

SISTEMI A RETE MAGLIATA PER IL TRASPORTO DI ENERGIA: ACCOPPIAMENTO DI STRUMENTI DI SIMULAZIONE TERMOFLUIDODINAMICA E ANALISI DI AFFIDABILITÀ CON APPROCCIO MONTE CARLO

A. Carpignano, E. Salvador, M. Gargiulo, M. Piccini

Dipartimento di Energetica, Politecnico di Torino

C.so Duca degli Abruzzi, 24 – 10129 Torino TO

andrea.carpignano@polito.it

SOMMARIO

Questo lavoro affronta il problema della valutazione della affidabilità e della disponibilità per sistemi a rete fortemente magliati, come i sistemi di distribuzione del gas o del calore. Nella prima parte sono affrontati i problemi specifici di questi sistemi, legati alla complessità strutturale e alle caratteristiche dinamiche che li contraddistinguono. Successivamente viene presentata una panoramica sul metodo Monte Carlo e sul suo utilizzo per realizzare un nuovo metodo di analisi adatto a questi sistemi. Segue una breve descrizione della rete di teleriscaldamento dell'AEM di Torino, che ha rappresentato il caso studio applicativo del metodo. Infine, è presentata una discussione finale dove vengono illustrati i risultati ottenuti e in cui vengono messi in evidenza aspetti positivi e problemi aperti del nuovo approccio.

1. INTRODUZIONE

Nonostante l'enorme proliferare di sistemi a struttura magliata, non si trovano in letteratura molti studi volti a quantificare l'affidabilità e la disponibilità di questo tipo di sistemi di distribuzione; quasi del tutto assenti sono poi le applicazioni che utilizzano il Metodo Monte Carlo come strumento di simulazione per l'analisi di reti magliate. Occorre però dire che il metodo Monte Carlo viene efficacemente utilizzato per risolvere una grande varietà di problemi fisici; infatti, benché questo metodo sia un mezzo per simulare processi casuali, esso può anche essere utilizzato per risolvere problemi che non hanno immediatamente un'interpretazione probabilistica.

A causa della scarsa attenzione riservata in passato alla modellazione, rivolta all'analisi di affidabilità e disponibilità, di sistemi magliati, non si hanno a disposizione strumenti adatti per effettuare questo tipo di analisi: ci si trova quindi nella condizione di studiare un tipo di sistemi sostanzialmente diversi da quelli tradizionali (es., sistemi per la produzione di energia) ma con gli stessi strumenti di analisi che si utilizzano per questi ultimi, ottenendo così risultati modesti e con una notevole mole di lavoro.

In particolare, le principali caratteristiche delle reti di distribuzione che ne rendono particolarmente difficile l'analisi di affidabilità con le tradizionali tecniche di analisi sono le seguenti.

- a) Le reti di distribuzione del gas e del calore sono sistemi complessi costituiti da centrali per la produzione, serbatoi di stoccaggio, tubazioni per il trasporto e la distribuzione, stazioni di pompaggio, valvole di regolazione e sezionamento: tutti questi sistemi sono a loro volta costituiti da un gran numero di componenti. La numerosità della componentistica costringe all'utilizzo di tecniche in grado di gestire, in modellazione e per l'analisi, diverse decine se non centinaia di componenti caratterizzati ciascuno da più modi di guasto.
- b) L'infrastruttura e le utenze sono distribuite su aree geografiche anche molto ampie e sono caratterizzate da esigenze diversificate; risulta quindi difficile definire l'evento "indisponibilità del sistema" che potrà acquisire un'accezione sia locale che generale. La molteplicità delle utenze e delle loro particolari esigenze rende quindi più generale e di difficile definizione il concetto di "indisponibilità": affinché l'analisi sia rappresentativa di tutti gli utenti occorrerà quindi effettuare valutazioni sulla singola utenza, ma anche individuare alcuni indici globali in grado di caratterizzare l'affidabilità e la disponibilità dell'intera rete. Questo ha portato all'elaborazione di *parametri di Affidabilità e Disponibilità Locali* e *parametri di Affidabilità e Disponibilità Globali* del sistema.
- c) Un altro aspetto peculiare di queste infrastrutture è l'elevata interazione tra gli aspetti probabilistici e quelli termofluidodinamici: i sistemi a rete magliata, utilizzati per la distribuzione dei fluidi, presentano un'elevata interdipendenza tra il guasto dei componenti ed il comportamento fisico del sistema. Questo significa che tali sistemi non possono essere trattati solo da un punto di vista puramente logico-probabilistico, ma necessitano di una tecnica ibrida, che permetta di studiare il problema in modo integrato.

- d) Questi sistemi hanno raramente strutture radiali: infatti, se si escludono le reti di trasporto dell'energia elettrica, le reti di teleriscaldamento o le reti di distribuzione gas sono generalmente costituite da un sistema di maglie tra loro collegate; questo aspetto aumenta enormemente la complessità dell'analisi in quanto il sistema può assumere un numero elevatissimo di configurazioni di funzionamento/guasto differenti.
- e) Le reti di distribuzione del gas e del calore sono solitamente strutture caratterizzate da un alto rateo di cambiamento, dovuto al continuo miglioramento e ampliamento della rete esistente: questo implica la necessità di aggiornare continuamente le analisi e disporre di tecniche agevoli per confrontare soluzioni progettuali diverse, ossia l'utilizzo di tecniche di analisi estremamente flessibili.

Nello studio qui presentato verranno affrontate le varie problematiche legate ai sistemi magliati mediante l'utilizzo di una tecnica alternativa alle tradizionali tecniche di analisi (in particolar modo alla Fault Tree Analysis) basata sul Metodo Monte Carlo [1]: l'utilizzo di una tecnica di simulazione Monte Carlo rappresenta un nuovo approccio a questo tipo di sistemi, che permette di evitare all'analista il lungo lavoro di costruzione degli alberi, delegando inoltre la maggior parte dell'analisi al calcolatore.

L'attività descritta in questo articolo si inserisce nell'ambito di un Programma di Ricerca Scientifica di Rilevante Interesse Nazionale, cofinanziato dal Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica e Tecnologica, incentrato sulla valutazione di metodologie per la valutazione e il controllo delle incertezze nelle analisi di affidabilità e di rischio di sistemi tecnologici complessi.

2. SVILUPPO DI UNA METODOLOGIA DI ANALISI BASATA SUL METODO MONTE CARLO

Nell'ottica di sviluppare una nuova metodologia basata sul metodo Monte Carlo, utile per realizzare l'analisi affidabilistica di una rete di distribuzione, è stato studiato un nuovo metodo di analisi in grado di integrare sia gli aspetti probabilistici sia quelli idraulici e termici peculiari di questi sistemi.

