AFFIDABILITA' DINAMICA CON METODO MONTE CARLO E RETI NEURALI

M. Marseguerra, E. Zio
Dipartimento di Ingegneria Nucleare -- Politecnico di Milano
Via Ponzio 34/3, Milano 20133
marzio.marseguerra@polimi.it

SOMMARIO

Le tecniche convenzionali per l'analisi di sicurezza con approccio probabilistico (albero degli eventi/guasti) sono considerate in generale statiche in quanto non sono in grado di descrivere in maniera dettagliata l'evoluzione fisica dell'impianto. Considerato, pero', che negli impianti reali gli aspetti dinamici giuocano un ruolo importante, il presente lavoro si propone di analizzare i vantaggi e i problemi legati ad un approccio dinamico all'analisi probabilistica di sicurezza. In questo ambito, un metodo particolarmente adatto a descrivere in maniera naturale la dinamica dell'impianto e' quello della simulazione Monte Carlo, che risulta pero' notevolmente appesantito, in termini di tempi di calcolo, dalla parte dedicata alla dinamica di processo. Nasce cosi' la necessita' di introdurre opportune tecniche di calcolo rapide e ragionevolmente approssimate: in questo ambito si colloca lo studio delle reti neurali artificiali per la soluzione delle equazioni matematiche associate al modello fisico per la descrizione dinamica dell'impianto.

1. INTRODUZIONE

I metodi convenzionali per l'analisi di sicurezza con approccio probabilistico PSA (dall'acronimo delle parole inglesi Probabilistic Safety Assessment) si basano principalmente sull'utilizzo dell'albero degli eventi ed albero dei guasti [1]. Queste tecniche sono considerate in generale statiche in quanto non sono in grado di descrivere in maniera dettagliata l'evoluzione fisica dell'impianto.

D'altra parte, negli impianti reali vi possono essere notevoli interazioni tra caratteristiche hardware ed evoluzione fisica. In molti casi, per esempio, le proprieta' stocastiche di transizione dei componenti di un sistema dipendono dalle condizioni in cui essi si trovano ad operare, e cioe' dai valori assunti da certe variabili di processo quali la temperatura, la pressione etc. Un altro aspetto dinamico tipico degli impianti reali e' la presenza di sistemi di controllo/protezione il cui funzionamento e' strettamente legato all'evoluzione fisica e puo' influenzare l'analisi con fenomeni tipici quali la *failure on demand*. In situazioni in cui l'impianto in esame presenti forti caratteristiche di dinamica, quali quelle qui accennate, le analisi classiche di affidabilita' sono inadeguate. Per questo motivo, negli ultimi anni si e' avviato un filone di ricerca per lo sviluppo di un approccio dinamico all'analisi probabilistica di rischio [2].

Il presente lavoro si propone di analizzare i vantaggi e i problemi legati all'approccio dinamico. In questo ambito, un metodo che risulta particolarmente adatto per descrivere in maniera naturale la dinamica dell'impianto e' quello della simulazione Monte Carlo.

In generale, nella pratica, la maggior parte degli studi di affidabilita' riguarda problemi ad evento raro, caratterizzati da una bassa probabilita' che si verifichi l'evento di interesse. Questo comporta che nelle simulazioni Monte Carlo la maggior parte delle storie non fornisce alcun contributo all'informazione richiesta e cio' porta ad un notevole dispendio di tempo di calcolo. Per questo, diventa indispensabile introdurre delle opportune tecniche di forzatura delle probabilita' naturali [3].

Inoltre, e' inevitabile che un'estensione dinamica della simulazione Monte Carlo porti ad aumentare ulteriormente i gia' notevoli sforzi computazionali richiesti dall'analisi. Questa situazione deriva dal fatto che si ha a che fare con un problema *stiff* determinato dalla combinazione di lunghe costanti di tempo tipiche dell'analisi probabilistica di affidabilita' (tempi medi di rottura dell'ordine di 10^4- 10^5 h) e delle costanti di tempo molto piu' brevi, caratteristiche dell'evoluzione deterministica delle variabili fisiche di processo (tempi dell'ordine dei secondi, minuti, ore).

Da queste semplici considerazioni, si evidenzia immediatamente la necessita' di introdurre opportune tecniche di calcolo per rendere piu' rapida la simulazione. In questo ambito si colloca lo studio delle reti neurali artificiali per la soluzione delle equazioni matematiche associate al modello fisico per la descrizione dinamica dell'impianto [4-5].

