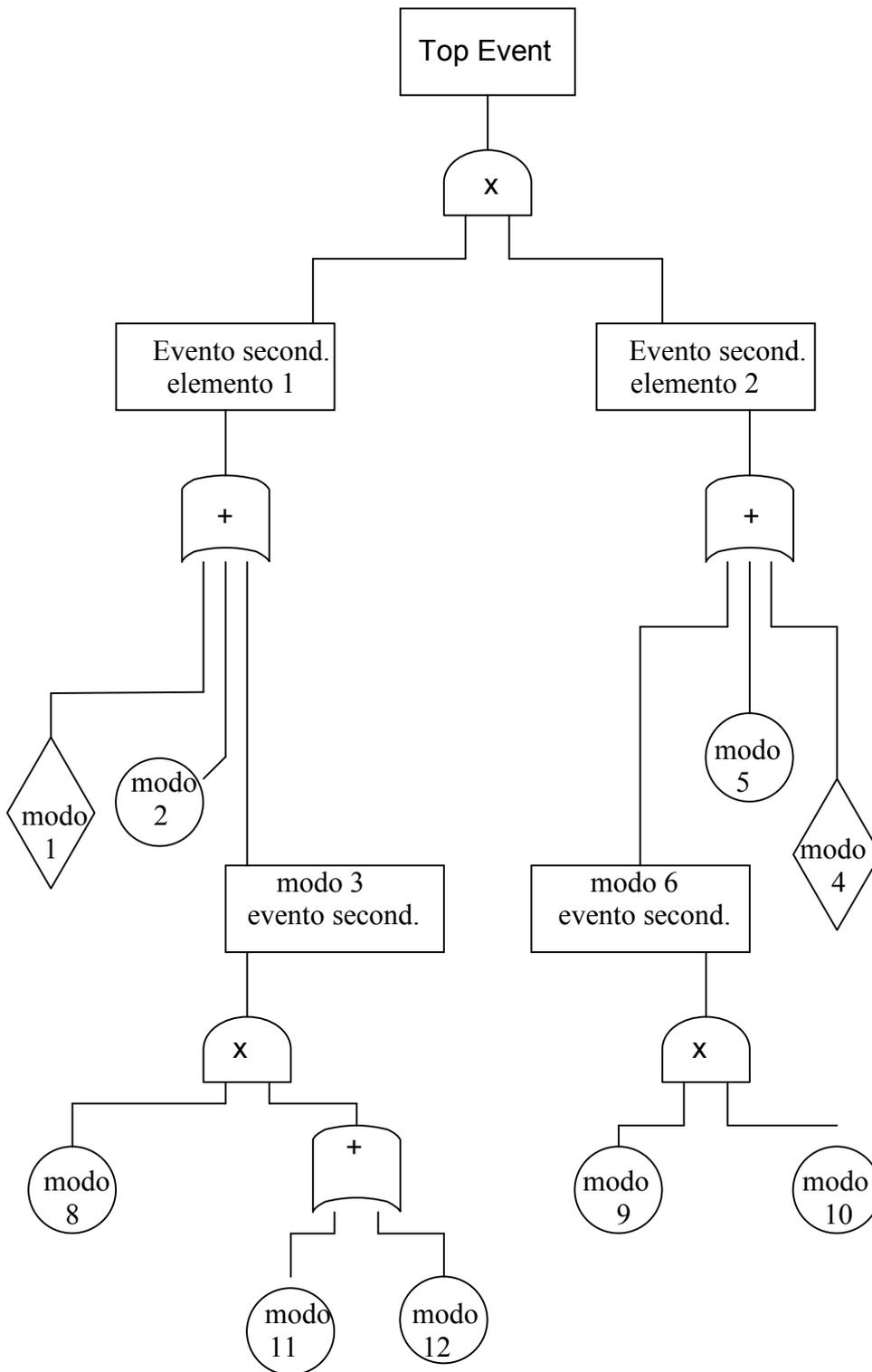
Determinata la funzione booleana in forma canonica si tratta di renderla minima il che significa trovare l'espressione con il minor numero di blocchi logici in modo da semplificare il calcolo della probabilità di guasto del sistema.