Questo nuovo approccio si basa principalmente sull'integrazione di due moduli complementari e fortemente interconnessi:

- un modulo Monte Carlo, che analizza l'evoluzione temporale (processi di guasto e riparazione) della rete nell'arco di un intervallo di tempo pari al tempo di missione. Questo modulo è in grado di identificare le varie configurazioni del sistema: esso permette di generare le configurazioni di guasto e la relativa probabilità di accadimento, sulla base delle probabilità di guasto e tempi di riparazione dei singoli componenti;
- un modulo termofluidodinamico semplificato che, sulla base dei componenti funzionanti nella rete (informazione ricavata dal precedente modulo), verifica quali baricentri termici sono alimentati dalle sorgenti sia dal punto di vista idraulico sia dal punto di vista termico.

L'integrazione dei due moduli permette quindi di ottenere la simulazione del comportamento termofluidodinamico della rete al variare delle configurazioni di guasto; simulando un numero elevato di configurazioni è possibile realizzare una statistica sul comportamento della rete fino a definire le relative affidabilità e disponibilità, ed evidenziarne le criticità.

Nel seguito è riportata una breve descrizione del funzionamento dei due moduli.

2.1 Modulo Monte Carlo

Per metodo Monte Carlo [2,3] si intende un metodo basato su una rappresentazione probabilistica del sistema che si vuole studiare combinata con la generazione automatica di numeri casuali, in modo tale che l'iterazione di successivi esperimenti condotti sul modello porti ad una valutazione statisticamente significativa del comportamento del sistema.

A causa delle peculiarità del metodo Monte Carlo il quale richiede, generalmente, un numero elevato di simulazioni per arrivare a convergenza, si è deciso di fare uso di alcune ipotesi semplificative, al fine di snellire il metodo in vista di una sua possibile implementazione in un software. Tali ipotesi sono:

- ✓ il sistema è considerato Markoviano: si assume cioè che l'evoluzione del sistema dipenda esclusivamente dallo stato presente (in particolare il processo di guasto dei componenti non è influenzato dalla loro età) e le distribuzioni dei tempi al guasto e dei tempi di riparazione sono assunte esponenziali;
- ✓ si esclude la possibilità che più guasti si verifichino nello stesso istante;
- ✓ l'evento "guasto di un componente" è considerato istantaneo;
- ✓ il ripristino di un componente dopo la sua riparazione è considerato istantaneo;

Il primo passo nella rappresentazione dell'evoluzione temporale della rete consiste nell'estrazione

dell'istante nel quale il sistema cambia stato, in altre parole, dell'istante in cui avviene la rottura di un componente.

Detto t_s tale istante, esso è determinato in base alla formula (1):

$$t_s = t_0 - \frac{1}{\sum_{i=1}^{N_a} \lambda_i} \log(rand) \quad (1)$$

dove: t_0 è l'istante a partire dal quale si vuole studiare la vita del sistema ($t_0=0$ per la prima estrazione, $t_0=t_s$ per le estrazioni successive)

N_a è il numero di componenti funzionanti all'istante t_0

λ_i è il rateo di guasto del componente i-esimo

$rand$ è un numero random uniformemente distribuito tra 0 e 1

A questo punto viene estratto il componente che si è guastato: per fare questo si suddivide l'intervallo [0,1]

in intervalli di ampiezza $\frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^{N_a} \lambda_i}$ e si estrae un numero random distribuito uniformemente tra 0 e 1.

L'i-esimo intervallo in cui cadrà questo numero random corrisponderà al componente che ha subito una rottura all'istante t_s . Ad esempio, il caso rappresentato in figura 1 corrisponderebbe al guasto del componente n-esimo.

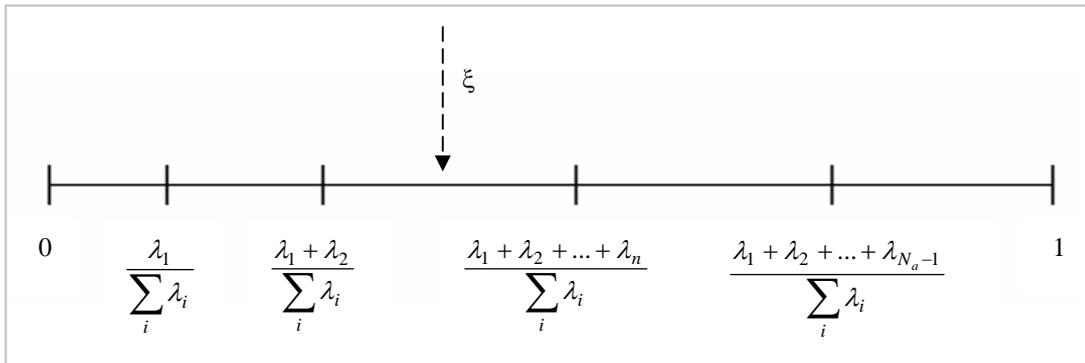


Figura 1 – Estrazione del componente che ha subito un guasto

Nel caso in cui il componente che si è guastato venga sottoposto ad un processo di riparazione, occorre estrarre l'istante di tempo in cui finirà tale riparazione. Per fare questo si utilizza la formula (2):

$$t = t_0 - \frac{1}{\mu_i} \log(rand) \quad (2)$$

dove: μ_i è il rateo di riparazione del componente i-esimo.

Per fare in modo che i tempi estratti rappresentino veramente l'evoluzione temporale del sistema come avverrebbe in un esperimento reale, occorre procedere ad una serie di controlli. Poiché non è possibile in questa sede entrare nel dettaglio di come vengono svolti questi controlli all'interno del modulo Monte Carlo, riportiamo un esempio dal quale è possibile comprendere come vengano rappresentate nel modulo le transizioni del sistema.

Si consideri ad esempio una situazione come quella schematizzata in figura 2.

