

AFFIDABILITA' E DISPONIBILITA' DI SISTEMI A RETE MEDIANTE APPLICAZIONI DI TECNICHE MONTE CARLO E AUTOMI CELLULARI

Paolo Vestrucci¹², Stefano La Rovere¹², Maria Sperandii²

¹ NIER Ingegneria S.p.A. - via Altabella, 3 - 40123 Bologna (Italy).

² Università degli studi di Bologna, Facoltà di Ingegneria - Viale del Risorgimento, 2 - 40136 Bologna (Italy).

SOMMARIO

Lo scopo della memoria è riportare i risultati avuti dalla applicazione ad opportuni casi esemplificativi di algoritmi di calcolo sviluppati per la stima delle caratteristiche di affidabilità e disponibilità di “sistemi a rete”. Esempi tipici di tale tipologia di sistemi sono le reti per la distribuzione di fluidi (es: teleriscaldamento) e le reti elettriche di trasmissione dell’energia [1], [2]. A tal fine, tecniche Monte Carlo sono integrate con un adeguato modello ad Automi Cellulari [3]. In generale, l’analisi delle caratteristiche di affidabilità e/o disponibilità mediante simulazione Monte Carlo consiste nel generare un “cammino casuale” tra i possibili stati del sistema [4], [5]. In particolare, è stato utilizzato il metodo Monte Carlo Indiretto che consiste nell’estrarre il tempo di transizione del sistema e, indipendentemente, il componente responsabile poiché interessato dall’evento di guasto o riparazione. Il problema della verifica dell’esistenza di una connessione sorgente-utilizzatore è stato affrontato mediante lo sviluppo di un modello ad Automi Cellulari, integrato con tecniche Monte Carlo per il campionamento dei guasti e delle riparazioni delle connessioni della rete. Aggiornata la configurazione del sistema, mediante il modello ad Automi Cellulari è verificato lo stato attivo / non attivo di ciascun nodo utilizzatore. In alternativa, l’applicazione di tecniche tradizionali richiederebbe l’identificazione sistematica, per ciascun nodo utilizzatore, dei possibili percorsi che lo connettono alla sorgente. L’adozione di tecniche di riduzione della varianza è necessaria ogni qualvolta i tassi di transizione (in generale i tassi di guasto) dei componenti del sistema risultano bassi con riferimento al tempo di missione specificato (condizione di “eventi rari”). Per la stima dell’indisponibilità del sistema, inoltre, l’applicazione di tecniche di riduzione della varianza è necessaria per agevolare il campionamento degli eventi di guasto multiplo, causa dell’indisponibilità (non raggiungibilità) di nodi utilizzatori caratterizzati da connessioni ridondanti con i nodi adiacenti.

1. INTRODUZIONE

Oggetto della presente memoria è l’analisi delle caratteristiche di affidabilità e disponibilità di sistemi a rete: sistemi distribuiti, generalmente caratterizzati da una struttura ad anelli chiusi (maglie), con un certo numero di nodi “Sorgente” e nodi “Utilizzatori”. Se da un lato il numero di maglie aumenta l’affidabilità e la disponibilità del servizio (elevata ridondanza), garantendo più percorsi di alimentazione per ciascuna utenza, dall’altro è un fattore che aumenta enormemente la complessità dell’analisi in quanto il sistema può assumere un numero molto elevato di configurazioni di funzionamento differenti [1].

L’architettura di un sistema a rete è specificata mediante la definizione delle connessioni esistenti tra i singoli nodi. In generale, ciascuna connessione può essere oggetto di guasto (e successiva riparazione), modificando in tal modo la configurazione della rete e determinando potenzialmente l’indisponibilità (la non raggiungibilità) di uno o più nodi (supposti non oggetto di malfunzionamento proprio).

Lo studio delle caratteristiche di affidabilità e disponibilità permette di soddisfare molteplici esigenze [1]: produrre stime previsionali sulla “continuità” del servizio offerto dal sistema a ciascuna utenza; offrire un supporto nelle fasi di progettazione dell’infrastruttura, al fine di adottare una adeguata configurazione (magliatura); offrire un supporto, sempre di carattere progettuale, durante la vita del sistema, in occasione di modifiche o potenziamenti; identificare le combinazioni di guasti che compromettono la funzionalità del sistema (Minimal Cut-Set) e i componenti “critici” in termini di impatto del relativo guasto sulle prestazioni complessive.

Le tecniche ed i metodi applicabili per l’analisi di affidabilità e di disponibilità di sistemi a reti sono molteplici e possono essere raggruppate in due categorie principali: metodi analitici (Diagrammi a blocchi di affidabilità, Fault Tree Analysis, Metodi di Markov) e metodi basati su un approccio simulativo.

Alla seconda categoria appartengono i metodi di simulazione Monte Carlo che stimano le caratteristiche di affidabilità e disponibilità attraverso processi che simulano, in maniera casuale, l'evoluzione del sistema. L'idea base del metodo è quella di simulare successivamente e indipendentemente un gran numero di storie, ciascuna delle quali descriva un andamento temporale dello stato del sistema dall'istante iniziale fino al tempo di missione [6],[7]. Ciascuna storia riproduce il caso di un sistema che subisce un "destino" particolare tra tutti i possibili a priori, simulato con un cammino di Markov nello spazio delle fasi mediante estrazione di numeri casuali da opportune distribuzioni note. L'estrazione di numeri casuali consente di individuare sequenze di guasti e successive riparazioni dei componenti del sistema, fino al tempo di missione; per la storia considerata si "accumulano" le grandezze di interesse (es. stato di non funzionamento del sistema o dei singoli componenti) mediante opportuni contatori; eseguito un numero sufficiente di storie, dal contenuto dei contatori sono ottenute le stime statistiche delle relative grandezze [5].

Ovviamente, ogni tecnica presenta vantaggi e svantaggi che la rendono adatta in alcune situazioni e non adatta in altre. Con riferimento ad un sistema a rete, se la sua configurazione non è particolarmente complessa è possibile calcolarne le caratteristiche di affidabilità / disponibilità utilizzando tecniche analitiche, mediante l'identificazione sistematica, per ciascun nodo utilizzatore, dei possibili percorsi che lo connettono alla sorgente (Funzione di Sistema). Nel caso di sistemi composti da elementi tra loro connessi in una struttura a rete fortemente magliata, la valutazione delle caratteristiche di affidabilità e disponibilità può essere efficacemente realizzata mediante un modello basato su *Automi Cellulari* [3].

