

TECNICHE MONTE CARLO E SIMULAZIONE TERMOFLUIDODINAMICA PER L'ANALISI DI AFFIDABILITÀ DI SISTEMI A RETE

Salvador E.

PhD Sicurezza Industriale e Analisi dei Rischi, via Carisio 1, 10143 Torino, Italia

emanuele.salvador@ording.torino.it

SOMMARIO

Il lavoro si pone come obiettivo di definire un approccio metodologico innovativo per l'analisi di affidabilità e disponibilità di sistemi a rete magliata per il trasporto e la distribuzione di fluidi (con particolare riferimento a reti di trasporto e distribuzione di calore e di gas). L'articolo riassume i contributi portati dall'autore durante i tre anni di dottorato nell'analisi di affidabilità di sistemi a rete ed è principalmente rivolto all'esposizione della metodologia sviluppata per effettuare tale analisi, basata sull'unione ricorsiva di due moduli di simulazione: un modulo Monte Carlo e un modulo termofluidodinamico. In particolare sarà descritta la metodologia sviluppata, basata sul metodo nodale per elaborare un modulo fluidodinamico in grado di gestire reti fortemente magliate e dotate di componenti quali valvole, sistemi di pompaggio, ecc. Sarà inoltre presentata la teoria alla base del calcolo termico sviluppato per l'analisi di reti di distribuzione di fluidi. Obiettivo di tale analisi è ottenere, a partire da alcuni nodi a temperatura nota (nodi sorgente), la distribuzione di temperature per tutti gli altri nodi presenti nella rete (nodi utenza). L'articolo presenterà nel dettaglio il modello realizzato e i risultati ottenuti dall'abbinamento della simulazione Monte Carlo e di quella termofluidodinamica.

1.0 INTRODUZIONE: CARATTERISTICHE DEI SISTEMI A RETE

Come evidenziato in precedenti studi (si veda ad es. [1], [2], [3]) un problema delle reti di trasporto, quali le reti di teleriscaldamento, è la stima dell'affidabilità e della disponibilità delle utenze, sia in fase di progetto sia durante la vita del sistema. Infatti, benché per effettuare queste analisi siano disponibili metodi consolidati quali analisi con alberi dei guasti, alberi degli eventi, catene di Markov, ecc., nessuna di queste tecniche "tradizionali" permette una agevole valutazione dei parametri affidabilistici per un sistema a rete.

I principali limiti di tali metodologie classiche nei confronti di un'analisi di affidabilità di sistemi a rete consistono nell'incapacità di gestire, in modellazione e per l'analisi, diverse decine se non centinaia di componenti caratterizzati ciascuno da più modi di guasto, nonché l'elevata interdipendenza tra aspetti probabilistici e termofluidodinamici.

La metodologia descritta in questo lavoro è basata sull'unione ricorsiva di due moduli di simulazione indipendenti ma fortemente collegati: un modulo di simulazione basato sul metodo Monte Carlo, per la generazione dei processi di guasto e riparazione dei componenti del sistema, e un modulo termofluidodinamico, per la valutazione dei campi di pressione e temperatura presenti all'interno della rete. La scelta di operare mediante un metodo Monte Carlo è stata dettata da vari fattori, tra i quali si può ricordare una delle principali peculiarità dei sistemi a rete: la complessità e l'elevato numero di configurazioni operative. Questi sistemi hanno infatti raramente strutture radiali: a differenza delle 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, anche in condizioni di normale funzionamento. Tale complessità strutturale è difficilmente rappresentabile con uno strumento quale gli alberi dei guasti (per citare una delle metodologie classiche di analisi affidabilistica), se non correndo il rischio di veder rapidamente "esplodere" il numero di ramificazioni nel tentativo di rappresentare tutte le possibili configurazioni della rete.

2.0 METODOLOGIA DI ANALISI: METODO MONTE CARLO E MODELLO TERMOFLUIDODINAMICO

L'approccio metodologico realizzato è caratterizzato da due moduli di simulazione indipendenti ma fortemente interfacciati: il primo modulo è basato sulla tecnica di simulazione Monte Carlo e utilizza dati di carattere affidabilistico associati ai componenti fondamentali (singoli produttori delle centrali termiche, sistemi di pompaggio e di ripompaggio, tratti di rete di trasporto, camere valvole, ecc.) al fine di identificare le possibili configurazioni di funzionamento e guasto del sistema (in condizioni di

completa efficienza o in presenza di uno o più guasti in punti diversi della rete di distribuzione). Questo modulo ha pertanto il compito di generare un numero molto elevato di configurazioni di funzionamento/guasto della rete, farle processare al successivo modulo termofluidodinamico e quindi valutare statisticamente il numero di disservizi e le rispettive durate.

Il secondo modulo è caratterizzato dalla risoluzione del sistema non lineare associato alla rete di trasporto fluidi considerata: tale modulo permette di rappresentare le modalità di distribuzione di portata a partire dalle centrali di produzione e dalle stazioni di ripompaggio verso i diversi utenti allacciati alla rete. In particolare fornisce le modalità di redistribuzione del carico idraulico e termico in seguito ad eventi di guasto a componenti fondamentali del sistema, in termini di utenti alimentati e non alimentati.

Il metodo proposto consente quindi, mediante l'unione ricorsiva di due moduli di simulazione, di effettuare la valutazione affidabilistica di un sistema a rete considerando sia il contributo dato dal comportamento al guasto del sistema (di tipo stocastico), sia il contributo (di tipo deterministico) dato dalla redistribuzione di pressioni, portate e temperature in funzione della configurazione della rete.

Il principio di funzionamento del modello di simulazione introdotto, basato sull'accoppiamento ricorsivo di un modulo di simulazione Monte Carlo e di un modulo di simulazione termofluidodinamica, è schematizzato in Figura 1.