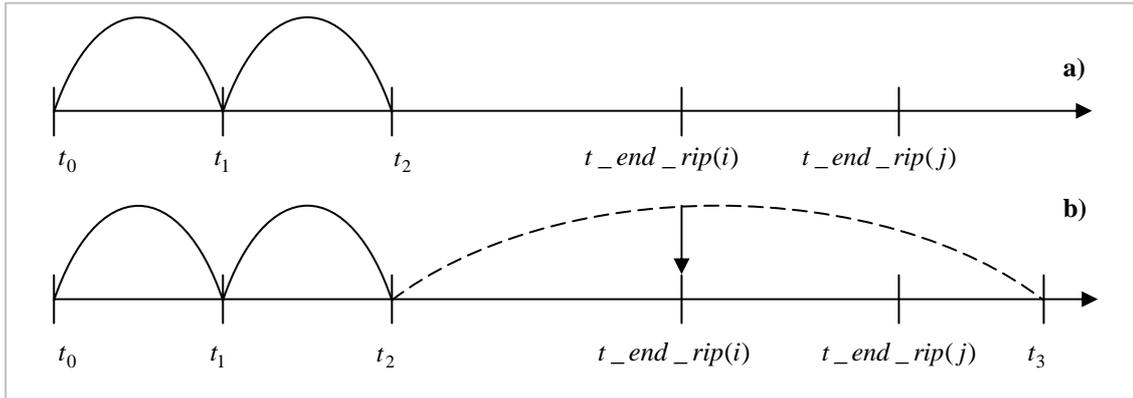


Figura 2 - Possibili configurazioni della rete

In essa sono schematizzate, mediante archi, due configurazioni della rete negli intervalli t_0-t_1 e t_1-t_2 ; all'istante t_1 si è guastato il componente i -esimo ed è stato estratto il suo tempo di fine riparazione $t_{end_rip}(i)$, mentre all'istante t_2 si è guastato il componente j -esimo per il quale è stato estratto $t_{end_rip}(j)$. E' ora possibile che una nuova estrazione dia come risultato un numero maggiore di $t_{end_rip}(j)$: in questo caso il simulatore dovrà riconoscere la presenza di tempi di fine riparazione più piccoli di t_3 e arrestare la simulazione corrente al più piccolo di questi valori. Quindi, la transizione in atto, riprodotta con una linea tratteggiata in figura 2b, dovrà essere interrotta nell'istante in cui viene ripristinato il funzionamento del componente i , in altre parole nel punto indicato dalla freccia.

Il modulo procede con controlli simili a quello sopra presentato, estraendo di volta in volta l'istante di tempo nel quale il sistema cambia stato; la simulazione procede finché non si raggiunge il tempo di missione t_m , cioè fino a che non si ha $t_0=t_m$; il tutto è poi ripetuto per N volte, fino al raggiungimento della precisione desiderata per i parametri affidabilistici che si vogliono calcolare.

E' opportuno a questo punto osservare che sarebbe anche possibile effettuare un unico campionamento del tempo di transizione considerando insieme componenti riparabili e non riparabili. La scelta di tenere distinti i due comportamenti, anche se in questa fase introduce estrazioni che sono spesso rifiutate, risulterà molto utile nel momento in cui si vorranno caratterizzare i componenti con distribuzioni ad hoc, al fine di meglio rappresentino il comportamento reale del sistema.

2.2 Modulo Termofluidodinamico

Per poter effettuare l'accoppiamento con il modulo Monte Carlo descritto nel paragrafo precedente, che richiede un numero molto elevato di simulazioni del comportamento del sistema in condizioni e configurazioni diverse, il simulatore termofluidodinamico è stato caratterizzato da una serie di ipotesi semplificative di base; in breve esse possono essere riassunte come segue:

- Il sistema è stato basato su una separazione della parte idraulica da quella termica tramite "sovraposizione degli effetti": un primo modulo verifica (in funzione della configurazione in esame) quali baricentri della rete possono essere correttamente alimentati da una portata pari a quella richiesta (punto di vista puramente idraulico) e un secondo modulo verifica se in corrispondenza dei baricentri correttamente alimentati dal punto di vista idraulico sia disponibile anche una quota di energia termica in grado di soddisfarne le esigenze di potenza termica.
- La distribuzione delle portate e delle potenze, a partire dai produttori e dai ripompaggi, è effettuata in funzione della distanza dei baricentri dalle sorgenti (di potenza termica e di portata idraulica) e dalle dimensioni dei diversi tratti delle tubazioni della rete di trasporto. A questo scopo è stata introdotta come parametro discriminatore una "lunghezza equivalente" per mezzo della quale confrontare le caratteristiche di resistenza idraulica di ciascun baricentro; tale parametro è calcolato mediante la

$$\text{formula: } L_{eq,i} = \frac{\text{lunghezza parziale tratto}_i}{\text{diametro parziale tratto}_i}$$

A partire dalle lunghezze equivalenti è possibile calcolare un parametro definito come "resistenza" dei diversi tratti parziali utilizzando la seguente relazione:

$$R_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n Leq_j}$$

in cui:

- R_i rappresenta la resistenza idraulica dell' i -esimo tratto di tubazione;
- il pedice " i " si riferisce all' i -esimo tratto in esame;
- il pedice " j " si riferisce agli " n " tratti in esame a monte dell' i -esimo tratto considerato, a partire dalla sorgente di alimentazione del tratto stesso (centrale di produzione o stazione di ripompaggio).

Le resistenze così definite rappresentano un parametro fondamentale per la determinazione della direzione privilegiata della portata lungo i tratti che si diramano a partire da una stazione di ripompaggio, nel caso in cui la portata gestibile dalle pompe funzionanti sia maggiore di quella massima disponibile in ingresso al ripompaggio stesso.

Alla luce delle ipotesi semplificative riportate ai punti precedenti si possono effettuare alcune considerazioni in merito al rispetto delle equazioni fondamentali di conservazione che stanno alla base di un modello termofluidodinamico di questo tipo.

Le equazioni di conservazione della massa e dell'energia possono essere espresse in modo sintetico come segue:

(Variazione della massa di un sistema nel tempo)	=	(Massa scambiata dal sistema con l'esterno riferita al tempo)
(Variazione dell'energia di un sistema nel tempo)	=	(Energia scambiata dal sistema con l'esterno riferita al tempo)

Nel caso specifico le due equazioni sono completamente rispettate: l'ipotesi di base di considerare solo stati stazionari del sistema rende nulli i primi termini delle due equazioni, mentre il modulo rispetta esattamente il bilancio tra le portate/potenze introdotte nelle linee di trasporto del sistema da centrali di produzione e ripompaggi, e le portate/potenze prelevate dai baricentri termici allacciati al termodotto. Le equazioni così semplificate assumono pertanto questo aspetto:

$$\sum \dot{m}_{produttori,ripompaggi} = \sum \dot{m}_{baricentri}$$

$$\sum \dot{e}_{produttori,ripompaggi} = \sum \dot{e}_{baricentri}$$

L'equazione di conservazione della quantità di moto può essere espressa in modo sintetico come segue:

(Variazione nel tempo della quantità di moto del sistema)	=	(Quantità di moto scambiata con l'esterno riferita al tempo)
---	---	--

