

Capitolo 1 - Teoria della manutenzione: la gestione delle macchine

Nel presente capitolo e nei tre successivi, si espongono alcune basi teoriche relative alla gestione delle macchine, delle informazioni, dei materiali e del personale di manutenzione.

Sezioni:

1.1 - Generalità

1.2 - Affidabilità

1.3 - Disponibilità

1.4 - Il tasso di guasto e la curva di mortalità

1.5 - I sistemi complessi

1.6 - Affidabilità. Sistemi in serie

1.7 - Affidabilità. Sistemi parallelo

1.8 - Disponibilità di sistemi complessi

1.9 - Osservazioni sui sistemi complessi

1.10 - La manutenibilità

1.1 - Generalità

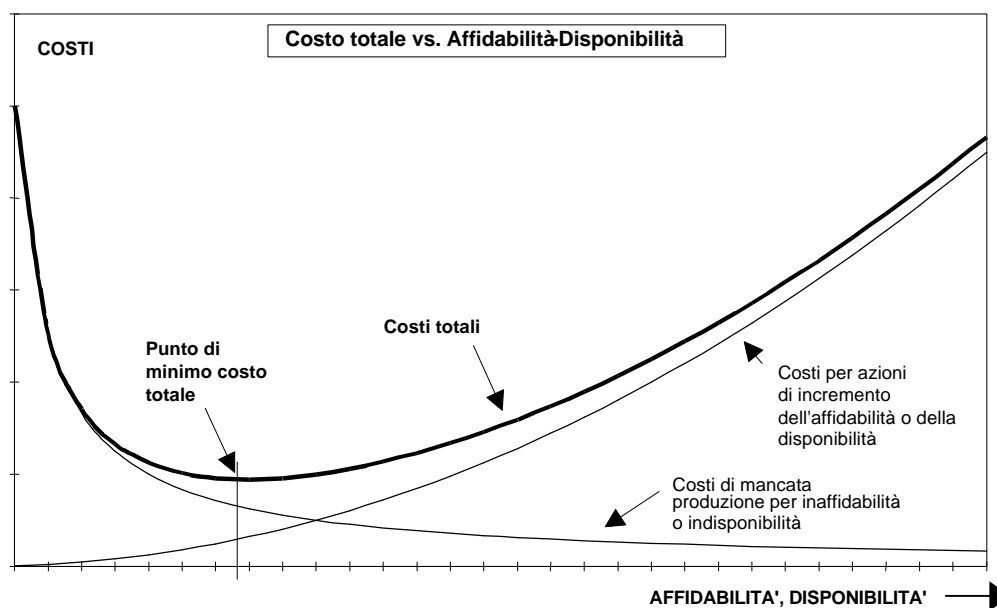
Una generica macchina viene progettata e costruita per svolgere una missione nota a priori e di cui si conoscono le caratteristiche in termini di tempi, di prestazioni e di costi. Il suo funzionamento, basato sulla continua interazione tra i sottosistemi che la compongono, non è tuttavia continuo nel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

L'affidabilità può essere definita come *la probabilità che un elemento* (macchina, sottosistema o componente) *funzioni senza guastarsi per un determinato tempo t dal suo avviamento ed in predeterminate condizioni ambientali.*

La disponibilità può invece essere definita come *la percentuale di tempo di buon funzionamento rispetto al tempo totale in cui è richiesto il funzionamento stesso dell'elemento* (macchina, sottosistema o componente).

Affidabilità e disponibilità, come si vedrà in seguito, rappresentano due grandezze attraverso le quali è possibile misurare la continuità con cui un elemento può garantire il raggiungimento della missione per la quale è stato ideato e costruito.

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



Se in ambito sicurezza, l'affidabilità assume un ruolo della massima importanza, a livello produttivo il suo posto viene spesso preso dalla disponibilità attraverso la quale il gestore d'impianto riesce a monitorare la reale efficienza operativa delle macchine nel corso della loro vita utile.

Poiché, come già affermato, le macchine si guastano, l'affidabilità e la disponibilità vengono garantite, ove possibile, attraverso adeguate *politiche manutentive* che, se da un lato contribuiscono ad un funzionamento globale regolare e continuativo, dall'altro rappresentano un onere economico spesso non indifferente, intervenendo:

- in sede di gestione dell'impianto
- nella progettazione o riprogettazione di parti o insiemi di macchine o nell'installazione di unità di riserva (sistemi ridondanti)

