

ANALISI DI AFFIDABILITÀ E DISPONIBILITÀ DI RETI FORTEMENTE MAGLIATE

G. Ballocco⁽¹⁾, A. Carpignano⁽²⁾, M. Gargiulo⁽³⁾, M. Piccini⁽⁴⁾

Dipartimento di Energetica, Politecnico di Torino

telefono: 011.564.4412⁽¹⁾ / 4450⁽²⁾ / 4412⁽³⁾ / 4413⁽⁴⁾

e-mail: gballocc@tin.it⁽¹⁾, acarpignano@polito.it⁽²⁾, maurizio.gargiulo@polito.it⁽³⁾, mipiccin@polito.it⁽⁴⁾

1. SOMMARIO

La memoria richiama il problema della valutazione dell'affidabilità e della disponibilità di sistemi a rete fortemente magliata, come i sistemi di distribuzione del gas o del calore. Nell'introduzione sono evidenziati i problemi specifici associati alla complessità strutturale ed al carattere dinamico di questi sistemi. Viene descritto ed applicato ad un'ipotetica rete un metodo che combina l'utilizzo di algoritmi ricorsivi per la *ricerca dei cut set*, basato sulla teoria dei grafi, al calcolo di indici affidabilistici. Segue un'analisi critica in cui i risultati del metodo proposto vengono confrontati con quelli ottenuti per mezzo di metodologie più consolidate. L'attività è basata sull'esperienza acquisita dagli autori durante l'analisi di affidabilità e disponibilità di uno dei più estesi sistemi di teleriscaldamento in Italia, gestito dall'Azienda Energetica Metropolitana (AEM) di Torino.

2. INTRODUZIONE

L'analisi di affidabilità e disponibilità di reti fortemente magliate, ad esempio per la distribuzione di gas o acqua calda per il teleriscaldamento, può considerarsi a tutt'oggi un problema aperto. Infatti, nonostante il proliferare di questa tipologia di sistemi, soprattutto in ambito urbano, in zone quindi molto complesse ed altamente vulnerabili, non è possibile reperire in letteratura tecniche specifiche che ne permettano l'analisi affidabilistica. Gli studi disponibili, inoltre, si riferiscono ad applicazioni di tecniche classiche adatte soprattutto allo studio di sistemi di dimensioni ridotte e a configurazione radiale. Da ciò consegue una considerevole incertezza nei risultati.

Le ragioni che rendono particolarmente problematica l'analisi sono diverse e connesse alle caratteristiche dei sistemi in esame. Possono essere riassunte come nel seguito.

- Le reti di distribuzione del gas e del calore sono sistemi complessi composti da centrali termiche, tubazioni per il trasporto e la distribuzione, stazioni di pompaggio, valvole di regolazione e sezionamento. Questi sistemi sono caratterizzati da un elevato numero di componenti e da un'elevata estensione territoriale.
- L'utenza è distribuita; una rete non è un sistema caratterizzabile da un solo ingresso ed una sola uscita e risulta pertanto complesso definire l'evento "indisponibilità della rete". Il concetto di indisponibilità dovrà tenere conto della distribuzione delle utenze sul territorio abbinando la probabilità di disservizio per ogni utenza ed il danno ad essa relativo.
- La magliatura delle reti fa sì che i sistemi siano altamente ridondati e quindi possano essere utilizzati in svariate configurazioni di esercizio. Il numero di maglie è un fattore che aumenta considerevolmente la complessità di analisi.
- Per questa tipologia di sistemi esiste un'elevata interazione tra gli aspetti probabilistici e quelli termo-fluidodinamici. 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 riguarda in particolare la ridistribuzione delle pressioni ai nodi della rete. Questo significa che tali sistemi non possono essere trattati solo da un punto di vista logico-probabilistico, ma richiedono l'utilizzo di una tecnica ibrida che permetta di studiare il problema in modo integrato, considerando aspetti logico-probabilistici e termoidraulici.
- Le reti di distribuzione del gas e del calore sono sistemi soggetti a molti cambiamenti strutturali ed a miglioramenti della loro configurazione topologica. Non è perciò sufficiente trovare uno strumento che

permetta di studiare l'affidabilità e la disponibilità della configurazione attuale ma è necessaria una tecnica flessibile che offra un supporto per valutare le diverse opzioni ed i diversi miglioramenti attuabili sul sistema, in modo tale da migliorare l'affidabilità e la disponibilità dello stesso

Sulla base di queste considerazioni, lo scopo di questo lavoro è la messa a punto di una metodologia per l'analisi di affidabilità e disponibilità di reti fortemente magliate. Nel seguito si proporrà una tecnica basata sulla combinazioni di metodi di ricerca dei cut-set con indici affidabilistici ed una sua applicazione ad una rete ipotetica. I risultati ottenuti saranno discussi alla luce di quelli accessibili per mezzo dell'analisi *con alberi dei guasti*, applicata allo stesso caso.