Nel caso specifico di moto di fluido in condizioni stazionarie e in presenza di perdite di carico distribuite e concentrate, l'equazione assume la nota forma di Bernoulli:

$$\frac{\Delta p}{\rho g} + \Delta z + \frac{\Delta v^2}{2g} = \Delta H_{distribuite} + \Delta H_{concentrate}$$

Per come è stato concepito, il modulo termofluidodinamico rispetta parzialmente questa equazione di conservazione, in particolare si sono fatte le seguenti semplificazioni:

- o le distribuzioni delle portate nei nodi della rete sono considerate indipendenti dal campo di pressione e si basano sulle ripartizioni che si avrebbero in condizioni di normale funzionamento; si considera, in altre parole, che il campo di pressione non sia alterato in modo marcato dai guasti presenti; questa approssimazione può essere accettabile dal momento che il campo di pressione è controllato dall'equilibrio della linea di mandata e di ritorno della rete che sono "comunicanti" in ogni tratto;
- o si trascura il termine di energia potenziale Δz dovuto alla quota in quanto trascurabile rispetto al salto di pressione prodotto dai sistemi di pompaggio ($\Delta p/\rho g$);
- o le perdite di carico (ΔH) concentrate e distribuite sono state considerate come un unico contributo legato alla portata ed alla resistenza equivalente, quest'ultima dipendente unicamente dalla geometria della linea (diametro e lunghezza).

Utilizzando queste ipotesi il modulo termofluidodinamico deve valutare, sulla base dei componenti funzionanti e di quelli guasti (informazione fornita dal modulo Monte Carlo), quali baricentri termici sono correttamente alimentati dalla portata/potenza richiesti e quali no. Questa informazione è poi utilizzata dal modulo Monte Carlo per produrre i risultati richiesti effettuando una media statistica basata sulle N simulazioni effettuate.

3. CASO STUDIO: LA RETE AEM DI TORINO

La rete di teleriscaldamento realizzata dall’Azienda Energetica Metropolitana (AEM) di Torino rappresenta, con i suoi 28.000.000 m³ di volume globale di edifici riscaldati, uno dei maggiori sistemi per la produzione e la distribuzione di energia termica sotto forma di un flusso di acqua pressurizzato e riscaldato, presenti in Italia.

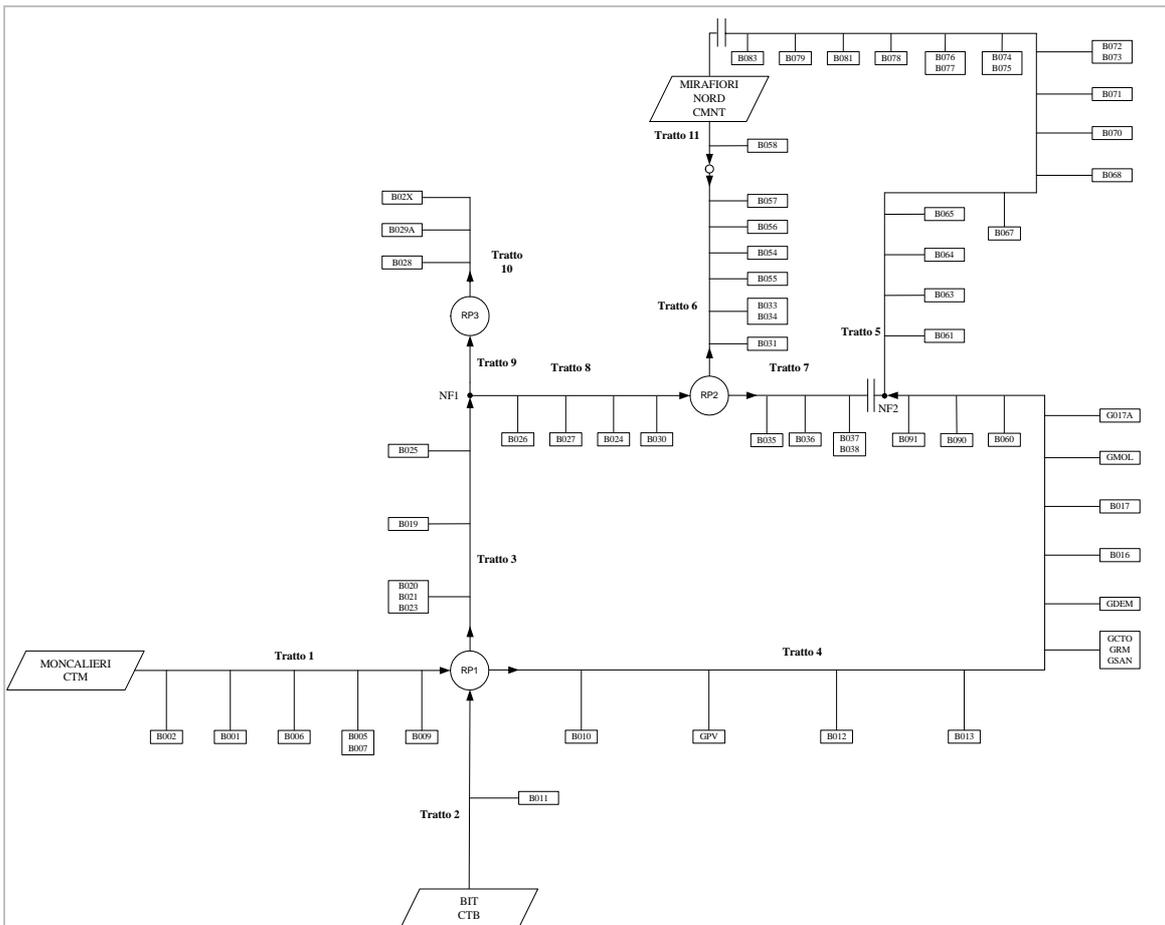


Figura 3 – La rete di teleriscaldamento di Torino Sud

In figura 3 è rappresentata la rete di teleriscaldamento di Torino Sud nella sua configurazione attuale. Essa include:

- 3 centrali per la produzione del calore e per il pompaggio (Moncalieri, Bit, Mirafiori Nord);
- 3 stazioni di pompaggio lungo la rete (RP1, RP2, RP3);
- 54 baricentri termici, che rappresentano gli utenti cui è destinato il servizio;
- un sistema di tubazioni principali;
- un sistema di tubazioni secondario per la distribuzione ai vari utenti.

Ogni tratto di tubazioni può essere considerato come una porzione elementare della rete, costituito da una coppia di tubazioni (una per la distribuzione dell’acqua calda, e una per il ritorno dell’acqua fredda). Diverse linee partono dai vari tratti della rete al fine di alimentare i vari utenti (successivamente denominati “baricentri termici”, o BCT): una frazione V_i del volume globale riscaldato può essere associato a ogni sezione della rete e questa quantità è considerata “persa” se si presenta un guasto in quella parte della rete.