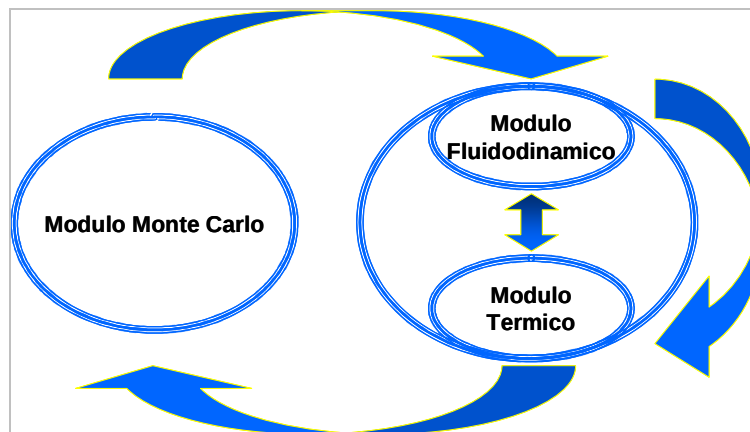


Figura1 Struttura generale del modello

Come si evince dallo schema di Figura 1, il secondo modulo racchiude in se due moduli diversi ma fortemente collegati, rispettivamente per il calcolo fluidodinamico della rete (portate e pressioni) e per il calcolo termico (temperature nei nodi).

Nel seguito sarà descritta nel dettaglio la metodologia sviluppata relativamente al modulo termofluidodinamico; per la descrizione dettagliata del funzionamento del modulo Monte Carlo si rimanda ai lavori precedentemente pubblicati ([2]-[5] e [16]). In breve, si ricorda che il modulo Monte Carlo sviluppato è basato sull'approccio tratto dal Billinton [6] e utilizza distribuzioni di guasto di tipo esponenziale. Tra le principali ipotesi su cui è basata la simulazione Monte Carlo si ricorda che 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), si esclude la possibilità che più guasti si verifichino nello stesso istante e l'evento di guasto e ripristino di un componente dopo la sua riparazione sono considerati istantanei.

3.0 MODULO FLUIDODINAMICO: METODO NODALE

A seguito di un'analisi critica dei principali metodi presenti in letteratura per effettuare un'analisi termofluidodinamica di un sistema a rete (quali il metodo di Hardy-Cross, rif. [7] e [8]), nonché metodologie in grado di gestirne la complessità (Automi Cellulari, rif. [9] e [10]), la ricerca è stata concentrata sul metodo nodale. Tale metodo si è infatti rivelato il più efficace per l'affiancamento al modulo Monte Carlo precedentemente elaborato. Nel metodo nodale le incognite fondamentali sono le quote piezometriche ad ogni nodo della rete (metodo dei carichi ai nodi): il sistema risolvibile è costituito dalle n equazioni di continuità ai nodi di giunzione (dove n è il numero di nodi), nelle quali le portate degli elementi confluenti in un nodo vengono espresse in funzione delle quote piezometriche nei nodi estremi degli elementi medesimi e dalle t equazioni di conservazione dell'energia (che legano

la perdita di carico alla portata per ciascuno dei tratti della rete). Il sistema così costituito è non lineare e può essere risolto, ad esempio, mediante il metodo di Newton-Rapson o mediante linearizzazione [11]. Tali equazioni sono state scritte in forma matriciale, più utile per la successiva implementazione su calcolatore. Il bilancio di massa assume quindi la forma:

$$A \cdot Q + Q_{ex} = 0 \quad (1)$$

dove: A ($n \times t$) è una matrice con un numero di righe pari al numero di nodi (n) presenti nella rete e un numero di colonne pari al numero di tratti (t), detta matrice di incidenza; Q ($t \times 1$) è un vettore colonna contenente le portate che scorrono nei tratti di tubazione della rete; Q_{ex} ($n \times 1$) è un vettore colonna contenente le portate immesse dai nodi sorgente, quelle estratte dai nodi utenza, o un valore nullo se il nodo non è né sorgente né utente.

L'equazione di conservazione dell'energia meccanica è invece data da:

$$\Delta H = K \cdot Q^n \quad (2)$$

dove: ΔH è il vettore delle perdite di carico (differenza tra il valore di pressione nel punto iniziale di un tratto e il valore nel punto finale dello stesso tratto) lungo le tubazioni; K è una matrice diagonale

($t \times t$) il cui generico componente è pari a $K = \frac{k_1 \cdot L}{C^n \cdot D^{4.8704}}$ in base alla formulazione di Hazen-

Williams (rif. [12]) e $n = 1.852$.

Esplicitando la portata da tale espressione e sostituendo nella (1) si ottiene il sistema:

$$W \cdot H + Q_{ex} = 0 \quad (3)$$

dove: W è una matrice quadrata di dimensioni ($n \times n$), simmetrica, nella quale i coefficienti diversi da zero sono situati in una fascia (di ampiezza $m < n$) intorno alla diagonale principale: questo consente, nel momento in cui si implementano le equazioni in un software, di evitare di memorizzare una matrice quadrata ($n \times n$), ma di utilizzare un vettore di dimensioni ($n \times m$) mediante opportuni metodi di memorizzazione (si veda ad. es. [13]). La matrice W è priva di elementi nulli solo nel caso in cui ogni nodo sia connesso con tutti gli altri nodi della rete, cosa che accade molto raramente.

3.1 Condizioni al contorno

Possono essere assegnate due tipi di condizioni al contorno: la portata spillata o introdotta in rete e la pressione nei nodi della rete. La prima condizione è introdotta direttamente mediante il vettore delle portate esterne Q_{ex} , introdotto nella (3). Nel caso invece sia fissata la pressione in uno o più nodi della rete, si è in presenza di una condizione del secondo tipo. E' opportuno far notare a questo punto che, affinché la soluzione sia univocamente determinata, è necessario assegnare (almeno) il carico H in un nodo [14]. In questo caso, fissata la pressione, ad es. nel nodo j , l'equazione j -esima del sistema (3) andrebbe eliminata ed i termini contenenti il carico assegnato conglobati nei termini noti. Per evitare il riordino del sistema conseguente a tale operazione (come evidenziato in [14]), conviene sostituire all'equazione di continuità nel nodo j la condizione di carico assegnato: $H_j = H_j^*$. Il sistema (3) assume così la forma riportata nella (4).