Nella applicazione proposta, i guasti e le riparazioni delle connessioni della rete sono simulati con un approccio *Monte Carlo Indiretto*, estraendo indipendentemente il tempo della transizione del sistema e il componente interessato dall'evento [8]. Aggiornata la configurazione del sistema, mediante il modello ad *Automi Cellulari* è verificato lo stato attivo / non attivo di ciascun nodo utilizzatore: l'applicazione di una regola locale opportunamente definita permette, infatti, la verifica dell'esistenza di almeno un percorso costituito da connessioni funzionanti con uno dei nodi sorgente [3].

Sia per la stima dell'inaffidabilità che per la stima dell'indisponibilità è necessario ricorrere a tecniche di riduzione della varianza nel caso di valori dei tassi di guasto delle connessioni significativamente bassi rispetto al tempo di missione definito per il sistema. Per la stima dell'indisponibilità, l'applicazione di tecniche forzatura è inoltre necessaria per agevolare il campionamento degli eventi di guasto multiplo, causa dell'indisponibilità di nodi utilizzatori caratterizzati da connessioni multiple (ridondanti) con i nodi adiacenti. L'algoritmo di calcolo è stato sviluppato previa definizione di adeguate strategie di riduzione della varianza per la stima dell'affidabilità e della disponibilità del sistema: per la stima dell'inaffidabilità è stata applicata la "forzatura del tasso di transizione (tasso di guasto)"; per la stima dell'indisponibilità sono state applicate la "forzatura della transizione del sistema" entro il tempo di missione e la "forzatura della transizione specifica", in termini di guasto o riparazione di una individuata connessione.

2. ANALISI DI DISPONIBILITA' DI SISTEMI A RETE MEDIANTE AUTOMI CELLULARI

Gli *Automi Cellulari* costituiscono una classe generale di modelli matematici in grado di riprodurre, con semplici regole, il comportamento dinamico di sistemi complessi. La dinamica degli *Automi Cellulari* si sviluppa in uno spazio di stato costituito da una matrice di celle discreta ed omogenea: tutte le celle siano caratterizzate dalle medesime proprietà. La singola cella è descritta da una variabile di stato che può assumere solo un numero finito di valori discreti dello spazio locale. La sua evoluzione è influenzata dalle celle contigue, appartenenti alla "regione di vicinato", che interagiscono con essa. Tale interazione è regolata da una funzione di transizione, identica per tutte le celle ed invariante nel tempo. Il valore della variabile di stato è aggiornato ad ogni iterazione sulla base dei valori assunti al passo corrente dalla cella stessa e da quelle vicine. Un passo di aggiornamento è completo quando la funzione di transizione è applicata simultaneamente a tutte le celle della matrice: si definisce, così, il nuovo stato complessivo del sistema [9].

Con riferimento all'analisi di sistemi a rete, un modello ad *Automi Cellulari* può essere utilizzato per verificare l'esistenza di una connessione tra uno o più *nodi sorgente* S e ciascun *nodo utilizzatore* U [3].

La regola locale di transizione è costituita da una funzione logica di tipo OR: "se almeno una delle celle della regione di vicinato è attiva, allora anche la cella considerata passa allo stato attivo o vi rimane se era già attiva al passo precedente" [3].

Per verificare l'esistenza di una connessione S-U, l'Automa Cellulare propaga localmente l'informazione da un nodo all'altro, aggiornando lo stato di ogni cella in base al valore assunto dalle celle appartenenti alla regione di vicinato. Il processo termina quando tutti i nodi utilizzatori risultano attivi ovvero, in generale, quando si raggiunge un "punto di stagnazione" (non si modifica lo stato attivo / non attivo dei nodi per successivi passi di aggiornamento).

Al variare della configurazione del sistema a fronte del guasto / riparazione di una delle connessioni, risulta in generale modificata la regione di vicinato di un sottoinsieme di nodi; l'applicazione del modello ad Automi Cellulari permette quindi di verificare, per ciascun nodo utilizzatore, se l'evento in oggetto ne ha determinato il cambiamento di stato (attivo / non attivo).

3. METODI DI SIMULAZIONE MONTE CARLO E TECNICHE DI RIDUZIONE DELLA VARIANZA

3.1 Metodi di simulazione Monte Carlo

Esistono diversi metodi di simulazione Monte Carlo che possono essere raggruppati in due macro famiglie: Monte Carlo Diretto e Monte Carlo Indiretto

Consideriamo un sistema costituito da componenti a due stati (guasto, funzionante) supposti non riparabili e riferiamoci alla stima delle sue caratteristiche di affidabilità. Il metodo diretto consiste nel campionare, per ogni componente, il relativo tempo di transizione così da ottenere una sequenza, in ordine crescente, dei guasti che avvengono durante una simulazione della storia del sistema, entro il tempo di missione definito [10]. Il metodo Monte Carlo Indiretto consiste nell'estrarre il tempo di transizione del sistema (guasto di uno dei componenti) e, indipendentemente, il componente responsabile della transizione stessa.

3.2 Tecniche di riduzione della varianza

Lo scopo delle Tecniche di riduzione della varianza è ridurre la varianza associata all'osservazione della variabile aleatoria in oggetto ovvero, ridurre la dispersione associata ai valori osservati per tale variabile.

In una simulazione, gli eventi più ricorrenti sono quelli che più spesso vengono campionati, al contrario degli "eventi rari", simulati meno frequentemente.

Mediante tecniche di Importance Sampling, o Campionamento d'Importanza, è operata una distorsione della funzione densità di probabilità di transizione del sistema / componente in modo da concentrare il campionamento proprio in quelle aree della distribuzione dove altrimenti risulterebbe meno frequente.

3.2.1 Forzatura del tasso di transizione

La tecnica di riduzione della varianza, proposta per la stima delle caratteristiche di affidabilità di un sistema a rete consiste nella "forzatura" del tasso di transizione (guasto) dei componenti.

Consideriamo un sistema costituito da componenti a due stati (guasto / funzionante), supposti non riparabili, che al tempo t_k subisca la k -esima transizione, che lo porta nello stato k ; assumiamo una distribuzione esponenziale per la densità di probabilità di guasto di ciascun componente (pdf).