3. UTILIZZO DI INDICI AFFIDABILISTICI MODIFICATI PER LA STIMA DELLE CONDIZIONI GENERALI DELLA RETE

Nell'affrontare un sistema a rete magliata, il primo passo concerne il calcolo dei valori di affidabilità e disponibilità per ogni utenza della rete, cioè la valutazione del comportamento locale del sistema; in una seconda fase, è necessario applicare una tecnica che permetta di raccogliere e considerare tutti i parametri locali al fine di produrre una valutazione circa il comportamento globale del sistema.

I precedenti lavori pubblicati dagli autori [1,2] hanno dimostrato come il problema della valutazione delle condizioni generali della rete, può essere efficacemente risolto mediante l'applicazione di indici affidabilistici modificati.

Gli indici di affidabilità sono stati sviluppati e validati con specifico riferimento all'ambito elettrotecnico, per i sistemi di distribuzione dell'energia elettrica [3]. Questi indici consentono di valutare, con alcune restrizioni, le condizioni globali di affidabilità e disponibilità della rete di distribuzione mediando sulle utenze le caratteristiche di affidabilità e disponibilità locali. Con opportune modifiche questi indici possono essere applicati anche in altri domini.

Nuovi indici sono stati sviluppati per l'applicazione alle reti di distribuzione del calore, sulla base di due categorie di risultati:

- *indisponibilità e numero atteso di guasti* (Q_i e W_i), ricavati tramite l'analisi con *alberi dei guasti* (*fault tree analysis* o *FTA*);
- perdita di volumi di calore forniti nel caso in cui ogni singolo gruppo di utenze fallisca (V_i).

Gli indici modificati sono riportati in Tabella 1 [1].

Tabella 1. Definizione degli Indici Affidabilistici Modificati.

$SAIFI = \frac{\sum W_i V_i}{\sum V_i} \frac{1}{T}$	<p><i>System Average Interruption Frequency Index</i>, 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.</p>
$SAIDI = \frac{\sum Q_i V_i}{\sum V_i}$	<p><i>System Average Interruption Duration Index</i>, 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.</p>

La scelta di questi indici è stata fatta al fine di identificare parametri in grado di fornire un'informazione generale e sintetica sulle caratteristiche del sistema: essi consentono di calcolare valori di *indisponibilità* e *numero atteso di guasti* della rete, mediati sul numero delle utenze connesse. Questo approccio si rivela molto utile nel caso si intendano confrontare le prestazioni di configurazioni diverse di una rete, al fine di individuare le soluzioni progettuali migliori per minimizzare i valori di *indisponibilità* e *numero atteso di guasti*.

A questo punto, preso atto del fatto che l'applicazione degli *indici affidabilistici* può risolvere il problema della valutazione del comportamento globale della rete, si presenta il problema di individuare una tecnica altrettanto efficace per calcolare i valori dei parametri locali della rete e cioè l'*indisponibilità* e il *numero atteso di guasti* relativo ad ogni singola utenza. In un primo momento ci si è avvalsi dell'utilizzo dell'analisi con *alberi dei guasti* che è in grado di fornire i risultati cercati tenendo conto dei guasti multipli e degli

aspetti fluidodinamici del problema. Questa tecnica comporta però uno sforzo consistente in termini di tempo di lavoro, poiché richiede la costruzione di un'albero dei guasti per ogni utenza esaminata; essa si rivela quindi inefficiente per sistemi molto estesi e/o soggetti a frequenti modifiche idrauliche o strutturali.

4. UTILIZZO DI METODI CUT SET E FLOW CUT SET PER LA STIMA DELLE CONDIZIONI LOCALI DELLA RETE

In letteratura sono reperibili diversi esempi di tecniche per la stima dell'affidabilità e disponibilità delle reti: dalle applicazioni del *metodo Montecarlo* [4], alle *reti neurali* [5], alle *catene di Markov* [6]. In seguito ad un'analisi critica delle diverse metodologie [2], l'attenzione si è focalizzata su metodi di *ricerca dei cut set*, basati sulla *teoria dei grafi*.

