

## **DIMOSTRAZIONE DEI REQUISITI RAMS MEDIANTE RACCOLTA, ORGANIZZAZIONE E UTILIZZO DI DATI SPERIMENTALI**

Stefano La Rovere\*, Valerio Marra<sup>o</sup>, Cristian Vercilli\*, Paolo Vestrucci\*

\*NIER Ingegneria S.p.A., Via Altabella, 3 – I-40123 Bologna

<sup>o</sup>I.S.L. - Ingegneria dei Sistemi Logistici S.r.l., Via di Marmiceto, 6/C – I-56121 Pisa

[s.larovere@niering.it](mailto:s.larovere@niering.it)

[valerio.marra@isl-altran.it](mailto:valerio.marra@isl-altran.it)

### **SOMMARIO**

L'impiego crescente di analisi RAMS (Reliability, Availability, Maintainability and Safety) per la valutazione delle prestazioni di sistemi industriali pone la necessità di sviluppare strategie adeguate per la loro validazione mediante la raccolta e l'elaborazione dei dati acquisiti durante l'esercizio. In particolare, la valutazione delle grandezze affidabilistiche in ingresso ad un'analisi RAMS è essenziale per verificare l'attendibilità delle stime previsionali relative alle frequenze d'accadimento degli eventi pericolosi individuati e dei target di disponibilità raggiunti. La gestione delle caratteristiche RAMS è strettamente legata al ciclo di vita del sistema, con particolare riferimento alle fasi di "Concezione", "Progetto ed implementazione", "Installazione e pre-esercizio" e di "Validazione e accettazione" del sistema. In questo lavoro si è proceduti nella definizione di linee guida da utilizzare nella pianificazione e nella esecuzione delle attività di monitoraggio e dimostrazione delle caratteristiche di affidabilità specificate per le "unità minime" costituenti il sistema e nello sviluppo di uno strumento software basato su una adeguata modellazione matematica del fenomeno affidabilistico. L'efficacia dello strumento è validata mediante casi di test forniti dalla letteratura corrente e dall'applicazione in casi particolari rispetto ai quali è valutato il grado di flessibilità dell'approccio metodologico proposto.

### **2. INTRODUZIONE**

L'analisi di sistemi safety-related e/o caratterizzati da "elevate" prestazioni di disponibilità sono sempre più frequentemente condotte in un contesto di verifica e validazione riferito all'intero ciclo di vita del sistema.

Lo sviluppo di una analisi RAMS, indipendentemente dalla tipologia di impianto/sistema o settore tecnologico, richiede una fase preliminare di identificazione/definizione degli eventi pericolosi e degli stati di esercizio del sistema (fuori servizio e modalità operative degradate). Parte integrante dell'analisi è l'attività di quantificazione delle frequenze di accadimento di tali eventi realizzata sulla base delle caratteristiche "previsionali" di affidabilità relative a ciascuna "unità minima" in cui il sistema è decomposto.

Nel seguito si propone una metodologia applicabile all'integrazione nelle diverse fasi del ciclo di vita, dei compiti relativi al monitoraggio programmato ed alla dimostrazione delle prestazioni RAMS del sistema. Tale attività è parte integrante della validazione e conseguente accettazione del sistema ed è finalizzata a verificare l'attendibilità delle stime quantitative previsionali prodotte. La dimostrazione delle caratteristiche RAMS del sistema si basa sulla dimostrazione delle caratteristiche di affidabilità dei componenti che lo costituiscono, attività tipicamente realizzata in una fase probatoria di pre-esercizio.

La metodologia proposta è essenzialmente applicabile a "sistemi distribuiti", ovvero caratterizzati da un numero elevato di unità minime che compongono una struttura essenzialmente modulare. Esempi di tali sistemi sono: impianti tecnologici di sicurezza fisica e di controllo, sistemi di controllo per il segnalamento ferroviario, sistemi di controllo di impianti di processo. L'approccio proposto è comunque utilizzabile:

- per un sottoinsieme di componenti caratterizzati da una elevata numerosità: in tal caso, la dimostrazione delle caratteristiche di affidabilità delle restanti unità deve essere condotta mediante approcci diversi (ad esempio con prove accelerate di vita);
- aumentando il numero di unità "osservate" mediante estensione del piano di dimostrazione a sistemi/impianti simili in esercizio (ad esempio prodotti dallo stesso fornitore).

L'approccio descritto è basato su un modello del processo di guasto di un componente estremamente semplificato e diffuso in letteratura: la funzione affidabilità è rappresentata mediante una distribuzione esponenziale con tasso di guasto costante; la distribuzione di Poisson è utilizzata per rappresentare la distribuzione di campionamento associata allo stimatore "numero di eventi di guasto" in una prova di dimostrazione dell'affidabilità di durata definita. Su tale modellazione matematica del fenomeno è sviluppato uno strumento software di supporto alle attività di monitoraggio e dimostrazione delle caratteristiche di affidabilità di una individuata tipologia di unità.

L'integrazione delle attività di dimostrazione del RAMS nel processo di accettazione del sistema richiede una analisi preliminare del ciclo di vita complessivo, al fine di individuare i compiti relativi a ciascuna fase.

In Tabella 1 sono definite le fasi principali del ciclo di vita di un sistema generico; per ciascuna fase sono individuati i compiti associati alla accettazione delle relative caratteristiche RAMS e i conseguenti requisiti che lo strumento di supporto deve possedere.

Fase del ciclo di vita	Compiti di dimostrazione del RAMS	Requisiti strumento SW
<b>Concezione e definizione dei requisiti</b>	Definizione dei criteri generali di accettazione del RAMS del sistema. Definizione della durata (generalmente massima) del periodo di pre-esercizio per la dimostrazione del RAMS del sistema.	Deve permettere una stima preliminare del tempo di osservazione massimo necessario ad una dimostrazione statisticamente significativa dei valori di affidabilità delle unità costituenti il sistema.
<b>Progetto e implementazione</b>	Definizione del sistema di raccolta dei dati di guasto. Definizione e ottimizzazione dei "parametri di progetto" del piano di dimostrazione.	Deve permettere di individuare il "set ottimale" dei parametri di progetto del piano di dimostrazione.
<b>Installazione e pre-esercizio</b>	Verifica di addebitabilità di ciascun guasto osservato. Monitoraggio in tempo reale del processo di dimostrazione.	Deve permettere di stimare i valori correnti dei parametri del piano di dimostrazione.
<b>Validazione e accettazione</b>	Verifica dell'esito delle prove di dimostrazione. Verifica dell'accettabilità del sistema, sulla base dei criteri di stabiliti.	Deve permettere un processo di "regressione" atto ad individuare i parametri del piano di dimostrazione "ottimale", verificato sulla base dell'esito avuto.

Tabella 1 - Fasi del ciclo di vita di un sistema generico

### 3. MODELLI STATISTICI DI RIFERIMENTO

La dimostrazione delle caratteristiche di affidabilità di una individuata tipologia di apparato è basata sui modelli di statistica matematica e inferenza statistica descritti di seguito, desunti dalla numerosa letteratura disponibile in merito (rif. [1], [2] e [3]). Una formalizzazione sufficientemente rigorosa del modello matematico di riferimento per lo sviluppo dello strumento software di supporto è ritenuta necessaria per la comprensione dei limiti e delle potenzialità dell'approccio e per la definizione dei criteri da adottare per il suo utilizzo.

#### 3.1 Richiami di statistica matematica

Gli elementi di statistica matematica alla base del modello matematico sviluppato sono la distribuzione esponenziale, utilizzata per rappresentare l'affidabilità di una apparecchiatura mediante un'unica variabile (tasso di guasto/tempo medio tra i guasti) e la distribuzione di Poisson, utilizzata per rappresentare la "distribuzione campionaria" dello stimatore "numero di eventi di guasto" in una prova di dimostrazione dell'affidabilità di durata definita.

Data una variabile aleatoria che assume due valori alternativi ("0", "1") e detta "p" la probabilità "di successo" ("1") in un esperimento aleatorio, la distribuzione binomiale (1) rappresenta la probabilità che la variabile aleatoria "X" definita come numero di eventi "di successo" su n esperimenti indipendenti assuma il valore "i".

$$P(X = i) = \binom{n}{i} p^i (1-p)^{n-i} \quad (1)$$

Per  $n \rightarrow \infty$  e  $p \rightarrow 0$  si ottiene la Distribuzione di Poisson (2), caratterizzata da valore atteso e varianza della distribuzione  $\mu = n \cdot p$ .

$$P(X = i) = \frac{\mu^i \cdot e^{-\mu}}{i!} \quad (2)$$

La distribuzione cumulata di Poisson (3) rappresenta la probabilità di avere al più k eventi di successo.

$$P(X = K) = \sum_{i=0}^k \frac{\mu^i \cdot e^{-\mu}}{i!} \quad (3)$$

#### 3.2 Richiami di inferenza statistica

L'inferenza statistica consiste nel processo di stima di una (o più) caratteristiche di una popolazione mediante osservazione dei valori assunti da uno "stimatore" opportunamente definito, in un test statistico campionario. Ai fini dell'applicazione studiata, è presentato un approccio di statistica inferenziale univariata, non parametrica, per la verifica di ipotesi definite sulla base di una distribuzione teorica di Poisson.