E' possibile quindi riassumere nel seguente modo le operazioni da effettuare per introdurre condizioni al contorno del secondo tipo nel sistema di equazioni:

- aggiungere il valore del carico assegnato H_j al vettore Q_{ex} ;
- annullare la riga j -esima e la colonna j -esima della matrice W ;
- imporre il coefficiente (j,j) pari a 1;
- imporre il coefficiente j -esimo del vettore Q_{ex} pari a H_j .

$$\begin{bmatrix} W_{11} & \dots & 0 & \dots & W_{1n} \\ \dots & \dots & 0 & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & 0 & \dots & \dots \\ W_{n1} & \dots & 0 & \dots & W_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_1 \\ \dots \\ H_i^* \\ \dots \\ H_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{ex,1} - W_{1j} \cdot H_j^* \\ \dots \\ H_i^* \\ \dots \\ Q_{ex,n} - W_{nj} \cdot H_j^* \end{bmatrix} \quad (4)$$

4.0 RISOLUZIONE DEL SISTEMA NON LINEARE

La necessità di affiancare il calcolo termofluidodinamico della rete ad un modulo Monte Carlo ha richiesto la creazione di un modulo automatico di risoluzione delle equazioni della fluidodinamica che fosse in grado di gestire differenti configurazioni della rete stessa in ingresso. In particolare, il simulatore è stato creato in modo tale da essere in grado di gestire la fluidodinamica del sistema sulla base della sola matrice di incidenza fornita dal modulo Monte Carlo (e delle caratteristiche geometriche e componentistiche della rete stessa). La risoluzione del sistema non lineare è stata affrontata mediante l'applicazione di un metodo di linearizzazione [11] e mediante il metodo di Newton-Raphson (tra i vari riferimenti ricordiamo [15]).

4.1 Linearizzazione del sistema

Il primo metodo che è stato preso in considerazione per la risoluzione del sistema non lineare (3) è stato un metodo di linearizzazione. Pur non essendo dotato di caratteristiche ottimali dal punto di vista della velocità di convergenza, la semplicità di tale metodo ne ha suggerito l'applicazione in una prima fase di analisi del modello, in particolare per valutare gli ordini di grandezza dei tempi di calcolo legati all'utilizzo di un metodo Monte Carlo in unione ad una simulazione termofluidodinamica dettagliata, come evidenziato in [16]. Come analizzato in precedenza, la non linearità presente nel sistema risolvibile (3) è dovuta alla dipendenza tra la caduta di pressione lungo una tubazione e la portata che scorre all'interno della tubazione stessa. Partendo dall'equazione (2) è possibile riscrivere la relazione tra caduta di pressione e portata facendo rientrare il fattore Q^{n-1} all'interno del parametro k' :

$$\Delta H = k \cdot Q^n = k \cdot Q^{n-1} \cdot Q = k' \cdot Q \quad (5)$$

Assumendo a questo punto $k' = k$, è possibile "eliminare" la non linearità presente nell'espressione $\Delta H = K \cdot Q^n$. In questo modo, all'interno del sistema risolvibile (3) è eliminata la dipendenza della matrice W dalle cadute di pressione: tale sistema è quindi risolvibile in modo diretto. Ovviamente il sistema andrà ancora risolto in modo iterativo, calcolando i valori delle pressioni nei vari punti della rete e ricavando di volta in volta il nuovo valore del parametro K, fino a giungere a convergenza.

L'applicazione di tale metodo può essere riassunto per mezzo dello schema riportato in Figura 3.

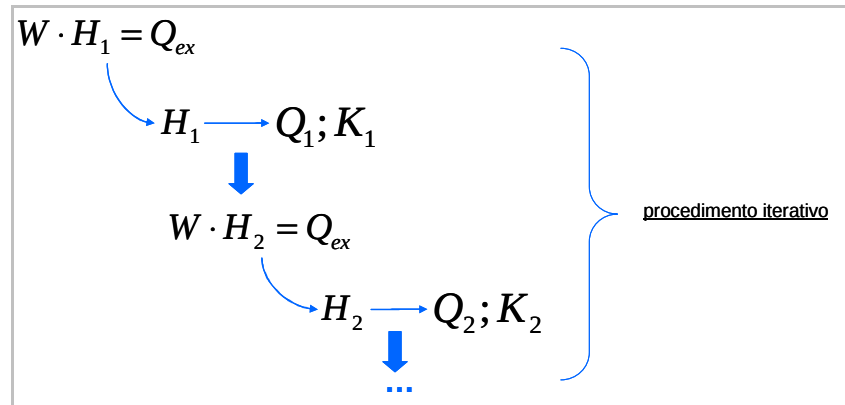


Figura 3 Schema di risoluzione del sistema (3) mediante linearizzazione

4.2 Risoluzione mediante metodo di Newton-Raphson

Come evidenziato in precedenza, l'obiettivo è di creare un modulo di simulazione che consenta, in base alla struttura geometrica quali sezioni e lunghezze delle tubazioni, la risoluzione delle equazioni della fluidodinamica sulla base della sola matrice di incidenza fornita dal modulo Monte Carlo.

Partendo dal sistema non lineare (3) è possibile ricavare il vettore H_s , soluzione di tale sistema, generando la sequenza di vettori $H_1, H_2, \dots, H_s$ mediante le espressioni ricorsive:

$$J_i \cdot \Delta H_i = f_i \text{ e } H_{i+1} = H_i + \Delta H_i \quad (7)$$

finchè non si raggiunge la tolleranza richiesta.