Per la minimizzazione delle funzioni, oltre all'algebra di Boole, esistono altri metodi basati sull'applicazione di alcuni teoremi.

Una volta costruito l'albero dei guasti può essere impiegato in diversi modi: per l'aspetto progettuale se l'impianto è in costruzione o per l'aspetto manutentivo nel caso di impianto esistente.

Vediamo un esempio grafico di albero di guasto con eventi primari e secondari di guasto.

3.22.2 Esempio di Albero di Guasto



3.22.3 Insiemi di taglio (cut set e Path set)

Per insieme di taglio si intendono quegli eventi il cui verificarsi determina il verificarsi dell'evento iniziale (top event).

Per taglio di ordine n si intendono gli n eventi che devono verificarsi per provocare il top event. nota la probabilità di verificarsi degli n eventi di taglio si può calcolare la probabilità di accadimento del top event.

Per migliorare l'affidabilità del sistema si dovranno attuare interventi manutentivi di prevenzione in generale su tutti i componenti e in particolar modo sui componenti che determinano gli ordini di taglio inferiori. Questo tipo di analisi ci consente di valutare il peso di ogni particolare sotto evento nei confronti del top event.

Queste considerazioni sono alla base delle valutazioni economiche necessarie per la scelta delle politica manutentiva ottimale.

Path sets

Un Path set è un particolare stato del sistema per il quale il Top event non si verifica.

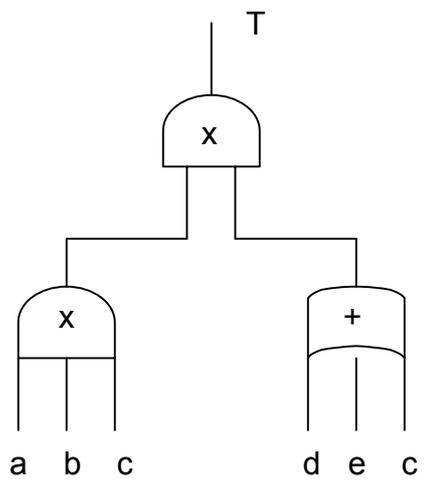
Il verificarsi o meno del top event determina rispettivamente una condizione di mal funzionamento o buon funzionamento del corrispondente sottosistema.

Minimal cut set: è un cut set che non comprende nessun altro cut set.

3.22.4 Cause comuni di guasto

Nella pratica possono esistere delle cause comuni di guasto: ad esempio un incendio in una particolare area può mettere fuori uso più sistemi contemporaneamente (impianti di servizio e impianti di produzione). È importante individuare la cause comuni di guasto per evitare di considerarle due volte.

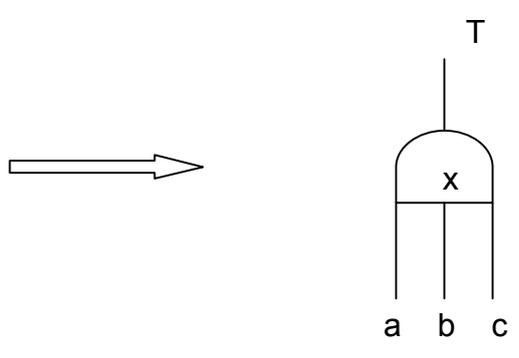
Esempio:



$$T = (a \cdot b \cdot c) \cdot (d + e + c)$$

per semplicità di trattazione poniamo $a \cdot b = f$ e $d + e = g$

$$T = (f \cdot c) \cdot (g + c) = f \cdot c \cdot g + f \cdot c \cdot c = a \cdot b \cdot c$$



3.23 Incremento dell'affidabilità

Vediamo ora una serie di metodologie finalizzate al miglioramento dell'affidabilità di un sistema.