### 3.2.1 Verifica delle ipotesi

Consideriamo un campione di numerosità  $m$  e oggetto di osservazione una definita variabile aleatoria (v.a.) “ $t$ ” di cui non conosciamo la relativa distribuzione di probabilità; siano  $(t_1, t_2, \dots, t_m)$  i valori assunti dalla v.a. nelle  $m$  osservazioni indipendenti.

La trasformazione  $x = x(t_1, t_2, \dots, t_m)$  definisce un’ulteriore variabile aleatoria, “stimatore” della v.a. se la sua “distribuzione di campionamento” ne è rappresentativa. I valori assunti dallo stimatore definiscono il cosiddetto spazio dei campioni  $X$ .

I test di inferenza statistica sono basati sulla verifica di una ipotesi  $H_0$  detta “nulla”, definita con riferimento alla variabile aleatoria oggetto di osservazione, mediante valutazione dei valori assunti dallo stimatore. Il sottoinsieme dello Spazio dei campioni associato alla mancata verifica dell’ipotesi nulla è definito “Regione Critica”  $X_c(t) \subset X$ . La definizione della Regione Critica (o della “Regione di accettazione”  $X_a(t) \subset X - X_c(t)$ ) consiste, quindi, nella definizione del criterio di valutazione dell’esito del test statistico, sulla base dei valori assunti dallo stimatore definito.

Si definisce “Errore del 1° tipo”, l’evento di ipotesi nulla vera ma non verificata sulla base del test statistico condotto. Con riferimento ad una ipotesi  $H_1$  “alternativa” (vera se e solo se non lo è l’ipotesi nulla), si definisce “Errore del 2° tipo”, l’evento di ipotesi alternativa vera ma ipotesi nulla verificata sulla base del test statistico condotto.

Sia  $f(x|H)$  la “distribuzione di campionamento”, condizionata all’evento di ipotesi  $H$  è vera. La (4) rappresenta la probabilità di errore del 1° tipo:

$$P(x \in X_c | H_0) = \int_{X_c} f(x|H_0) dx \quad (4)$$

La (5) rappresenta la probabilità di errore del 2° tipo:

$$P(x \in X_a | H_1) = \int_{X_a} f(x|H_1) dx \quad (5)$$

Le (6) definiscono le ipotesi di un test “bilaterale”, alternative per  $t_1 \leq t_0$ , secondo la formalizzazione più efficace del modello con riferimento alla sua applicazione in prove di dimostrazione dell’affidabilità:

$$H_0 : t \geq t_0, H_1 : t \leq t_1. \quad (6)$$

In tal caso un errore del 1° tipo consiste nell’ipotesi  $H_0$  vera ( $t \geq t_0$ ) ma non verificata sulla base del test statistico condotto ( $x \in X_c$ ); un errore del 2° tipo consiste nell’ipotesi  $H_1$  vera ( $t \leq t_1$ ) ma ipotesi  $H_0$  verificata sulla base del test statistico condotto ( $x \in X_a$ ).

La (7) rappresenta la massima probabilità di errore del 1° tipo:

$$\alpha = P_{\max}(x \in X_c(t_0) | t \geq t_0) = \alpha(t_0) \quad (7)$$

La (8) rappresenta massima probabilità di errore del 2° tipo:

$$\beta = P_{\max}(x \notin X_c(t_0) | t \leq t_1) = \beta(t_1) \quad (8)$$

### 3.2.2 Definizione degli intervalli di confidenza

Consideriamo un test di inferenza finalizzato alla valutazione di un parametro  $t$ , variabile aleatoria che definisce il processo stocastico osservato sulla base dello stimatore  $x$ . Sia  $f(x|t)$  la “distribuzione di campionamento”. Con riferimento alla Figura 1,  $h_1(t)$  definito dalla (9) è detto Percentile superiore a probabilità  $\alpha_1$  della distribuzione:

$$\alpha_1 = \int_{-\infty}^{h_1(t)} f(x|t) dx \quad (9)$$

$h_2(t)$  definito dalla (10) è detto Percentile inferiore a probabilità  $\alpha_2$  della distribuzione:

$$\alpha_2 = \int_{h_2(t)}^{\infty} f(x|t) dx \quad (10)$$

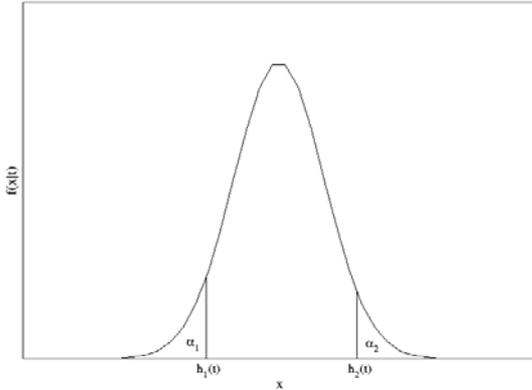


Figura 1 - Percentili superiore e inferiore

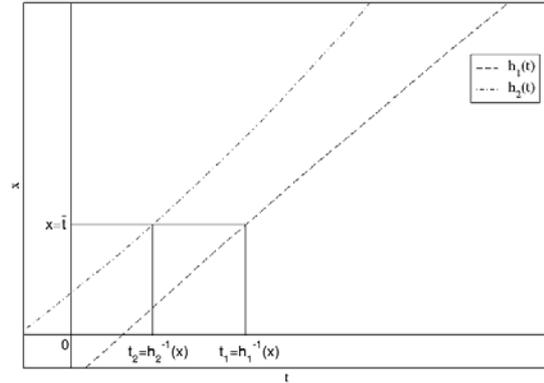


Figura 2 - Percentili superiore e inferiore

Con riferimento alla Figura 2, al valore  $x$  assunto dallo stimatore risulta associato l'intervallo  $t_1 = h_1^{-1}(x)$  e  $t_2 = h_2^{-1}(x)$  per la variabile aleatoria  $t$ . A tale intervallo è associato il livello di confidenza  $1 - \alpha_1 - \alpha_2$ , definito come la probabilità che lo stimatore assuma un valore compreso tra  $h_1(t)$  e  $h_2(t)$ .

### 3.2.4 Test di dimostrazione dell'affidabilità

L'affidabilità di una unità è definita come "la probabilità che essa realizzi una funzione richiesta, in condizioni stabilite, per un dato intervallo di tempo  $[0, t]$ " (rif. [1], [2] e [3]). Sia  $F(t)$  la probabilità di guasto nell'intervallo  $[0, t]$ ; assumendo per la funzione Densità di probabilità di guasto ( $f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$ ) una distribuzione esponenziale con tasso di guasto costante ( $\lambda = \lambda(t) [=] h^{-1}$ ), la funzione Affidabilità è rappresentata dalla (11):

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(\tau) \cdot d\tau = e^{-\lambda t} \quad (11)$$

La (12) definisce il Tempo medio tra due guasti ( $\theta [=] h$ ):

$$\theta = \int_0^{\infty} R(\tau) d\tau = \int_0^{\infty} e^{-\lambda \tau} d\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (12)$$

In sede di dimostrazione dell'affidabilità di una unità, il modello statistico utilizzato consiste in un test bilaterale di inferenza basato sullo stimatore "numero di eventi di guasto in un periodo di osservazione definito". Con riferimento ad un campione di numerosità  $n$  e ad un periodo  $T$  di osservazione, si assume per la distribuzione di campionamento una distribuzione teorica di Poisson (13), caso particolare della distribuzione binomiale (approssimazione valida per un elevato numero di unità ed un basso ordine di grandezza del tasso di guasto):

$$f(m|\mathcal{G}) = \binom{n}{m} \left(\frac{T}{\mathcal{G}}\right)^m \left(1 - \frac{T}{\mathcal{G}}\right)^{n-m} \approx \frac{(n \cdot T / \theta)^m \cdot e^{-nT/\theta}}{m!} \quad (13)$$

Il criterio di accettazione del test è definito dal numero limite di eventi di guasto ( $r$ ), nel periodo di osservazione definito, per il rigetto dell'unità (regione critica dello spazio campionario). Con riferimento alla formulazione (6) di ipotesi del test ( $H_0: \theta \geq \theta_0$ ,  $H_1: \theta \leq \theta_1$ , con  $\theta_1 \leq \theta_0$ ), la (14) rappresenta la Massima probabilità di Errore del 1° tipo.

$$P_{\max}(x \in X_c | H_0) = \sum_{k=r}^{\infty} \frac{(n \cdot T / \theta_0)^k \cdot e^{-nT/\theta_0}}{k!} = 1 - \sum_{k=0}^{r-1} \frac{(n \cdot T / \theta_0)^k \cdot e^{-nT/\theta_0}}{k!} = \alpha(n, T, r, \mathcal{G}_0) \quad (14)$$

La (15) rappresenta la Massima probabilità di Errore del 2° tipo.

$$P_{\max}(x \notin X_c | H_1) = \sum_{k=0}^{r-1} \frac{(n \cdot T / \theta_1)^k \cdot e^{-nT/\theta_1}}{k!} = \beta(n, T, r, \mathcal{G}_1) \quad (15)$$

Tale approccio è consistente con la definizione di un intervallo  $[T / \mathcal{G}_0, T / \mathcal{G}_1]$  per la variabile aleatoria  $p$  e di un intervallo  $[\theta_1, \theta_0]$  per la variabile aleatoria  $\theta$ , aventi confidenza  $1 - \alpha - \beta$ .