J_i rappresenta la matrice Jacobiana del sistema (3) ed ha la seguente espressione:

$$J(n \times n) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial H_1} & \frac{\partial f_1}{\partial H_2} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial H_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial H_1} & \frac{\partial f_n}{\partial H_2} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial H_n} \end{bmatrix} \quad (8)$$

f_i rappresenta il vettore dei residui così definito: $f_i = Q_{ex,i} - W_i \cdot H_i$ (9)

Consideriamo ora quanto rappresentato in Figura 4, dove il generico nodo j è collegato ai nodi n_1 , n_2 , n_3 per mezzo dei tratti t_1 , t_2 , t_3 ed è caratterizzato dalla portata (entrante o uscente) $Q_{ex,j}$.

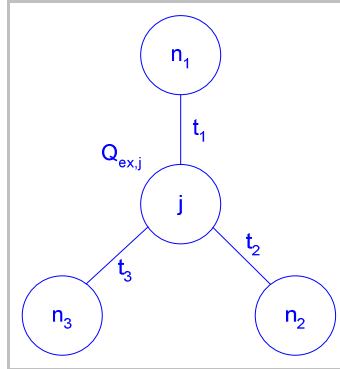


Figura 4 Rappresentazione generica del nodo di una rete

La valutazione dei due termini principali della (8), quelli sulla diagonale principale o fuori da essa, porta alle seguenti espressioni:

$$\frac{\partial f_i}{\partial H_j} = -0.54 \cdot w_{t1} - 0.54 \cdot w_{t2} - 0.54 \cdot w_{t3} \quad \frac{\partial f_i}{\partial H_{n1}} = 0.54 \cdot w_{t1}$$

Queste relazioni permettono, sostituite all'interno della (8), di valutare la matrice Jacobiana per mezzo dell'espressione:

$$J = -0.54 \cdot W \quad (10)$$

Questa relazione rappresenta un punto fondamentale per lo sviluppo del simulatore fluidodinamico: la (10) permette infatti di valutare la matrice Jacobiana per mezzo di una semplice moltiplicazione della matrice W per una costante rendendo particolarmente agevole la risoluzione del sistema (3).

5.0 INSERIMENTO DELLE POMPE NEL MODELLO

Il passaggio successivo per automatizzare la risoluzione del sistema di equazioni non lineare di una rete di trasporto fluidi consiste nell'inserire all'interno del sistema stesso componenti "speciali" quali, ad esempio, sistemi di pompaggio. Le reti di distribuzione sono infatti caratterizzate (si veda ad es. [17]) dalla presenza di sistemi di pompaggio all'interno delle centrali di produzione o posizionati lungo il sistema di tubazioni al fine di rilanciare la pressione all'interno della rete stessa.

L'inserimento di una pompa all'interno della rappresentazione della rete per mezzo di matrice di incidenza, schematizzato in Figura 5, è stato effettuato mediante l'inserimento di un nodo all'interno della struttura della rete (per rappresentare il punto di mandata della pompa) e di un tratto (per rappresentare la pompa stessa).

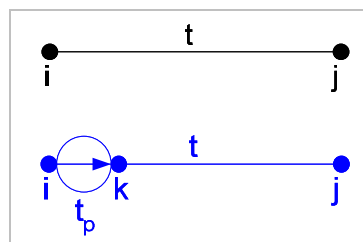


Figura 5 Schema dell'inserimento di una pompa all'interno di un tratto di estremi i e j

Nel seguito sarà descritto il modello che è stato creato per la modellazione di un sistema di pompaggio rappresentato mediante una caratteristica lineare o per mezzo di un andamento quadratico della portata in funzione della pressione.

5.1 Pompe con caratteristica lineare

Una pompa schematizzata con una caratteristica lineare può essere rappresentata per mezzo della seguente relazione:

$$\Delta H_p = -(H_i - H_k) = \alpha - \beta \cdot Q_t \quad (11)$$

dove: $\Delta H_p = -(H_i - H_k)$ rappresenta l'incremento di pressione ai capi della pompa; α e β rappresentano parametri caratteristici del funzionamento della pompa; Q_t è la portata che scorre attraverso la pompa; i e k rappresentano, rispettivamente, il nodo di presa e il nodo di mandata della pompa, come schematizzato in Figura 5.

Dalla (11) è possibile ricavare la portata Q_t che risulta essere data da:

$$Q_t = \frac{\alpha - (H_k - H_i)}{\beta} \quad (12)$$

Per valutare come tale rappresentazione possa essere inserita all'interno del sistema di equazioni non lineare consideriamo la rete utilizzata da Hodge e Taylor [18] riportata in Figura 6.

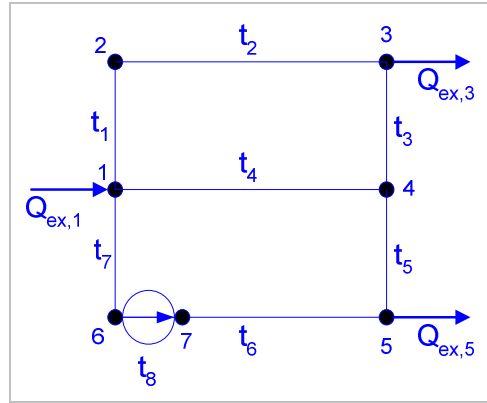


Figura 6 Rete utilizzata per l'inserimento di una pompa nel sistema di equazioni

In Figura 6 la pompa è stata inserita nel tratto compreso tra i nodi 5 e 6 (tratto t_6) mediante l'introduzione del tratto t_8 e del nodo 7.