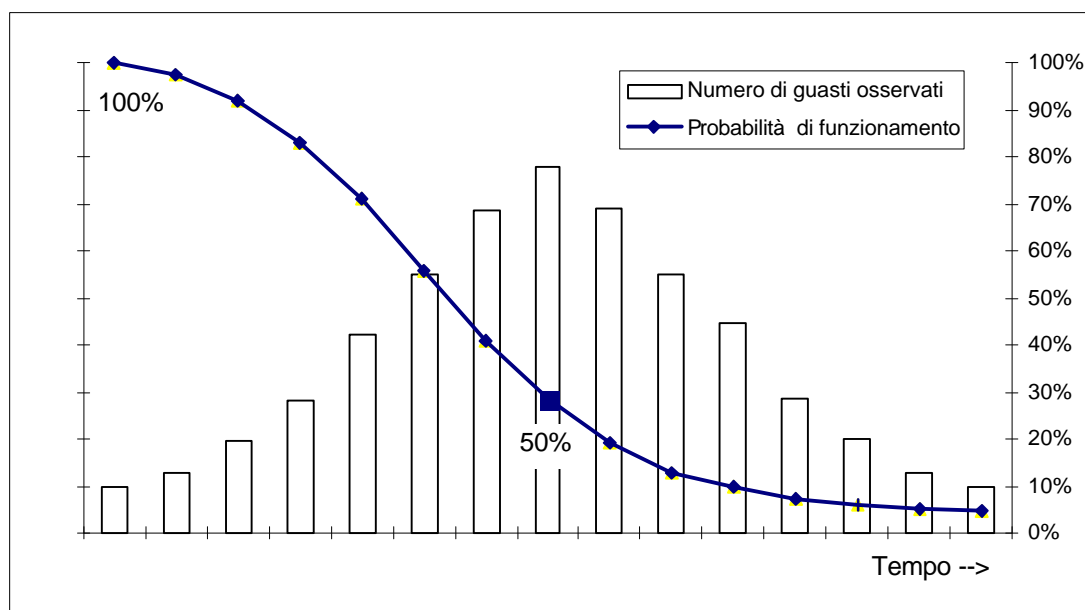
1.2 - Affidabilità

Lo studio dell'affidabilità si applica in genere a meccanismi che, nel corso della vita utile, non possono essere tecnicamente o economicamente riparati.

Si consideri ad esempio il caso di un determinato tipo di lampadina. Si tratta di un oggetto la cui funzione si esaurisce dopo un certo numero di ore di funzionamento e che non può essere riparato. Un metodo semplice per stimarne l'affidabilità è il seguente:

- si prendano un certo numero di lampadine, ad esempio, 100 e si accendano contemporaneamente al tempo zero. La *missione* delle lampade è quella di rimanere accese.
- dopo un'ora di funzionamento alcune lampade cesseranno di funzionare: si supponga che si spengano 2 lampade. In tal caso si può affermare che l'affidabilità di una lampadina nuova scelta a campione tra quelle prodotte è del 98% in un'ora
- dopo 1000 ore di funzionamento si supponga che funzionino ancora 70 lampade su 100. Si dirà quindi che l'affidabilità di quel tipo di lampadina è del 70% su 1000 ore di funzionamento

Il risultato di questo test può essere visualizzato in un grafico qualitativo come il seguente, in cui vengono contemporaneamente messe in evidenza, in funzione del tempo di funzionamento, le curve del numero di guasti osservati e la probabilità di buon funzionamento della lampada secondo una legge di tipo gaussiano.



Questo esempio permette alcune considerazioni:

1. Più elevato è il numero di lampadine testate e più precisa risulterà la valutazione della probabilità di funzionamento. Solo se si provassero infinite lampade 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.
2. Esistono molte leggi (gaussiane, esponenziali, lognormali, ecc.) che caratterizzano la probabilità di guasto nel tempo (e quindi l'affidabilità) per diversi tipi di componenti. Le più frequenti in ambito manutentivo sono la legge gaussiana (detta anche *normale*) e la legge esponenziale negativa.
3. nell'ambito di dispositivi non riparabili, si può definire un *tempo medio al guasto* MTTF (Mean Time To Failure) come quel tempo in cui il 50% dei componenti testati ha cessato di svolgere la sua missione.

Si è quindi visto come l'affidabilità di un componente non riparabile sia la sua probabilità di buon funzionamento all'interno di un certo intervallo di tempo di utilizzo.

La generica missione della lampada è quella di rimanere accesa tuttavia la lampada può avere diverse funzioni (o missioni) che richiedono diversi livelli di affidabilità. Si considerino ad esempio le lampade per un uso domestico e quelle necessarie all'atterraggio notturno di un aereo o ai sistemi di segnalazione ottici di emergenza. I livelli di affidabilità richiesti al componente variano pertanto in funzione delle conseguenze di un mancato funzionamento.

In un'ottica manutentiva, conoscere la probabilità di buon funzionamento di un componente in un certo periodo di tempo (cioè conoscerne l'affidabilità) consente di intervenire *prima* che si verifichi il guasto; la lampada domestica potrà quindi essere sostituita alla rottura mentre quella dell'aereo è consigliabile che venga rinnovata quando la sua affidabilità nel tempo scende ad un livello inferiore ad un certo valore imposto.

La definizione di affidabilità vista in precedenza implica una precisa conoscenza delle condizioni di normale funzionamento e delle condizioni di *guasto* inteso come incapacità di condurre a termine con successo la missione affidata.