4. APPLICAZIONE DEL METODO E RISULTATI

Al fine di testare la fattibilità dell'approccio metodologico precedentemente descritto, il metodo è stato implementato in ambiente Matlab.

Lo schema generale del tool è rappresentato nella figura 4.

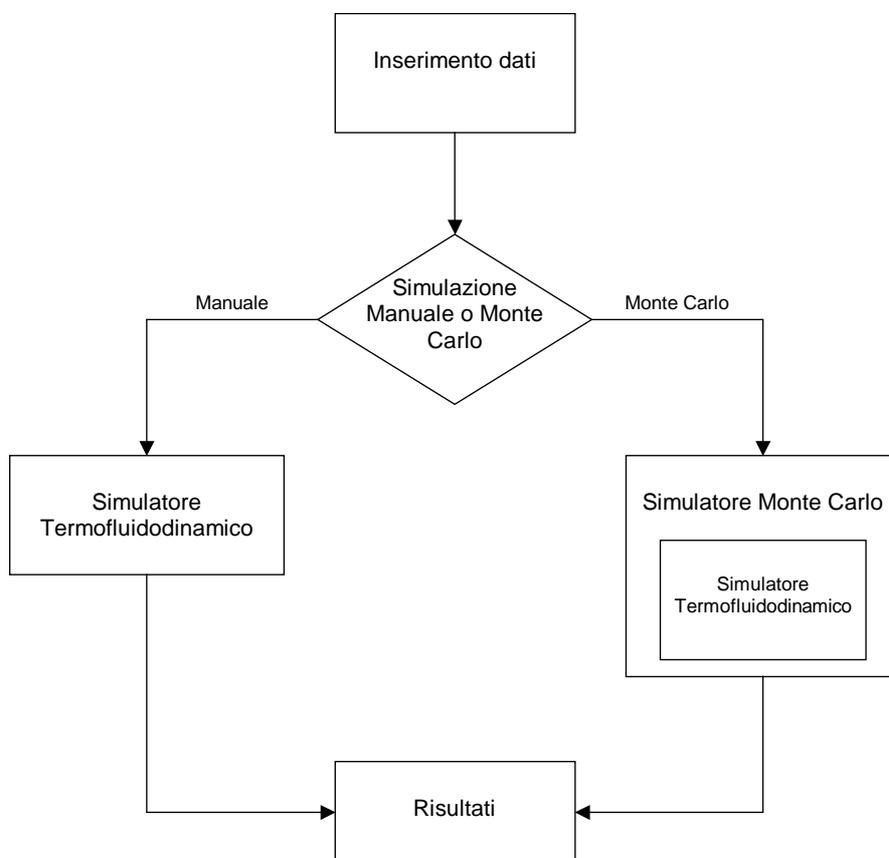


Figura 4 – Struttura generale del simulatore

In questa prima versione del modello di simulazione sono stati considerati i tre produttori attualmente allacciati alla rete e i tre sistemi di ripompaggio esistenti. Riassumendo, i componenti considerati sono:

Moncalieri	3 pompe principali + 1 di riserva	3 caldaie	1 turbogas
BIT	2 pompe principali + 1 di riserva	3 caldaie	
Mirafiori	2 pompe principali + 2 di riserva	2 caldaie + 3 di riserva	
Nord			
RP1	6 pompe		
RP2	4 pompe		
RP3	2 pompe		

Al fine di semplificare la costruzione di una prima versione pilota del modello non sono stati considerati, quali componenti soggetti a guasto, i tratti di tubazione tra i vari baricentri e tra i baricentri e le stazioni di pompaggio o produzione del calore, e neanche le varie valvole di sezionamento presenti nella rete. Il software è comunque stato costruito in modo tale da rendere agevole l'inserimento di tali componenti in una successiva versione.

L'analisi di una rete magliata come quella dell'AEM richiede il calcolo di risultati sia a livello locale di singolo baricentro sia a livello globale dell'intera rete.

A questo scopo il simulatore è stato costruito per poter fornire risultati sul comportamento affidabilistico delle singole utenze nonché sulle caratteristiche di affidabilità della rete nel suo complesso.

Per quanto riguarda il primo aspetto, sono stati calcolati il numero atteso di guasti e l'indisponibilità relativi ad ogni singolo baricentro con le formule:

$$W_i = \frac{\sum_{n=1}^N W_{i,n}}{N} \quad Q_{-bct_i} = \frac{\sum_{n=1}^N \left(\frac{\sum_{0 \rightarrow t_m} \Delta t}{t_m} \right)_n}{N}$$

dove: W_i rappresenta il numero atteso di guasti relativo all'i-esimo baricentro termico;
 Q_i rappresenta l'indisponibilità relativa all'i-esimo baricentro termico
 N è il numero di simulazioni (storie di vita del sistema nell'intervallo $[0, t_m]$, con t_m tempo di missione)

$\left(\frac{\sum_{0 \rightarrow t_m} \Delta t}{t_m} \right)_n$ indica la sommatoria degli intervalli di tempo per cui un baricentro non è stato alimentato nella simulazione n-esima.

Questa analisi ha portato ai risultati schematizzati nel grafico di figura 5.

