Appunti del corso di
Affidabilitá e Diagnostica dei Sistemi Elettrici

Andrea Cavallini, Gian Carlo Montanari
DIE-Universitá di Bologna
viale Risorgimento 2, 40136 Bologna
andrea.cavallini@mail.ing.unibo.it
http://limat.ing.unibo.it

A.A 1999/2000

Indice

Capitolo 6

Affidabilitá

6.1 Generalitá sul guasto

Definizione 6.1.1 (Guasto) *Cessazione dell'attitudine del dispositivo ad adempiere la funzione richiesta.*

Il criterio di guasto puó essere quantificato nel modo seguente. Si supponga, a titolo di esempio, di considerare il guasto di un semplice partitore resistivo. Sia r il rapporto di partizione $r = R_1/(R_1 + R_2)$. Il partitore si considera funzionante in modo corretto se il rapporto r é compreso nell'intervallo $[r_{inf}, r_{sup}]$. Inoltre, per evitare che il partitore assorba una corrente eccessiva, deve essere $R_1+R_2 \geq R_{inf}$. Esplicitando il legame fra R_1 ed R_2 imposto dal rapporto di partizione si ottiene:

$$R_2 = R_1 \frac{1-r}{r}$$

che impone una realazione lineare fra R_1 ed R_2, esplicitabile come una retta passante per l'origine e di pendenza $1/r - 1$ (nota che $0 \leq r \leq 1$) nel piano (R_1, R_2). In modo simile, la relazione $R_1 + R_2 = R_{inf}$ impone una relazione lineare fra R_1 ed R_2 esplicitabile come una rettta per $(0, R_{inf})$ e $(R_{inf}, 0)$ nel piano (R_1, R_2). In sostanza, il sistema partitore funziona correttamente per ogni coppia (R_1, R_2) nel dominio D di figura 6.1. Il guasto avviene al tempo t se $(R_1(t), R_2(t))$ attraversa la frontiera di D.

I guasti possono essere classificati in vari modi, ad esempio, seguento il seguente schema:

- Causa
  - impiego improprio
  - usura
  - deficienza intrinseca (primari o indotti)
- Impatto
  - critici
  - primari
  - secondari
- Entitá
  - parziali
  - totali

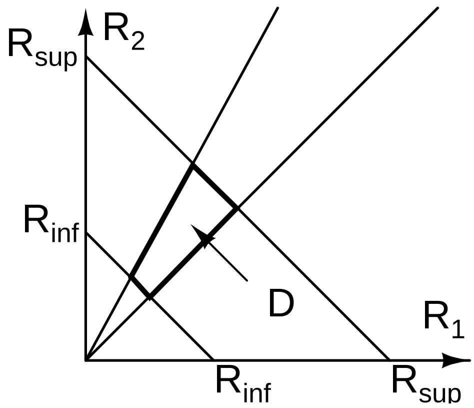

Figura 6.1: Dominio di corretto funzionamento per un partitore resistivo avente rapporto di partizione che deve essere compreso in $[r_{inf}, r_{sup}]$ e resistenza totale non inferiore ad R_{inf}

  - intermittenti

- Evoluzione temporale
  - progressivi
  - improvvisi

Il tempo al guasto, cioé la lunghezza del periodo in cui il dispositivo rimane in servizio fornendo correttamente la funzione richiesta é una variabile aleatoria. I motivi per cui il tempo al guasto é aleatorio sono tre: (a) i materiali hanno struttura non uniforme, quindi resistenza alle sollecitazioni che varia in modo aleatorio da campione a campione di materiale (ad esempio, provini identici dello stesso materiale possono avere rigiditá dielettriche diverse), (b) le cause di invecchiamento o fattori di stress possono variare in modo aleatorio nel tempo (ad esempio, i tempi di arrivo delle sovratensioni atmosferiche), (c) le macchine possono essere chiamate ad operare in modo non continuativo ma aleatorio (si pensi ad una saldatrice, quando sará utilizzata la prossima volta e come sará utilizzata, per quanto tempo?).

E' importante osservare che un dispositivo che, immediatamente dopo la produzione, é in grado di espletare la funzione richiesta non é necessariamente un dispositivo affidabile. Si distingue infatti la conformitá, cioé il fatto che il dispositivo appena prodotto sia conforme a certi requisiti, dall'affidabilitá, che tratta la capacitdel dispositivo di rimanere conforme ai requisiti dati per un tempo prefissato. La conformitá é una proprietá relativa al tempo $t = 0$, immediatamente successivo alla produzione.

I guasti comportano costi legati al mancato utilizzo dei macchinari, perdite di vite umane, guasti indotti (ad esempio, un isolamento che cede puó portare ad un corto circuito che danneggia i conduttori). Inoltre la riparazione di un guasto é spesso meno economica di un intervento di manutenzione programmata (non é necessario effettuare una diagnostica prima di intervenire, la squadra puó intervenire nel momento piú opportuno, ecc.). Quantitativamente, la perdita economica per anno legata al guasto (in ambiente industriale) é esplicitabile come:

$$K = N_{anno}\big(K_{riparazione} + (r+s)(G_p - K_p)\big) \tag{6.1}$$

essendo N_{anno} il numero di guasti per anno, $K_{riparazione}$ la spesa media di riparazione, r il tempo medio di riparazione, s il tempo medio necessario per fare ripartire la produzione una volta rimosso il guasto, G_p e K_p la redditivitá ed il costo orario della produzione.

E' quindi necessario che il progettista di un sistema cerchi di minimizzare il rischio economico legato ai guasti. Poiché il guasto é un fenomeno aleatorio, la minimizzazione del rischio ad esso associato deve essere fatto mediante tecniche proababilistiche. Generalmente é necessario specificare quantificare il costo legato al guasto e minimizzarne il valore atteso.

In un sistema di produzione, trasmissione ed utilizzo dell'energia elettrica, i guasti possono essere classificati nel modo seguente [?]. Guasti aventi sede nell'impianto utilizzatore:

- Completa o parziale inoperativitá dell'impianto o, piú in generale, operativitá inferiore ai livelli nominali
- Comportamento inaccettabile di apparecchiature nell'impianto
- Inserzione dei dispositivi di protezione o di emergenza
- Mancata fornitura di energia a dispositivi o sottocircuiti dell'impianto.

Guasti aventi sede nel sistema di produzione/trasmissione:

- Interruzione della fornitura
- Deviazione della forma d'onda di tensione rispetto ai profili standard per effetto di flicker, sovratensioni, buchi di tensione, armoniche, ecc..

Gli indici comunemente accettati per valutare la bontá di un sistema di produzione/trasmissione sono:
(a) indici primari

- numero di interruzioni per anno (λ)
- durata media dell'interruzione (r)

(b) indici secondari

- numero di ore di guasto per anno
- valore atteso dell'energia richiesta ma non fornita nel corso dell'anno

6.2 Sistemi non riparabili

Il concetto di qualitá di un dispositivo, o di un sistema, é legato alla fiducia che si ha nel dispositivo (o sistema), fiducia che non si rompa, che si comporti in modo soddisfacente. Nel modo piú semplice possibile tale fiducia puó essere espressa come la *conformitá* del dispositivo all'atto dell'acquisto. Tale conformitá richiede che ogni parametro vitale per il corretto funzionamento del dispositivo (ad esempio, il rapporto di trasduzione di un partitore resistivo, il rapporto spire e le perdite in corto circuito ed a vuoto di un trasformatore) stiano all'interno di prefissati intervalli di tolleranza. La conformitá del dispositivo puó essere perseguita dal produttore mediante controlli sulla produzione o dal compratore, mediante collaudi da effettuarsi sul dispositivo o su un campione della produzione all'atto dell'acquisto. Le prove di conformitá si distinguono in:

- controlli di produzione
- collaudi (prove di tipo, accettazione e mantenimento della qualitá)

Piú complesso é rispondere al problema se, una volta comprato, il dispositivo o sistema sará conforme alle aspettative per un tempo adeguato. In altre parole, la qualitá durerá nel tempo? Sará lecito avere fiducia nel dispositivo dopo un certo tempo dall'acquisto? Per risolvere questo problema, che in pratica si pone come un problema di predizione, si devono utilizzare tecniche probabilistiche. Tali tecniche vanno sotto il nome generico di analisi affidabilistiche e permettono di ricavare (1) funzioni affidabilistiche, (2) parametri affidabilistici. In generale, le funzioni affidabilistiche rappresentano l'evoluzione della probabilitá di guasto al variare del tempo, mentre i parametri affidabilistici rappresentano valori medi dei tempi al guasto o probabilitá di trovare in servizio un sistema che, in caso di guasto, puó essere riparato.