Riassumendo, il modello descritto è rappresentato dalle relazioni (16):

$$\alpha = 1 - \sum_{k=0}^{r-1} \frac{(n \cdot T / \theta_0)^k \cdot e^{-nT/\theta_0}}{k!} \quad \beta = \sum_{k=0}^{r-1} \frac{(n \cdot T / \theta_1)^k \cdot e^{-nT/\theta_1}}{k!} \quad (16)$$

tra le seguenti variabili:

- $T, n$ : definiti “parametri del test”;
- $\theta_1, \theta_0, \alpha, \beta$ : definiti “parametri di confidenza del test”;
- $r$ : definito “parametro di valutazione del test”.

L'applicazione del modello statistico in oggetto presuppone la definizione delle seguenti ipotesi:

- la densità di probabilità di guasto dell'unità è rappresentata da una distribuzione teorica esponenziale;
- la variabile aleatoria Tempo medio tra due guasti / Rateo di guasto è osservata mediante lo stimatore definito dal numero di eventi di guasto in un periodo di osservazione definito;
- la distribuzione di campionamento è rappresentata da una distribuzione teorica di Poisson.

## 4 STRUMENTO SOFTWARE DI SUPPORTO

All'utilizzo di strumenti software commerciali, basati sui modelli statistici precedentemente descritti, è stato preferito lo sviluppo di uno strumento dedicato, essenzialmente a fronte della flessibilità necessaria per la sua applicazione nelle diverse fasi del ciclo di vita del sistema e della volontà di definire il piano di dimostrazione con riferimento a diversi criteri di ottimizzazione. L'algoritmo di calcolo è stato implementato attraverso un codice scritto nel linguaggio di programmazione Visual Basic implementato in un foglio di calcolo di Excel per l'acquisizione dei dati in ingresso e la visualizzazione dei dati in uscita. A partire dai requisiti specificati per lo strumento di supporto nel §2, con riferimento ai compiti relativi a ciascuna fase del ciclo di vita del sistema, l'algoritmo è stato sviluppato mediante tre distinti moduli di calcolo. In Figura 3 è riportata l'interfaccia utilizzata per l'introduzione dei dati di ingresso e la visualizzazione dei dati in uscita; questa è articolata in tre schede distinte, relative a ciascun algoritmo di calcolo implementato.

### 4.1 Modulo 1

I dati in ingresso al *Modulo 1* costituiscono i vincoli del piano di dimostrazione:

- parametri del test:  $T_{\max}, n$ ;
- valori limite dei parametri di confidenza:  $\theta_1, \theta_0, \alpha_{\max}, \beta_{\max}$ .

Un ulteriore dato di input è relativo al passo temporale utilizzato dall'algoritmo di calcolo:  $Dt$ .

I dati in uscita dal modulo 1 definiscono:

- il parametro di valutazione del test: numero di guasti per il rigetto  $r$  ovvero per l'accettazione  $a = r - 1$ ;
- il periodo minimo di osservazione  $T_{\min}$  ed i relativi valori di  $\alpha$  e  $\beta$ , nel rispetto dei vincoli imposti.

Il *Modulo 1* può essere utilizzato con diverse finalità:

- valutazione del periodo massimo di osservazione  $T_{\max}$  e dei parametri di confidenza  $\alpha_{\max}, \beta_{\max}$ , sulla base dei valori specificati per la numerosità delle unità osservate  $n$  e per i parametri di confidenza  $\theta_1, \theta_0$  (in fase di concezione e definizione dei requisiti del sistema);
- ottimizzazione del test di dimostrazione, in termini di definizione del periodo minimo di osservazione, nel rispetto dei vincoli specificati (in fase di progettazione del piano).

### 4.2 Modulo 2

Parte dei dati in ingresso al *Modulo 2* ( $n, \theta_1, \theta_0$ ) sono acquisiti dal *Modulo 1*. Due ulteriori vincoli del piano di dimostrazione sono definiti mediante i valori relativi al:

- periodo massimo di osservazione:  $T_{\max}^* = T_{\max} \cdot m$ ;
- parametro di valutazione del test:  $r$  ovvero  $a$ .

Ulteriori dati richiesti dal modulo 2 sono relativi ai parametri utilizzati dall'algoritmo di calcolo:

- passo temporale:  $Dt$ ;
- "Confidenza su  $|\alpha^* - \beta^*|$ ":  $c$ ;
- "Rapporto di forzatura":  $\mu$ .

I dati in uscita dal modulo 2 sono relativi ai valori "ottimali" (minimi) dei parametri di confidenza  $\alpha^*$  e  $\beta^*$  ed al relativo Periodo minimo di osservazione  $T_{\min}^*$ .

I parametri relativi alla Confidenza su  $|\alpha^* - \beta^*|$  e al Rapporto di forzatura definiscono i criteri di verifica adottati dall'algoritmo di calcolo per l'ottimizzazione dei parametri di confidenza  $\alpha^*$  e  $\beta^*$  in termini di:

- "bilanciamento del test", caratteristica valutata mediante la quantità  $|\alpha^* - \beta^*|$ ;
- "protezione ad errori del 2° tipo", caratteristica associata alla condizione  $\beta^* < \alpha^*$ .

Utilizzando un Rapporto di forzatura pari a 1, il modulo permette di stimare i valori di  $\alpha^*$  e  $\beta^*$  che soddisfano la confidenza specificata, nel rispetto dei vincoli  $\alpha_{\max}$  e  $\beta_{\max}$ ; è in tal modo ottimizzato il "bilanciamento del test". Un valore del Rapporto di forzatura maggiore di 1 permette di ottenere un valore del parametro  $\beta^*$  minore del valore assunto da  $\alpha^*$ ; ottimizzando la "protezione" offerta dal piano di dimostrazione nei confronti di errori del 2° tipo. Il modulo 2 può essere utilizzato con diverse finalità:

- ottimizzazione del piano di dimostrazione, in termini di "bilanciamento del test" e "protezione da errori del 2° tipo" (in fase di progettazione del piano);
- valutazione "in tempo reale", durante il periodo probatorio di pre-esercizio, dei valori correnti dei parametri di confidenza del piano di dimostrazione "ottimale", verificato sulla base del numero di guasti osservati.

### 4.3 Modulo 3

Parte dei dati in ingresso al *Modulo 2* sono acquisiti dal *Modulo 3*; in particolare, sono utilizzati i valori precedentemente definiti per i parametri  $n, \alpha_{\max}, \beta_{\max}$ . Due ulteriori vincoli del piano di dimostrazione sono specificati mediante i valori relativi al:

- periodo effettivo di osservazione:  $T^{**}$ ;
- numero di guasti osservati:  $a^{**}$ ;

Un ulteriore dato in ingresso è relativo al Passo di incremento di  $Dg_0$  utilizzato dall'algoritmo di calcolo.

I dati in uscita dal *Modulo 3* sono relativi ai valori "ottimali" dei parametri di confidenza, nel rispetto dei vincoli definiti: valore massimo di  $g_1^{**}$  e valori minimi di  $g_0^{**}, \alpha^{**}, \beta^{**}$ .

Il *Modulo 3* può essere utilizzato con diverse finalità:

- ottimizzazione del piano di dimostrazione in termini di parametri di confidenza associati (in fase di progettazione del piano);
- valutazione "in tempo reale", durante il periodo probatorio di esercizio, dei valori correnti dei parametri di confidenza del piano di dimostrazione "ottimale", verificato sulla base del numero di guasti osservati;
- "processo di regressione", utilizzabile al termine del periodo probatorio di pre-esercizio in caso di esito negativo del test pianificato, per la stima dei parametri di confidenza associati al piano di dimostrazione "ottimale", verificato sulla base del numero di guasti osservati nel periodo effettivo di osservazione.