Le reti neurali artificiali rappresentano una metodologia in rapido sviluppo che trova applicazione in molti campi della scienza ed ingegneria [6]. La capacita' delle reti neurali di processare segnali ed informazione fa si' che una loro applicazione a problemi legati all'operazione e controllo di sistemi tecnologici ad alto rischio,

quali quelli nucleari, chimici ed aerospaziali, abbia un'intrinseca potenzialita' di aumentarne la sicurezza ed affidabilita'. In particolare, le capacita' diagnostiche delle reti neurali sono fortemente supportate dalla loro abilita' a rispondere in tempo reale alle variazioni di stato del sistema, e a riconoscere e classificare l'informazione anche se questa arriva parzialmente incompleta o affetta da rumore statistico.

L'idea fondamentale alla base dell'applicazione delle reti neurali per la soluzione di modelli fisici e' quella di istruire una o piu' reti neurali ad eseguire la mappatura funzionale tra ingresso e uscita descritta dal sistema di equazioni che costituiscono il modello fisico dell'impianto. Nella dinamica classica, tale mappatura e' fornita dalle soluzioni numeriche o analitiche del sistema di equazioni, che permettono di risalire, direttamente o indirettamente, ai valori di uscita, noti gli ingressi. Quello che si e' invece cercato di fare nell' approccio neurale e' di presentare alla rete un insieme di esempi della relazione input-output per un ben determinato modello fisico e, su questi esempi, addestrare la rete a dare una descrizione piu' o meno approssimata del comportamento fisico del sistema.

2. IL RUOLO DELLA DINAMICA NELL'AFFIDABILITA'

L' approccio classico agli studi di affidabilita' si basa principalmente sulla combinazione delle due tecniche *albero degli eventi* ed *albero dei guasti*. Riassumendo brevemente, si considera un dato evento iniziatore, tipicamente un incidente, e i sistemi che sono conseguentemente chiamati ad entrare in azione nel tentativo di mitigarne gli effetti. Tali sistemi possono eseguire correttamente la loro funzione oppure fallire a causa di guasti interni: questo porta allo sviluppo di diversi scenari di evoluzione dell'incidente che vengono organizzati in una struttura ad albero. Le probabilita' di successo o fallimento di ogni singolo sistema, cioe' la probabilita' di continuare su un determinato ramo dell'albero degli eventi, vengono valutate mediante alberi di guasto i quali permettono di risalire a tali probabilita' dalle probabilita' di funzionamento e guasto dei componenti base del sistema. Da questo punto di vista quindi, durante l'evoluzione dell'incidente, i sistemi e i singoli componenti possono cambiare stato di funzionamento (per esempio una valvola che viene chiusa, un sistema di raffreddamento d'emergenza che entra in funzione o, ancora, una pompa che vede ridotta la sua portata di funzionamento) e corrispondentemente l'impianto cambia configurazione. In generale e' quasi sempre vero che in questa situazione si verificano variazioni nell'evoluzione delle variabili fisiche di processo (tipicamente temperature, pressioni, portate etc.) che possono essere spesso di notevole entita' in caso di incidente grave. In una situazione incidentale di questo tipo, lo stato di funzionamento di tutti i sistemi e componenti dell'impianto puo' venire fortemente influenzato dai valori delle variabili di processo. In questo caso, uno studio di affidabilita' dell'impianto secondo l'approccio statico, in cui i fenomeni di evoluzione sono in generale considerati in termini di grandezze medie, potrebbe portare a risultati insoddisfacenti.

Il fatto di voler tenere conto degli aspetti di evoluzione fisica dell'impianto in uno studio di affidabilita' dinamica porta inevitabilmente a porre l'attenzione sul funzionamento dinamico dei Sistemi di Controllo e Protezione (CPS dall'acronimo delle parole inglesi *Control Protection System*) e sull'influenza che le variabili di processo hanno sulle probabilita' di guasto dei componenti. Il funzionamento di un impianto in condizioni ordinarie prevede il monitoraggio di alcune variabili di processo e il loro controllo entro precisi limiti. Durante un incidente e' possibile che alcune di queste soglie vengano superate e corrispondentemente venga richiesto l'intervento del CPS per riportare l'impianto alle condizioni di normale funzionamento o per guidarlo verso una configurazione globale di sicurezza, secondo le procedure di progetto. E' possibile pero' che uno dei CPS sia in una situazione di guasto latente che lo porta a rispondere con insuccesso alla richiesta di intervento (*failure on demand*). A seguito di questo evento l'evoluzione dell'incidente potrebbe seguire un diverso percorso, difficilmente prevedibile se non si seguono gli andamenti delle variabili di processo.