I presupposti per una corretta applicazione dell'affidabilità al mondo operativo possono essere individuati come segue:

- definizione di un criterio univoco ed oggettivo (che può sintetizzarsi in una procedura operativa) per il riconoscimento dello stato di guasto
- determinazione dell'intervallo di tempo t entro il quale è richiesto che la macchina o l'elemento considerato debbano funzionare per portare a termine la missione
- determinazione delle *condizioni ambientali* in cui la macchina deve svolgere la sua missione

1.3 - Disponibilità

Finora si è considerato il caso di macchine o componenti non riparabili cioè con un singolo ciclo di vita come ad esempio l'hard disk di un calcolatore, un fusibile elettrico, un cuscinetto a sfere, ecc.

Nel caso in cui sia possibile ripristinare la funzionalità, 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, si ricorre spesso alla valutazione della disponibilità.

La norma UNI 9910 definisce la disponibilità come *l'attitudine di una entità a essere in grado di svolgere una funzione richiesta in determinate condizioni a un dato istante, o durante un dato intervallo di tempo, supponendo che siano assicurati i mezzi esterni eventualmente necessari.*

La disponibilità A^1 di una macchina può anche essere definita come la percentuale di tempo di buon funzionamento rispetto al tempo totale in cui è richiesto il funzionamento stesso della macchina.

Chiamati rispettivamente UT (*Up Time*) il tempo in cui il sistema è realmente disponibile all'uso e DT (*Down Time*) il tempo in cui la macchina è ferma (per guasto o per riparazione), la disponibilità A vale (in percentuale):

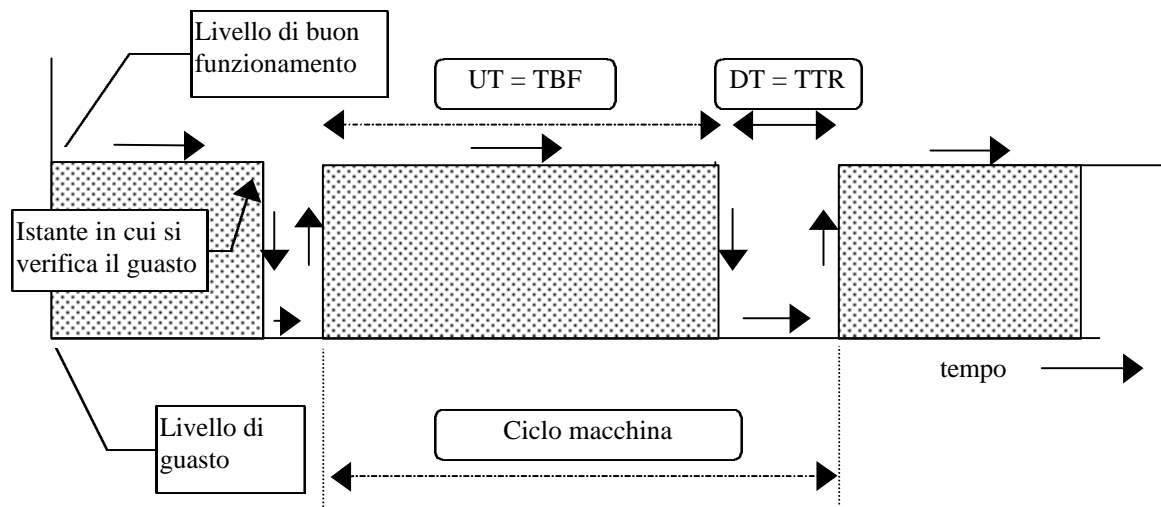
$$A = UT / (UT+DT)$$

Poiché per sistemi riparabili si può parlare di tempo medio tra due guasti, MTBF (Mean Time Between Failures), anziché di MTTF ed inoltre viene introdotto un nuovo elemento che è il *tempo medio di ripristino della funzionalità* MTTR (Mean Time To

¹Dall'inglese *Availability*

Restoration), si può assumere che l'UT coincida con l' MTBF e il DT con l'MTTR e quindi la relazione precedente si riscrive come:

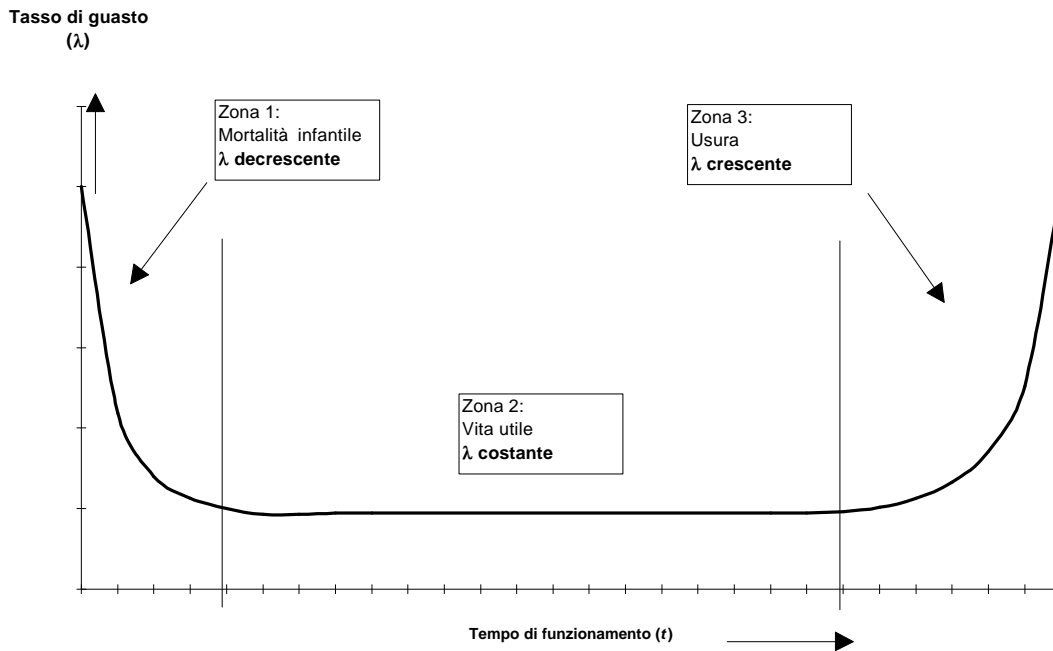
$$A = MTBF / (MTBF + MTTR)$$



A parità di tempo medio tra due rotture (uguale MTBF), una macchina o un componente facilmente riparabile è quindi più disponibile di un altro avente MTTR più elevato; analogamente la disponibilità di due sistemi con simile tempo di riparazione, cresce al crescere dell'MTBF cioè della sua affidabilità all'interno del periodo di funzionamento richiesto.

1.4 - Il tasso di guasto e la curva di mortalità

L'andamento del tasso di guasto $I(t)$, ovvero la frequenza con cui le macchine si guastano nel corso della vita utile, può in genere essere rappresentato con una curva che, per la particolare forma, viene chiamata a *vasca da bagno*.



La curva è valida per tutta la vita utile dell'apparato e si possono rilevare tre distinti periodi:

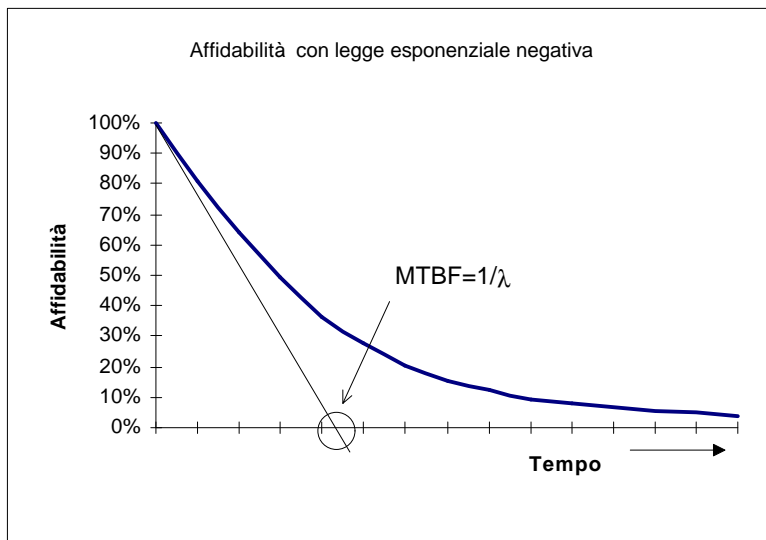
- un periodo iniziale in cui la macchina è in "rodaggio". I componenti cominciano a svolgere la loro funzione ed alcuni di essi, in genere difettosi, possono cedere in breve tempo. Questo periodo è chiamato di "mortalità infantile" e in esso $I(t)$, inizialmente elevato cala rapidamente (zona 1)
- un periodo detto di "vita utile" o di "mortalità standard" (zona 2), in cui la macchina funziona a regime, i componenti sono assestati e gli operatori esperti all'uso. In questo periodo il tasso di guasto è costante e minimo (la macchina subisce guasti a periodi molto distanziati e regolari)
- un'ultima fase (zona 3) in cui l'apparato è soggetto a fenomeni di "usura" derivanti dall'intenso utilizzo. Il tasso di guasto cresce (la macchina si guasta sempre più spesso) fintanto che risulta inutilizzabile.

L'effetto sul tasso di guasto dell'assestamento iniziale dei componenti è in genere tanto più ridotto quanto migliori ed accurate sono la progettazione e l'installazione della macchina e il livello di addestramento degli operatori, mentre l'effetto dell'usura è facilmente rilevabile a causa della tendenza in rapida crescita del numero di guasti in un fissato periodo di tempo.

La zona di maggiore interesse ai fini dell'affidabilità è quella riferibile al periodo di vita utile (2).