Indichiamo con $\lambda_{k_{tot}}$ il tasso di transizione totale del sistema nello stato k , dato dalla somma dei tassi di guasto dei componenti ancora funzionanti nello stato k e con $\lambda_{k_{tot}}^*$ il relativo tasso di transizione "forzato". Le seguenti espressioni forniscono la funzione cumulata F , il tempo (t_{k+1}) a cui avviene la successiva transizione ($k+1$), il relativo peso (u_{k+1}) calcolato come rapporto tra la pdf "naturale" e la pdf "forzata" ed il peso complessivo associato alla storia (w_{k+1}) [11]:

$$F(t_k) = 1 - \exp(-\lambda_{k_{tot}} t_k) = \xi \quad \Rightarrow \quad t_{k+1} = t_k - \frac{\log(1-\xi)}{\lambda_{k_{tot}}^*}$$

$$u_{k+1} = \frac{pdf}{pdf^*} = \frac{\lambda_{k_{tot}} \exp(-\lambda_{k_{tot}} (t_{k+1} - t_k))}{\lambda_{k_{tot}}^* \exp(-\lambda_{k_{tot}}^* (t_{k+1} - t_k))} = \frac{\lambda_{k_{tot}}}{\lambda_{k_{tot}}^*} \exp((\lambda_{k_{tot}}^* - \lambda_{k_{tot}})(t_{k+1} - t_k)) \quad (1)$$

$$\omega_{k+1} = u_{k+1} \omega_k = \left(\frac{\lambda_{k_{tot}}}{\lambda_{k_{tot}}^*} \exp((\lambda_{k_{tot}}^* - \lambda_{k_{tot}})(t_{k+1} - t_k)) \right) \omega_k$$

Nel caso generale in cui è realizzata una diversa forzatura per i tassi di transizione dei diversi componenti, il peso associato alla storia è dato dalla (2), che generalizza l'espressione (1). Il termine introdotto, associato ad una transizione del sistema dovuta al guasto del componente i-esimo, è infatti nullo nel caso in cui tutti i tassi di transizione “forzati” siano ottenuti dai relativi tassi di transizione “natural” mediante un medesimo fattore moltiplicativo.

$$u_{k+1} = \frac{\lambda_{k_{tot}}}{\lambda_{k_{tot}}^*} \exp((\lambda_{k_{tot}}^* - \lambda_{k_{tot}})(t_{k+1} - t_k)) \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_i^*} \times \frac{\lambda_{k_{tot}}^*}{\lambda_{k_{tot}}} \right)_{k+1} = \frac{\lambda_i}{\lambda_i^*} \exp((\lambda_{k_{tot}}^* - \lambda_{k_{tot}})(t_{k+1} - t_k)) \quad (2)$$

L'applicazione della tecnica di forzatura del tasso di transizione può, in linea generale, determinare una riduzione o un aumento della varianza associata alla osservazione della variabile aleatoria in oggetto (affidabilità o disponibilità).

Il problema dell'ottimizzazione della forzatura del tasso di transizione in termini di minimizzazione della varianza è stato efficacemente affrontato per la stima dell'affidabilità di un componente non riparabile [11]: la condizione di riduzione della varianza è soddisfatta per un definito range di valori e risulta massima in corrispondenza di un definito valore del parametro di distorsione (prodotto tra il tasso di guasto ed il tempo di missione). Mediante soluzione numerica della condizioni di massima riduzione della varianza (minimo momento secondo) è stata ottenuta una relazione empirica per il calcolo del parametro di distorsione ottimale [11], utilizzata in uno dei successivi esempi applicativi.

Per concludere, il seguente esempio numerico mostra come la tecnica di riduzione della varianza in oggetto sia efficacemente applicabile anche per la stima dell'indisponibilità di un sistema composto da componenti riparabili, mediante forzatura dei soli tassi di guasto.

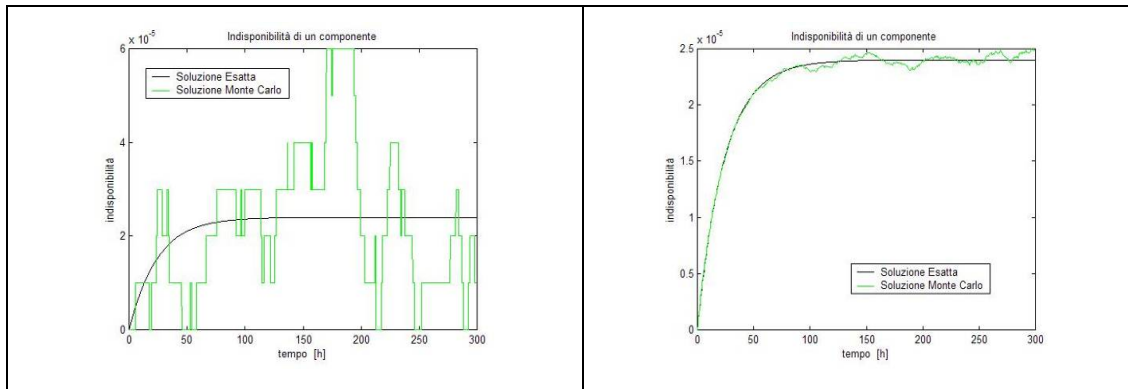


Figura 1. Indisponibilità mediante Monte Carlo Crudo e Forzato con $\lambda = 10^{-6} \text{ [h}^{-1}\text{]}$

3.2.2 Forzatura del Guasto Certo

Tale tecnica di riduzione della varianza consiste nel modificare la densità (ovvero la relativa funzione cumulativa) di probabilità di transizione del sistema, in modo da avere sicuramente una transizione entro il tempo di missione definito.

Con riferimento alla figura 2, l'estrazione di un numero casuale (ξ) corrisponde, secondo la distribuzione cumulativa $F^*(t)$, ad un istante di tempo compreso nell'intervallo $[0, T_M]$.