Uno dei principi che ricorrono nella teoria dell'affidabilità è che il valore massimo di affidabilità di un prodotto industriale si raggiunge nella fase di progetto. Tutte le fasi successive di realizzazione, conduzione e interazione ambientale concorrono ad allontanare, in modo più o meno rilevante, da quelle che sono le intenzioni iniziali. Si deve quindi pensare all'affidabilità di un sistema già a partire dalla fase iniziale di progettazione, richiedendo tutti gli standard necessari affinché il sistema possa assicurare le prestazioni richieste in fase di esercizio.

Tecniche principali per l'incremento dell'affidabilità di un sistema.

a) La ridondanza

E' stato precedentemente messo in evidenza come le connessioni influiscano in maniera diretta sulla misura finale dell'affidabilità di un sistema e come la connessione in parallelo garantisca per sua natura un'affidabilità superiore rispetto a quella di una connessione in serie a parità di rateo di guasto. Da questa osservazione deriva il concetto di ridondanza in parallelo o attiva.

Quando si ritiene la funzione di un dispositivo di particolare criticità o importanza per il corretto funzionamento dell'intero sottosistema o sistema di cui fa parte, si può aumentarne l'affidabilità attraverso una duplicazione del componente stesso. In questo modo la funzione richiesta è asservita, non più da un solo componente, ma da due o più contemporaneamente.

È possibile riferire la ridondanza anche ad un intero sottosistema, cioè eseguire una duplicazione di una linea di processo per intero.

Non tutti i sistemi possono sopportare la presenza di un parallelo attivo; nei circuiti idraulici o circuiti elettrici le esigenze strutturali non sono in grado di prevedere situazioni del genere appena descritto. In questi casi si ricorre ad un'altra forma di ridondanza che è quella passiva o sequenziale. Se il primo elemento va fuori servizio, il secondo, attraverso un'operazione di commutazione manuale o automatica, subentra rispondendo in pieno alle richieste del sistema.

Una situazione di questo tipo comporta la partecipazione di più elementi i quali entrano nella procedura per migliorare l'affidabilità del sistema, ma sono soggetti essi stessi a fenomeni di guasto.

b) Sostituzione dei componenti con altri di qualità superiore

c) Miglioramento delle condizioni al contorno

d) La manutenzione

Un altro strumento capace di aumentare l'affidabilità di un sistema è l'attività di Manutenzione.

Non tutti i sistemi sono in grado di accogliere operazioni di manutenzione; occorre cioè che il sistema o il semplice componente elementare sia stato pensato e realizzato per essere

accessibile a questo tipo di sviluppo. La proprietà di accessibilità è indicata con il termine di manutenibilità ed è definita come l'attitudine di un dispositivo, in condizioni specificate di uso, ad essere conservato o ripristinato in uno stato nel quale può adempiere alle funzioni richieste, quando la manutenzione è effettuata in prestabilite condizioni ed usando procedure e mezzi prescritti.

Analisi di Sensibilità di un sistema

Prendiamo in considerazione un sistema: dopo averne calcolato l'affidabilità globale, dimezziamo il rateo di guasto di uno degli elementi costituenti il sistema stesso e ricalcoliamo l'affidabilità globale. Ripetendo l'operazione per i diversi componenti sarà possibile valutare qual è il componente per il quale, migliorandone l'affidabilità, si ottiene percentualmente il massimo incremento di affidabilità del sistema.

3.24 Affidabilità e progetto

- L'affidabilità tradizionale assume che il progetto sia stato fatto senza errori (o che, in ogni caso, questi errori siano identificati e rimossi prima della messa in esercizio dell'impianto).
- In questo caso, gli unici guasti possibili sono quelli di usura o quelli casuali, di cui si deve tenere conto nell'analisi affidabilistica.