In questa zona, in cui $I(t)$ si può assumere per semplicità *costante*, l'affidabilità può essere espressa con una legge esponenziale negativa del tipo:

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



Operando nella zona di vita utile e supponendo $I(t)$ costante l'MTBF assume un valore che coincide con l'inverso del tasso di guasto

$$MTBF = 1/\lambda$$

L'importanza di quest'ultima relazione appare chiara se si considera che, nel corso della vita utile di una macchina, un valore tipicamente analitico e progettuale (λ) è correlato direttamente con un parametro operativo (MTBF). La costanza di λ implica infatti un valore medio dell'intervallo di tempo tra due guasti anch'esso costante, con la diretta conseguenza che è possibile *stimare* con una certa precisione il momento in cui la macchina si guasterà in futuro.

Una progressiva diminuzione dell'MTBF, cioè una diminuzione dell'intervallo medio di buon funzionamento, è indicativa del raggiungimento del termine della vita utile dell'apparato (zona 3).

Per abbassare il tasso di guasto e quindi aumentare l'affidabilità e la disponibilità e si ricorre in genere a metodi *preventivi*, cioè ad una politica manutentiva che si basa su operazioni eseguite *ad intervalli di tempo programmati* allo scopo di assicurare l'affidabilità e la disponibilità richieste prevenendo e contrastando il verificarsi del guasto.

La determinazione del corretto intervallo di intervento preventivo dipende proprio dall'andamento del tasso λ (e quindi dell'MTBF) nella zona di vita utile.

1.5 - I sistemi complessi

Finora si sono trattati sistemi per i quali è stata definita la funzione affidabilità $R(t)$, il tasso di guasto λ , le relazioni che li uniscono e i significati a livello analitico e operativo.

La situazione affidabilistica cambia se più macchine, caratterizzate da livelli di affidabilità (o disponibilità) propri, vengono utilizzate contemporaneamente per assolvere ad un determinato scopo. È il caso ad esempio, di una serie di pompe per il movimento di fluidi all'interno di uno stabilimento.

La relazione da cercare, che indica l'affidabilità del sistema composto, ha la seguente forma:

$$R_{\text{sys}} = \text{funzione di } (R_i) \quad \text{con } i=1, \dots, n$$

in cui R_i rappresenta l'affidabilità (nota) dell' i -esimo componente nel sistema composto.

La dipendenza di R_{sys} dalle R_i dipende sostanzialmente dalla configurazione e dalla natura del sistema.

Si distinguono due famiglie principali di sistemi complessi:

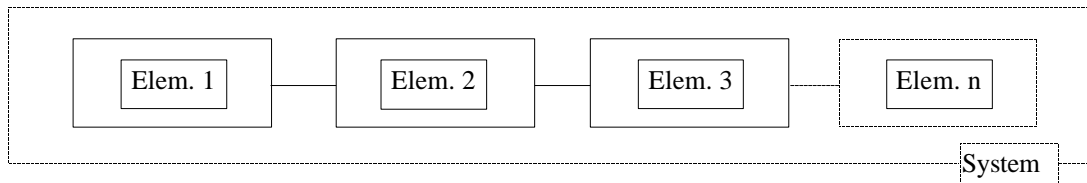
- tipo *serie*
- tipo *parallelo o ridondanti*

È necessario stabilire *quanto* l'affidabilità/disponibilità del sistema complesso sia *dipendente* dalla affidabilità/disponibilità dei suoi componenti.

Nel caso dei sistemi serie, ad esempio di due o più interruttori elettrici, questa dipendenza è totale: la rottura di un dispositivo rende inutilizzabile tutto il sistema. Nei sistemi ridondanti la definizione di guasto è invece definita dalle caratteristiche e dalle prestazioni richieste all'intero complesso; ad esempio il guasto ad una pompa idraulica all'interno di un complesso di tre elementi, di cui sia richiesto il buon funzionamento di almeno due, può non alterare il risultato operativo delle rimanenti due pompe ma influisce sicuramente sulle caratteristiche di affidabilità dell'intero sistema.

1.6 - Affidabilità. Sistemi in serie

Sono sistemi in cui il guasto ad uno qualsiasi dei componenti causa l'interruzione del funzionamento dell'intero sistema. Una rappresentazione schematica può essere la seguente:



Gli elementi possono essere rappresentati nella realtà da interruttori in un circuito elettrico, elementi di una pompa pluristadio, dispositivi interdipendenti di una automobile, ecc.

Fissato il numero di elementi n e l'affidabilità del singolo elemento, l'affidabilità globale del sistema è data da:

$$R_{syst} = R_1 * R_2 * * R_n = \prod_{i=1}^n R_i \quad \text{con } i = 1... n$$

Se, ad esempio, in un sistema di 4 elementi, 3 hanno, nel periodo di buon funzionamento richiesto, affidabilità R pari a 0.9 (90%) e uno di essi ha $R = 0.5$, l'affidabilità complessiva è pari a:

$$R_{tot} = 0.9 * 0.9 * 0.9 * 0.5 = 0.3645$$

che è inferiore a 0.5.