Modulo 1		
Dati in input		
Numero di unità (#)	$n$	10
Periodo massimo di osservazione (ore)	$T_{max}$	17520
MTBF massimo (ore)	$\theta_0$	100000
Rapporto $d=\theta_0/\theta_1$ (#)	$d$	2.50
MTBF minimo (ore)	$\theta_1$	40000
Valore limite per la massima probabilità di errore del 1° tipo (#)	$\alpha_{max}$	0.2000
Valore limite per la massima probabilità di errore del 2° tipo (#)	$\beta_{max}$	0.2000
Passo temporale (ore)	$Dt$	10
Dati in output		
Numero di guasti per accettazione (#)	$a$	3
Numero di guasti al rigetto (#)	$r$	4
Massima probabilità di errore del 1° tipo (#)	$\alpha$	0.1011
Massima probabilità di errore del 2° tipo (#)	$\beta$	0.3629
Periodo minimo di osservazione (h)	$T_{min}$	17520

Modulo 2		
Dati in input		
Numero di unità (#)	$n$	10
MTBF massimo (ore)	$\theta_0$	100000
MTBF minimo (ore)	$\theta_1$	40000
Multiplo del Periodo di osservazione (#)	$m$	1
Periodo massimo di osservazione (ore)	$T_{max}^*$	17520
Numero di guasti per accettazione (#)	$a^*$	3
Numero di guasti al rigetto (#)	$r^*$	4
Passo temporale (ore)	$Dt^*$	10
Confidenza su $ \alpha^* - \beta^* $ (#)	$c$	0.0100
Rapporto di forzatura (#)	$\mu$	1.00
Dati in output		
Massima probabilità di errore del 1° tipo (#)	$\alpha^*$	0.1852
Massima probabilità di errore del 2° tipo (#)	$\beta^*$	0.1952
Periodo minimo di osservazione (h)	$T_{min}^*$	22232

Modulo 3		
Dati in input		
Numero di unità (#)	$n$	10
Valore limite per la massima probabilità di errore del 1° tipo (#)	$\alpha_{max}$	0.2000
Valore limite per la massima probabilità di errore del 2° tipo (#)	$\beta_{max}$	0.2000
Numero di guasti osservati (#)	$a^{**}$	3
Periodo effettivo di osservazione (ore)	$T^{**}$	17520
Passo di incremento di $\theta_0$ (ore)	$D\theta_0$	10
Dati in output		
MTBF massimo (ore)	$\theta_0^{**}$	100000
MTBF minimo (ore)	$\theta_1^{**}$	31760
Massima probabilità di errore del 1° tipo (#)	$\alpha^{**}$	0.1011
Massima probabilità di errore del 2° tipo (#)	$\beta^{**}$	0.1999

Figura 3 – Interfaccia moduli di calcolo: Esempio applicativo 1

## 5. LINEE GUIDA DEL PROCESSO DI DIMOSTRAZIONE

Con riferimento alle fasi del ciclo di vita del sistema definite nel §2 e delle caratteristiche dello strumento software di supporto descritte nel §4, sono riportate le linee guida per l'applicazione del processo di validazione delle caratteristiche RAMS di un sistema, mediante dimostrazione dell'affidabilità delle unità che le costituiscono.

### 5.1 Fase di “Concezione e definizione dei requisiti” del sistema

I criteri di accettazione delle prestazioni RAMS del Sistema sono generalmente il risultato di un processo di allocazione dell'affidabilità sulle unità minime che lo costituiscono, realizzato sulla base di predefiniti criteri di accettazione del rischio e/o dei requisiti di disponibilità specificati per il sistema. Secondo l'approccio proposto, la validazione delle prestazioni RAMS del sistema è condotta mediante prove di dimostrazione dell'affidabilità delle singole unità che lo costituiscono; l'accettazione del sistema presuppone, quindi, l'accettazione di tutte le unità minime in cui il sistema è scomposto. Sulla base del modello proposto per le prove di dimostrazione dell'affidabilità (rappresentato dalle equazioni (16)), l'accettazione di ciascuna unità presuppone l'accettazione di un rischio residuo (rappresentato dalla massima probabilità di errore del 2° tipo) di aver accettato un campione caratterizzato da un valore limite (minimo) predefinito del Tempo medio tra due guasti. La definizione del livello di confidenza con il quale “accettare” una tipologia osservata di unità, consiste quindi nella specifica di due valori: un valore minimo per la sua caratteristica di affidabilità ed un valore massimo di probabilità associata alla sua accettazione.

La definizione di una prova di dimostrazione dell'affidabilità consiste nella definizione di un set di variabili (parametri di progetto del piano) classificate in: parametri del test ( $T, n$ ), parametri di confidenza ( $\theta_1, \theta_0, \alpha, \beta$ ) e parametri di valutazione ( $r$ ) del test. I parametri di confidenza ( $\theta_1, \beta$ ), in ogni caso rappresentativi della significatività statistica del test, assumono un rilievo particolare nella dialettica tra “fornitore” e “consumatore”, terminologia ampiamente adottata in letteratura (rif. [1]).

In fase di concezione e definizione dei requisiti del sistema interessa, generalmente, definire i valori limite dei parametri di progetto dei piani di dimostrazione che saranno sviluppati nelle successive fasi del ciclo di vita. In tale fase, è generalmente disponibile uno schema di massima dell'architettura del sistema ed una definizione preliminare delle unità minime che lo costituiscono e della relativa numerosità. Al fine di integrare nel processo di accettazione del sistema la validazione delle sue caratteristiche RAMS, la definizione delle unità minime, generalmente condotta con riferimento alla disponibilità di dati di guasto e al livello di dettaglio proprio del modello affidabilistico, deve essere realizzata considerando la loro numerosità e l'“osservabilità” del relativo evento di guasto durante l'esercizio.

Con riferimento al modello statistico adottato, interessa definire il periodo massimo di osservazione  $T_{max}$  ed i valori limite dei parametri di confidenza  $\alpha_{max}, \beta_{max}$ . La durata massima del periodo di osservazione è funzione della numerosità delle unità osservate, dell'ordine di grandezza del valore previsionale della sua caratteristica di affidabilità e del livello di confidenza definito per la sua accettazione.

Lo strumento software sviluppato può essere utilizzato per la stima del periodo massimo di osservazione  $T_{max}$  e dei relativi parametri di confidenza  $\alpha_{max}, \beta_{max}$ , sulla base dei valori specificati per la numerosità delle unità osservate  $n$  e per i parametri di confidenza  $\theta_1$  e  $\theta_0$ ; mediante l'algoritmo che implementa il modulo 1 di calcolo è stato prodotto un set di diagrammi da utilizzare a tal fine. A titolo esemplificativo sono riportati due diagrammi che permettono di stimare il periodo di osservazione (P.O.) in funzione della numerosità delle unità osservate ( $n$ ).

Il diagramma “a”, riportato in Figura 4, può essere utilizzato per definire il periodo di osservazione necessario a soddisfare i vincoli definiti sui parametri di confidenza  $\alpha_{max}, \beta_{max}$  e  $\theta_0$  sulla base della numerosità delle unità osservate. Il diagramma riporta le curve relative a diversi valori del rapporto  $d = \theta_0 / \theta_1$  (da cui  $\theta_1$ ); in particolare, il diagramma è relativo ai valori  $\alpha_{max} = 0.20$ ,  $\beta_{max} = 0.20$  e  $\theta_0 = 100000 h$  ed ai range  $[0, 17520]$  per il periodo di osservazione e  $[0, 100]$  per la numerosità delle unità.

Il diagramma “b”, riportato in Figura 5, può essere utilizzato per definire il periodo di osservazione necessario a soddisfare i vincoli definiti sui parametri di confidenza  $d$  e  $\theta_0$ , sulla base della numerosità delle unità osservate. Il diagramma riporta le curve relative a diversi valori della coppia di parametri di confidenza  $\alpha$  e  $\beta$ ; in particolare, il diagramma è relativo ai valori  $d = 1.5$  e  $\theta_0 = 100000 h$  ed ai range  $[0, 17520]$  per il periodo di osservazione e  $[0, 100]$  per la numerosità delle unità.