L'espressione indicata nella (12) diventa quindi:

$$Q_8 = \frac{\alpha - (H_7 - H_6)}{\beta} \quad (13)$$

Le equazioni relative ai nodi della rete di Figura 6 saranno le stesse del sistema senza pompa, tranne per i nodi 6 e 7, che presentano un collegamento con la pompa stessa. Per tali nodi le equazioni di conservazione, per i nodi di presa e di mandata, saranno rispettivamente:

$$w_7 \cdot (H_6 - H_1) - Q_8 = Q_{ex,6} \quad (14)$$

$$-w_6 \cdot (H_7 - H_5) + Q_8 = Q_{ex,7} \quad (15)$$

Sostituendo in queste equazioni la (13) è possibile ottenere le espressioni dei residui per i nodi di presa e di mandata della pompa, per i quali è possibile calcolare le derivate e ricavare così i termini da inserire nella matrice Jacobiana (8). A titolo di esempio, per il nodo di presa della pompa si ottiene:

$$\begin{cases} \frac{\partial f_6}{\partial H_1} = 0.54 \cdot w_7 \\ \frac{\partial f_6}{\partial H_1} = -0.54 \cdot w_7 + \frac{1}{\beta} \\ \frac{\partial f_6}{\partial H_7} = -\frac{1}{\beta} \end{cases} \quad (16)$$

Si può dunque affermare che, anche con l'inserimento di una pompa all'interno della rete, il calcolo della matrice Jacobiana può essere ancora svolto come indicato nel paragrafo 4.2 per mezzo dell'espressione:

$$J = -0.54 \cdot W \quad (17)$$

e utilizzando la seguente procedura (i rappresenta il nodo di presa e k il nodo di mandata della pompa):

- sommare il termine $1/\beta$ ai termini (i,i) e (k,k) sulla diagonale principale;
- sottrarre il termine $1/\beta$ ai termini (i,k) e (k,i) simmetrici rispetto alla diagonale principale.

Quindi, anche in questo caso, il calcolo dello Jacobiano e, di conseguenza, la risoluzione del sistema non lineare (3), può essere fatta sulla base della sola matrice di incidenza e delle caratteristiche della pompa stessa.

5.2 Pompe con caratteristica quadratica

Una pompa schematizzata con una caratteristica quadratica può essere rappresentata per mezzo della seguente relazione:

$$\Delta H_p = -(H_i - H_k) = \alpha \cdot Q_t^2 + \beta \cdot Q_t + \gamma \quad (18)$$

dove: α , β e γ sono parametri caratteristici del funzionamento della pompa; i e k indicano, rispettivamente, il nodo di presa e il nodo di mandata della pompa.

Il valore di Q_t ricavato dalla (18) assumerà la forma:

$$Q_t = \frac{-\beta - \sqrt{\beta^2 - 4 \cdot \alpha \cdot [\gamma - (H_k - H_i)]}}{2 \cdot \alpha} \quad (19)$$

Procedendo nello stesso modo indicato al paragrafo precedente è stato verificato che, anche in questo caso, la matrice Jacobiana può essere calcolata mediante l'espressione (10), con l'unica differenza che il coefficiente β presente nelle (16) è ora dipendente dalla portata che attraversa la pompa.

6.0 MODELLO TERMICO

Obiettivo dell'analisi termica è ottenere, a partire da alcuni nodi a temperatura nota (nodi sorgente), la distribuzione di temperature per tutti gli altri nodi presenti nella rete (nodi utenza).

Tale obiettivo scaturisce dall'esigenza di valutare se un utente, correttamente alimentato dal punto di vista idraulico (portata erogata dalla rete), sia anche alimentato dal punto di vista termico, in altre parole possa spillare tale portata alla temperatura da lui richiesta.

6.1 Tubazioni coibentate ed interrate

Per una tubazione interrata, che sia dotata di una coibentazione al fine del trasporto di un fluido "caldo", la resistenza termica complessiva è data dalla somma di cinque resistenze termiche [19], dovute alla resistenza termica tra acqua e tubazione, alla tubazione stessa, allo strato di isolante, al terreno e alla resistenza termica tra terreno e aria. La resistenza termica dell'isolante e quella del terreno sono decisamente preponderanti sulle altre, che possono essere trascurate.

Si ha quindi che la resistenza totale R_{tot} è data dall'equazione:

$$R_{tot} = R_{is} + R_{terr} \quad (20)$$

dove: R_{tot} è la resistenza termica complessiva ($m^{\circ}Cs/kJ$); R_{is} è la resistenza termica della coibentazione ($m^{\circ}Cs/kJ$); R_{terr} è la resistenza termica del terreno ($m^{\circ}Cs/kJ$).

Per le espressioni analitiche di tali parametri, in funzione del diametro della tubazione e dell'isolante, nonché delle caratteristiche di conducibilità termica di isolante e terreno si rimanda ai testi specialistici presenti in letteratura.

6.2 Temperatura in uscita da una tubazione

Valutiamo ora la variazione della temperatura tra ingresso e uscita di una tubazione, in funzione della dispersione termica tra la tubazione stessa e il terreno circostante. Consideriamo un tratto di tubazione di lunghezza dx come rappresentato in Figura 7.

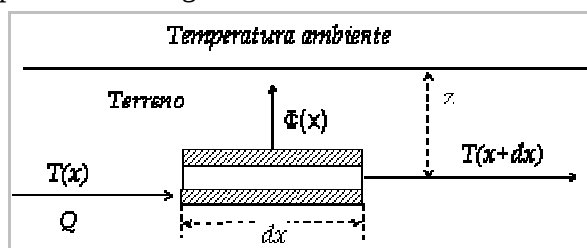


Figura 7 Calcolo della temperatura in uscita da una tubazione interrata

In caso di equilibrio termico con il terreno si ha:

$$\Phi(x) = \frac{T(x) - T_{amb}}{R_{tot}} \quad (21)$$

dove: $\Phi(x)$ è il calore scambiato per unità di lunghezza e di tempo (kJ/m/s); $T(x)$ è la temperatura della tubazione alla coordinata x (°C); T_{amb} è la temperatura ambiente (°C).

A partire da tale relazione e dal bilancio entalpico sul tratto dx è possibile, integrando sulla variabile x , ricavare la relazione tra la temperatura del fluido in uscita dalla tubazione e la temperatura del fluido in ingresso alla tubazione stessa:

$$T_{out} = T_{amb} + (T_{in} - T_{amb}) \cdot e^{-\frac{L}{c_{H_2O} \cdot R_{tot} \cdot Q}} \quad (22)$$

dove: L è la lunghezza della tubazione (m); T_{out} è la temperatura in uscita dalla tubazione (°C); T_{in} è la temperatura in ingresso alla tubazione (°C).