Si può inoltre dimostrare che il tasso di guasto del sistema è uguale alla somma dei tassi di guasto dei suoi componenti:

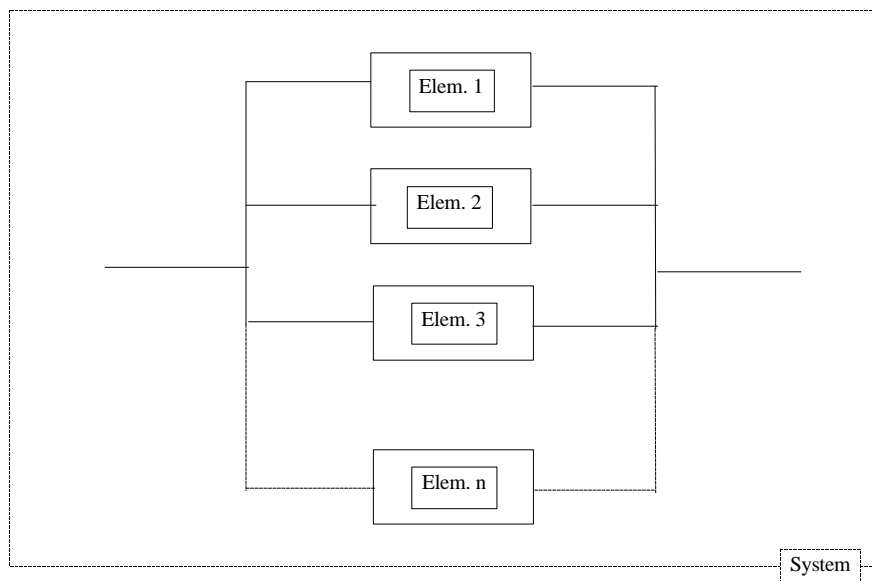
$$I_{syst} = \sum_{i=1}^n I_i$$

e che per tassi di guasto costanti (cioè all'interno del periodo di vita utile),

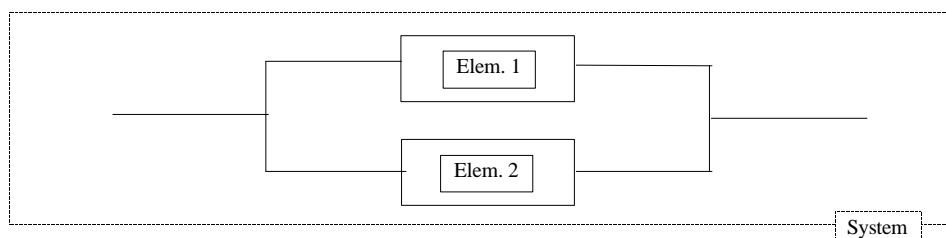
$$MTBF_{syst} = 1 / I_{syst}$$

1.7 - Affidabilità. Sistemi parallelo

Schematicamente sono rappresentabili come segue:



In genere complessi di questo tipo vengono costruiti allo scopo di potenziare le funzioni originarie dei singoli componenti con altri, posti in parallelo, ottenendo affidabilità più elevate e/o prestazioni migliori. Alla moltiplicazione degli apparati corrisponde tuttavia una pressoché proporzionale moltiplicazione dei costi (si può infatti escludere parte dei costi generali d'impianto del sistema). L'installazione di sistemi ridondanti viene eseguita generalmente quando la mancanza di funzionamento provoca gravi danni economici o funzionali (sicurezza, mancata produzione, rischio di danneggiamento ad altri componenti). Per semplificare i calcoli si supponga di avere un sistema composto da 2 soli elementi posti in parallelo quale il seguente:



Definite rispettivamente l'affidabilità del sistema R e dei suoi componenti R_1 e R_2 e le loro *inaffidabilità* Q_i dove

$$Q = 1 - R$$

allora se il buon funzionamento del sistema deriva dalla condizione in cui almeno uno degli elementi è funzionante, si ha:

Elemento 1	Elemento 2	Probabilità di buon funzionamento del sistema
Funziona	Funziona	$R_1 * R_2$
Funziona	Non funziona	$R_1 * (1-R_2) = R_1 * Q_2$
Non funziona	Funziona	$R_2 * (1-R_1) = R_2 * Q_1$

La somma delle probabilità di buon funzionamento è data da

$$R_{syst} = R_1 * R_2 + R_1 * (1-R_2) + R_2 * (1-R_1) = R_1 + R_2 - R_1 * R_2$$

In generale, per sistemi con n elementi in parallelo si ricorre al calcolo della inaffidabilità Q:

$$Q_{syst} = Q_1 * Q_2 * \dots * Q_n = \prod_i Q_i$$

da cui:

$$R_{syst} = 1 - Q_{syst} = 1 - \prod_i Q_i$$

La validità di quanto esposto è dimostrabile con il caso di 2 elementi visto sopra:

$$Q_{syst} = Q_1 * Q_2 = (1 - R_{syst}) = 1 - (1 - R_1) * (1 - R_2)$$

$$R_{syst} = R_1 + R_2 - R_1 * R_2$$

Per quanto riguarda il tasso di guasto, nell'ipotesi in cui

$$R_1 = R_2 = e^{-\lambda t}$$

si ha

$$R_{syst} = 2 * e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}$$

e quindi si può dimostrare che:

$$(MTBF)_{syst} = 3 / 2 \lambda$$

1.8 - Disponibilità di sistemi complessi

Per il calcolo della disponibilità di una macchina (sistema complesso) si possono utilizzare, per sistemi serie o parallelo, le stesse formule e gli stessi schemi proposti per l'affidabilità R, quindi:

- per sistemi *serie* con n elementi:

definita con A_i la disponibilità dell'elemento i -esimo, la disponibilità risulta:

$$A_{syst} = A_1 * A_2 * \dots * A_n = \prod_{i=1}^n A_i$$

- per sistemi *ridondanti*, sempre con n elementi:

la disponibilità globale vale:

$$A_{syst} = 1 - \prod_{i=1}^n I_i$$

dove la quantità I_i rappresenta l'*indisponibilità* ($1-A_i$) del componente.

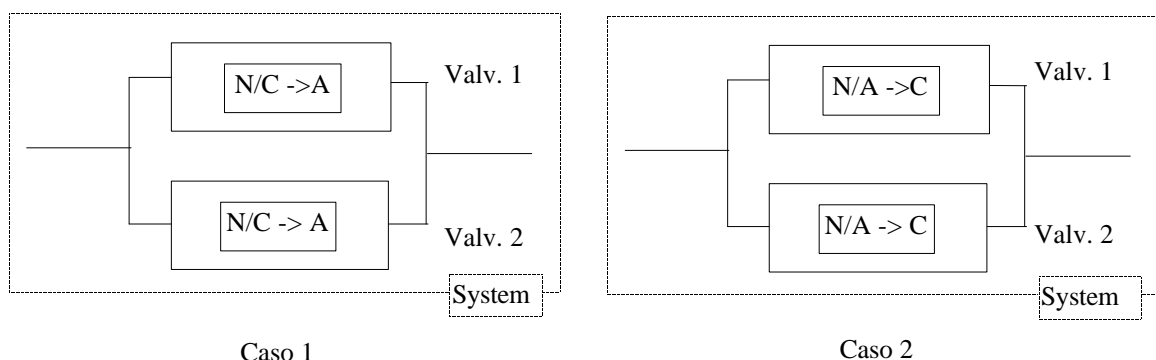
1.9 - Osservazioni sui sistemi complessi

Se nel sistema tipo serie a due elementi (supposti uguali) il tempo medio tra due guasti corrisponde al reciproco del tasso di guasto del sistema, a sua volta somma dei tassi dei componenti, nello stesso sistema parallelo si ha un aumento dell'intervallo operativo medio del complesso. Tale incremento non è tuttavia pari al doppio (100%) rispetto ad un singolo componente ma è pari solo al 50% (1/2).

Un aspetto di interesse riguarda inoltre la funzionalità degli elementi del sistema.

Si consideri un generico sistema di valvole in parallelo caratterizzato da due diversi utilizzi:

1. valvole normalmente chiuse in fase di riposo e in apertura durante l'utilizzo
2. valvole normalmente aperte a riposo e chiuse in utilizzo



Legenda:
 N/A = Normalmente Aperta, N/C = Normalmente Chiusa
 A = Aperta in utilizzo, C = Chiusa in utilizzo

Caso 1 :

il ruolo del sistema di valvole è di aprire il flusso durante l'utilizzo. Si supponga che la valvola 1 si guasti, cioè non si apra: ammesso che il flusso della sola valvola 2 sia sufficiente ad assolvere il compito del sistema nel suo complesso, la situazione affidabilistica è quella normale di un complesso ridondante vista sopra.

Lo schema e la trattazione analitica corrispondono.

Caso 2:

ora il ruolo del sistema è di chiudere il flusso durante l'utilizzo. Un generico guasto alla valvola 1 (mancata chiusura) permetterebbe comunque al flusso di passare da monte a valle e il sistema sarebbe da considerarsi in guasto.

Lo schema e la trattazione affidabilistica in questo caso non coincidono, infatti analiticamente il caso 2 è un sistema di tipo serie e non parallelo.

Casi di questo genere possono verificarsi ad esempio, con condensatori in parallelo che si guastano (cortocircuitandosi) o con interruttori anch'essi in parallelo che, a causa di guasto non si aprono quando necessario. Analoghe osservazioni possono essere effettuate per sistemi schematicamente in serie ma affidabilisticamente in parallelo.

Si può concludere affermando che è la caratteristica funzionale dei componenti, e non il tipo di collegamento, che determina la configurazione affidabilistica di un sistema complesso.

In generale quindi la decisione finale sui sistemi ridondanti dovrà quindi tenere conto di aspetti connessi al rischio di guasto, ai costi e alle caratteristiche tecniche dell'impianto da progettare o da gestire. Le alternative possibili sono pressoché infinite e spaziano dalla scelta di un unico elemento con elevate caratteristiche di affidabilità, cui spesso è associato un elevato costo, all'installazione di dispositivi multipli con caratteristiche di continuità peggiori ma dal costo più contenuto.