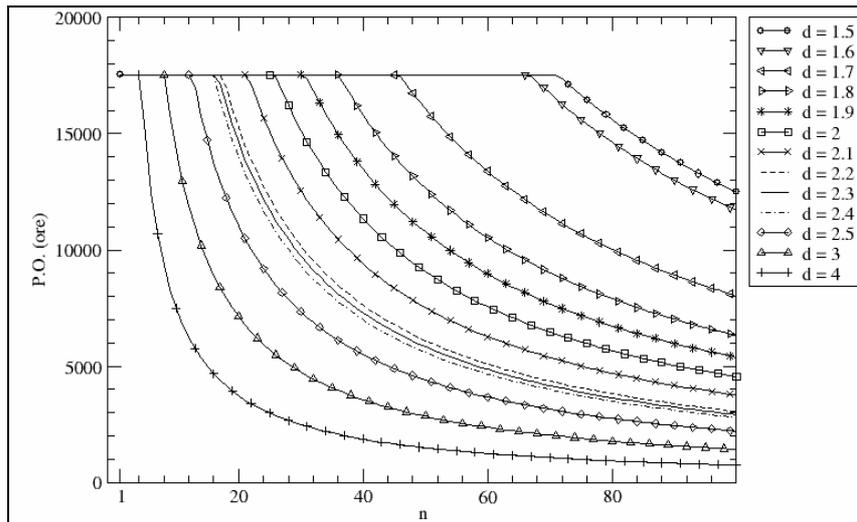


Figura 4 - Diagramma a

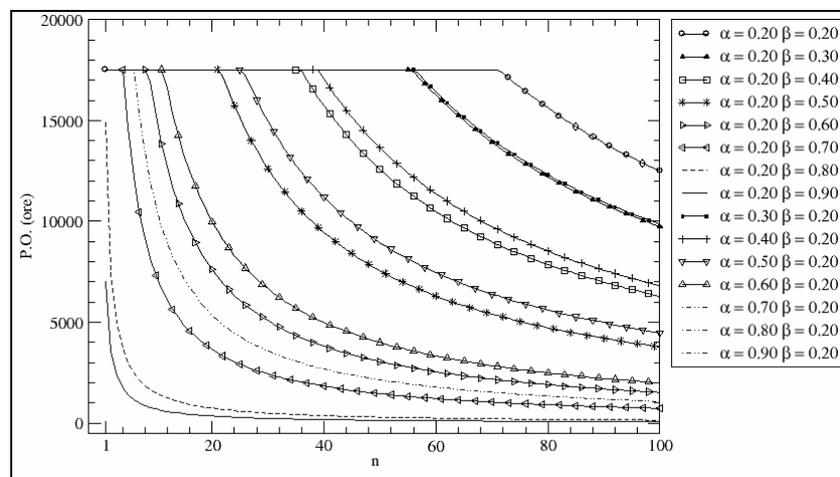


Figura 5 - Diagramma b

## 5. 2 Fase di “Progetto e implementazione” del sistema

In fase di sviluppo del sistema, tra le attività previste dal programma RAMS predisposto deve essere compresa la definizione in dettaglio dei piani di dimostrazione relativi a ciascuna unità minima costituente il sistema. Il modello di affidabilità del sistema, definito in sede di analisi RAMS, individua le unità minime da considerare, la loro numerosità e i target di sicurezza e/o di disponibilità del sistema complessivo, in funzione dei valori previsionali di affidabilità delle singole unità che lo costituiscono.

Lo strumento software permette di definire, con riferimento a ciascuna tipologia di unità minima, i “parametri di progetto” del relativo piano di dimostrazione dell’affidabilità. Tale processo consiste nella ottimizzazione di un certo numero di variabili del piano, nel rispetto dei vincoli imposti sui restanti parametri del modello. A tal fine, i tre moduli di calcolo in cui lo strumento di supporto è articolato possono essere utilizzati in modo integrato.

In generale, dalla precedente fase del ciclo di vita del sistema, risultano definiti i valori limite per il periodo di osservazione  $T_{max}$  e per i parametri di confidenza  $\alpha_{max}$ ,  $\beta_{max}$ ,  $\theta_0$  e  $\theta_1$ .

Con riferimento al §4, il modulo 1 può essere utilizzato per ottimizzare il piano di dimostrazione in termini di definizione del periodo minimo di osservazione, nel rispetto dei vincoli specificati. Il modulo 2 può essere utilizzato per la definizione del piano di dimostrazione “ottimale”, in termini di “bilanciamento del test” e “protezione da errori del 2° tipo”, nel rispetto dei vincoli specificati per  $\theta_0$  e  $\theta_1$ . Il modulo 3 può essere utilizzato per l’ottimizzazione del piano di dimostrazione in termini di valori ottimali per i parametri di confidenza, nel rispetto dei vincoli specificati per  $\alpha_{max}$  e  $\beta_{max}$ . Nel §6, gli esempi applicativi 1 e 2 mostrano l’utilizzo dei tre moduli di calcolo, secondo le finalità suddette.

Ulteriori attività particolarmente significative sono relative alla definizione del sistema di raccolta dei dati di guasto e dei relativi criteri di addebitabilità. L'acquisizione dei dati di guasto e la loro valutazione presuppone la predisposizione di un sistema di verbalizzazione, notifica e memorizzazione delle risultanze di ciascun intervento di manutenzione correttiva e preventiva condotto sul sistema. La definizione di una scheda FRACAS (Failure Reporting And Corrective Action System) "ottimale" è essenzialmente legata alla esaustività delle informazioni contenute. Un primo set di informazioni da registrare - quali i dati necessari per l'individuazione dell'unità in oggetto, ad esempio sulla base di una schematizzazione gerarchica del sistema e di una identificazione puntuale delle unità che lo compongono - sono ricavabili dalla numerosa letteratura in merito (rif. [1]). Sulla base dei criteri di addebitabilità dei guasti - essenzialmente relativi alle cause ritenute pertinenti - la scheda deve essere completata con la richiesta di tutte le informazioni che si ritenga necessario conoscere per la valutazione dell'evento occorso (es.: integrità dell'ambiente di installazione, altre unità malfunzionanti, etc.). A titolo esemplificativo sono generalmente considerati non addebitabili i guasti che ricadono in una delle seguenti classi: guasti dovuti ad un errata installazione; guasti dovuti a colpa o negligenza nell'uso; guasti dovuti ad errata o mancata manutenzione, guasti secondari ovvero dovuti a guasti (primari) di altre unità, mancanza di energia elettrica di alimentazione. Tali scenari devono essere analizzati in dettaglio al fine di individuare eventuali criticità, ad esempio nell'organizzazione del supporto logistico o nella formazione del personale manutentore, e definire opportune azioni correttive.

## 5.2 Fase di "Installazione e pre-esercizio" del sistema

Durante il periodo di pre-esercizio del sistema, in sede di acquisizione e valutazione dei dati di guasto sulla base dei criteri di addebitabilità definiti, interessa monitorare "in tempo reale" i valori "correnti" dei parametri di confidenza del piano di dimostrazione. Tale attività è essenzialmente condotta al fine di valutare l'adeguatezza del piano predisposto e di individuare tempestivamente eventuali criticità (unità per le quali esiste una probabilità significativa di successo delle prova in relazione ad un valore limite estremamente basso della sua caratteristica di affidabilità).

Con riferimento al §4, i moduli di calcolo 2 e 3 permettono la valutazione, durante il periodo probatorio di esercizio, dei valori correnti dei parametri di confidenza del piano di dimostrazione "ottimale", verificato sulla base del numero di guasti osservati. Con riferimento al §6, l'esempio applicativo 3 mostra l'utilizzo dei due moduli di calcolo a tal fine. I diversi criteri di ottimizzazione implementati dai due algoritmi di calcolo permettono di definire piani di dimostrazione alternativi, fornendo supporto alle valutazioni del caso.

## 5.3 Fase di "Validazione e accettazione" del sistema

In fase di validazione del sistema, sulla base dei criteri di accettazioni stabiliti per ciascuna prova di dimostrazione, interessa valutare l'esito delle stesse sulla base del numero di guasti osservati durante il periodo effettivo di osservazione (e ritenuti addebitabili sulla base dei criteri definiti). In caso di esito positivo delle prove relative a ciascuna tipologia di unità costituenti il sistema, il processo si conclude con la sua accettazione. In caso di esito negativo della prova relativa ad una individuata tipologia di unità, la mancata accettazione del sistema è seguita da una fase di analisi finalizzata a:

- valutare la caratteristica minima di affidabilità dell'unità in oggetto, al fine di stimare il relativo impatto sulle prestazioni RAMS del sistema complessivo;
- prolungare il periodo probatorio di pre-esercizio del sistema, definendo un periodo di osservazione aggiuntivo ed il relativo criterio di accettazione.

Con riferimento al §4, il modulo 3 può essere utilizzato a supporto delle suddette analisi in quanto:

- permette di realizzare il "processo di regressione" per la valutazione dei parametri di confidenza del piano di dimostrazione "ottimale", verificato sulla base del numero di eventi di guasto osservati (e ritenuti addebitabili), nel periodo effettivo di osservazione;
- permette di valutare "l'evoluzione futura" dei parametri di confidenza, supponendo di prolungare il periodo di osservazione (generalmente, senza l'osservazione di un ulteriore guasto).

## 6. ESEMPI DI APPLICAZIONE

Con riferimento alla Figura 3, l'interfaccia dello strumento software di supporto è riportata contestualmente ad un **esempio applicativo (1)** in cui è mostrato il suo utilizzo per la definizione del piano di dimostrazione dell'affidabilità di una individuata tipologia di unità, "ottimale" in termini di periodo di osservazione e parametri di confidenza associati. In particolare, consideriamo un campione di 15 unità ed una durata del periodo di pre-esercizio del sistema, tempo massimo per la dimostrazione dell'affidabilità delle sue unità minime, pari a 2 anni ( $T_{max} = 17520h$ ).