7.0 INSERIMENTO DEL MODELLO TERMICO NEL METODO NODALE

A partire dall'espressione (22) e dalle caratteristiche topologiche di una rete, è stato formulato un sistema di equazioni al fine di calcolare le temperature nei vari nodi della rete stessa. In generale, la temperatura in uscita da una tubazione non coincide con la temperatura del nodo in cui la tubazione termina: questo è dovuto al fatto che la temperatura del nodo sarà il risultato del bilancio entalpico tra tutte le portate (entranti e uscenti) che riguardano quel nodo.

Quindi, per valutare le temperature nei vari nodi della rete, occorrerà impostare due sistemi di equazioni differenti ma tra loro strettamente correlati: un sistema di equazioni per la temperatura in uscita dalle tubazioni (t equazioni) e un sistema di equazioni di bilancio entalpico in ogni nodo della rete (n equazioni). Come si evince dall'espressione (22), poichè la valutazione della temperatura in uscita da una tubazione è funzione anche della portata che scorre nella tubazione stessa, il calcolo termico andrà svolto solo dopo aver ricavato l'equilibrio delle portate all'interno della rete di distribuzione.

7.1 Sistema di equazioni per la temperatura in uscita dalle tubazioni

Consideriamo la generica tubazione t , dal nodo i al nodo j , immersa in un ambiente a temperatura T_a , rappresentata in Figura 9.

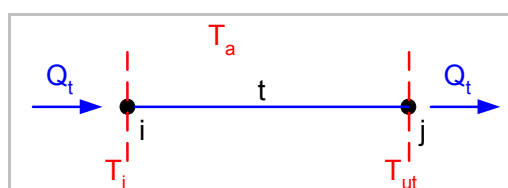


Figura 9 Generica tubazione tra i nodi i e j

In base all'espressione (22) possiamo scrivere:

$$T_{out} = T_a + (T_i - T_a) \cdot e^{-\frac{L_t}{c_{H2O} \cdot R_t \cdot Q_t}} \quad (23)$$

Poichè i termini a esponente sono caratteristici della tubazione, è possibile introdurre un coefficiente p , da calcolare una sola volta per ogni tubazione (e per una data distribuzione delle portate nella rete), mediante la seguente espressione:

$$p = e^{-\frac{L_t}{c_{H2O} \cdot R_t \cdot Q_t}} \quad (24)$$

In questo modo la (23) può essere scritta in forma matriciale come:

$$T_u = P \cdot N_p \cdot T + T_a \cdot (I - P) \quad (25)$$

dove N_p è un vettore contenente i nodi da cui la portata è uscente e T è il vettore delle temperature nei nodi della rete.

E, in forma compatta, come:

$$T_u = W \cdot T + Z \quad (26)$$

dove: $W = P \cdot N_p$ di dimensioni (txn) ; $Z = I - P$ di dimensioni $(tx1)$.

7.2 Sistema di equazioni di bilancio entalpico nei nodi della rete

In Figura 10 è rappresentato un generico nodo n , nel quale convergono tre tratti ed è spillata (nodo utente) una portata Q_{ex} .

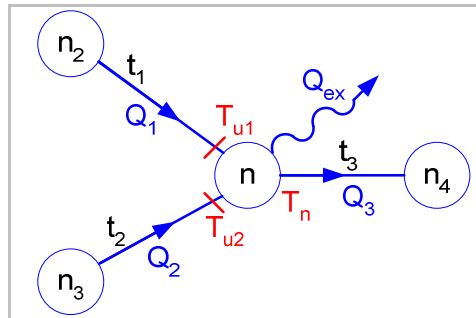


Figura 10 Bilancio entalpico per un nodo generico

Considerando in prima approssimazione il calore specifico dell'acqua costante, è possibile scrivere, per il generico nodo riportato in Figura 10, il bilancio entalpico come:

$$T_n \cdot Q_3 - T_{u1} \cdot Q_1 - T_{u2} \cdot Q_2 = T_n \cdot Q_{ex3} \quad (27)$$

L'equazione (27) deve essere scritta per tutti gli n nodi della rete, portando così alla costruzione di un sistema di n equazioni nelle n temperature incognite in forma matriciale.

Il contributo dato al bilancio entalpico dalle portate uscenti o entranti in un nodo può essere espresso rispettivamente per mezzo delle seguenti relazioni:

$$diag(N_p \cdot Q) \cdot T = D_p \cdot T \quad (28)$$

$$N_a^T \cdot diag(Q) \cdot T_u = D_a \cdot T_u \quad (29)$$

dove: $D_p = N_p \cdot Q$ ha dimensioni $(n \times n)$; $D_a = N_a^T \cdot diag(Q)$ ha dimensioni $(n \times t)$

Mediante queste matrici, il sistema di n equazioni (27) può essere scritto come:

$$D_p \cdot T - D_a \cdot T_u = D_{ex} \cdot T \quad (30)$$

dove: D_{ex} è una matrice diagonale contenenti i valori delle portate spillate o introdotte nei vari nodi.

La (30) può ancora essere riscritta nella forma compatta:

$$G \cdot T = D_a \cdot T_u \quad (31)$$

dove: $G = D_p - D_{ex}$ ha dimensioni $(n \times n)$.

La (26) insieme alla (31) forma il seguente sistema di equazioni:

$$\begin{cases} T_u = W \cdot T + Z \\ G \cdot T = D_a \cdot T_u \end{cases} \quad (32)$$

Sostituendo l'espressione del vettore T_u data dalla (26) all'interno della (31) è ancora possibile ridurre il sistema (32) al seguente sistema matriciale, nella sola incognita (vettoriale) T :

$$E \cdot T = N \quad (33)$$

dove: $E = G - D_a \cdot W$ di dimensioni $(n \times n)$; $N = D_a \cdot Z$ di dimensioni $(n \times 1)$.