Nella progettazione si può ragionevolmente assumere che gli errori di disegno siano stati rimossi

I sistemi analogici sono costruiti con componenti che hanno, all'interno dell'intervallo operativo dell'impianto, un numero infinito di stati stabili, che permettono di descrivere il loro comportamento con funzioni continue e di costruire un modello matematico del sistema. Tale modello può essere studiato analiticamente e le caratteristiche del sistema (nel nostro caso, l'affidabilità) possono essere determinate in modo rigoroso. Nel caso di sistemi elettromeccanici digitali, essi sono generalmente costituiti con componenti aventi un insieme finito di stati stabili, ed il sistema risultante ha un numero relativamente piccolo di stati discreti, che può essere studiato e testato in modo esaustivo.

Il collaudo ed errori di progetto.

durante la fase di collaudo si può esercitare il sistema realizzato e se ne verificano le caratteristiche, ed in particolare la sua affidabilità.

L'avvento dell'elettronica e dell'informatica ha portato i sistemi automatici ad un grado di flessibilità molto elevato, inimmaginabile nella precedente era meccanica.

Tale evoluzione ha determinato un notevole aumento del grado di libertà dei progettisti: poiché gli errori progettuali sono molto più correggibili, la mente del progettista è molto più libera di indirizzarsi agli aspetti concettuali, e ci si può permettere sempre di più il lusso di progettare il sistema in astratto, prescindendo dai tecnicismi e dai dettagli, che si confida possano essere poi risolti a livello procedurale, applicando sistematicamente le metodologie di progettazione affidabilistica e di qualità. Ora, il fatto che, grazie alle tecnologie informatiche, gli errori siano divenuti correggibili, non significa che siano certamente corretti. Sul piano metodologico, il fatto che esistano ormai procedure standard e check list per ogni fase progettuale, non significa che tali procedure siano complete e corrette, né che siano sempre e certamente applicate per intero. Le procedure devono essere applicate sistematicamente e completamente, e continuamente controllate, riverificate ed aggiornate, dai progettisti, dai tecnologi processisti e dagli utenti, in un lavoro di riesame continuo che non può in alcun modo essere omissivo.

3.25 Criteri di progettazione affidabilistica

Vediamo ora brevemente come si progetta l'affidabilità nel caso di un sistema generico.

1. Nel caso di progetti ad elevata esigenza di affidabilità e sicurezza occorre limitare molto, se non evitare completamente, la vendita di competenze allo scoperto, specie quando il fornitore non è ancora completamente al corrente di tutte le diverse competenze che occorrono per completare il progetto, ma pensa di approfondire le esigenze e procurarsi le competenze in seguito. Spesso il budget di commessa, definito senza tener conto di particolari competenze, risulta poi, in fase esecutiva, troppo esiguo, ed importanti aspetti affidabilistici finiranno con il restare scoperti. E' interesse del committente preoccuparsi di chiarire, ed il fornitore dovrebbe dichiarare, se possiede competenze affidabilistiche in generale, e se possiede competenze affidabilistiche specifiche, relative al processo da controllare ed alle tecnologie da usare nel progetto.
2. Il primo passo progettuale consiste ovviamente nel definire i requisiti di affidabilità dell'intero sistema (logistica, di missione, di sicurezza e di utilizzo). Questa attività è parte integrante della definizione dei requisiti del sistema. In particolare l'affidabilità di utilizzo dipende in modo determinante dalla definizione precisa dei requisiti affidabilistici. Per tale fase di definizione potrebbero essere necessari skill ed esperienze di diversa natura (ad es. meccanica, elettrica, elettronica, fluidodinamica, impiantistica, informatica): la fase di definizione dei requisiti affidabilistici deve coinvolgere, fin dall'inizio, progettisti esperti nelle diverse discipline implicate dal progetto. Non ultima, per importanza, è la presenza dell'utente finale, che dovrà, se necessario, essere aiutato in questa fase a definire il profilo professionale ed il numero delle persone che utilizzeranno il sistema. La progettazione affidabilistica deve infatti basarsi anche sulla logica d'impianto, sulla quantità ed ubicazione delle stazioni di lavoro, sugli orari di presidio delle stazioni di lavoro, sui comportamenti ed esigenze delle persone che utilizzeranno il sistema (se si tratta di tecnologi, di ricercatori, di responsabili di produzione, di manutentori, o altro), sulla natura e sui flussi del processo produttivo, di esercizio o di ricerca. Se il sistema dovrà interagire con operatori ed utenti umani, se è prevista l'interazione umana in un ciclo critico o potenzialmente critico, si dovrà prestare attenzione alla sicurezza ed efficienza delle comunicazioni umani-macchina e macchina-umani, al fine di evitare, per esempio, fenomeni di ipo-attenzione o iper-attenzione. E' inoltre interesse sia del committente che del fornitore chiarire bene le differenze tra performance ed affidabilità del sistema, e definire, per ogni parte del sistema, precisi criteri di scelta e priorità