Inoltre, durante un incidente le variabili di processo possono fuoriuscire dai limiti di controllo e raggiungere valori tali da modificare sostanzialmente le probabilita' di guasto dei componenti. Durante l'incidente di Chernobyl [7], per esempio, il livello di potenza scese fino a 200 *Mwt* e le corrispondenti cadute di pressione risultarono molto minori di quelle a 700-1000 *Mwt*, livello di potenza al quale si sarebbe dovuto condurre l'esperimento. In questa situazione, la portata con tutte le otto pompe funzionanti sali' a 56000-58000 m^3/h e la portata singola di alcune pompe sali' fino a 8000 m^3/h. Questa condizione di funzionamento delle pompe era fortemente proibita dalle procedure di sicurezza poiche' valori di portata cosi' alti causavano un aumento nelle probabilita' di guasto delle pompe.

Infine, non e' assolutamente da sottovalutare il fatto che in realta' gli incidenti non sono mai instantanei, nel senso che ci vuole un certo tempo affinche' le variabili di processo raggiungano ed oltrepassino i limiti di sicurezza, oltre i quali si ha un guasto catastrofico. Questo ritardo temporale, cui spesso si fa riferimento con il termine *periodo di grazia* puo' risultare determinante nell'evoluzione di un incidente poiche' in questo intervallo di tempo potrebbero verificarsi riparazioni, oppure altri guasti che porterebbero l'impianto su un'altro "ramo" di evoluzione incidentale, dando luogo a conseguenze diverse.

In tutte queste situazioni in cui i valori delle variabili di processo influenzano fortemente il comportamento dell'impianto, sembrerebbe quasi obbligatorio rivolgersi ad un approccio dinamico dell'affidabilita'. C'e' da tenere ben presente pero' che un tale approccio, che tiene conto dell'evoluzione delle variabili di processo, appesantisce notevolmente l'analisi e richiede notevoli risorse di calcolo, soprattutto in termini di tempi di CPU. Infatti ad ogni configurazione hardware dell'impianto puo' corrispondere una diversa dinamica che va adeguatamente descritta con un modello matematico: poiche' un impianto reale ha in generale un elevato numero di configurazioni possibili, corrispondentemente devono essere disponibili un gran numero di modelli: la descrizione di questi modelli e' in generale basata su sistemi di equazioni differenziali che vanno integrate con passi temporali legati ai tempi dell'evoluzione fisica, che sono tipicamente molto piu' piccoli delle costanti di tempo stocastiche dell' impianto. Questo porta in generale ad un notevole dispendio di tempo di calcolo, per cui il raggiungimento di risultati utili facendo uso ragionevole di risorse richiede l'impiego di modelli opportunamente semplificati e tecniche di risoluzione rapide ed efficienti quali ad esempio il metodo delle superfici di risposta, [8], o la tecnica della mappatura cella a cella, [9]. Come vedremo in seguito, un' altra tecnica sofisticata qui proposta e' quella delle reti neurali.

3. IL DOMINIO DI COMPETENZA DELL'AFFIDABILITA' DINAMICA

Con riferimento ad un impianto a rischio, consideriamo un evento iniziatore d'incidente e la sequenza di eventi che ne consegue. Ci proponiamo di definire alcune condizioni che stabiliscano la necessita' di eseguire un'analisi dinamica del comportamento affidabilistico del sistema.

A questo proposito, definiamo *durata incidentale* l'intervallo di tempo necessario affinche' i sistemi di protezione riportino l'impianto ad uno stato di sicurezza oppure, in caso di fallimento di tali sistemi di protezione, l'impianto pervenga ad uno stato di guasto irreparabile. Ovviamente l'orizzonte temporale di interesse per l'analisi del comportamento dell'impianto durante la durata incidentale e' significativamente piu' breve di quello dell'analisi PSA classica ove si parla di *tempi* di missione dell' ordine di mesi o anni.

Nei casi in cui e' possibile stimare che durante la durata dell'incidente le variabili di processo non deviano apprezzabilmente dai loro valori pre-incidentali, e' possibile eseguire l'analisi ignorando gli aspetti dinamici che hanno, evidentemente, poca influenza sulle probabilita' di guasti successivi.