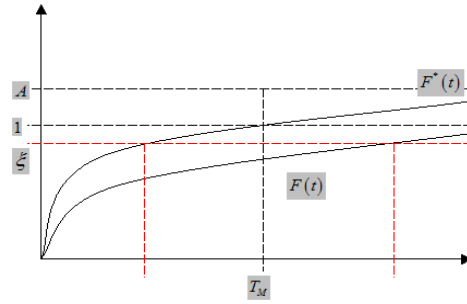


Figura 2. Forzatura del Guasto Certo

Considerando una distribuzione esponenziale per la funzione densità di probabilità di transizione (guasto), si ha per il tempo a cui avviene la successiva transizione ($k+1$), “forzata” ad accadere nel tempo $T_M - t_k$:

$$t_{k+1} = t_k - \frac{1}{\lambda} \ln \left[1 - \xi \left(1 - e^{-\lambda(T_M - t_k)} \right) \right] \quad (3)$$

Il peso della transizione, calcolato come rapporto tra la pdf “naturale” e la pdf “forzata”, è dato dal rapporto [5]:

$$u_{k+1} = \frac{f(t_{k+1})}{f^*(t_{k+1})} = \lambda e^{-\lambda(t_{k+1} - t_k)} \frac{1 - e^{-\lambda(T_M - t_k)}}{\lambda e^{-\lambda(t_{k+1} - t_k)}} = 1 - e^{-\lambda(T_M - t_k)} \quad (4)$$

3.2.3 Forzatura della Transizione Specifica

Tale tecnica di riduzione della varianza consiste nel modificare le densità di probabilità di transizione dei componenti del sistema (in generale, i tassi di guasto e riparazione dei singoli componenti, supposti riparabili).

Con riferimento al metodo Monte Carlo Indiretto, tale tecnica è applicata attribuendo una uguale probabilità che una transizione del sistema (indipendentemente campionata sulla base del tasso di transizione totale) sia dovuta al guasto di uno specifico componente ovvero alla riparazione di un componente precedentemente oggetto di guasto. Sono in tal modo favoriti gli eventi più rari (eventi di guasto con basse probabilità e guasti multipli) che risulterebbero di difficile campionamento.

Consideriamo un sistema di nc componenti e sia λ_i il tasso di transizione del componente i -esimo nello stato K del sistema. La funzione densità di probabilità naturale associata alla estrazione del componente i -esimo è data da $pdf = \frac{\lambda_i}{\lambda_{k_{tot}}}$, dove $\lambda_{k_{tot}}$ è il tasso di transizione totale del sistema nello stato k , dato dalla

somma dei tassi di transizione dei singoli componenti (tasso di guasto dei componenti funzionanti e tasso di riparazione dei componenti guasti).

In Figura 3 è rappresentata la funzione (cumulativa) di probabilità; l'estrazione del componente i -esimo è determinata dall'estrazione di un numero casuale compreso nel relativo intervallo.



Figura 3. Forzatura del Guasto Certo

La forzatura della transizione specifica è realizzata ripartendo l'intervallo $[0,1]$ in sottointervalli di uguale ampiezza. La funzione densità di probabilità distorta associata alla estrazione di un qualsiasi componente è data da: $pdf^* = \frac{1}{nc}$.

Il peso della transizione, calcolato come rapporto tra la pdf “naturale” e la pdf “forzata”, è dato dal rapporto:

$$u_{k+1} = \frac{pdf}{pdf^*} = \frac{\left(\lambda_i / \lambda_{k_{tot}} \right)}{(1/nc)} = nc \frac{\lambda_i}{\lambda_{k_{tot}}} \quad (5)$$

4. ESEMPI APPLICATIVI

Esempio 1

Come primo esempio consideriamo il sistema a rete di figura 4. Per fissare le idee, riferiamoci ad una rete di alimentazione elettrica caratterizzata da una singola maglia (es. rete elettrica in media tensione), in cui 1 nodo sorgente alimenta 4 utenze. L'analisi in oggetto non comprende la valutazione delle caratteristiche di “Adeguatezza” (capacità di far fronte ad una data richiesta di energia / potenza elettrica, in condizioni di guasto) e “Sicurezza” (capacità di garantire una fornitura “stabile”, in condizioni di guasto) del Sistema.

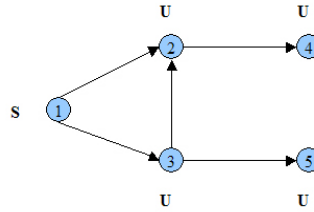


Figura 4. Esempio di sistema a rete a 5 nodi (1 nodo sorgente e 4 nodi utilizzatori)

Siano:

Tempo di Missione: $T_M = 40$ [h],

Numero di simulazioni Monte Carlo: $ns = 4000$,

Tasso di Guasto: $\lambda_{23} = 10^{-3}$ [h^{-1}]; altre connessioni $\lambda = 10^{-5}$ [h^{-1}].

In figura 5 sono mostrati i risultati avuti per l'inaffidabilità del sistema, ovvero di ciascun nodo utilizzatore, mediante l'applicazione dell'algoritmo di calcolo sviluppato. La soluzione teorica è il risultato della applicazione di tecniche analitiche tradizionali (Reliability Block Diagram o, equivalentemente, Fault Tree Analysis) e richiede l'identificazione delle funzioni di sistema, riferite a ciascun nodo utilizzatore.

In particolare, il caso (a) è relativo alla applicazione del metodo MonteCarlo (Indiretto) “crudo”; dal relativo grafico si osserva come i bassi valori dei tassi di guasto rendono nullo il campionamento dei guasti multipli, responsabili della mancata connessione del nodo 2 con la sorgente; per i restanti nodi la simulazione non è comunque tale da avere una stima soddisfacente dell'indisponibilità.

I casi (b) e (c) sono relativi alla applicazione di tecniche di riduzione della varianza associata mediante forzatura del tasso di transizione (guasto). Nel caso (b) è applicato un uguale fattore moltiplicativo (100) al tasso di guasto di ciascuna connessione; nel caso (c) la forzatura è “ottimizzata” in termini di massima riduzione della varianza [4] (il peso associato a ciascuna transizione è valutato mediante l'espressione (2)).