Assumiamo come vincoli specifici del piano i seguenti valori limite per i parametri di confidenza:  $\alpha_{\max} = 0.2000$ ,  $\beta_{\max} = 0.2000$ ,  $\theta_0 = 100000h$  e  $\theta_1 = 40000h$ .

Il modulo 1 mostra come nel periodo massimo di osservazione, sulla base dei valori specificati per  $\theta_0$  e  $\theta_1$ , non è possibile soddisfare il vincolo relativo a  $\beta_{\max}$ . Il modulo 2 è quindi utilizzato per valutare il periodo minimo di osservazione  $T_{\min}^* = 22232h$ , necessario al rispetto dei vincoli specificati. Il modulo 3 permette, invece, di valutare i valori di  $\theta_0$  e  $\theta_1$  tali da verificare i restanti vincoli specificati, al termine del periodo massimo di osservazione.

Il successivo **esempio applicativo (2)** mostra l'utilizzo dello strumento di supporto nella definizione dei parametri di progetto del piano di dimostrazione "ottimale" per tre distinte tipologie di unità, caratterizzate da una diversa numerosità e da diversi valori previsionali per la relativa caratteristica di affidabilità (tempo medio tra due guasti).

Per fissare le idee, riferiamoci ad un sottoinsieme delle unità minime che generalmente costituiscono la sezione di rilevazione di un impianto antincendio: rilevatori ottici, rilevatori termici e centralina di rilevazione.

Le schede riportate in Figura 6, relative a ciascuna tipologia di unità, riassumono i vincoli specificati ed i parametri di progetto dei piani di dimostrazione risultati dai tre moduli di calcolo sviluppati.

Supponiamo che la durata del periodo di pre-esercizio del sistema, periodo massimo per la dimostrazione dell'affidabilità delle sue unità minime, sia pari a 2 anni ( $T_{\max} = 17520h$ ).

Con riferimento al campione di 20 sensori termici, assumiamo come vincoli specifici del piano di dimostrazione i seguenti valori limite per i parametri di confidenza:  $\alpha_{\max} = 0.2000$ ,  $\beta_{\max} = 0.2000$ ,  $\theta_0 = 210000h$  e  $\theta_1 = 70000h$ . Il modulo di calcolo 1 è utilizzato per la definizione del parametro di valutazione della prova e del periodo minimo di osservazione, nel rispetto dei vincoli specificati; i risultati del calcolo sono: 2 eventi di guasto per l'accettazione dell'unità, con un periodo minimo di osservazione pari a  $T_{\min} = 14977h$ . I valori risultati per i parametri di confidenza,  $\alpha^* = 0.1729$  e  $\beta_{\max} = 0.2000$ , suggeriscono di utilizzare il modulo 2 per ottimizzare il piano di dimostrazione in termini di "protezione ad errori del 2° tipo". Mediante la definizione di un idoneo rapporto di forzatura, il modulo 2 mostra come estendendo il periodo di osservazione al valore  $T_{\min}^* = 15955h$ , intermedio tra il periodo minimo di osservazione risultato dal modulo 1 e la durata massima del periodo probatorio di pre-esercizio, risultano soddisfatti i vincoli specificati ed in particolare risulta:  $\beta^* = 0.1671 < \alpha^* = 0.1961$ . Il modulo 3 è utilizzato al fine di completare la valutazione delle informazioni significative, mediante la definizione del piano di dimostrazione relativo al periodo massimo di osservazione, a parità di criterio di accettazione della prova e nel rispetto dei vincoli  $\alpha_{\max} = 0.2000$  e  $\beta_{\max} = 0.2000$ . Dai risultati ottenuti è evidente come si riduca il parametro di confidenza ( $\beta^{**} = 0.1242$ ) associato al valore minimo della caratteristica di affidabilità ( $\theta_1 = 70000h$ ) e aumenti il valore massimo ( $\theta_0 = 228270h$ ) associato al vincolo definito per il relativo parametro di confidenza. Sulla base delle suddette informazioni, è possibile selezionare il piano di dimostrazione ritenuto più adeguato.

Lo strumento è utilizzato in maniera analoga per il campione di 5 sensori ottici e per le 3 centraline di rilevazione. Nel primo caso, il modulo 1 permette un primo dimensionamento dei parametri di progetto del piano di dimostrazione; utilizzando il modulo 2 per la sua ottimizzazione in termini di "protezione da errori del 2° tipo", risulta che la relativa condizione ( $\beta < \alpha$ ) è verificabile solo per un periodo di osservazione  $T_{\min}^* = 17988h$  maggiore del  $T_{\max}$  definito. Il modulo 3° è quindi utilizzato per ottimizzare il piano di dimostrazione in termini di "bilanciamento del test", al termine del periodo massimo di osservazione; i risultati del calcolo sono:  $\alpha^* = 0.1812$  e  $\beta^* = 0.1875$ .

Nel secondo caso, i risultati ottenuti mediante il modulo 1 mostrano la mancata verifica del vincolo relativo al parametro di confidenza  $\beta_{\max} = 0.2000$ . Mediante il modulo 2 è valutato il periodo minimo di osservazione necessario per il rispetto dei vincoli specificati; il valore risultato è pari a  $T_{\min}^* = 28557h$ , significativamente maggiore della durata prevista per il periodo di pre-esercizio del sistema. Il modulo 3 permette di definire il valore limite  $\theta_1 = 12280h$  che, a parità di criterio di accettazione e al termine del periodo massimo di osservazione, risulta verificato con una confidenza minore del valore limite specificato ( $\beta^{**} = 0.1999 < \beta_{\max}$ ).

Rilevatori termici		
Vincoli specificati		
Numero di unità (#)	$n$	20
Periodo massimo di osservazione (ore)	$T_{max}$	17520
Valore limite per la massima probabilità di errore del 1° tipo (#)	$a_{max}$	0.2000
Valore limite per la massima probabilità di errore del 2° tipo (#)	$\beta_{max}$	0.2000
Modulo 1		
Numero di guasti per accettazione (#)	$a$	2
Numero di guasti al rigetto (#)	$r$	3
MTBF massimo (ore)	$\theta_0$	210000
MTBF minimo (ore)	$\theta_1$	70000
Massima probabilità di errore del 1° tipo (#)	$\alpha$	0.1729
Massima probabilità di errore del 2° tipo (#)	$\beta$	0.2000
Periodo minimo di osservazione (h)	$T_{min}$	14977
Modulo 2		
Numero di guasti per accettazione (#)	$a$	2
Numero di guasti al rigetto (#)	$r$	3
MTBF massimo (ore)	$\theta_0$	210000
MTBF minimo (ore)	$\theta_1$	70000
Massima probabilità di errore del 1° tipo (#)	$\alpha^*$	0.1961
Massima probabilità di errore del 2° tipo (#)	$\beta^*$	0.1671
Periodo minimo di osservazione (h)	$T_{min}^*$	15955
Modulo 3		
Numero di guasti per accettazione (#)	$a$	2
Numero di guasti al rigetto (#)	$r$	3
MTBF massimo (ore)	$\theta_0$	228270
MTBF minimo (ore)	$\theta_1$	70000
Massima probabilità di errore del 1° tipo (#)	$\alpha^{**}$	0.2000
Massima probabilità di errore del 2° tipo (#)	$\beta^{**}$	0.1242
Periodo effettivo di osservazione (ore)	$T^{**}$	17520

Rilevatori ottici		
Vincoli specificati		
Numero di unità (#)	$n$	5
Periodo massimo di osservazione (ore)	$T_{max}$	17520
Valore limite per la massima probabilità di errore del 1° tipo (#)	$a_{max}$	0.2000
Valore limite per la massima probabilità di errore del 2° tipo (#)	$\beta_{max}$	0.2000
Modulo 1		
Numero di guasti per accettazione (#)	$a$	2
Numero di guasti al rigetto (#)	$r$	3
MTBF massimo (ore)	$\theta_0$	60000
MTBF minimo (ore)	$\theta_1$	20000
Massima probabilità di errore del 1° tipo (#)	$\alpha$	0.1729
Massima probabilità di errore del 2° tipo (#)	$\beta$	0.2000
Periodo minimo di osservazione (h)	$T_{min}$	17116
Modulo 2		
Numero di guasti per accettazione (#)	$a$	2
Numero di guasti al rigetto (#)	$r$	3
MTBF massimo (ore)	$\theta_0$	60000
MTBF minimo (ore)	$\theta_1$	20000
Massima probabilità di errore del 1° tipo (#)	$\alpha^*$	0.1909
Massima probabilità di errore del 2° tipo (#)	$\beta^*$	0.1739
Periodo minimo di osservazione (h)	$T_{min}^*$	17988
Modulo 3		
Numero di guasti per accettazione (#)	$a$	2
Numero di guasti al rigetto (#)	$r$	3
MTBF massimo (ore)	$\theta_0$	60000
MTBF minimo (ore)	$\theta_1$	20000
Massima probabilità di errore del 1° tipo (#)	$\alpha^{**}$	0.1812
Massima probabilità di errore del 2° tipo (#)	$\beta^{**}$	0.1875
Periodo effettivo di osservazione (ore)	$T^{**}$	17520