All' altro estremo, ci sono situazioni per le quali i transitori incidentali sono cosi' rapidi che lo scenario incidentale si sviluppa in maniera completamente deterministica.

L'analisi dinamica dell'affidabilita' e' invece essenziale nelle situazioni intermedie in cui un evento iniziatore provoca variazioni significative delle variabili di processo le quali, a loro volta, inducono variazioni deterministiche nei tassi di guasto di alcuni dei componenti. I ratei di guasto possono essere, cosi', portati a valori tali da rendere probabile il verificarsi di ulteriori guasti, indotti indirettamente dai valori assunti dalle variabili di processo. Chiaramente, la successiva evoluzione dello scenario incidentale seguira' percorsi diversi a seconda della successione delle rotture, del loro ordine e dei tempi a cui esse si verificano. In questi casi, percio', lo scenario incidentale va seguito accoppiando gli aspetti stocastici dei guasti di componenti con l'evoluzione deterministica delle variabili di processo.

L'analisi di situazioni incidentali di cui sopra va eseguita tramite modelli predittivi a partire dall'ipotesi che si sia verificata una transizione stocastica di un componente hardware (evento iniziatore). La predizione degli stati futuri del sistema richiede che si segua deterministicamente l'evoluzione fisica del sistema; che si tenga conto della possibilita' che i valori assunti dalle variabili di processo favoriscano ulteriori transizioni stocastiche dei componenti; che si continui a seguire l'evoluzione del sistema nella nuova configurazione assunta. In sistemi a carattere dinamico spinto, e' possibile che un tale schema si verifichi ripetutamente durante la durata incidentale.

E' opportuno rilevare che l'intervento dell'operatore umano puo' giuocare un ruolo importante nello sviluppo di questi scenari. Il successo o meno di un intervento umano tendente a riportare il sistema in uno stato sicuro viene, anch'esso, a dipendere dal valore che le variabili di processo assumono durante il periodo di grazia in quanto questi valori e la durata del periodo di grazia condizionano il livello di stress a cui l'operatore e' sottoposto.

4. AFFIDABILITA' DINAMICA E MONTE CARLO

Nel paragrafo precedente abbiamo visto che l'approccio dinamico all'analisi affidabilistica di un impianto e' basato sull' integrazione degli aspetti stocastici classici con gli aspetti propriamente dinamici dell' impianto. E' opinione dei presenti autori che il metodo Monte Carlo, per le sue peculiari caratteristiche di flessibilita', e' il piu' adatto all'approccio dinamico.

Supponiamo che al tempo $t_0=0$ il sistema sia nello stato S_0 caratterizzato da una ben determinata configurazione dei suoi componenti. Ad un certo istante t_1 uno dei componenti subisce una transizione di stato che porta il sistema ad una diversa configurazione S_1. Il sistema permane in tale configurazione fino a quando non si verifica un'altra transizione al tempo t_2 che lo porta in una nuova configurazione S_2. Proseguendo in questo modo, si genera un cammino random che ha termine quando il sistema entra in uno stato assorbente, dal quale non e' in grado di uscire. Assumendo come ipotesi di lavoro che il sistema sia Markoviano o semimarkoviano, questo cammino random viene a descrivere una storia di vita del sistema che e' governata dalla funzione densita' di probabilita' condizionale $T(t'|t,S)$ che il sistema faccia una transizione ad un certo istante t' essendo noto che esso e' arrivato nella configurazione S al tempo t (a questa funzione si da il nome di *kernel di trasporto)* e dalla probabilita' $C(S'|t',S)$ che il sistema in seguito alla transizione si porti nella configurazione S', essendo noto che la transizione avviene a t' quando il sistema e' nella configurazione S (a questa probabilita' si fa spesso riferimento con il nome di *kernel di collisione* in analogia a quello che si fa nel trasporto di particelle neutre). La simulazione Monte Carlo di ogni singola storia del sistema consiste nell' estrarre gli istanti di transizione e le risultanti configurazioni dalle corrispondenti distribuzioni. Generando un numero elevato di storie Monte Carlo e raccogliendo le informazioni di interesse, e' possibile fare un' analisi statistica sulle caratteristiche di affidabilita' e disponibilita' del sistema in esame.