Gli studi affidabilistici permettono di ricavare la probabilitá dei tempi al guasto o valori medi dei tempi al guasto per un dispositivo o un insieme di dispositivi. Il primo problema é indicato come analisi di affidabilitá , il secondo come analisi affidabilistica combinatoria. Il primo problema richiede, fra l'altro, l'analisi statistica dei tempi al guasto derivati da test di rottura in laboratorio o da osservazioni fatte da dispositivi operanti sul campo. Le prove affidabilistiche si distinguono in:

- prove di vita (di lunga durata, accelerate)
- prove di verifica dell'affidabilitá
- prove di determinazione dell'affidabilitá

Il secondo problema, cioé l'analisi combinatoria di affidabilitá , consiste nella combinazione di funzioni e parametri derivanti dall'analisi affidabilistica dei singoli dispositivi. E' importante osservare che la distinzione fra dispositivo e sistema é puramente funzionale. Ad esempio, nel sistema di generazione elettrica una centrale di produzione puó essere pensata come un singolo dispositivo. Tuttavia, quando si intende analizzare l'influenza che la configurazione dei vari apparati della centrale ha sull'affidabilitá della centrale stessa, allora puó essere conveniente separare i circuiti elettrici da quelli termici, l'alternatore dal trasformatore, i servizi ausiliari dalla generazione, ecc..

Per quantificare i concetti esposti si definisce:

Definizione 6.2.1 (Affidabilitá) *E' la probabilitá , valutata all'istante 0 in cui il dispositivo (o sistema) viene messo in servizio, che il dispostivo funzioni correttamente in* $[0, t]$. *Se* $\boldsymbol{t}$ *é la VA che descrive il tempo la guasto, allora:*

$$R(t) = \Pr(\text{Il dispositivo funziona in } [0, t]) = \Pr(\boldsymbol{t} > t) \tag{6.2}$$

Nel definire la affidabilitá é necessario specificare il tipo di guasto, ad esempio, circuito aperto o corto circuito. In teoria, sarebbe necessario specificare una funzione affidabilistica per ogni tipo di guasto.

L'affidabilitá si indica generalmente con il simbolo R dall'inglese *reliability*. L'istante t quantifica il tempo totale di esposizione del sistema, cioé il tempo netto di funzionamento. L'istante t puó quindi coincidere con il tempo trascorso dall'istante di attivazione per un dispositivo operante in modo continuo, oppure con una frazione di esso se il dispositivo opera in modo discontinuo. In generale, se $\boldsymbol{\delta}$ é il ciclo di lavoro del dispositivo, T il tempo totale (misurato dal calendario) di servizio del dispositivo, si ha:

$$t = T\boldsymbol{E}[\boldsymbol{\delta}] \tag{6.3}$$

Se l'intervallo non é $[0, t]$ ma, piú genericamente $[t_1, t_2]$, allora si definisce:

Definizione 6.2.2 (Affidabilitá di missione) *E' la probabilitá , valutata supponendo che il dispositivo sia sano in* t_1*, che il dispostivo funzioni correttamente in* $[t_1, t_2]$*:*

$$R_m(t_1, t_2) = \Pr(\boldsymbol{t} > t_2 \mid \boldsymbol{t} > t_1) \tag{6.4}$$

Il legame fra R ed R_m si esplicita immediatamente in base alla definizione di probabilitá condizionata ($\Pr(\mathcal{E} \mid \mathcal{F}) = \Pr(\mathcal{E}\mathcal{F})/\Pr(\mathcal{F})$) come:

$$R_m(t_1, t_2) = \frac{R(t_2)}{R(t_1)} \tag{6.5}$$

Per come é definita l'affidabilitá puó essere collegata alla distribuzione dei tempi al guasto:

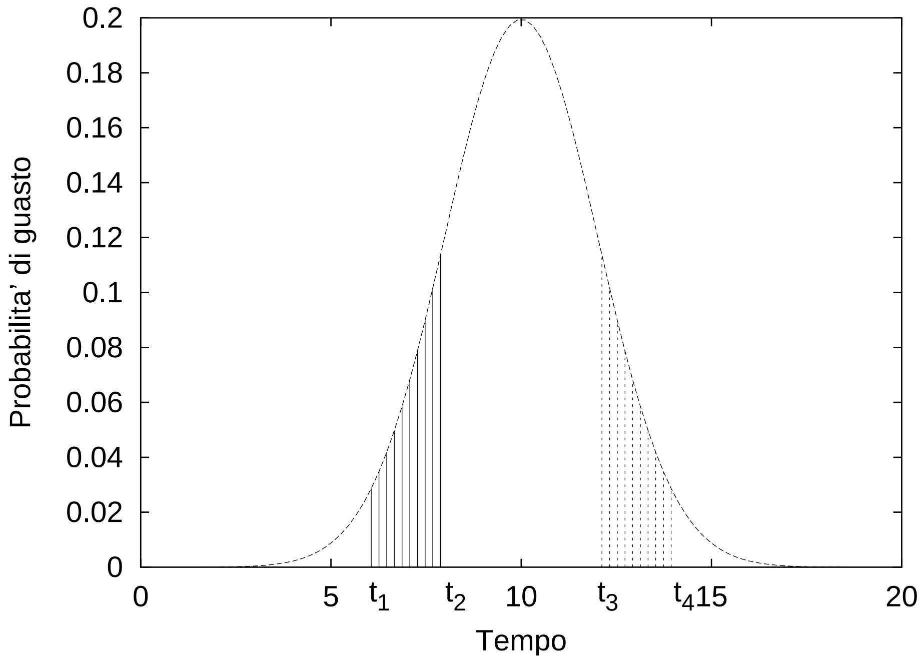

Figura 6.2: Affidabilitá di missione

$$R(t) = \Pr(\boldsymbol{t} > t) = 1 - \Pr(\boldsymbol{t} \leq t) = 1 - F(t) \tag{6.6}$$

o, utilizzando la densitá dei tempi al guasto:

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(s)\mathrm{d}s \tag{6.7}$$

E' importante osservare che un dispositivo complesso puó avere modalitá di guasto diverse con diversi effetti sulla funzionalitá del sistema in cui é inserito. Quando si intenda differenziare queste modalitá di guasto é necessario specificare l'affidabilitá per ogni tipo di guasto, separatamente. Inoltre l'affidabilitá di un dispositivo é legata alle condizioni operative del dispositivo stesso. Ad esempio, la probabilitá che un sistema isolante si guasti nei prossimi 10 anni é tanto piú alta tanto piú alto é il campo a cui l'isolamento é soggetto in condizioni normali. Per calcolare l'affidabilitá di un dispositivo in funzione delle differenti condizioni di lavoro bisognerebbe valutare:

$$R(t \mid stress = S) \tag{6.8}$$

Tale studio deve essere condotto per mezzo di prove accelerate ed elaborando opportuni modelli (ad esempio, modelli di vita).