Centralina di rilevazione		
Vincoli specificati		
Numero di unità (#)	$n$	3
Periodo massimo di osservazione (ore)	$T_{max}$	17520
Valore limite per la massima probabilità di errore del 1° tipo (#)	$a_{max}$	0.2000
Valore limite per la massima probabilità di errore del 2° tipo (#)	$\beta_{max}$	0.2000
Modulo 1		
Numero di guasti per accettazione (#)	$a$	2
Numero di guasti al rigetto (#)	$r$	3
MTBF massimo (ore)	$\theta_0$	60000
MTBF minimo (ore)	$\theta_1$	20000
Massima probabilità di errore del 1° tipo (#)	$\alpha$	0.0590
Massima probabilità di errore del 2° tipo (#)	$\beta$	0.5113
Periodo minimo di osservazione (h)	$T_{min}$	17524
Modulo 2		
Numero di guasti per accettazione (#)	$a$	2
Numero di guasti al rigetto (#)	$r$	3
MTBF massimo (ore)	$\theta_0$	60000
MTBF minimo (ore)	$\theta_1$	20000
Massima probabilità di errore del 1° tipo (#)	$\alpha^*$	0.1733
Massima probabilità di errore del 2° tipo (#)	$\beta^*$	0.1994
Periodo minimo di osservazione (h)	$T_{min}^*$	28557
Modulo 3		
Numero di guasti per accettazione (#)	$a$	2
Numero di guasti al rigetto (#)	$r$	3
MTBF massimo (ore)	$\theta_0$	60000
MTBF minimo (ore)	$\theta_1$	12280
Massima probabilità di errore del 1° tipo (#)	$\alpha^{**}$	0.0590
Massima probabilità di errore del 2° tipo (#)	$\beta^{**}$	0.1999
Periodo effettivo di osservazione (ore)	$T^{**}$	17520

Figura 6 – Esempio applicativo 2

L'ultimo **esempio applicativo (3)** mostra l'utilizzo dello strumento di supporto per la valutazione "in tempo reale", durante il periodo probatorio di esercizio, dei valori "correnti" dei parametri di confidenza del piano di dimostrazione "ottimale", verificato sulla base del numero di guasti osservati. Consideriamo un sistema composto da 15 unità identiche, per il quale è stabilita la durata massima del periodo probatorio di pre-esercizio, pari a 2 anni ( $T_{max} = 17520h$ ). Assumiamo come vincoli specifici del piano di dimostrazione i seguenti valori limite per i parametri di confidenza:  $\alpha_{max} = 0.2000$ ,  $\beta_{max} = 0.2000$ ,  $\theta_0 = 100000h$  e  $\theta_1 = 40000h$ .

In via preliminare, con riferimento alla Figura 7, i moduli di calcolo 1 e 3 sono utilizzati per definire il piano di dimostrazione. Il modulo di calcolo 1 è utilizzato per la definizione del parametro di valutazione della prova e del periodo minimo di osservazione, nel rispetto dei vincoli specificati; i risultati del calcolo sono: 3 eventi di guasto per l'accettazione dell'unità, con un periodo minimo di osservazione pari a  $T_{min} = 14707h$ . Il modulo di calcolo 3 è utilizzato per valutare i parametri di confidenza relativi al piano di dimostrazione valutato, a parità di criterio di accettazione, al termine del periodo massimo di osservazione; i risultati del calcolo mostrano come si riduca il parametro di confidenza ( $\beta^{**} = 0,1071$ ) associato al valore limite minimo per la caratteristica di affidabilità ( $\theta_1 = 40000h$ ) e come aumenti il valore limite massimo ( $\theta_0 = 114430h$ ) a cui risulta associato un parametro di confidenza  $\alpha^{**} = \alpha_{max}$ ; tali informazioni suggeriscono di attendere il termine del periodo massimo di osservazione in quanto il piano di dimostrazione associato è caratterizzato da un valore significativamente minore (circa dimezzato) della massima probabilità di Errori del 2° tipo.

Modulo 1		
Dati in input		
Numero di unità (#)	$n$	15
Periodo massimo di osservazione (ore)	$T_{max}$	17520
MTBF massimo (ore)	$\theta_0$	100000
Rapporto $d = \theta_0/\theta_1$ (#)	$d$	2.50
MTBF minimo (ore)	$\theta_1$	40000
Valore limite per la massima probabilità di errore del 1° tipo (#)	$a_{max}$	0.2000
Valore limite per la massima probabilità di errore del 2° tipo (#)	$\beta_{max}$	0.2000
Passo temporale (ore)	$Dt$	10
Dati in output		
Numero di guasti per accettazione (#)	$a$	3
Numero di guasti al rigetto (#)	$r$	4
Massima probabilità di errore del 1° tipo (#)	$\alpha$	0.1819
Massima probabilità di errore del 2° tipo (#)	$\beta$	0.2000
Periodo minimo di osservazione (h)	$T_{min}$	14707

Modulo 3		
Dati in input		
Numero di unità (#)	$n$	15
Valore limite per la massima probabilità di errore del 1° tipo (#)	$a_{max}$	0.2000
Valore limite per la massima probabilità di errore del 2° tipo (#)	$\beta_{max}$	0.2000
Numero di guasti osservati	$a^{**}$	3
Periodo effettivo di osservazione (ore)	$T^{**}$	17520
Passo di incremento di $\theta_0$ (ore)	$D\theta_0$	10
Dati in output		
MTBF massimo (ore)	$\theta_0^{**}$	40000
MTBF minimo (ore)	$\theta_1^{**}$	114430
Massima probabilità di errore del 1° tipo (#)	$\alpha^{**}$	0.2000
Massima probabilità di errore del 2° tipo (#)	$\beta^{**}$	0.1071

Figura 7 –Esempio applicativo 3

Supponiamo che dopo 1 anno di osservazione siano stati osservati (e ritenuti addebitabili) 2 eventi di guasto per l'unità in oggetto.

In Figura 8 è mostrato l'utilizzo dei moduli di calcolo 2 e 3 per la valutazione dei parametri di confidenza del piano di dimostrazione "ottimale", verificato sulla base del numero di guasti osservati nel periodo effettivo di osservazione. Mediante il modulo 2, introducendo i vincoli relativi al numero di guasti ed al periodo effettivo di osservazione (mediante il parametro  $m$  posto pari a 0.5), è ottenuto il valore  $\beta^* = 0.2859$ , per un periodo di osservazione pari a  $T_{min}^* = 9860h$  necessario a verificare il vincolo di confidenza  $\alpha_{max} = 0.2000$  con riferimento ad un possibile rifiuto al 3 guasto occorso. In tal modo è verificato come, sulla base dei valori definiti per  $\theta_0$  e  $\theta_1$ , non è possibile rispettare il vincolo imposto per il parametro di confidenza  $\beta$ . Infine, mediante il modulo 3 sono valutati i valori di  $\theta_0$  e  $\theta_1$  che permettono di soddisfare i vincoli imposti su entrambi i parametri di confidenza  $\alpha$  e  $\beta$ . In tal modo è valutata la caratteristica minima di affidabilità  $\theta_1^{**} = 30700h$ , dimostrata sulla base del numero di eventi di guasto occorsi nel periodo effettivo di osservazione, nel rispetto del relativo vincolo di confidenza ( $\beta_{max} = 0.2000$ ).