Il sistema (33) può essere risolto invertendo la matrice E ed ottenendo così il vettore T delle temperature in tutti i nodi della rete. Le condizioni al contorno per tale sistema di equazioni possono essere imposte nello stesso modo di quanto fatto per il sistema (3), come descritto nel par. 3.1.

8.0 APPLICAZIONI

Nel seguito è presentata una delle applicazioni che sono state fatte della metodologia descritta nel presente articolo per mezzo del software sviluppato, ad una rete di distribuzione di fluidi tratta dal testo di Jeppson [12]. Obiettivo di tale applicazione è da una parte dimostrare l'applicabilità e la funzionalità del metodo sviluppato, dall'altra evidenziarne la potenzialità per l'analisi di affidabilità di sistemi a rete. Tale rete, riportata in Figura 11, è costituita da 26 tratti di tubazione, 16 nodi (dei quali 2 nodi sorgente e 8 nodi utenza) e 1 pompa di rilancio della pressione.

Al fine di valutare l'influenza del modello termico sulla valutazione affidabilistica della rete, sono stati valutati i parametri affidabilistici di interesse sia con l'utilizzo del modello puramente fluidodinamico (valutazione delle portate e delle pressioni) sia con il modello comprensivo della valutazione della temperatura del fluido; i risultati di tale applicazione per la rete di Figura 11, in termini di indisponibilità (Q) e numero atteso di guasti (ENF), sono riportati nella successiva Tabella 1.

Da quanto riportato in Tabella 1 si evince che i valori ottenuti considerando anche il modello termico della rete sono costantemente superiori a quelli ricavati senza la considerazione dell'influenza della temperatura sulle utenze: ciò appare ragionevolmente corretto in quanto l'introduzione del calcolo termico necessita il soddisfacimento di una condizione in più per la verifica delle alimentazioni delle utenze, aumentando di conseguenza il valore calcolato rispetto all'assenza di valutazione termica. Si nota inoltre come la differenza tra i due valori sia in alcuni casi superiore al 20%, evidenziando così l'importanza di una simulazione anche termica della rete, e non solo in termini di portate e pressioni, al fine di stimare correttamente i parametri affidabilistici delle utenze ad essa collegate.

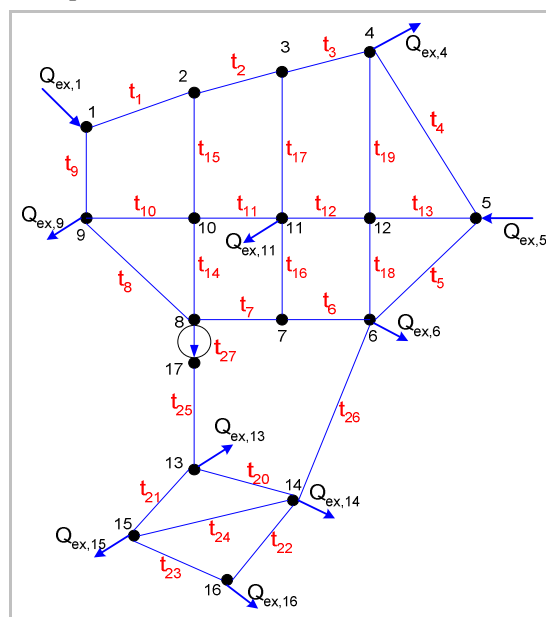


Figura 11 Rete di distribuzione di fluidi [12]

Tabella 1 Confronto tra i parametri affidabilistici locali valutati solo con il modello fluidodinamico e con il modello termofluidodinamico (pedice T)

	Q	Q _T	ENF	ENF _T
Nodo 4	0.1734	0.3749	4.03	5.36
Nodo 6	0.3436	0.4660	4.85	5.87
Nodo 9	0.3617	0.3602	5.16	5.15
Nodo 11	0.1333	0.2781	2.81	4.33
Nodo 13	0.3183	0.4247	4.93	5.54
Nodo 14	0.3960	0.4366	4.78	5.56
Nodo 15	0.3112	0.4405	4.84	5.52
Nodo 16	0.3630	0.4482	4.93	5.92

Un'ulteriore tipologia di risultati derivanti dall'analisi in oggetto è costituita da matrici del tipo rappresentato in Figura 12: per mezzo di tale rappresentazione è possibile avere subito un'indicazione dei componenti che maggiormente influiscono sulle non alimentazioni delle due utenze e i relativi tempi.

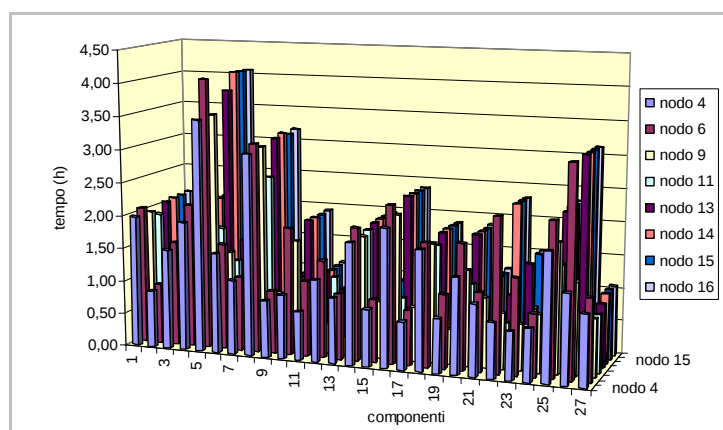


Figura 12 Influenza dei guasti dei componenti sui nodi della rete di Figura 11

L'utilità di grafici e delle relative analisi è data dall'evidenza che si può immediatamente avere per quanto riguarda la valutazione della criticità dei singoli componenti il sistema, e la loro influenza sulle utenze, sia in termini di numero di mancate alimentazioni, sia di intervalli di tempo di mancato servizio. Di conseguenza, risulta particolarmente agevole l'individuazione degli elementi sui quali è più opportuno intervenire per migliorare le prestazioni del sistema.