6.2.1 Funzioni affidabilistiche empiriche

Si considerino n_0 dispositivi messi in prova, ad esempio 1000 lampadine energizzate al tempo $t = 0$. Sia $n_g(t)$ il numero di lampadine che si sono guastate dopo t ore dall'energizzazione del campione. Si puó provare allora che la funzioni affidabilistiche definite in precedenza possono essere stimate come:

$$\hat{F}(t) = \frac{n_g(t)}{n_0}$$

frazione di lampade che si sono guastate t ore.

$$\hat{R}(t) = \frac{n_0 - n_g(t)}{n_0}$$

frazione di lampade ancora funzionanti dopo t ore.

$$\hat{f}(t) = \frac{1}{\Delta t}\frac{n_g(t+\Delta t) - n_g(t)}{n_0}$$

frazione di lampade che si sono guastate nell'intervallo $[t, t+\Delta t]$, diviso per Δt. Al tendere di n_0 all'infinito, le funzioni affidabilistiche empiriche tendono, per la legge dei grandi numeri, alle funzioni affidabilistiche teoriche, mostrate nei precedenti paragrafi.

6.2.2 Il tasso di guasto istantaneo

Il tasso di guasto istantaneo é quella quanitá nota altrimenti come tasso di azzardo, definita come:

$$\lambda(t) = \lim_{h\to 0}\frac{1}{h}\Pr(t < \boldsymbol{t} \leq t+h \mid \boldsymbol{t} > t) \tag{6.9}$$

Il tasso di azzardo é quindi definita come la probabilitá dell'evento $\mathcal{E} = \{t < \boldsymbol{t} \leq t+h\}$ condizionata dall'evento $\mathcal{F} = \{\boldsymbol{t} > t\}$. Applicando la definizione di probabilitá condizionata, si scrive:

$$\lambda(t) = \lim_{h\to 0}\frac{1}{h}\frac{F(t+h) - F(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \tag{6.10}$$

Utilizzando gli stimatori empirici descritti in precedenza si ottiene lo stimatore empirico del tasso di guasto istantaneo:

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{1}{h}\frac{n_s(t) - n_s(t+h)}{n_s(t)} \tag{6.11}$$

Quindi il tasso di guasto é assimilabile al rapporto fra i dispositivi che si guastano in un certo intervallo e quelli che sono arrivati vivi all'inizio di questo intervallo. Dividendo numeratore e denominatore per n_0 si ottiene:

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\hat{f}(t)}{\hat{R}(t)} \tag{6.12}$$

Nella pratica il tasso di guasto empirico segue quasi sempre la cosidetta curva a "vasca da bagno", come mostrato qualitativamente in 6.3. La curva presenta tre distinti tratti. Il primo tratto, ad azzardo calante, é quello relativo ai guasti giovanili, guasti originati da difetti di produzione e che si manifestano nel primo periodo di funzionamento. L'azzardo cala in quanto, al crescere del tempo, i dispositivi che presentano guasti legati ad una produzione difettosa vengono scoperti ed eliminati. Il secondo tratto, detto "vita utile", é a tassi di azzardo costanti. E' noto che la probabilitá di avere un guasto in $[t, t+\mathrm{d}t]$ é uguale a $\lambda(t)\mathrm{d}t$: nel periodo di vita utile o dei guasti casuali, la probabilitá di guasto non dipende dal tempo ovvero l'effetto dell'invecchiamento puó essere trascurato. L'ultimo tratto, ad azzardo costante, corrisponde alla fine della vita utile ed all'inizio della zona dei guasti pe invecchiamento o usura.

Sistemi con azzardi crescenti, calanti o costanti possono essere modellati utilizzando la distribuzione di Weibull, infatti:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} = \frac{\beta}{\alpha^\beta}t^{\beta-1} = \lambda_0 t^{\beta-1}$$

si osserva che:

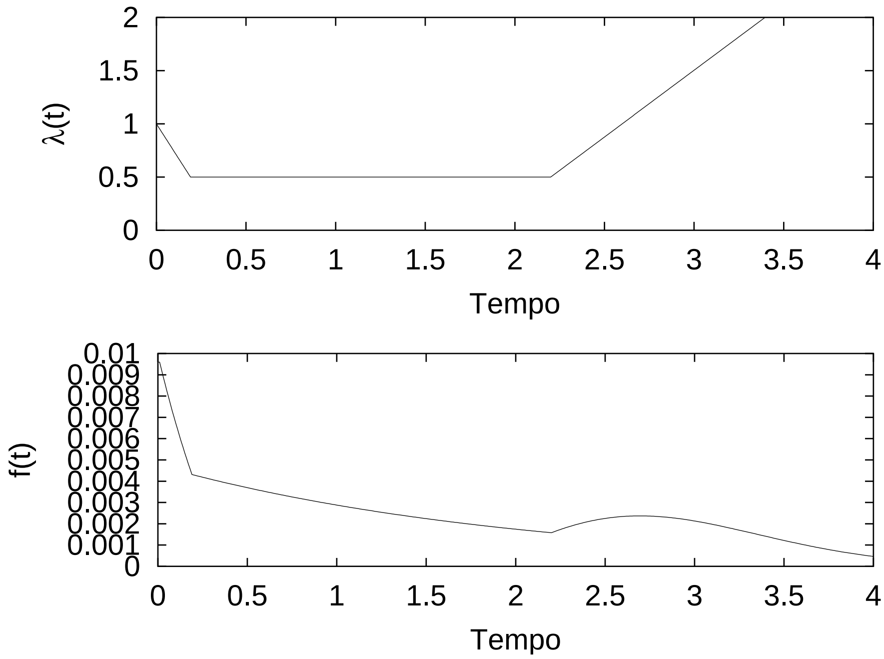

Figura 6.3: La curva a “vasca da bagno” dell’azzardo e la corrispondente densitá di probabilitá dei guasti.

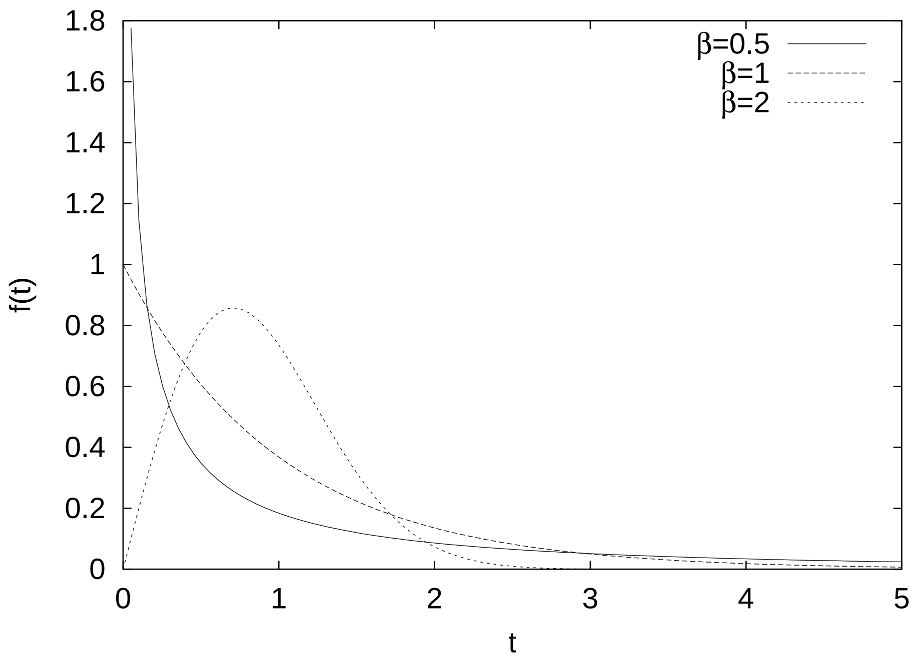

Figura 6.4: Andamento della funzione di probabilitá di weibull per $\alpha = 1$ e per diversi valori di β.

$$t^{\beta-1} = \begin{cases} \beta > 1 & \text{azzardo crescente} \\ \beta = 1 & \text{azzardo costante} \\ \beta < 1 & \text{azzardo calante} \end{cases}$$

la distribuzione di Weibull é in grado di approssimare una larga classe di fenomeni a tassi di guasto istantaneo crescente, costante o calante. Si noti dalla figura 6.4 come le varie forme possibili della distribuzione di Weibull siano assimilabili ai tratti della tensitá di guasto riportata in 6.3.