La struttura di simulazione, tipica del metodo Monte Carlo, che abbiamo qui brevemente richiamato, puo' essere adattata in maniera naturale per accogliere gli aspetti di evoluzione dinamica dell'impianto, introducendo opportuni modelli fisici che descrivano l'evoluzione delle variabili di processo nelle diverse configurazioni hardware. Supponiamo che il sistema sia costituito da N_C componenti elementari e che la sua generica configurazione j-esima sia descrivibile da un vettore di stato $\mathbf{j} \equiv [j(1), j(2), ..., j(N_C)]$ che identifica gli stati dei singoli componenti. Sia inoltre $\boldsymbol{y(t)}$ il vettore delle variabili di processo al tempo t. Ad un certo istante t^0_j della sua vita (simulata), quando il vettore delle variabili di processo e' $\boldsymbol{y}(t^0_j)$, il sistema entra nella configurazione hardware **j** alla quale corrisponde un modello matematico che descrive l'evoluzione fisica del sistema in quella particolare configurazione e che puo' essere dato sotto forma di una equazione vettoriale:

$$\dot{y}(t) = f_j[y(t), t; a_j, y(t^0_j)] \qquad t \geq t^0_j \tag{1}$$

dove il vettore $\mathbf{a_j}$ rappresenta l'insieme dei parametri del modello pertinente a quella configurazione. Se al tempo $t^0_k > t^0_j$ si verifica una nuova transizione, sia essa stocastica o deterministica (dettata dall'azione dei sistemi di controllo), che porta il sistema dalla configurazione iniziale **j** a una nuova configurazione **k** l'evoluzione fisica delle variabili di processo varia e corrispondentemente cambia il modello matematico che la descrive:

$$f_j[y(t), t; a_j, y(t^0_j)] \quad \rightarrow \quad f_k[y(t), t; a_k, y(t^0_{kj})] \qquad t \geq t^0_k > t^0_j \tag{2}$$

In Fig. 1 e' riportato un diagramma qualitativo della traiettoria percorsa dal punto $\mathbf{y}(t)$ nello spazio delle fasi che risulta dal prodotto cartesiano dello spazio continuo delle variabili di processo e quello discreto delle configurazioni di sistema. Per semplicita' si fa riferimento ad un caso elementare con due sole variabili di processo e tre diverse configurazioni hardware indicate con le lettere *k, l, m*. Ad ognuna di queste configurazioni hardware corrisponde un "piano" delle fasi in cui sono distinguibili due regioni delimitate da altrettante linee di separazione. La regione interna alle linee di separazione e' la regione di "corretto funzionamento" e fintantoche' il punto $\mathbf{y}(t)$ rimane all'interno di essa, il sistema e' considerato in normale funzionamento, e non sono richieste azioni da parte del controllo. Quando la configurazione e' tale che $\mathbf{y}(t)$ raggiunge la curva di separazione, viene richiesto l'intervento del controllo per riportare il sistema in condizioni di normale funzionamento. Se il controllo non e' in grado di eseguire tale azione, $\mathbf{y}(t)$ entra in una regione di funzionamento fuori controllo, ma il sistema e' ancora sano. Tuttavia in queste condizioni l'evoluzione non e' piu' controllata ed il sistema puo' evolvere verso una situazione di top event (m(4)), che si verifica quando il punto $\mathbf{y}(t)$ oltrepassa la seconda linea ed entra nella regione di top event nella quale le variabili di processo assumono valori non ammissibili per il corretto funzionamento dell'impianto. In generale la combinazione di transizioni stocastiche e azioni o fallimenti del sistema di controllo puo' generare un gran numero di diverse traiettorie di evoluzione.

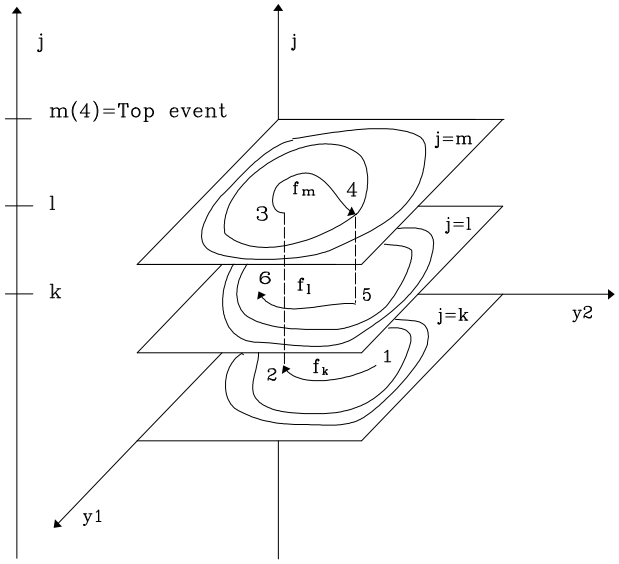

Figura 1. Evoluzione dinamica del punto **y**(t) nello spazio delle fasi.