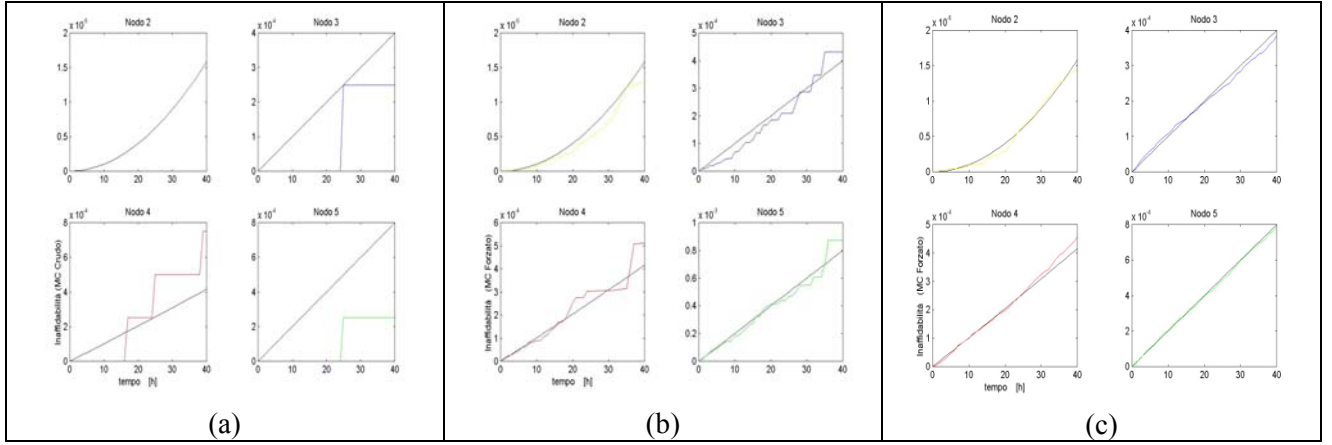


Figura 5. Esempio 1: Inaffidabilità del sistema mediante Monte Carlo Indiretto Crudo (a) e Forzato (b) e (c)

Esempio 2

Anche per il secondo esempio consideriamo il sistema a rete di figura 4. Siano:

Tempo di Missione: $T_M = 200$ [h],

Numero di simulazioni Monte Carlo: $ns = 50000$,

Tassi di Guasto: $\lambda = 10^{-5}$ [h^{-1}] e Tassi di Riparazione: $\mu = 1/24$ [h^{-1}].

In figura 6 sono mostrati i risultati avuti per l'indisponibilità del sistema, ovvero di ciascun nodo utilizzatore, mediante l'applicazione dell'algoritmo di calcolo sviluppato.

In particolare, il caso (a) è relativo alla applicazione del metodo Monte Carlo (Indiretto) "crudo"; dal relativo grafico si osserva come i bassi valori dei tassi di guasto rendono nullo il campionamento dei guasti multipli, responsabili della mancata connessione del nodo 2 con la sorgente; per i restanti nodi la simulazione non è comunque tale da avere una stima soddisfacente dell'indisponibilità.

Il caso (b) è relativo alla applicazione integrata delle tecniche di riduzione della varianza mediante forzatura della transizione del sistema entro il tempo di missione e mediante forzatura della transizione specifica, in termini di uguale probabilità di guasto / riparazione delle diverse connessioni.

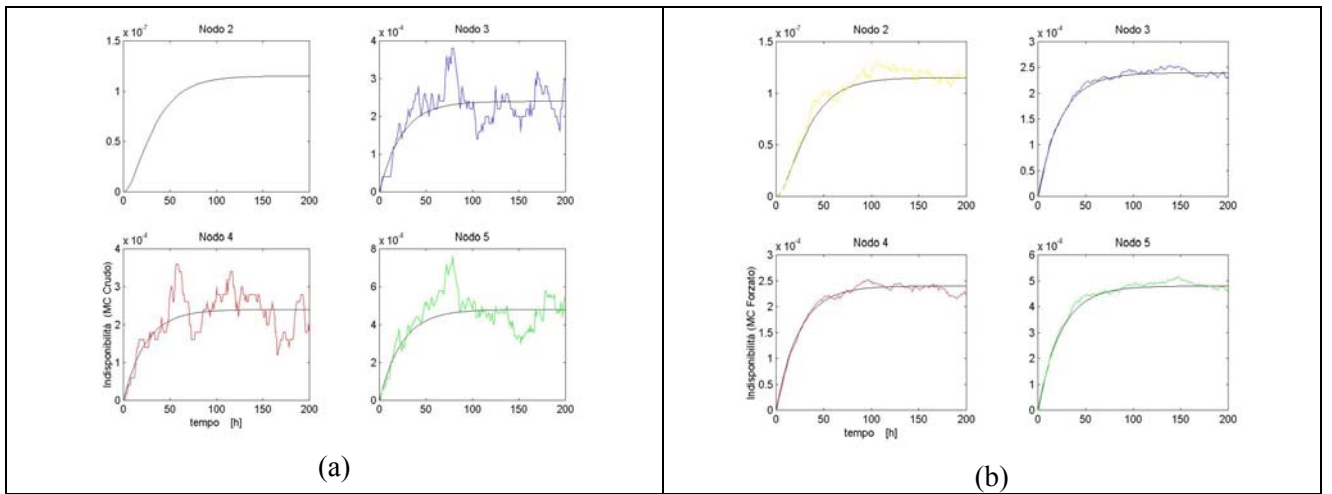


Figura 6. Esempio 2: Indisponibilità del sistema mediante Monte Carlo Indiretto Crudo (a) e Forzato (b)

L'algoritmo di calcolo sviluppato per l'applicazione del metodo Monte Carlo Indiretto Forzato, finalizzato alla stima dell'indisponibilità di sistemi a rete, procede attraverso i passi di seguito descritti:

- 1) inizializzazione del contatore delle storie Monte Carlo: $k = 0$;
- 2) inizializzazione variabili temporali: $T_t = 0$ tempo di transizione ;
 $T = 0$ variabile per aggiornamento asse temporale ;
- 3) inizializzazione del contatore indisponibilità: $c_i = 0$ per ogni nodo utilizzatore i ;
- 4) inizializzazione dei pesi dovuti alla forzatura: $w = 0, b = 0, u = 1$;
- 5) calcolo del tasso di transizione del sistema: $\lambda_{tot} = \sum_i \lambda_i$ dove λ_i è il tasso di transizione (guasto / riparazione) del componente i -esimo ;
- 6) estrazione della connessione che determina la transizione del sistema, interessata da un guasto o da una riparazione in relazione al suo stato “corrente, e calcolo del relativo peso”: $u = nc \frac{\lambda_i}{\lambda_{tot}}$;
 estrazione del tempo di transizione del sistema e calcolo del relativo peso: $T_t = 1 - \frac{\log(1 - \xi \times b)}{\lambda_{tot}}$,
 $b = 1 - e^{-\lambda_{tot}(T_M - T)}$ in caso di guasto e $b = 1$ in caso di riparazione della connessione;
- 7) aggiornamento della matrice di stato della rete, della matrice dei tassi di transizione;
- 8) calcolo del peso complessivo dovuto alle due tecniche di riduzione della varianza: $w = w \times b \times u$;
- 9) ricerca dei nodi utilizzatori non attivi mediante algoritmo Automi Cellulari: per ogni nodo i verifica dell'esistenza di un nodo j attivo appartenente alla sua “regione di vicinato”;
- 10) aggiornamento dei contatori di indisponibilità dei nodi: $c_i = c + w$;
- 11) se $T_t \leq T_M$ allora $T = T_t$ e si torna al punto 5;
- 12) se $k < ns$ (con ns = numero di storie Monte Carlo) si torna al punto 2;
- 13) calcolo dell'indisponibilità: $U = c / ns$