CONCLUSIONI

Il presente lavoro, partendo dalle attività precedentemente svolte ([2]-[5]) ha avuto come obiettivo la messa a punto di una metodologia di analisi affidabilistica, in grado di gestire sia gli aspetti stocastici sia termofluidodinamici legati all'analisi di sistemi a rete per la distribuzione di fluidi. I risultati esposti in questo articolo hanno evidenziato alcune potenzialità della metodologia, sia per quanto riguarda la versatilità dell'analisi sia per la diversificazione dei risultati ottenibili: ciò viene fatto per mezzo della valutazione di parametri affidabilistici locali e globali e grazie alla rappresentazione numerica e/o grafica dei risultati stessi, nonché della possibilità di effettuare analisi di sensitività al fine di valutare la criticità dei componenti nei confronti delle varie utenze, mediante la semplice sostituzione dei valori dei ratei di guasto. Ai fini gestionali e progettuali, il metodo rappresenta un valido supporto per la verifica della qualità del servizio offerto, e delle possibili necessità di modifiche strutturali per migliorarne le prestazioni, consentendo inoltre di verificare l'effetto su affidabilità e disponibilità della localizzazione dei produttori, nonché di evidenziare le criticità che caratterizzano i vari componenti, indicandone l'effetto sulle varie utenze della rete. Concludendo si può affermare che, laddove i classici metodi di analisi non consentivano di soddisfare le esigenze dell'analista e lasciavano diversi problemi aperti, il metodo proposto consente di affrontare efficacemente tali problematiche configurandosi come uno strumento versatile e adatto allo scopo.

RIFERIMENTI

- [1] Carpignano A., Piccini M., Salvador E., "Analisi di Affidabilità e Disponibilità di sistemi a rete magliata per il trasporto di fluidi: l'approccio metodologico basato su Fault Tree Analysis e Indici Integrali di Affidabilità e Disponibilità". PRIN PoliTo Re02. Politecnico di Torino, Settembre 2004.
- [2] Carpignano A., Salvador E., Gargiulo M., Piccini M., "Monte Carlo Method Application for Reliability and Availability Analysis of Highly Meshed Network Systems". ESREL 2004.
- [3] Carpignano A., Salvador E., Gargiulo M., Piccini M., "Sistemi a rete magliata per il trasporto di energia: accoppiamento di strumenti di simulazione termofluidodinamica e analisi di affidabilità con approccio Monte Carlo". VGR 2004.
- [4] Carpignano A., Piccini M., Salvador E., Ponte E., "Analisi di affidabilità e disponibilità di sistemi a rete magliata per il trasporto di fluidi: sviluppi dell'approccio metodologico basato sul metodo Monte Carlo e su una simulazione dettagliata degli aspetti fluidodinamici". PRIN PoliTo Re06. Dicembre 2005.
- [5] Carpignano A., Piccini M., Salvador E., "Analisi di affidabilità e disponibilità di sistemi a rete magliata per il trasporto di fluidi: l'approccio metodologico basato sul metodo Monte Carlo". PRIN PoliTo Re04. Politecnico di Torino, Ottobre 2004.
- [6] Billinton R., Li W., "Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods". 1994 Plenum Press, New York.
- [7] Lopes A. M. G., "Implementation of the Hardy-Cross Method for the Solution of Piping Networks". Computer Applications in Engineering Education, Vol. 12 Issue 2, Jul 2004.
- [8] Sarbu I., "Analysis of Looped Water Distribution Networks". Dep. of Building Services, "Politehnica" University of Timisoara, Romania.
- [9] Rocco C. M., Zio E., "Solving Advanced Network Reliability Problems by means of Cellular Automata and Monte Carlo Sampling". Reliability Engineering and System Safety, Vol. 89 N° 2, 2005.
- [10] Rocco C. M., Moreno S. J. A., "Network reliability assessment using a cellular automata approach". Reliability Engineering and System Safety, Vol. 78, Sep, 2002.
- [11] Wood Don J., M. ASCE and Charles C. O. A., A. M. ASCE, "Hydraulics Network Analysis Using Linear Theory". Journal of the Hydraulics Division, Vol. 98, N° HY7, July, 1972.
- [12] Jeppson R. W., "Analysis of flow in pipe networks". Ann Arbor Science Publishers Inc. Second printing, 1977.
- [13] Mignosa P., "Modelli matematici delle reti di distribuzione idrica". Dip. di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Parma.
- [14] Georgiev V., Stankov P., Lozanova M., "Modeling a pipe line network". XXIII Summer School "Application of Mathematics in Technology", Sozopol, Bulgaria, June 15-21, 1997.
- [15] Epp R., Fowler A. G., "Efficient Code for Steady-State Flows in Networks". Journal of the Hydraulics Division, Vol. 96, HY1, Jan, 1970.
- [16] Carpignano A., Piccini M., Salvador E., Gargiulo M., "Applicazione comparativa di metodologie di analisi di affidabilità e disponibilità per un sistema di teleriscaldamento". PRIN PoliTo Re05. Politecnico di Torino, Novembre 2004.
- [17] Ghelli G. M., Ghelli G., "Tecniche delle reti e degli impianti acqua e gas". Maggioli editore. III edizione. 2003.
- [18] Hodge B. K., Taylor R., "Analysis and design of energy systems". Prentice All, III edition.
- [19] Tarenzi V., "Programma Teleris – calcolo del regime stazionario di una rete di teleriscaldamento". Bologna, Giugno 2003.
- [20] Calì M., "Rassegna di metodi per il calcolo delle reti per distribuzione di fluido". CH₄ Energia Metano n°1-1984.
- [21] Kesavan H. K. and Chandrashekar M., "Graph-Theoretic Models for Pipe Network Analysis". Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol.98, Feb. 1972.
- [22] Donachie R. P., "Digital Program for Water Network Analysis". Journal of the Hydraulics Division, Vol. 100, No 3, Mar 1974.
- [23] Huddleston D. H., Alarcon V. J., Chen W., "Water Distribution Network Analysis using Excel". Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 130, No. 10, October 2004.