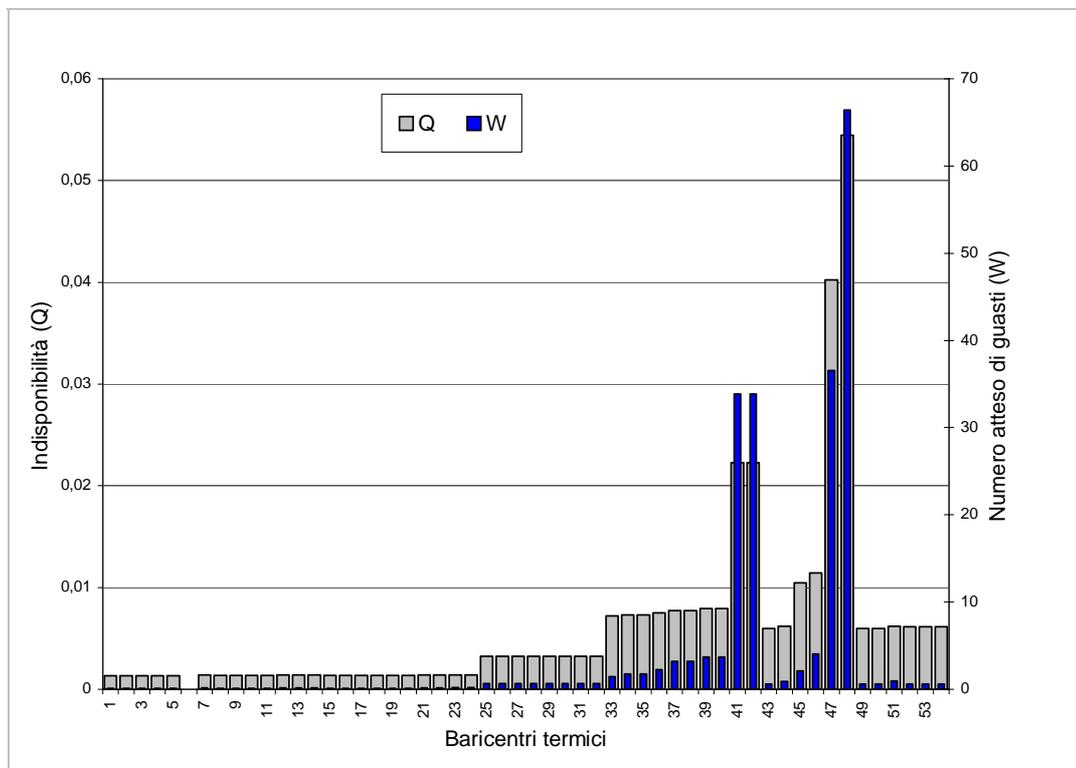


Figura 5– Inaffidabilità e indisponibilità per i baricentri termici

Nell'analisi svolta è stato anche possibile verificare l'influenza dei guasti dei componenti sull'alimentazione dei baricentri termici: in seguito al guasto di un componente (pompa, caldaia o turbogas) si incrementano in opportune matrici i contatori relativi ai baricentri che passano da una condizione di alimentazione ad una di non alimentazione. In questo modo si arriva alla valutazione di una sorta di indice di criticità di ogni componente rispetto ad ogni baricentro termico, che indica come il comportamento al guasto del componente influisce sul comportamento al guasto del baricentro termico.

Le matrici utilizzate a questo scopo sono le seguenti:

- *guilty*: è costituita da un numero di colonne pari al numero di componenti presenti nel sistema (pompe, caldaie, turbogas) e da un numero di righe pari al numero di baricentri termici alimentati dalla rete; il generico componente $guilty_{ij}$ rappresenta il numero di volte per cui il guasto del componente j ha causato la non alimentazione del baricentro i .
- *time*: di dimensioni pari a *guilty*; il generico componente $time_{ij}$ rappresenta il tempo per cui il baricentro i -esimo non è stato alimentato a causa delle rotture del componente j -esimo.

In particolare, si è rivelata molto utile ai fini della comprensione del comportamento affidabilistico della rete una rappresentazione tridimensionale di tali matrici, riportata in figura 6.

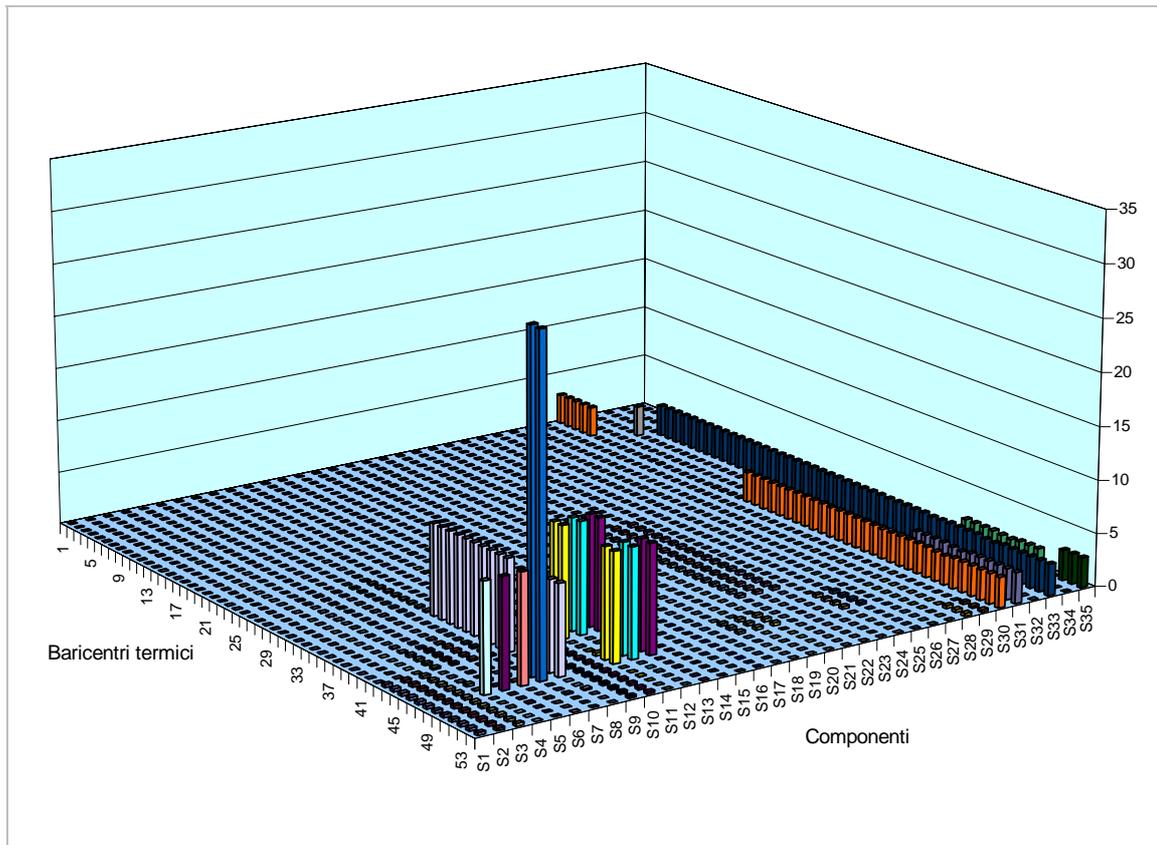


Figura 6 – Matrice time

Per quanto riguarda l'analisi del comportamento affidabilistico globale della rete, sono stati utilizzati alcuni *indici affidabilistici modificati* [4,5]: in particolare si è fatto riferimento agli indici SAIFI e SAIDI che danno, rispettivamente, un'indicazione del valore dell'inaffidabilità e dell'indisponibilità globali della rete. Le espressioni che definiscono tali indici si basano sui risultati ottenuti a livello di singolo baricentro pesati sulle volumetrie V_i spillate da ogni singola utenza; esse sono:

$$SAIFI = \frac{\sum W_i V_i}{\sum V_i} \frac{1}{t_m}$$

System Average Interruption Frequency Index, dove W_i rappresenta il numero atteso di guasti di ogni gruppo di utenze, V_i i volumi di calore forniti relativamente al gruppo i -esimo e T il tempo di missione. Questo indice rappresenta il numero atteso di guasti per unità di tempo, nella direzione dei volumi non forniti.