Un aspetto importante che deriva da questo schema dinamico e' che le condizioni di evento top sono generalmente espresse in termini di variabili di processo che oltrepassano valori di soglia predefiniti, al contrario di quanto accade nel PSA classico in cui tutti gli eventi top sono descritti sotto forma di configurazioni hardware.

Una volta messi a punto i modelli fisici corrispondenti a tutte le possibili configurazioni hardware dell' impianto e' possibile simulare storie di vita dell'impianto complete, che comprendono sia le transizioni stocastiche che quelle deterministiche imposte dal controllo. In Fig. 2 e' riportata schematicamente una traccia della procedura generale di simulazione Monte Carlo in un'analisi affidabilistica con approccio dinamico. All'inizio della simulazione ed ogni volta che si verifica una transizione, sia essa stocastica oppure imposta dal controllo, viene estratto il tempo della successiva transizione stocastica e calcolato (dal modello matematico dell'evoluzione fisica) quello del prossimo intervento da parte del controllo. Il piu' piccolo dei due tempi determina quale evento si verifica effettivamente e in corrispondenza di tale evento viene aggiornata opportunamente la configurazione del sistema. In particolare nella figura si fa riferimento ad una storia in cui il primo evento che si verifica e' una transizione stocastica al tempo t_1. Cio' significa che nell' intervallo di tempo $(0, t_1)$ l'evoluzione delle variabili di processo, descritta dal modello fisico *PM1*, si svolge tutta all'interno dei limiti di controllo. Al tempo t_1 la transizione, selezionata per campionamento casuale dalla corrispondente distribuzione, porta il sistema in una nuova configurazione in corrispondenza della quale le variabili di processo evolvono secondo un altro modello fisico, *PM2*. Il tempo della simulazione viene quindi avanzato all' istante t_1 , e viene campionato l'istante t_2 della successiva transizione stocastica e calcolato quello di intervento del controllo t^*. In questo caso $t^*<t_2$ cosicche' si verifica una situazione nella quale le variabili di processo hanno raggiunto la soglia di controllo: corrispondentemente viene richiesta una transizione deterministica. A questo punto la storia puo' seguire due diverse strade. Se la transizione richiesta non viene eseguita (failure on demand) il sistema continua ad evolvere invariato secondo il modello fisico *PM2* ed il tempo di successiva transizione stocastica rimane all' istante t_2 . Si noti che in questo caso le variabili di processo non sono piu' nella regione di controllo, per cui potrebbero evolvere fino ad oltrepassare i limiti di sicurezza e portare il sistema ad un evento top, prima che si verifichi la successiva transizione stocastica a t_2 . Se invece il sistema di controllo esegue con successo la propria azione, la configurazione del sistema viene modificata proprio in modo da mantenere le variabili di processo all' interno dei limiti consentiti. In questa nuova configurazione il sistema evolve in generale secondo un diverso modello fisico, per es. *PM3*. In questo caso si ripete l'estrazione del tempo della successiva transizione t_3 e si ricalcola il tempo del prossimo intervento del sistema di controllo e si procede in maniera analoga a prima. La sequenza

qui descritta viene ripetuta fino a che il sistema fallisce (evento top) o raggiunge con successo la fine della durata incidentale.

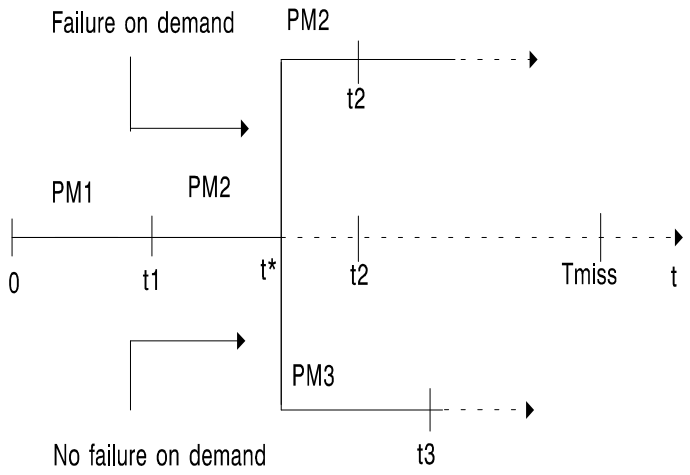

Figura 2. Schema quantitativo di una sequenza di eventi in una storia Monte Carlo.