1.10 - La manutenibilità

La norma UNI 9910 definisce la *manutenibilità* come *l'attitudine di una entità (macchina o impianto N.d.A.), in assegnate condizioni di utilizzazione, a essere mantenuta o riportata in uno stato nel quale essa può svolgere la funzione richiesta, quando la manutenzione è eseguita nelle condizioni date, con procedure e mezzi prescritti.*

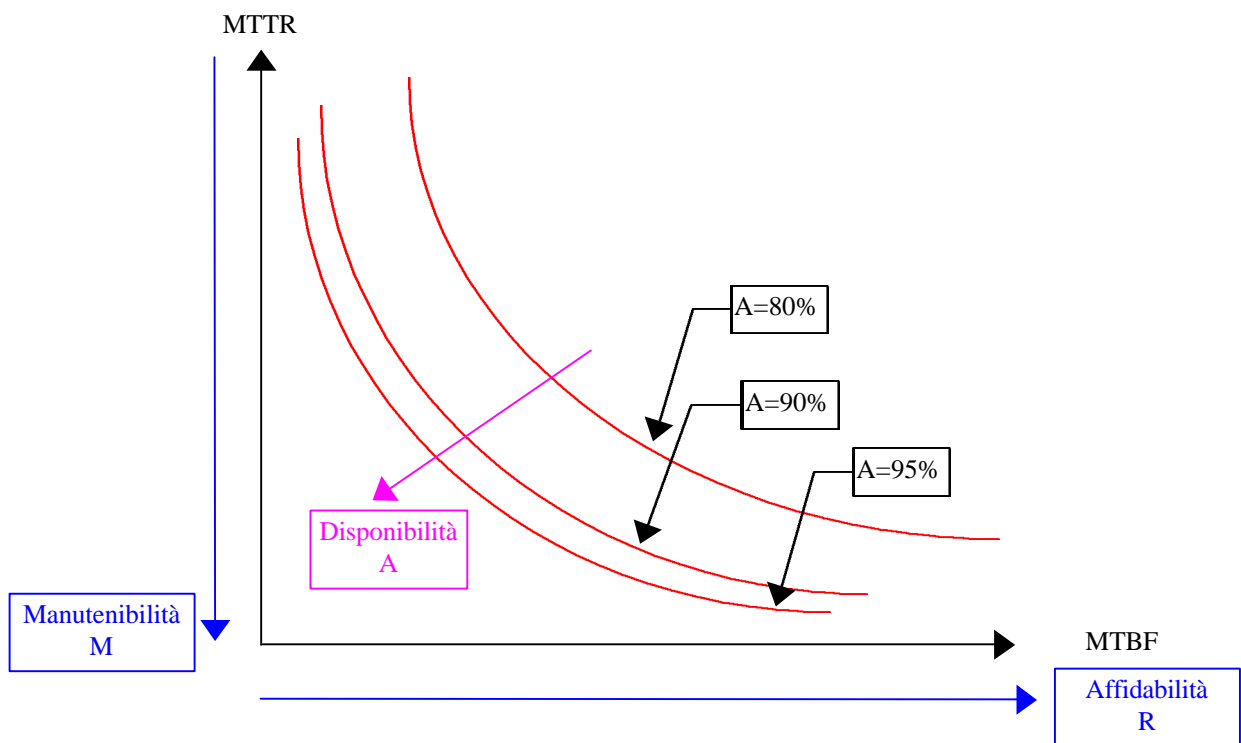
La manutenibilità è quindi una caratteristica della macchina che dipende però anche dalle *condizioni* in cui viene mantenuta. In queste condizioni sono compresi, oltre alle caratteristiche progettuali, anche tutti quei fattori che integrano la macchina nell'impianto in cui essa si trova, dalla posizione fisica nello stabilimento, all'accessibilità delle parti da riparare, al flusso di materiali e persone che la circondano abitualmente, ecc.

Esiste una relazione tra la quantità MTTR, tempo medio di riparazione (inteso come ritorno in servizio), che rappresenta in sintesi la manutenibilità della macchina, e la funzione affidabilità. Poiché si è visto che:

$$A = MTBF / (MTBF + MTTR)$$

allora MTTR dipende anche dal parametro disponibilità A.

Qualitativamente, si può vedere la relazione tra le tre grandezze in un grafico:



Definito quindi un certo valore di affidabilità (caratteristica progettuale) e valutata la disponibilità operativa storica A come il rapporto tra il tempo di buon funzionamento e il tempo totale di utilizzo (guasti compresi), si ottiene un valore di manutenibilità che può essere comparato con altri rilevati su macchine o impianti della stessa tipologia. Definita ad esempio "normale" una disponibilità del componente o dell'impianto pari al 95% e noti storicamente i tempi di intervento per guasto (MTTR) è possibile risalire alla sua affidabilità per scopi di riprogettazione e miglioramento delle caratteristiche.