tra gli aspetti prestazionali e gli aspetti affidabilistici. La fase di definizione dei requisiti, funzionali ed affidabilistici, del sistema deve anche definire i requisiti dei progettisti che disegneranno il sistema: ove siano rilevate delle mancanze, occorrerà ricercare gli skill necessari.

3. Terminata la definizione dei requisiti, si procede con la fase di disegno, in cui vengono individuate le parti principali del sistema: il sistema viene disegnato come un insieme di sotto-sistemi che interagiscono tra loro, viene definita la funzione di ciascun sotto-sistema e si stabiliscono le comunicazioni tra di essi. In questa fase, detta disegno dell'architettura di sistema, si esaminano i requisiti individuati nella fase precedente e si stabilisce quale sotto-sistema, o insieme di essi, li debbano soddisfare. Facendo così, si trasformano i requisiti di sistema in un insieme di requisiti specifici dei vari sotto-sistemi. Anche i requisiti di affidabilità vengono gestiti in questo modo: vengono cioè tradotti in una serie di requisiti specifici per ogni elemento.

4. Queste due fasi vengono iterate un numero sufficiente di volte (dipendente dalla complessità del sistema), fino a che è stato raggiunto il livello di dettaglio sufficiente affinché il progettista possa realizzare il singolo elemento. Tipicamente in un progetto complesso la fase di disegno di sistema termina quando sono state chiaramente individuate le parti puramente software, quelle hardware (quali sensori ed attuatori), quelle meccaniche, e così via.

5. Infine, per ogni tipo di elemento (meccanico, elettronico, software), inizia la progettazione specifica, che è chiaramente diversa da elemento ad elemento, seguita dalla sua fabbricazione. In questa fase, ogni progettista dovrà rispettare i requisiti di affidabilità che gli sono stati assegnati dal disegno di sistema.
6. A questo punto l'attività di progettazione affidabilistica si trasforma in un'attività di controllo della corrispondenza o meno di quanto elaborato dai progettisti rispetto agli obiettivi. Si tratta di monitorare, ai vari stadi di avanzamento, l'affidabilità stimata del progetto e di intraprendere, se necessario, opportune modifiche migliorative. Tali modifiche possono essere:
 7.
 - Scelta di materiali costruttivi di maggior qualità.
 - Scelta di componenti più affidabili (o sovradimensionati, che risentono cioè meno delle sollecitazioni richieste).
 - Introduzione di ridondanze.
 - Revisioni di progetto.
 - Revisioni dei criteri e delle modalità di utilizzo.