Modulo 2		
Dati in input		
Numero di apparati utilizzati (#)	$n$	15
MTBF massimo (ore)	$\theta_0$	100000
MTBF minimo (ore)	$\theta_1$	40000
Multiplo del Periodo di osservazione (#)	$m$	0.5
Periodo di osservazione massimo (ore)	$T_{max}^*$	8760
Numero di guasti per accettazione (#)	$a^*$	2
Numero di guasti al rigetto (#)	$r^*$	3
Passo temporale (ore)	$Dt^*$	10
Confidenza su $\lambda^* - \beta^*l$ (#)	$c$	0.1000
Rapporto di forzatura (#)	$\mu$	1
Dati in output		
Massima probabilità di errore del 1° tipo (#)	$\alpha^*$	0.1859
Massima probabilità di errore del 2° tipo (#)	$\beta^*$	0.2859
Periodo minimo di osservazione (h)	$T_{min}^*$	9860

Modulo 3		
Dati in input		
Numero di unità (#)	$n$	15
Valore limite per la massima probabilità di errore del 1° tipo (#)	$\alpha_{max}$	0.20
Valore limite per la massima probabilità di errore del 2° tipo (#)	$\beta_{max}$	0.20
Numero di guasti osservati	$a^{**}$	2
Periodo effettivo di osservazione (ore)	$T^{**}$	8760
Passo di incremento di $\theta_0$ (ore)	$D\theta_0$	10
Dati in output		
MTBF massimo (ore)	$\theta_0^{**}$	100000
MTBF minimo (ore)	$\theta_1^{**}$	30700
Massima probabilità di errore del 1° tipo (#)	$\alpha^{**}$	0.1461
Massima probabilità di errore del 2° tipo (#)	$\beta^{**}$	0.1999

Figura 8 –Esempio applicativo 3

Mediante lo stesso esempio applicativo, è mostrato l'utilizzo dei moduli di calcolo 2 e 3 a supporto delle analisi conseguenti alla mancata accettazione dell'unità. Supponiamo che al termine del periodo massimo di osservazione siano stati osservati (e ritenuti addebitabili) 5 eventi di guasto; in tale scenario non è possibile accettare l'unità in oggetto. Con riferimento al Modulo 1 riportato in Figura 9, introducendo i vincoli relativi al numero di guasti (per accettazione) ed al periodo effettivo di osservazione (mediante il parametro  $m$  posto pari a 1), è stimato il periodo minimo di osservazione ( $T_{min} = 22883h$ ) che, in assenza di ulteriori eventi di guasto, permetterebbe di ritenere positiva la prova, nel rispetto dei vincoli definiti per i parametri di confidenza. Tale informazione può essere utilizzata per valutare l'opportunità di estendere il periodo probatorio di pre-esercizio del sistema. Mediante il modulo 3 sono valutati i valori di  $\theta_0$  e  $\theta_1$  che permettono di soddisfare i vincoli specificati per i parametri di confidenza  $\alpha$  e  $\beta$ . In tal modo è valutata la caratteristica minima di affidabilità  $\theta_1^{**} = 32240h$ , dimostrata sulla base del numero di eventi di guasto occorsi nel periodo (massimo) di osservazione, nel rispetto del relativo vincolo di confidenza ( $\beta_{max} = 0.2000$ ). Tale informazione può essere utilizzata per valutare il relativo impatto sulle caratteristiche RAMS del sistema complessivo.

Modulo 2		
Dati in input		
Numero di apparati utilizzati (#)	$n$	15
MTBF massimo (ore)	$\theta_0$	100000
MTBF minimo (ore)	$\theta_1$	40000
Multiplo del Periodo di osservazione (#)	$m$	1
Periodo di osservazione massimo (ore)	$T_{max}^*$	17520
Numero di guasti per accettazione (#)	$a^*$	5
Numero di guasti al rigetto (#)	$r^*$	4
Passo temporale (ore)	$Dt^*$	10
Confidenza su $\lambda^* - \beta^*l$ (#)	$c$	0.0100
Rapporto di forzatura (#)	$\mu$	1
Dati in output		
Massima probabilità di errore del 1° tipo (#)	$\alpha^*$	0.1336
Massima probabilità di errore del 2° tipo (#)	$\beta^*$	0.1436
Periodo minimo di osservazione (h)	$T_{min}^*$	22883

Modulo 3		
Dati in input		
Numero di unità (#)	$n$	15
Valore limite per la massima probabilità di errore del 1° tipo (#)	$\alpha_{max}$	0.20
Valore limite per la massima probabilità di errore del 2° tipo (#)	$\beta_{max}$	0.20
Numero di guasti osservati	$a^{**}$	5
Periodo effettivo di osservazione (ore)	$T^{**}$	17520
Passo di incremento di $\theta_0$ (ore)	$D\theta_0$	10
Dati in output		
MTBF massimo (ore)	$\theta_0^{**}$	100000
MTBF minimo (ore)	$\theta_1^{**}$	32240
Massima probabilità di errore del 1° tipo (#)	$\alpha^{**}$	0.0511
Massima probabilità di errore del 2° tipo (#)	$\beta^{**}$	0.20000

Figura 9 –Esempio applicativo 3

## 7. CONCLUSIONI

Nelle opere di ingegneria moderna, sempre più spesso è richiesto il monitoraggio delle performance di un sistema e l'allocazione delle responsabilità delle stesse tra i soggetti interessati: "fornitore" di ciascuna unità e "gestore" del sistema complessivo. Questa crescente esigenza impone il coinvolgimento e l'accostamento, a metodi e tecniche consolidate, di strumenti appartenenti ad altre discipline del sapere scientifico. Gli argomenti presentati in questo lavoro sono proposti come "trait d'union" tra le discipline puramente statistiche e la "best practice" ingegneristica.

La metodologia proposta per l'accettazione di un sistema con riferimento alle sue prestazioni RAMS è basata sulla dimostrazione delle caratteristiche di affidabilità dei componenti che lo costituiscono. In tal modo è possibile verificare l'attendibilità delle stime previsionali relative alle frequenze d'accadimento degli eventi pericolosi individuati e dei target di disponibilità raggiunti, in termini di "prestazioni limite" del sistema dimostrate durante la fase probatorio di pre-esercizio, con predefiniti livelli di confidenza.

Al fine di chiarire le potenzialità e i limiti del modello di dimostrazione adottato e di definire i criteri da seguire per il suo utilizzo, è stata proposta una trattazione sufficientemente rigorosa dei fondamenti di statistica matematica e di inferenza statistica di riferimento.

Al fine di supportare l'integrazione dei compiti relativi alla validazione delle caratteristiche RAMS del sistema nelle diverse fasi del suo ciclo di vita e di definire i piani di dimostrazione relativi alle unità minime che lo costituiscono con riferimento a diversi criteri di ottimizzazione, è stato sviluppato uno strumento software dedicato. L'analisi del ciclo di vita del sistema ha permesso di definire i requisiti essenziali dello strumento di supporto; il tool sviluppato è stato quindi descritto con riferimento al modello statistico di riferimento e ai dati di input / output relativi ai diversi moduli di calcolo in cui è articolato.

Sono state quindi definite le linee guida per l'applicazione del processo di dimostrazione, con riferimento a ciascuna fase del ciclo di vita del sistema ed ai possibili utilizzi di ciascun modulo.

Gli esempi applicativi prodotti hanno mostrato l'efficacia dell'approccio metodologico prodotto e validato lo strumento di supporto. Le informazioni rese disponibili dal tool, infatti, possono essere efficacemente utilizzate con finalità diverse nelle varie fasi del ciclo di vita del sistema, realizzando: la definizione dei vincoli specifici dei piani di dimostrazione, in fase di concezione e definizione dei requisiti del sistema; la definizione dei piani di dimostrazione "ottimali" - con riferimento ai criteri di "bilanciamento del test" e "protezione ad errori del 2° tipo" - in fase di progetto e implementazione; l'analisi "in tempo reale" dei dati di guasto acquisiti durante la fase probatoria di pre-esercizio; l'analisi dello scenario di mancata accettazione di una unità - sulla base del piano di dimostrazione predisposto - in termini di possibile estensione del periodo di osservazione e di valutazione della caratteristica minima di affidabilità dimostrata, nel rispetto dei vincoli di confidenza specificati.

Approfondimenti significativi delle tematiche affrontate nella presente memoria, sono relativi alla generalizzazione del modello statistico di riferimento sulla base di una distribuzione di Weibul per la densità di probabilità di guasto di ciascuna unità ed alla definizione di una metodologia efficace di integrazione dei criteri di accettazione del RAMS del sistema con i parametri di confidenza dei piani di dimostrazione delle caratteristiche di affidabilità delle singole unità che lo costituiscono.

## 9. ELENCO DEI SIMBOLI

$\alpha$	massima probabilità di errore del 1° tipo	$n$	numero di unità osservate
$\beta$	massima probabilità di errore del 2° tipo	$N$	numero di eventi di guasto verificatisi
$\theta$	tempo medio tra due guasti	$p$	probabilità di successo
$\lambda$	rateo di guasto	$P$	distribuzione cumulata di Poisson
$\mu$	parametro della distribuzione di Poisson	$R$	funzione affidabilità
$\tau$	tempo	$r$	numero limite di eventi di guasto
$f$	densità di probabilità di guasto	$T$	periodo di osservazione
$H_0$	ipotesi nulla	$x$	stimatore
$H_1$	ipotesi alternativa	$X$	variabile aleatoria
$k$	numero di eventi	$X_a$	regione di accettazione
$m$	numero di eventi di guasto	$X_c$	regione critica

## 10. BIBLIOGRAFIA

- [1] MIL-HDBK-781A, *Handbook for Reliability Test Methods, Plans, and Environments for Engineering, Development, Qualification, and Production* (1996).
- [2] A. Zanini, *Elementi di affidabilità*, Editrice Esculapio, Bologna (1991).
- [3] R. Billington, R.N. Allan, *Reliability evaluation of engineering systems: concept and techniques*, Plenum Press, NY (1983).