$$SAIDI = \frac{\sum Q_i V_i}{\sum V_i}$$

System Average Interruption Duration Index, dove Q_i rappresenta l'indisponibilità di ogni gruppo di utenze e V_i i volumi di calore forniti relativamente al gruppo i -esimo. Questo indice rappresenta l'indisponibilità del sistema, nella direzione dei volumi non forniti; come l'indisponibilità può essere interpretata come l'intervallo tra la durata del guasto e la durata teorica della missione, così l'indice può rappresentare la durata percentuale del guasto, nella direzione dei volumi non forniti

A titolo di confronto, abbiamo riportato nella seguente tabella 1 i valori ottenuti per un numero di simulazioni pari a 20000 insieme con i risultati ottenuti mediante analisi con Fault Tree, utilizzata in un precedente lavoro [4].

	Metodo Monte Carlo	Analisi con Fault Tree
SAIFI	1.33e-003	4.41e-004
SAIDI	5.65e-003	7.76e-003

Tabella 1 – Indici affidabilistici per la rete di teleriscaldamento di Torino Sud

La diversità nei risultati ottenuti con questi due metodi è da attribuire a diversi fattori:

- in primo luogo alle semplificazioni utilizzate per la prima versione di prova del metodo, in modo particolare al fatto che non sono stati considerati i guasti delle tubazioni e alle camere valvole che, pur avendo bassi ratei di guasto, possono avere un'influenza non trascurabile sull'alimentazione di alcune utenze;
- in secondo luogo alle ipotesi che sono state introdotte per quanto riguarda il modulo Termofluidodinamico applicato a questa rete, che da un lato affronta in modo semplificato gli aspetti fluidodinamici (come descritto nel precedente capitolo 3.2), ma dall'altro dettaglia in modo più approfondito e dinamico il comportamento dei ripompaggi in funzione delle diverse configurazioni che possono verificarsi in caso di guasto.

Questi fattori possono influire in modo opposto nella differenza dei risultati per i due metodi: in particolare il primo fattore esclude sicuramente dall'analisi dei possibili modi di guasto rispetto all'analisi con Fault Tree, mentre il secondo aspetto può introdurre dei benefici andando a correggere ipotesi effettivamente molto conservative per l'analisi con Fault Tree (ad esempio andando a dettagliare meglio le pompe effettivamente disponibili e non richiedendo sempre che tutte le pompe siano attive anche quando non tutte sono effettivamente necessarie).

La validità del metodo sarà ulteriormente valutata accoppiando analisi ad hoc con Fault Tree e con il modello di simulatore, a singole porzioni di rete e cercando di rendere più coerenti possibile le configurazioni analizzate con i due approcci.

Si osserva in ogni caso una buona concordanza nei risultati in termini di ordini di grandezza, specialmente per quanto riguarda l'indice SAIDI.

Un altro importante aspetto legato ad una simulazione Monte Carlo, è la verifica della convergenza statistica dei risultati. Per controllare la convergenza dei risultati ottenuti è stata calcolata la varianza, relativamente ai valori di inaffidabilità e indisponibilità, in funzione del numero di simulazioni effettuate. E' possibile affermare a priori che i baricentri termici non sono tutti uguali dal punto di vista statistico: alcuni, in particolare quelli più lontani dalle centrali di produzione del calore, saranno soggetti, mediamente, ad un numero maggiore di guasti (in quanto risentono dei guasti di tutti i componenti interposti tra essi e le centrali, nonché dei guasti delle centrali stesse); altri subiranno invece un numero minore di guasti poiché situati più vicino alle centrali e quindi non soggetti ai guasti dei ripompaggi. Per controllare la convergenza dei risultati occorrerà quindi basarsi sul secondo gruppo di baricentri, cioè su quelli che sono dotati, diciamo così, della peggior statistica.

In figura 7 sono rappresentati gli andamenti del P.R.S.D. (percentage relative standard deviation: $P.R.S.D = \frac{\sigma(\bar{x})}{\bar{x}} \cdot 100$) per i baricentri 1 e 48, rispettivamente quelli con la peggiore e con la migliore statistica; la differenza nei valori dei due grafici conferma quanto precedentemente supposto.