Controllo dell'affidabilità

Lo strumento utilizzato per tenere sotto controllo lo sviluppo dell'affidabilità e per decidere se effettuare interventi migliorativi e quali tra quelli possibili, è la procedura nota come FMECA (Failure Mode Effect and Criticality Analysis): si tratta di un'analisi sistematica di come ogni componente possa venire meno al suo corretto funzionamento (considerando le differenti modalità di guasto) e di quali conseguenze questo abbia sull'intero sistema:

3.26 Il metodo semiprobabilistico

Il metodo semiprobabilistico rappresenta una alternativa all'albero dei guasti per mettere in evidenza i punti critici di un sistema. Tale metodo è stato inizialmente introdotto come strumento per la valutazione dell'affidabilità dei reattori delle centrali nucleari italiane.

È un metodo semplice ed efficace in confronto ad un albero dei guasti che, per impianti complessi come impianti nucleari, risulta gestibile unicamente mediante calcolatore.

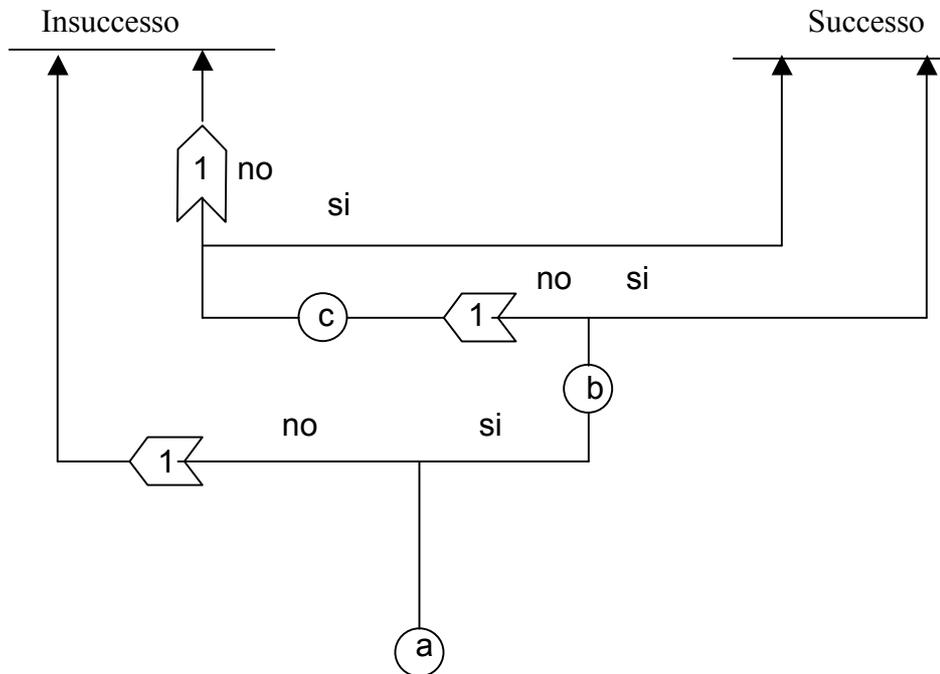
L'impianto viene suddiviso in Eventi iniziatori di guasto e Sistemi di sicurezza. Ai diversi elementi vengono assegnati degli indici in funzione della loro affidabilità.

Esempio:

- 0 indice per elementi di normale qualità industriale
- 1 prodotto industriale di alta qualità
- 2 prodotto industriale di altissima qualità
- 3 prodotto dedicato e specifico, espressamente progettato e studiato per l'impianto.

Si tracciano i percorsi logici che rispecchiano la reale configurazione del sistema con frecce che portano all'evento finale precedentemente individuato, si sommano gli indici indicati sui percorsi; i percorsi con indice basso saranno considerati pericolosi.

esempio



I percorsi che portano all'insuccesso sono due, uno ha la somma degli indici pari a 1, l'altro pari a 2: il percorso pericoloso è quindi il primo.
Il metodo semiprobabilistico non è rigoroso e razionale come l'albero dei guasti ma è altrettanto efficace in quanto consente di determinare l'evento critico.