L'algoritmo sopra riportato è relativo alla applicazione integrata delle tecniche di forzatura del “guasto certo” e “ della transizione specifica”. In figura 7 sono mostrati i risultati avuti dall'applicazione singola di tali tecniche di riduzione della varianza. In particolare, il caso (a) è relativo alla applicazione della forzatura “della transizione specifica”; il (b) è relativo alla applicazione della forzatura del “guasto certo”.

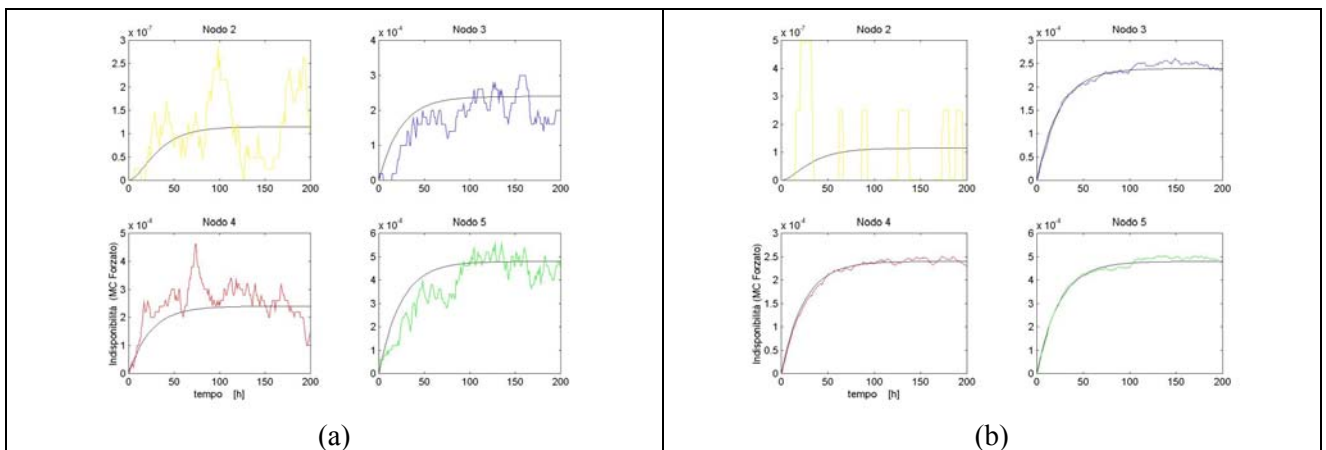


Figura 7. Esempio 2: Indisponibilità del sistema mediante Forzatura della transizione specifica (a) e Forzatura del Guasto Certo (b)

L'applicazione delle sola tecnica di Forzatura del guasto certo permette una generale riduzione della varianza associata alla stima dell'indisponibilità di ciascun nodo (utilizzatore) del sistema a rete. Tuttavia, rimane non soddisfacente la stima dell'indisponibilità del nodo 2, caratterizzato da due percorsi in ridondanza che lo connettono con la sorgente. L'applicazione delle sola tecnica di Forzatura della transizione specifica favorisce il campionamento di guasti multipli, come evidente dalla migliore stima dell'indisponibilità del nodo 2; nel complesso, però, non risulta una stima soddisfacente dell'indisponibilità dei nodi utilizzatori. Applicando in modo integrato le due tecniche di riduzione della varianza si ottengono i risultati mostrati in figura 5.b; è evidente un miglioramento sostanziale per la stima dell'indisponibilità di tutti i nodi della rete, compreso il nodo con percorsi in ridondanza.

Esempio 3

Gli algoritmi di calcolo sviluppati per la stima dell'inaffidabilità e dell'indisponibilità sono applicati al sistema a rete riportato in figura 8, caratterizzato da una configurazione più complessa in termini di numero di nodi e connessioni e livello di magliatura. Per fissare le idee, riferiamoci ad una rete di teleriscaldamento in cui 1 nodo sorgente alimenta 11 utenze. L'analisi in oggetto non comprende la valutazione delle caratteristiche di "Adeguatezza" del Sistema (capacità di far fronte ad una data richiesta di energia / potenza termica, in condizioni di guasto).

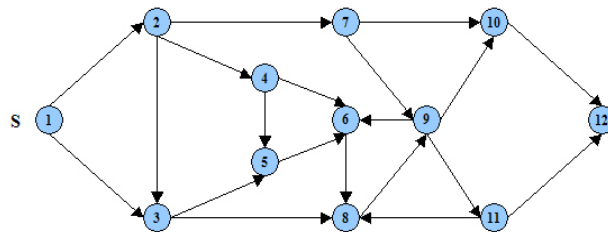


Figura 8. Esempio di sistema a rete magliata a 12 nodi (1 nodo sorgente e 11 nodi utilizzatori)

Siano:

Tempo di Missione: $T_M = 400 \text{ [h]}$,

Numero di simulazioni Monte Carlo: $ns = 100000$,

Tassi di Guasto: $\lambda = 10^{-5} \text{ [h}^{-1}\text{]}$ e Tassi di Riparazione: $\mu = 1/24 \text{ [h}^{-1}\text{]}$.

Stima dell'Inaffidabilità

Applichiamo l'algoritmo di calcolo sviluppato per la stima dell'inaffidabilità del sistema.