E' importante osservare che mediante il tasso di azzardo é possibile specificare completamente le funzioni affidabilistiche. Infatti, é :

$$f(t) = \frac{\mathrm{d}F(t)}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}R(t)}{\mathrm{d}t}$$

Quindi:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

porge:

$$\frac{\mathrm{d}R(t)}{R(t)} = -\lambda(t)\mathrm{d}t$$

che integrata fornisce la relazione cercata:

$$R(t) = \exp\Big(- \int_0^t \lambda(s)\mathrm{d}s \Big) \tag{6.13}$$

ed anche

$$f(t) = \lambda(t) \exp\Big(- \int_0^t \lambda(s)\mathrm{d}s \Big) \tag{6.14}$$

Infine, si osservi che l'affidabilitá di missione in $[t, t+h]$ ecc:

$$R_m(t, t+h) = \frac{R(t+h)}{R(t)} = \frac{\exp\Big(- \int_0^{t+h} \lambda(s)\mathrm{d}s \Big)}{\exp\Big(- \int_0^{t} \lambda(s)\mathrm{d}s \Big)} \approx \exp\big(- \lambda(t)h \big)$$

cioé l'affidabilitá di missione puó essere legata al tasso di guasto istantaneo. Nel periodo dei guasti casuali, per un prefissato valore di h, l'affidabilitá di missione non dipende dal momento di inizio della missione.

6.2.3 Parametri affidabilistici

Per i sistemi non riparabili, o ad un singolo componente, si definisce un solo parametro affidabilistico, cioé il tempo medio fino al guasto o MTTF (Mean Time To Failure o Mean Operating Time to Failure):

$$MTTF = \boldsymbol{E}[\boldsymbol{t}] \tag{6.15}$$

Al solito, si puó definire lo stimatore empirico sulla base di una prova effettuata su n_0 dispositivi i cui tempi t_i di rottura siano stati registrati:

$$M\hat{T}TF = \frac{1}{n_0} \sum_{i=1}^{n_0} t_i \tag{6.16}$$

Se la prova viene interrotta dopo $r < n_0$ cedimenti, una stima conservativa di MTTF é data da:

$$M\hat{T}TF = \frac{1}{n_0}\big((n_0 - r)t_r + \sum_{i=1}^{r} t_i\big) \tag{6.17}$$

In questo modo, agli $n - r$ dispositivi ancora sani in t_p viene assegnato un tempo di guasto pari a t_p, ottenendo una stima di MTTF sicuramente inferiore a quella che si sarebbe ottenuta conducendo la prova fino all'esaurimento di tutti i dispositivi. La quantitá

$$T_C = (n_0 - r)t_r + \sum_{i=1}^{r} t_i$$

é il tempo cumulato di guasto.

Il calcolo di MTTF puó essere fatto a partire dalla funzione di affidabilitá . Infatti:

$$MTTF = \int_0^\infty tf(t)\mathrm{d}t = -\int_0^\infty t\frac{\mathrm{d}R(t)}{\mathrm{d}t}\mathrm{d}t = \big[tR(t)\big]_0^\infty + \int_0^\infty R(t)\mathrm{d}t$$

Il primo termine é uguale a 0. Infatti per $t = 0$ il prodotto $tR(t)$ é certamente nullo essendo $R(t)$ compreso in $[0, 1]$ (R é una probabilitá). Per t tendente all'infinito, se λ_{inf} é un minorante per $\lambda(t)$, allora é :

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(s)\mathrm{d}s\right) \leq \exp(-\lambda_{inf}t)$$

ed $R(t)$ puó essere maggiorata da una funzione esponenziale. Poiché gli esponenziali tendono a zero piú velocemente delle potenze del tempo, allora $\lim_{t\to\infty} tR(t) = 0$. Dunque:

$$MTTF = \int_0^\infty R(t)\mathrm{d}t \tag{6.18}$$

Si ricorda che nell'ipotesi di azzardo costante $R(t) = \exp(-\lambda t)$, quindi:

$$MTTF = \int_0^\infty \exp(-\lambda s)\mathrm{d}s = \frac{1}{\lambda} \tag{6.19}$$

Questa relazione permette di ottenere uno stimatore, approssimato per difetto, del tasso di guasto:

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{M\hat{T}TF} = \frac{n_0}{T_C} \tag{6.20}$$

6.3 Tasso di guasto per componenti elettronici

Quando si discute di tasso di guasto di un componente ci si riferisce sempre ad un numero costante di guasti per anno. E' tuttavia noto che il tasso di guasto di un componente segue, generalmente, la curva "a vasca da bagno". Perché allora non si considerano i tratti a tasso di guasto calante (mortalitá infantile) e crescente (invecchiamento)? Perché si ammette che opportune mediante opportuni trattamenti gran parte dei guasti infantili siano stati rimossi. Inoltre, si ipotizza che la manutenzione del sistema in cui il componente é inserito sia tale da garantire che, non appena il componente stesso inizia a deteriorarsi per effetto dell'invecchiamento, si proceda alla sostituzione.

Fra le tecniche che permettono di eliminare i guasti infantili si possono menzionare il controllo di qualitá effettuato sulle saldature (che spesso sono il punto debole dei componenti elettronici) e l'utilizzo del componente per un numero di ore prefissato nelle condizioni nominali o, addirittura, in condizioni piú gravose delle nominali. Questa procedura é simile a quella fatta per le Ferrari, che vengono consegnate al cliente dopo aver percorso circa 250 chilometri.

Per determinare il tasso di guasto per un componente si possono scegliere strade alternative. La prima prevede di effettuare test di durata in laboratorio, riproducendo il piú fedelmente possibile le condizioni di utilizzo oppure, caso piú comune, condizioni piú gravose. La seconda strada possibile é raccogliere informazioni su quello che é stato il comportamento del componente durante l'utilizzo pratico.

Entrambe le strade presentano problemi notevoli. Se si intende effettuare prove in laboratorio alle condizioni nominali si deve tenere conto che tali prove potrebbero avere durata notevole. Le prove accelerate non presentano problemi di questo tipo, ma la é necessario estrapolare il tasso di guasto alle condizioni nominali di lavoro. Ció puó deve essere fatto con grandissima attenzione.