E' opportuno a questo punto precisare che il metodo Monte Carlo, pur essendo molto adatto per un approccio dinamico al PSA, soffre in ogni caso pesantemente dell' enorme aumento di tempo di calcolo che l'analisi dinamica inevitabilmente introduce. Se gia' il metodo soffriva di problemi di tempo di calcolo nell' analisi statica a causa dell' elevato numero di storie da simulare per ottenere dei risultati statistici significativi, ora nell'analisi dinamica il tutto e' fortemente appesantito, in linea di principio, dal dovere ogni volta seguire l'evoluzione delle variabili fisiche coinvolte nel processo. In questa situazione assumono grande importanza le tecniche di forzatura delle transizioni stocastiche e i metodi per una rapida soluzione dei modelli matematici di cui abbiamo gia' parlato.

5. IL RUOLO DELLE RETI NEURALI IN AFFIDABILITA' DINAMICA

Nell'ambito delle attivita' di ricerca volte a sviluppare metodi rapidi di soluzione di modelli complessi, l'utilizzo di algoritmi di calcolo neurale, inizialmente proposti dai presenti autori [4], sta assumendo una sempre maggiore importanza.

Le reti neurali artificiali rappresentano una metodologia in rapido sviluppo che trova applicazione in molti campi della scienza ed ingegneria. La capacita' delle reti neurali di processare segnali ed informazione fa si' che una loro applicazione a problemi legati all'operazione e controllo di sistemi tecnologici ad alto rischio, quali quelli nucleari, chimici ed aerospaziali, abbia un'intrinseca potenzialita' di aumentarne la sicurezza ed affidabilita'. In particolare, le capacita' diagnostiche delle reti neurali sono fortemente supportate dalla loro abilita' a rispondere in tempo reale alle variazioni di stato del sistema, e a riconoscere a classificare l'informazione anche se questa arriva parzialmente incompleta o affetta da rumore statistico.

L'idea fondamentale che sta alla base dell'applicazione delle reti neurali per la soluzione di modelli fisici e' quella di cercare di istruire una o piu' reti neurali ad eseguire la mappatura funzionale tra ingresso e uscita, descritta dal sistema di equazioni che costituiscono il modello fisico dell'impianto. Nella dinamica classica, tale mappatura e' fornita dalle soluzioni analitiche o -piu' spesso- numeriche del sistema di equazioni, e che permettono di risalire, direttamente o indirettamente, ai valori di uscita, una volta che siano noti gli ingressi. Quello che si fa, invece, con le reti e' costruire degli esempi della relazione input-output per un ben determinato modello fisico e, su questi esempi, addestrare la rete a dare una descrizione piu' o meno approssimata del comportamento fisico del sistema. Una volta completato l'addestramento, le reti possono essere utilizzate per fornire soluzioni approssimate del modello, grazie alla loro capacita' di recupero di

informazione immagazzinata e di generalizzazione a nuove situazioni. Le predizioni neurali vengono eseguite in maniera molto rapida e a passi temporali considerevolmente piu' grandi di quelli tipici dei metodi classici di integrazione numerica, consentendo cosi' un notevole risparmio di tempo calcolo. L'andamento temporale della soluzione del modello viene ottenuto fornendo in input alla rete ad ogni passo le predizioni eseguite ai passi precedenti. Ovviamente, questa procedura puo' essere soggetta, se non ben controllata, all'accumulo di errori che potrebbe far divergere la risposta.

L'approccio neurale e' stato applicato con successo dai presenti autori dapprima ad un semplice sistema di letteratura [4] e in seguito al pressurizzatore di un reattore nucleare ad acqua in pressione [5]. Entrambi i casi hanno dimostrato che e' possibile ottenere predizioni sufficientemente accurate (ben entro i limiti di incertezza dei dati statistici dei ratei di rottura e riparazione) con una riduzione di qualche ordine di grandezza nei tempi di calcolo. Qesti vantaggi sono destinati ad aumentare nell'applicazione a casi piu' complessi: infatti, il tempo richiesto dalla rete per eseguire la predizione e' molto piccolo e, in ogni caso, cresce con la complessita' del sistema in maniera molto piu' lenta di quello richiesto per integrare il sitema di equazioni del modello. Infine, ci si aspetta che il vantaggio di un ridotto tempo di calcolo sia ulteriormente aumentato con l'impiego dei futuri calcolatori paralleli che costituiscono l'ambiente ottimale per sfruttare il parallelismo insito nei calcoli neurali.