In figura 9 sono riportati i risultati avuti per i nodi 2, 3, 4, 7, 9 e 10 di cui è calcolata la soluzione analitica (a) e per i restanti nodi (b).

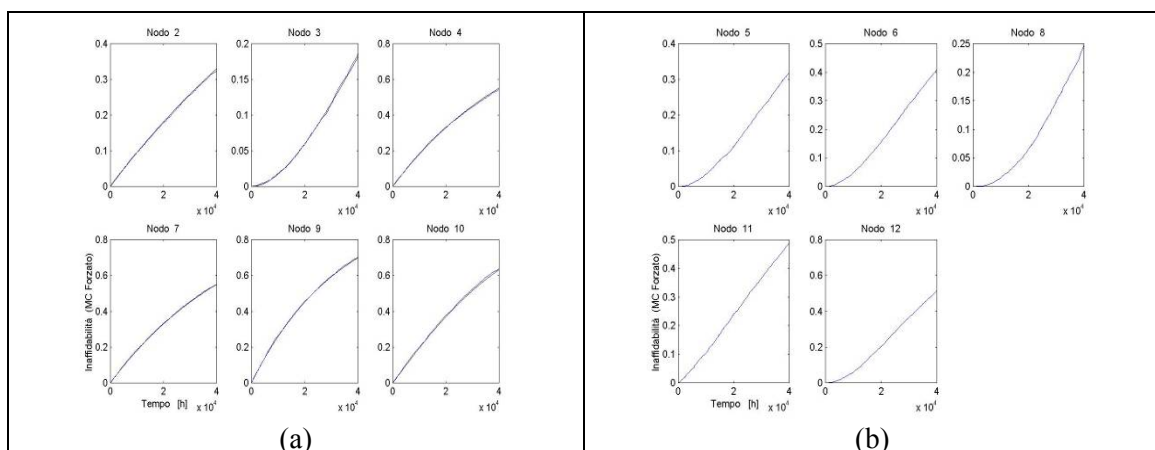


Figura 9. Esempio 3: Inaffidabilità del sistema

Stima dell'Indisponibilità

Applichiamo l'algoritmo di calcolo sviluppato per la stima dell'indisponibilità del sistema. Ai fini della riduzione della varianza sono utilizzate, in modo integrato, le tecniche di forzatura del “guasto certo” e “della transizione specifica”. In figura 10 sono riportati i risultati avuti per i nodi 2, 3, 4, 7, 9 e 10 di cui è calcolata la soluzione analitica (a) e per i restanti nodi (b).

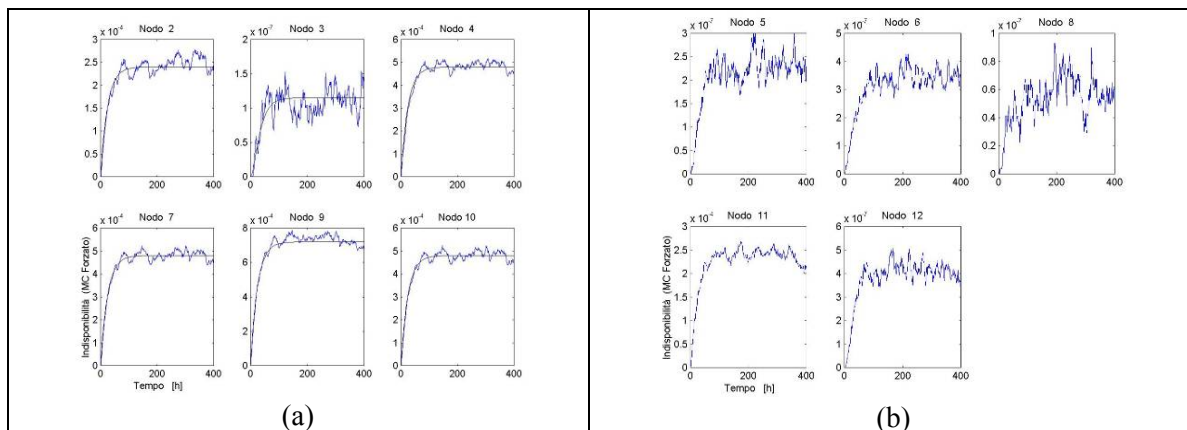


Figura 10. Esempio 3: Indisponibilità del sistema

Esempio 4

Come esempio finale consideriamo il sistema di figura 11. Per fissare le idee, riferiamoci ad una rete di alimentazione elettrica caratterizzata da uno sviluppo radiale (es. rete elettrica in bassa tensione), in cui 1 nodo sorgente alimenta 6 utenze.

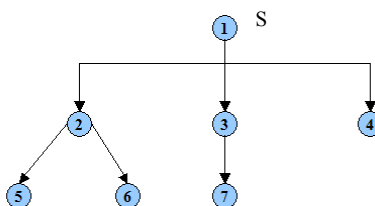


Figura 11. Esempio di sistema a rete radiale a 7 nodi (1 nodo sorgente e 6 nodi utilizzatori)

Siano:

Tempo di Missione: $T_M = 400$ [h] caso (a), $T_M = 40$ [h] caso (b),

Numero di simulazioni Monte Carlo: $ns = 100000$,

Tassi di Guasto: $\lambda = 10^{-5}$ [h^{-1}], Tassi di Riparazione: $\mu = 1/24$ [h^{-1}].