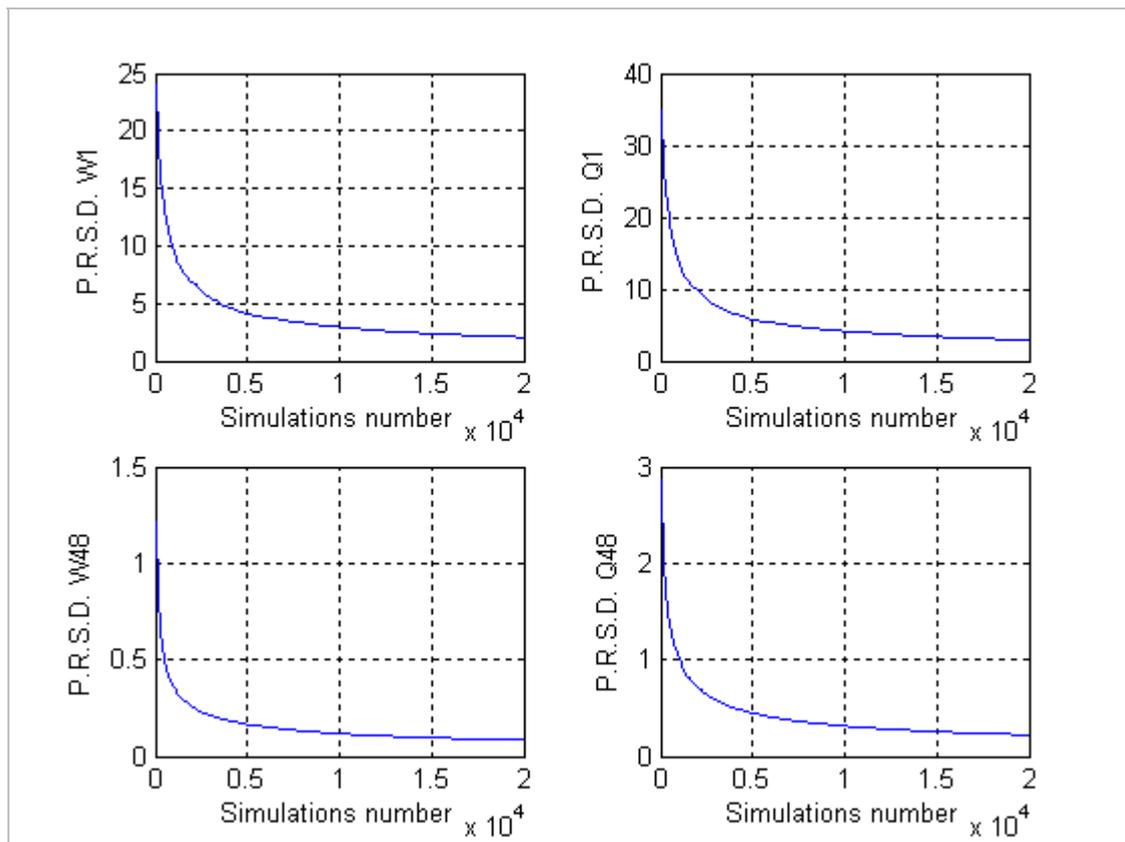


Figura 7 – Andamento del P.R.S.D. in funzione del numero di simulazioni per i baricentri termici 1 e 48

5. CONCLUSIONI

Questo lavoro dimostra come il metodo Monte Carlo possa essere applicato efficacemente e con successo a sistemi magliati, con il vantaggio di non dover introdurre le semplificazioni di carattere statico spesso necessarie quando si utilizzano i metodi analitici tradizionali.

Gli aspetti di maggior rilievo di questa nuova metodologia possono essere così riassunti:

- è in grado, mediante una tecnica innovativa che coinvolge un metodo probabilistico, di simulare efficacemente i processi di guasto e riparazione per una rete di teleriscaldamento;
- è capace di gestire sia i guasti dei singoli componenti sia i guasti multipli che possono presentarsi nella rete;
- è in grado di gestire i processi di riparazione dei componenti;
- fornisce una valutazione del livello di criticità di ogni componente considerato nei confronti di ogni baricentro termico allacciato alla rete;
- considera, anche se in modo semplificato, la fluidodinamica del sistema;
- è dotata di elevata flessibilità: può, in altre parole, adattarsi alle frequenti modifiche cui la rete può essere sottoposta durante la sua vita.

Il carattere innovativo della tecnica di analisi qui esposta ci ha posto comunque di fronte a diverse problematiche. In particolare, sarà decisivo per l'affermazione e l'ulteriore sviluppo di questa metodologia nell'analisi affidabilistica dei sistemi a rete, un ulteriore approfondimento e la risoluzione dei problemi associati ai seguenti aspetti:

- l'introduzione di un modulo fluidodinamico in grado di simulare con maggior precisione l'andamento delle portate nella rete; questo aspetto risulta chiaramente cruciale ai fini della simulazione: in questa prima versione la fluidodinamica è stata implementata solo in modo parziale mediante il confronto tra "resistenze idrauliche" create ad hoc. Se da una parte questo espediente ha consentito l'inserimento della fluidodinamica stessa nel software e la parziale riduzione dei tempi di calcolo, è anche vero che le semplificazioni così introdotte generano degli errori non sempre valutabili a priori, e che possono quindi inficiare il risultato della simulazione stessa. Questo aspetto verrà approfondito cercando di raffinare l'approccio fluidodinamico e confrontandolo con sistemi di simulazione termofluidodinamici

- attualmente esistenti;
- la possibile “esplosione” del numero di componenti, a causa dell’introduzione di altri componenti strutturali quali i tratti di tubazioni o i componenti delle camere valvole, o a causa dell’incremento delle dimensioni della rete, potrebbe rendere incompatibile l’utilizzo di un metodo Monte Carlo, a causa dell’eccessivo tempo di calcolo richiesto per la simulazione e delle difficoltà di convergenza.

Queste considerazioni ci portano a concludere che, benché sia stata provata la fattibilità di realizzare uno strumento volto all’analisi affidabilistica di reti fortemente magliate mediante un metodo Monte Carlo, molto lavoro debba essere ancora fatto dal punto di vista dell’analisi fluidodinamica del sistema. Tale analisi dovrà consentire di riprodurre con una certa precisione (nota a priori) il movimento dei fluidi all’interno della rete e, contemporaneamente, dovrà richiedere tempi di calcolo compatibili con l’accoppiamento ad un modulo Monte Carlo.

I risultati ottenuti in questa prima analisi hanno comunque dimostrato che il metodo Monte Carlo può essere efficacemente implementato in un programma in Matlab per l’analisi affidabilistica di reti magliate: mentre i classici metodi di analisi richiedono un intenso lavoro da parte dell’analista, con questo tipo di approccio è richiesto soltanto di inserire le caratteristiche affidabilistiche e termofluidodinamiche della rete, mentre il software si preoccupa di effettuare l’analisi restituendo le informazioni sia a livello di singolo baricentro sia a livello globale.

Va inoltre sottolineata l’importanza di tale strumento per analisi di sensitività, ad esempio per la ricerca della posizione ottimale dei produttori tramite eventuale riposizionamento o ripotenziamento degli stessi, o per la scelta di eventuali modifiche strutturali o di ampliamento delle reti.

Possiamo quindi concludere che gli sviluppi futuri, volti al miglioramento del metodo qui esposto saranno diretti da una parte all’applicazione di un metodo di accelerazione della varianza per ridurre i tempi di calcolo, dall’altra alla creazione e all’implementazione di un modulo di simulazione termofluidodinamica più raffinato.

7. BIBLIOGRAFIA

[1] E. Salvador, “Applicazione del metodo Monte Carlo all’analisi affidabilistica delle reti di teleriscaldamento”. Tesi di Laurea in Ingegneria Nucleare, Politecnico di Torino, Dipartimento di Energetica, Luglio 2003.

[2] M. Marseguerra, E. Zio, “Basics of the Monte Carlo Method with Application to System Reliability”. Hagen, Germany 2002.

[3] A. Dubi, “Basic Concepts of the Monte Carlo Method”. Ispra, October 8-12 1984.

[4] A. Carpignano, M. Piccini & M. Gargiulo, “Reliability and Availability Evaluation for Highly Meshed Network Systems: Status of the Art and New Perspectives”. In: Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2002, Seattle, WA USA.

[5] G. Ballocco, A. Carpignano, M. Gargiulo, M. Piccini, “Analisi di affidabilità e disponibilità di reti fortemente magliate”, VGR 2002.