6. CONCLUSIONI

Il riconoscimento di alcune potenziali lacune dei metodi classici usati negli studi PSA ha spinto i ricercatori e gli esperti nel campo ad investigare la possibilita' di un approccio dinamico all'analisi probabilistica di sicurezza. Ne e' nata cosi' la cosiddetta "affidabilita' dinamica" che ha come obbiettivo quello di integrare alla parte stocastica dello scenario incidentale quella deterministica legata all'evoluzione del processo. Tale approccio deve essere, quindi, in grado di tener conto degli aspetti dinamici dell'incidente quali l'ordine, e i tempi, dei guasti e malfunzionamenti che si succedono in tutta la durata dell'incidente, le dipendenze dei ratei di transizione dalle variabili di processo, un modello di operatore umano, etc.

Nondimeno, alcune obiezioni sono state sollevate nei confronti dell'approccio dinamico, in particolare per quanto riguarda le difficolta' di applicazione pratica e la mancanza di una chiara definizione del suo dominio di applicazione.

Per quanto concerne quest'ultimo punto, nel presente lavoro abbiamo evidenziato quali condizioni debbano sussistere affinche' la valutazione probabilistica di sicurezza di sistemi complessi risulti condizionata dall'evoluzione delle variabili di processo e dalla loro influenza sul comportamento stocastico dei componenti hardware. In particolare abbiamo specificato i limiti pratici di applicabilita' dell'affidabilita' dinamica, introducendo il concetto di durata incidentale.

Per quanto concerne la difficolta' di applicazione pratica, e' pur vero che l'approccio dinamico consente di tener conto della presenza di sistemi di controllo e di altri aspetti dinamici che indubbiamente sono presenti nei sistemi reali. D'altra parte, e' pur vero che questi aspetti tendono ad appesantire notevolmente l'analisi.

Il metodo Monte Carlo sembra essere l'unico in grado, grazie alla sua flessibilita' e semplicita', ad assorbire in se', in maniera relativamente "indolore", gli aspetti della dinamica. Tuttavia, la valutazione di sistemi ad evento raro e il calcolo delle traiettorie dinamiche che si ramificano lungo tutta una storia rendono la simulazione molto pesante da un punto di vista del tempo di calcolo. Per far fronte a questi problemi sono state sviluppate varie tecniche di riduzione della varianza e proposti vari metodi di soluzione approssimata, ma rapida, dei modelli dinamici. Tra questi ultimi, fa ben sperare l'applicazione di reti neurali addestrate, sulla base di esempi, a riprodurre la mappatura tra ingresso e uscita del modello.

8. BIBLIOGRAFIA

[1] *P.R.A. Procedures Guide*, U. S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-2300 (1981).

[2] T. Aldemir, N. Siu, A. Mosleh, P.C. Cacciabue, B.G. Goktepe, Eds., *Reliability And Safety Assessment of Dynamic Process Systems*, NATO-ASI Series F, Vol. 120, Springer-Verlag, Berlin, (1994).

[3] P.E. Labeau, Probabilistic Dynamics: Estimation of Generalized Unreliability Through Efficient Monte Carlo Simulation, *Ann. Nucl. Energy*, Vol. 23, No. 17, pp. 1355-1369 (1996).

[4] M. Marseguerra, M. Nutini and E. Zio, Approximate Physical Modelling In Dynamic PSA Using Artificial Neural Networks, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 45, pp. 47-56 (1994).

[5] M. Marseguerra, M. Ricotti and E. Zio, Approaching System Evolution In Dynamic PSA BY Neural Networks, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 49, pp. 91-99 (1995).

[6] E. Sanchez-Sinencio and C. Lau, Eds., *Artificial Neural Networks: Paradigms, Applications and Hardware Implementations*, IEEE Press (1992).
[7] Post-Accident Review Meeting, IAEA, Vienna, 25-29 Aug. (1986).
[8] L. Olivi, Response Surface Methodology, *Handbook of Nuclear Reactor Safety*, EUR 9600, EN (1982).
[9] M. Marseguerra and E. Zio, The Cell-To-Boundary Method in Monte Carlo-Based Dynamic PSA, *Reliability Engineering and System Safety*, **49**, pp. 91-99 (1995).