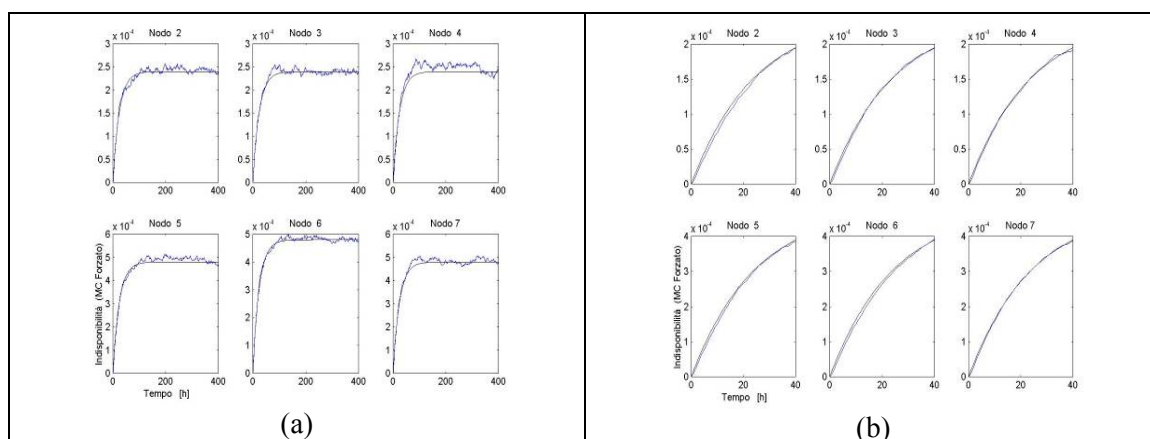


Figura 12. Esempio 4: Indisponibilità del sistema

CONCLUSIONI

Con riferimento a casi esemplificativi analiticamente risolti, sono stati descritti ed applicati opportuni algoritmi di calcolo per la valutazione delle caratteristiche di affidabilità e disponibilità di sistemi a rete. A tal fine, tecniche Monte Carlo per la simulazione delle condizioni di guasto / riparazione delle connessioni del sistema sono state integrate con un modello ad Automi Cellulari adeguato alla verifica dell'esistenza di una connessione sorgente-utilizzatore [3].

Rispetto all'utilizzo di metodi analitici tradizionali, il vantaggio derivante da tale approccio è in primo luogo relativo alla non necessaria conoscenza della *funzione di sistema*, da stimare per ciascun nodo utilizzatore. Ciò è molto utile, se non indispensabile, nei casi in cui il sistema a rete è caratterizzato da una configurazione complessa, fortemente magliata.

Lo sforzo principale è stato rivolto alla definizione ed alla applicazione di una adeguata strategia di riduzione della varianza associata alla stima delle grandezze di interesse. I risultati essenziali dell'attività svolta sono di seguito sintetizzati.

Con riferimento alla stima delle caratteristiche di affidabilità di sistemi a rete in condizione di "eventi rari" (cioè per tassi di guasto delle connessioni significativamente bassi rispetto al tempo di missione specificato):

- la tecnica di forzatura del tasso di transizione (guasto) di ciascun componente è efficacemente utilizzabile per la riduzione della varianza associata alla caratteristica di affidabilità del sistema ovvero di ciascun nodo utilizzatore;
- l'ottimizzazione del tasso di guasto forzato di ciascuna connessione (ovvero l'utilizzo del valore che massimizza la riduzione della varianza associata alla relativa caratteristica di affidabilità) permette una soddisfacente stima dell'affidabilità del sistema ovvero di ciascun nodo utilizzatore;
- nel caso di tassi di guasto delle connessioni tra loro differenti, o differentemente forzati, è necessario introdurre un fattore correttivo nel calcolo del relativo peso che tenga conto della alterazione introdotta nella "estrazione" della connessione che ha determinato la transizione del sistema.

Con riferimento alla stima delle caratteristiche di disponibilità di sistemi a rete:

- per tassi di guasto delle connessioni significativamente bassi rispetto al tempo di missione specificato ("condizione di eventi rari"), la tecnica di forzatura del "guasto certo" è efficacemente utilizzabile per aumentare il campionamento delle transizioni del sistema;
- per sistemi a rete fortemente magliata, la tecnica di forzatura "della transizione specifica" è efficacemente utilizzabile per aumentare il campionamento di guasti multipli, causa dell'indisponibilità di nodi utilizzatori caratterizzati da connessioni ridondanti con i nodi adiacenti;
- le suddette tecniche di forzatura sono efficacemente integrabili per la riduzione della varianza associata alle caratteristiche di disponibilità del sistema ovvero di ciascun nodo utilizzatore.

Successivi sviluppi degli algoritmi di calcolo possono essere relativi a:

- utilizzo di tecniche di riduzione della varianza in sede di "analisi di importanza" delle connessioni del sistema a rete;
- generalizzazione delle tecniche di Importance Sampling e/o applicazione di tecniche differenti, per l'utilizzo di distribuzioni di probabilità (guasto / riparazione) differenti da una distribuzione esponenziale;
- generalizzazione del modello del sistema, considerando potenzialmente oggetto di guasto anche i nodi sorgente e utilizzatori;
- utilizzo di modelli ad Automi cellulari adeguati ad una definizione più generale della funzione di sistema (es. connessione punto a punto);
- integrazione con modelli deterministici (fluidodinamici, elettrici,...) per la simulazione delle condizioni di funzionamento del sistema in una assegnata configurazione.

BIBLIOGRAFIA

1. A. Carpignano, Affidabilità dei sistemi a rete magliata, Politecnico di Torino, Convegno Nazionale 3ASI, Alghero, 2003;
2. R. Billinton and W. Li, Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods, 1994, Plenum Press, New York;
3. E. Zio, L. Padovani, V. Zile, A combination of Monte Carlo simulation and cellular automata for computing the availability of complex network, Reliability Engineering & System safety, 2004;
4. A. Dubi, Monte Carlo Applications in Systems Engineering, John Wiley and Sons, Chichester, 2000;
5. M. Marseguerra and E. Zio, Basics of the Monte Carlo Method with Application to System Reliability, LiLoLe – Verlag GmbH, Hagen, 2003;
6. M. Marseguerra and E. Zio, Principles of Monte Carlo Simulation for application to Reliability and Availability Analysis, Tutorials Notes of ESREL 2001, European Safety and Reliability Conference, September 16-20, 2001, Torino, Italy;
7. M. Marseguerra and E. Zio, System Unavailability Calculations in Biased Monte Carlo Simulation: a Possible Pitfall, Annali of Nuclear Energy, 27: 1577-1588, 2000;
8. Labeau PE; E. Zio, Procedures of Monte Carlo transport simulation for applications in system engineering, Reliability Engineering and System Safety, 77:217-228, 2002;
9. S. Succi, Automi Cellulari: una nuova frontiera del calcolo scientifico, Edizioni Franco Angeli, 1991;
10. E. Zio, Biasing the transiting probabilities in direct Monte Carlo, Reliability Engineering and System Safety, 47:59-63, 1995;
11. L. Campioni, R. Scardovelli and P. Vestrucci, Optimized Monte Carlo Simulations for System Reliability Analysis, In Spitzer C; Schmoker U; Dang VN, editor, Proceedings of the PSAM7-ESREL '04, pages 164-169, Berlin, 2004;