Per quanto concerne i ritorni "dal campo", bisogna osservare che sono decisamente piú economici (non é necessario dotarsi di un laboratorio). Bisogna anche osservare che non sempre il componente é stato utilizzato dall'utente finale nel modo corretto e, pertanto, il tasso di rottura puó assumere valori significativamente diversi da quelli ottenibili in condizioni nominali. Questo aspetto puó essere considerato un vantaggio, in quanto si introduce nel computo del tasso di guasto anche il fattore umano. In generale, tuttavia, i ritorni dal campo, se il sistema é stato progettato correttamente ed i guasti giovanili sono stati eliminati, possono essere pochi e, pertanto, la stima statistica puó essere affetta da una forte incertezza.

Un modo per risolvere questi problemi é quello di utilizzare manuali di affidabilitá. Fea i piú noti sono il manuale MIL-HDBK-217, il manuale coprodotto da CNET, British Telecom, ed Italtel, e, quando disponibili, i dati forniti dai costruttori stessi (esempio, Motorola). Per calcolare il tasso di guasto, λ_p (*part failure rate*), i manuali si servono di formule del tipo:

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_1 \pi_2 \dots \tag{6.21}$$

dove λ_b (*base failure rate*) é la frequenza di guasto intrinseca, e dipende dal tipo di dispositivo, dalla temperatura ambiente Θ_A e dal fattore di stress, S, definito come:

$$S = \frac{\text{carico effettivo}}{\text{carico nominale a 25 C}} \tag{6.22}$$

Il fattore λ_b cresce, generalmente, in modo esponenziale con la temperatura ambiente.

I fattori π tengono conto di condizioni ambientali (π_E), di qualitá nel progetto e nella realizzazione (π_Q), tecnolgia (π_A), temperatura della giunzione (π_T), ecc.. Ad esempio, per componenti passivi é:

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_E \pi_Q \pi_A \tag{6.23}$$

Il fattore π_T segue la legge di Arrhenius:

$$\frac{\pi_{\Theta_2}}{\pi_{\Theta_1}} \approx \exp\left[\frac{E_A}{k}\left(\frac{1}{\Theta_1} - \frac{1}{\Theta_2}\right)\right] \tag{6.24}$$

dove k é la costante di Boltzmann, E_A, paria 0.3-0.7 eV per semiconduttori in silicio, é una energia di attivazione globale, approssimativamente pari a quella del meccanismo di rottura dominante.

Esempio 6.3.1 (Tasso di guasto diodi) Il calcolo del tasso di guasto viene effettuato mediante la seguente equazione:

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_T \pi_S \pi_C \pi_Q \pi_E \text{ guasti}/10^6\text{ore}$$

dove i fattori π sono:

π_T temperatura

π_S stress

π_C costruzione dei contatti

π_Q qualitá

π_E ambientale

La frequenza di guasto intrinseca, λ_b, dipende dal tipo di dispositivo e dalla applicazione (analogico per applicazioni generiche, per rettificatori, Schottky, ecc.).

Tipo	λ_b
Analogico, general purpose	0.0038
Switching	0.0010
Rettifactore, fast recovery	0.0690
Rettificatore, Schottky	0.0030
Diodo di potenza	0.0050
Rettificatore di alta tensione	0.0050
Varistore (soppressori transitori)	0.0013
Regolatore di corrente	0.0034
regolatori di tensione, Zener	0.0020

Il fattore π_T é funzione della temperatura della giunzione espressa in gradi centigradi, Θ_J, attraverso le equazioni:

$$\pi_T = \exp\left[-3091\left(\frac{1}{\Theta_J + 273} - \frac{1}{298}\right)\right]$$

valida per diodi analogici general purpose, switching fast recovery, per rettificatori varistori.

$$\pi_T = \exp\left[-1925\left(\frac{1}{\Theta_J + 273} - \frac{1}{298}\right)\right]$$

valida per regolatori di tensione, regolatori di corrente e Zener.

Il fattore di stress, π_S,dipende dal tipo di applicazione. Per varistori (soppressori di transitori), regolatori di tensione (diodi a valanga), riferimenti di tensione (diodi Zener), e regolatori di corrente é:

$$\pi_S = 1.0$$

per tutti gli altri, definito V_s lo stress di tensione come il rapporto fra la tensione applicata e quella nominale:

$$V_s = \frac{\text{tensione inversa sul diodo}}{\text{tensione nominale}}$$

é:

$$\pi_S = \begin{cases} 0.054 & \text{se } V_s \leq 3 \\ V_s^{2.43} & \text{se } 0.3 < V_s \leq 1.0 \end{cases}$$

Il fattore di costruzione dei contatti é:

Tecnologia costruttiva	π_C
Metallurgici	1.0
Non metallurgici	2.0

Sistemi complessi

6.4 Generalitá, concetto di missione

Quando si intende sviluppare un dispositivo o sistema é spesso necessario calcolare l'affidabilitá del prodotto progettato senza aspettare i risultati di test accelerati o i dati relativi al comportamento "sul campo" del prodotto. Ció accade, ad esempio, per gli aerei uilizzati nel trasporto civile oppure nello sviluppo di sistemi per le missioni spaziali.

In ogni caso, poiché la difettositá di un prodotto si traduce sempre in un costo per il produttore, anche quando ci sia la possibilitá di valutare *a posteriori* l'affidabilitá del prodotto sviluppato, é sempre meglio valutare *a priori* (predizione), il comportamento affidabilistico del prodotto durante la fase di sviluppo.

La predizione dell'affidabilitá del prodotto deve essere condotta valutando in modo esaustivo le funzioni a cui il prodotto deve rispondere. Ognuna di queste funzioni sará indicata, nel seguito, con il termine di missione. Stabilita la o le missioni che devono essere portate a termine dal prodotto, si procede, missione per missione, a valutare in quale modo i guasti sui singoli dispositivi che compongono il prodotto si riflettano sulla capacitá del prodotto di portare a termine la missione considerata. Per fare ció é, tra l'altro, necessario considerare che i singoli dispositivi possono avere uno o piú modi di guasto e, pertanto, possono avere diverse influenze sulla capacitá di adempiere al compito prefissato.

L'analisi affidabilistica compiuta secondo i criteri indicati sopra (in modo molto impreciso e generico) porta il progettista ad evitare errori macroscopici e a scegliere fra diverse strategie per realizzare il prodotto (ad esempio, scelta fra diverse configurazioni circuitali fra componenti piú o meno idonei per ottenere il livello di affidabilitá prestabilito, ecc.). Anche l'opzione di introdurre dispositivi atti a ridurre lo stress sui componenti puó essere valutata; ad esempio, nella realizzazione di una sala dedicata ad ospitare una banca dati, é utile valutare se l'introduzione di un sistema di condizionamento dell'ambiente possa portare ad una sostanziale riduzione del numero di guasti per anno del *mainframe* ospitante la banca dati stessa.

Durante la fase di progetto si vengono cosí a definire diversi scenari. I progetti maggiormente affidabili avranno, in generale, un costo maggiore (presenza di ridondanze, componenti di maggior qualitá, introduzione di apparecchiature atte a ridurre lo stress termico sui componenti, ecc.). La scelta finale fra le varie configurazioni possibili deve essere fatta valutando (cosa non sempre facile) il costo totale del progetto, cioé la somma del costo del prodotto e del costo legato alla difettositá del prodotto. Si noti che i costi legati alla difettositá del prodotto possono essere significativamente alti in presenza di problemi di sicurezza per l'utente finale del prodotto. E' pertanto importante inserire, fra le missioni del prodotto, quella di non arrecare danno all'utente del prodotto stesso.

6.5 Il diagramma affidabilistico

Influenza della missione

I diagrammi affidabilistici consentono di organizzare in modo razionale l'analisi affidabilistica del sistema. In generale, esistono tanti diagrammi affidabilistici quante sono le missioni che devono essere compiute dal sistema. Infatti, il singolo diagramma affidabilistico deve rispondere alle seguenti domande:

- Quali dispositivi sono necessari per compiere la missione?
- Quali dispositivi possono rompersi senza alterare la capacitá del sistema di compiere la missione?

Nel tracciare il diagramma affidabilistico, ogni dispositivo viene rappresentato come un blocco funzionale connesso ad almeno un altro blocco funzionale. Il diagramma ha una entrata ed una uscita. Il sistema funziona quando esiste almeno un percorso di blocchi funzionali attivi (o dispositivi non guasti) fra ingresso ed uscita.

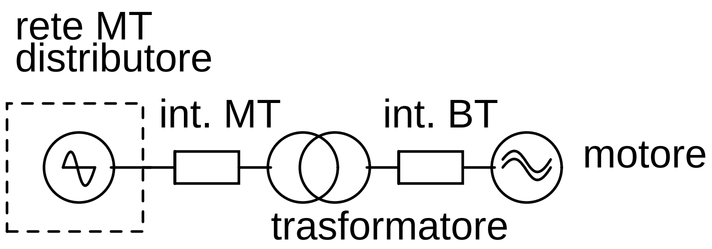

Figura 6.5: Diagramma unifilare di un sistema elettrico industriale progettato per alimentare un motore elettrico in bassa tensione

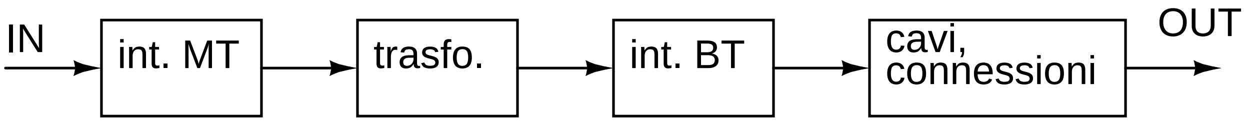

Figura 6.6: Diagramma affidabilistico di un sistema elettrico industriale progettato per alimentare un motore elettrico in bassa tensione. La missione é quella primaria, cioé l'alimentazione del motore.

Per tracciare il diagramma affidabilistico si procede nel modo seguente: tutti i dispositivi strettamente necessari per compiere la missione vengono posti in serie. Quando due o piú dispositivi possano compiere la medesima funzione, tali dispositivi vengono posti in parallelo (ridondanza) Dispositivi che non abbiano influenza sulls capacitá del sistema di compiere la missione specificata non vengono rappresentati.

Esempio 6.5.1 Per fare un esempio pratico, si consideri il sistema elettrico di figura 6.5.

Per tale sistema, fra le varie possibili, possono essere considerate due missioni: (a) portare l'energia elettrica al motore (missione primaria), (b) impedire che, in caso di corto circuito del motore, debbano intervenire le protezioni ed i dispositivi di manovra della rete in media tensione che alimenta il sistema (missione secondaria).

Per potere espletare la missione primaria sono necessari tutti i dispositivi mostrati nel circuito unifilare. Pertanto, il diagramma affidabilistico é la serie dei blocchi funzionali relativi ad ogni dispositivo.

La missione secondaria é invece espletata dai due interruttori. Poiché una opportuna regolazione dei tempi di intervento permette a questi due dispositivi di interrompere il circuito prima delle protezioni della rete MT, tali dispositivi possono essere pensati come un circuito affidabilistico di tipo parallelo.

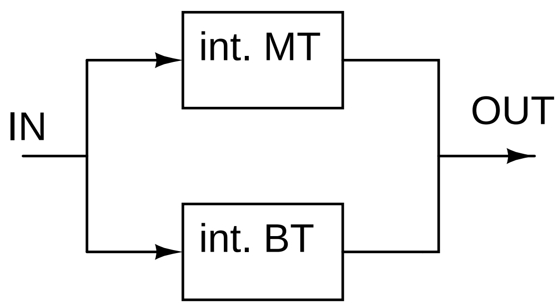

Figura 6.7: Diagramma affidabilistico di un sistema elettrico industriale progettato per alimentare un motore elettrico in bassa tensione. La missione é quella secondaria, cioé impedire che un corto circuito del motore provochi l'intervento delle protezioni della rete in media tensione.

Si noti, dal diagramma relativo alla missione secondaria, che l'essere elettricamente in serie non implica la serie affidabilistica.

6.6 Strutture semplici

6.6.1 Sistemi di tipo serie

Il sistema piú semplice é quello in cui ogni dispositivo é necessario per potere compiere la missione. Poiché la probabilitá di tenuta del sistema ($\Pr(S)$) é data dalla probabilitá di tenuta simultanea di tutti i dispositivi:

$$\Pr(S) = \Pr(D_1 D_2 \dots D_n)$$

facendo l'ipotesi di indipendenza stocastica fra i guasti, l'affidabilitá del sistema é data da:

$$R = \prod_{i=1}^{n} R_i < \min_i(R_i) \tag{6.25}$$

che, in termini di tassi di guasto si traduce in:

$$\lambda = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \tag{6.26}$$

Quindi,

$$MTTF = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \lambda_i} \tag{6.27}$$

Chiaramente, un sistema serie presenta alti tassi di guasto e non é, in generale, adatto a conseguire livelli di affidabilitá elevati. Per conseguire un incremento di affidabilitá nei dispositivi in serie é possibile scegliere dispositivi di elevata qualitá e, se possibile, ridurre lo stress sui singoli componenti (ad esempio mediante raffreddamento forzato).

6.6.2 Sistemi di tipo parallelo (ridondanza)

I sistemi di tipo parallelo, o a ridondanza totale, sono quelli in cui una certa funzione, necessaria per compiere la missione, puó essere espletata da due o piú dispositivi. Poiché la probabilitá di guasto del sistema ($\Pr(\bar{S})$) é data dalla probabilitá di guasto simultanea di tutti i dispositivi:

$$\Pr(\bar{S}) = \Pr(\bar{D}_1 \bar{D}_2 \dots barD_n)$$

facendo l'ipotesi di indipendenza stocastica fra i guasti, l'inaffidabilitá del sistema é data da:

$$1 - R = \prod_{i=1}^{n} (1 - R_i) < \min_i(1 - R_i) \tag{6.28}$$

Quando le affidabilitá dei dispositivi componenti il parallelo non sono uguali, l'affidabilitá del dispositivo é difficilmente esprimibile in forma compatta, eccezion fatta per il caso di due dispositivi:

$$R = R_1 + R_2 - R_1 R_2 \tag{6.29}$$

Se tutti i dispositivi sono identici $R_i = R_D$, allora é possibile scrivere:

$$R = \sum_{i=1}^{n} \left(\begin{array}{c} n \\ i \end{array} \right) R_D (1 - R_D)^{n-i} \tag{6.30}$$

E' necessario osservare che la ridondanza puó essere effettuata in modi diversi. Ogni modo di effettuare la ridondanza ha influenza sul tasso di guasto dei componenti che costituiscono il parallelo. In particolare, per dispositivi che debbano trasmettere potenza o corrente (si pensi a gruppi sincroni), si puó avere:

- ridondanza calda, i dispositivi sono soggetti allo stesso carico. Il tasso di guasto é identico per i vari dispositivi.
- ridondanza tiepida, i dispositivi ridondanti sono soggetti a carico ridotto e, pertanto, hanno tassi di guasto piú bassi di quello che fornisce il servizio.
- ridondanza fredda, gli elementi ridondanti sono scarichi ed hanno tasso di guasto nullo finché non vengono posti in servizio.

Per ottenere un incremento delle prestazioni di sistemi ridondanti é possibile utilizzare dispositivi costruiti utilizzando diverse tecnologie oppure diversi costruttori. Ció porta ad una riduzione di guasti legati ad una sbagliata progettazione del componente o ad una inadeguata prestazione di una particolare tecnologia costruttiva in determinate condizioni di impiego.

Sistemi a ridondanza parziale

A volte, su n dispositivi, debbono essere operativi almeno $k < n$ perché il sistema sia in grado di compiere la propria missione. Tali si dicono a ridondanza parziale.

6.6.3 Combinazione di strutture tipo serie e parallelo

Per strutture riconducibili ad una serie di sottoblocchi tipo serie/parallelo si agisce conglobando in elementi equivalenti i singoli sottoblocchi, come mostrato in fgura 6.8

6.6.4 Influenza del modo di guasto dei dispositivi

Ogni dispositivo puó avere differenti modi di guasto. Per un dispositivo elettrico i due modi di guasto piú significativi sono quelli di corto circuito (CC) e di circuito aperto (CA). In generale, a seconda della missione prescelta, sará CC oppure CA il modo di guasto che porta il sistema a non essere capace di compiere la missione fissata. A volte, quando il dispositivo ha piú modi di guasto, é necessario specificare a quale modo di guasto ci si riferisce. Nell'esempio 6.5.1, per la missione primaria i modi di guasto degli interruttori sono tutti quei modi che rendono un interruttore incapace di trasmettere corrente, cioé:

- incapace di chiudere,
- apertura non richiesta,
- guasto durante il servizio,
- guasto prodottosi o scoperto durante test o manutenzione

Al contrario, per la missione secondaria, i modi di guasto sono quei modi che rendono un interruttore incapace di interrompere una corrente, cioé:

- incapace di aprire

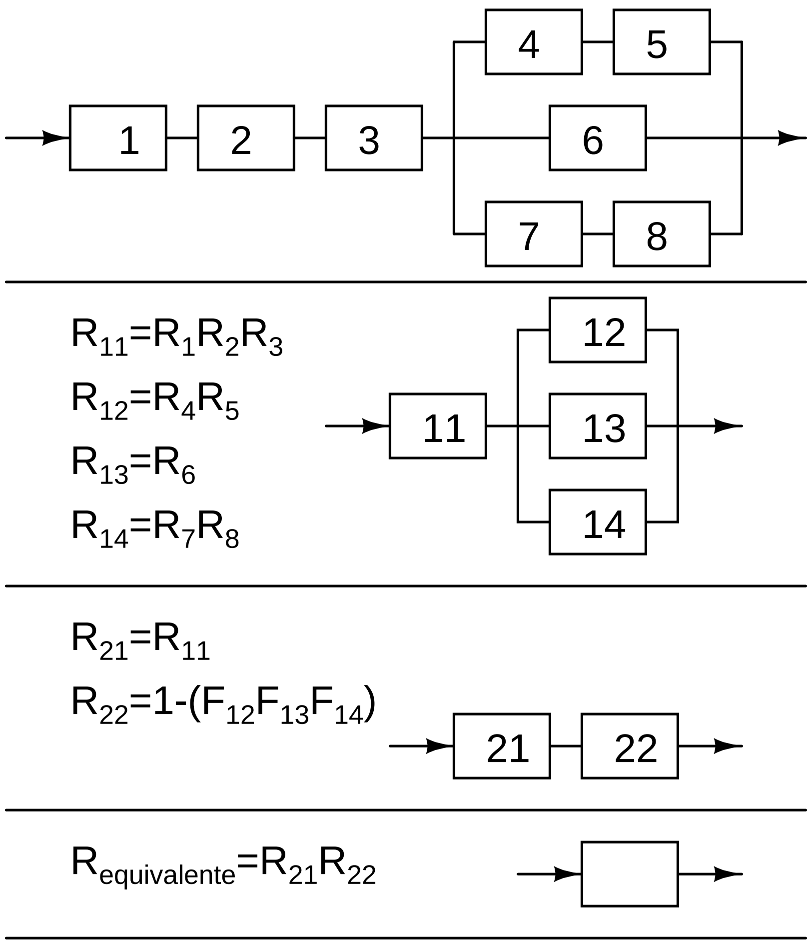

Figura 6.8: Procedura di semplificazione di un sistema costituito da sottoblocchiaventi struttura del tipo serie e/o parallelo.

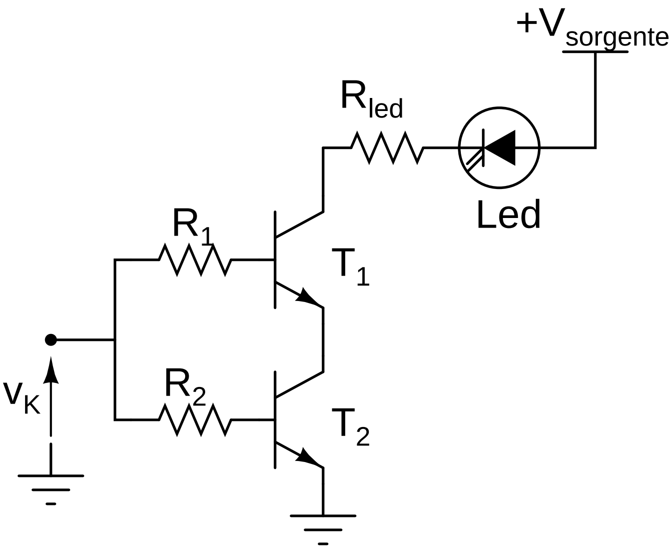

Figura 6.9: Circuito elettronico di segnalazione di stato. Quando v_k é "alta", il led si illumina

- rottura durante una fase di apertura

Il modo di guasto influenza anche, indipendentemente dalla missione, la configurazione affidabilistica. Ad esempio, nel circuito elettronico di figura 6.9, i due transistor possono essere considerati in parallelo se il modo di guasto é CC. In serie se il modo di guasto é CA. Nel caso specifico, poiché il modo di guasto piú frequente é CA, i due dispositivi sono in parallelo. Quando i due modi di guasto possono entrambi portare all'interruzione del servizio fornito, é possibile considerare un dispositivo come due blocchi funzionali in serie. Ogni blocco é relativo ad un tipo di guasto, CC o CA.

Esempio 6.6.1 (Diodi in serie o parallelo) I diodi possono dare luogo, in seguito a guasto, a circuiti aperti o corto circuiti. Siano R_{CA} e R_{CC} le affidabilitá calcolate per i due modi di guasto. Tali affidabilitá possono essere stimate nel modo seguente. Se, a partire da n_0 diodi, dopo un tempo t n_{CA} si sono interrotti e n_{CC} sono andati in corto circuito, allora le affidabilitá stimate sono:

$$\hat{R}_{CA}(t) = \frac{n_{CA}}{n_0}$$

$$\hat{R}_{CC}(t) = \frac{n_{CC}}{n_0}$$

La serie di due diodi (equivalente, come funzione, ad un unico diodo) smette di funzionare se uno dei due diodi si guasta dando luogo ad un circuito aperto o, alternativamente, se entrambi i diodi sono in corto circuito. Il diagramma affidabilistico puó essere tracciato come due blocchi in serie relativi alla rottura a circuito aperto e due blocchi in parallelo elativi alla rottura in corto circuito. Quindi:

$$R_{CA-CA} = R_{CA}^2$$

$$R_{CC-CC} = 2R_{CC} - R_{CC}^2$$

$$R \approx R_{CA}^2(2R_{CC} - R_{CC}^2)$$

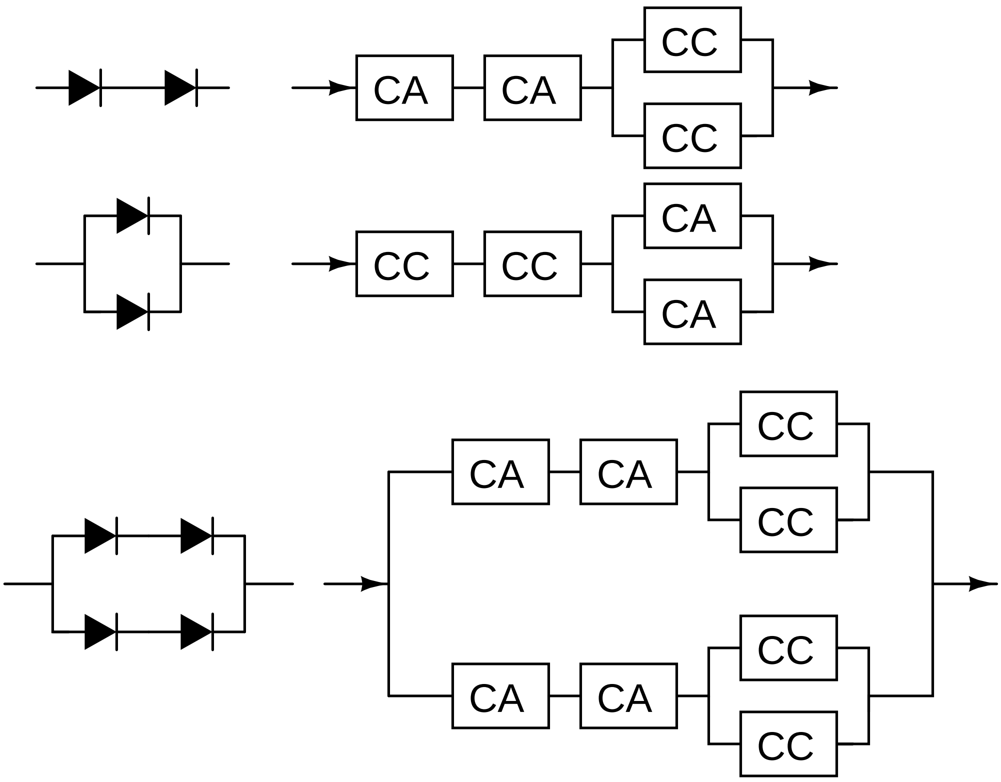

Figura 6.10: Configurazioni circuitali dei diodi e corrispondenti diagrammi affidabilistici

Il risultato é approssimato in quanto il diagramma mostrato ammette guasti simultanei, di uno e dell'altro tipo, per il medesimo diodo. Perché il risultato sia prossimo a quello reale le probabilitá di guasto devono essere sufficientemente basse da potere considerare approssimativamente nulla la probabilitá di due guasti simultanei sullo stesso dispositivo. Tale approssimazione é ragionevole in pratica.

Per i diodi in parallelo valgono considerazioni analoghe, come mostra la figura 6.10. Pertanto:

$$R \approx R_{CC}^2(2R_{CA} - R_{CA}^2)$$

La figura 6.10 mostra anche una configurazione a ridondanza quadratica. Tale struttura é detta *fault tolerant* in quanto sopporta almeno un guasto di un tipo o dell'altro.

6.7 Strutture complesse

Si consideri la figura 6.11. Tale struttura non é direttamente riconducibile a combinazione di sottosistrutture di tipo serie o parallelo. Come si procede per il calcolo dell'affidabilitá o del tasso di guasto di una struttura di questo tipo? Esistono vari metodi. I piú importanti, descritti in questa sezione, sono quello della probabilitá totale e quello dello spazio degli stati.

6.7.1 Il metodo della probabilitá totale

Il metodo della probabilitá totale consiste nello scegliere un dispositivo nel sistema. Tale dispositivo sia caratterizzato da una affidabilitá R^*. Si supponga di essere in grado di cancolare $R(F)$, l'affidabilitá del sistema supponendo che il dispositivo sia perfettamente funzionante, $R(G)$, l'affidabilitá del sistema

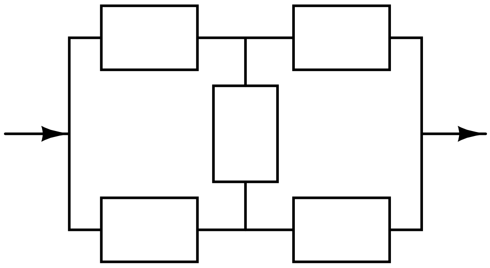

Figura 6.11: Sistema affidabilistico con struttura non riconducibile a combinazione di sottosistrutture di tipo serie o parallelo.

supponendo che il dispositivo sia guasto. Utilizzando il teorema della probabilitá totale (si veda (2.14)) si ottiene:

$$R = R(F)R^* R(G)(1 - R^*) \tag{6.31}$$

Applicando il metodo della probabilitá totale si ottengono due sottosistemi: il sottosistema in cui il dispositivo scelto é funzionante e quello in cui é guasto. Se tali sottosistemi non fossero direttamente risolvibili, é possibile applicare il metodo della probabilitá totale in modo iterativo. Per il sistema con struttura a ponte, ipotizzando che ogni componente abbia affidabilitá R, il sistema ha affidabilitá data da:

$$R_S = (2R^2 - R^4)(1 - R) + ((2R - R^2)^2)R = 2R^2 + 2R^3 - 5R^4 + 2R^5$$

6.7.2 Il metodo dello spazio degli stati

Il metodo degli stati, applicato ad un sistema di N dispositivi consiste nel numerare i dispositivi progressivamente (con numeri interi che vanno da 1 ad N). E' quindi consigliabile scrivere una matrice consistente di N righe e 2^N colonne. Tale matrice puó essere riempita a partire dall'ultima riga mediante sequenze di 1 e 0 consecutivi. Il numero di 0 (o di 1) consecutivi é pari a $2^{(}N - r)$ se r é il numero di riga. Per fare un esempio, una matrice relativa ad un sistema di 3 dispositivi é:

1	1	1	1	0	0	0	0
1	1	0	0	1	1	0	0
1	0	1	0	1	0	1	0

Ogni colonna della matrice specifica un particolare stato del sistema. I numeri indicano lo stato (0=guasto, 1=funzionante) del dispositivo avente il numero corrispondente al numero di riga. Ad esempio, la terza colonna della matrice relativa ad un sistema di tre elementi é: $(1, 0, 1)^T$. Ció significa che, nel terzo stato degli otto possibili, il primo ed il terzo dispositivo non sono guasti, mentre il secondo dispositivo non é in grado di espletare la propria funzione.

La matrice che descrive gli stati del sistema puó essere generata in modo indipendente dal sistema. A partire dalla matrice é poi necessario valutare, colonna per colonna, quali stati consentono al sistema di portare a termine la missione e quali no. L'affidabilitá del sistema é pari alla somma delle probabilitá degli stati che permettono di compiere la missione.

Ad esempio, per il sistema a ponte, ipotizzato che ogni componente abbia la medesima affidabilitá, si osserva che esistono 2 stati in cui 2 dispositivi consentono di compiere la missione, 8 stati con 3 dispositivi, 5 stati con 4 dispositivi ed 1 stato con 5 dispositivi. L'affidabilitá é data da:

$$R_S = 2(R^2(1 - R)^3) + 8(R^3(1 - R)^2) + 5(R^4(1 - R)) + R^5 = 2R^2 + 2R^3 - 5R^4 + 2R^5$$

Il metodo dello spazio degli stati si presta bene all'implementazione mediante calcolatore elettronico. Per effettuare i conti in modo manuale é forse preferibile il metodo della probabilitá totale.