Con l'applicazione di questa tecnica, sulla base di una rappresentazione grafica del sistema, possono essere individuati tutti i possibili *cut set*, da cui è immediato pervenire ai valori di *indisponibilità* e *numero atteso di guasti*, ottenendo quindi gli stessi risultati accessibili per mezzo della FTA.

Il metodo prevede la creazione di una matrice caratteristica del sistema, detta *matrice di incidenza*, sulla base della rappresentazione grafica, o grafo, dello stesso; quindi, tramite appositi algoritmi, si perviene alla lista di tutti i *cut set*, o Insiemi di Taglio. Il tempo di calcolo per *cut set* aumenta linearmente con l'aumentare del numero di nodi ma diminuisce esponenzialmente al diminuire della densità della matrice. Nella loro veste più semplificata, queste tecniche non tengono conto dei possibili guasti dei nodi della rete (nodi perfetti) e trascurano gli aspetti termo-fluidodinamici. Nuovi approcci in fase di sviluppo consentono però di superare queste semplificazioni.

Questo tipo di approccio presenta numerosi vantaggi.

- La parte più consistente del lavoro di analisi può essere trasferita all'algoritmo di calcolo, rimanendo all'analista solo la fase di costruzione della matrice caratteristica;
- Possono essere presi in considerazione gli aspetti termo-fluidodinamici del sistema;
- È assicurata un'ampia flessibilità in caso di cambiamenti nella struttura del sistema;
- È possibile considerare gli aspetti dinamici del sistema definendo adeguatamente le caratteristiche dei singoli nodi.

In prima istanza, il principale limite di questo approccio può essere legato al tempo di calcolo richiesto dall'algoritmo poiché la matrice associata a una rete estesa e fortemente magliata, può assumere dimensioni ragguardevoli; esistono in ogni caso metodi di riduzione [7,8] che consentono di contenere il tempo di calcolo.

5. ESEMPIO APPLICATIVO

Al fine di valutare l'efficacia dei Metodi di Ricerca di *cut set*, si è svolta un'applicazione prendendo in considerazione un'ipotetica rete di teleriscaldamento urbano. I risultati sono stati confrontati con quelli ottenuti tramite l'analisi con *alberi dei guasti*. L'esempio considerato è riportato in Figura 1; a dispetto della sua semplicità, la rete esaminata presenta tutte le caratteristiche di un caso reale.

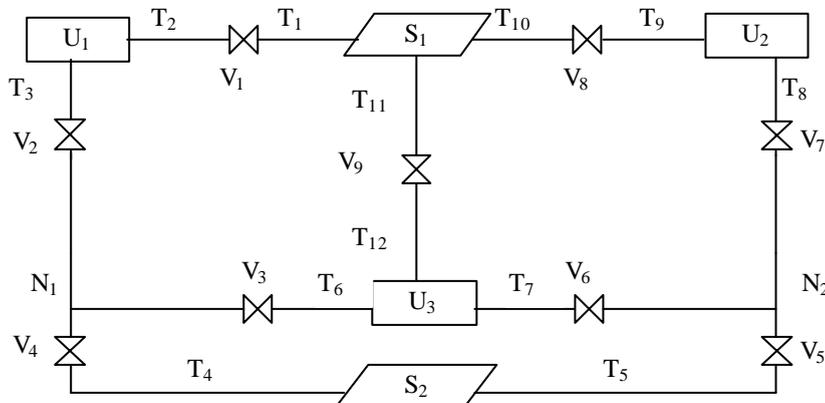


Figura 1. Rete ipotetica per teleriscaldamento

T_x : Tratto di doppia tubazione (una tubazione per l'alimentazione dell'acqua calda alle utenze, l'altra per il ritorno dell'acqua fredda). Il modo di guasto considerato è la perdita di fluido in seguito alla rottura della tubazione.

V_x : Valvola motorizzata. Due modi di guasto considerati: valvola bloccata chiusa e perdita di fluido.

S_x : Sorgenti (Impianti di produzione del calore e impianti di pompaggio). L'unico guasto considerato è il fuori servizio.

U_x : Utenze. Due modi di guasto considerati: utenze bloccate chiuse e perdita di fluido.

La presenza di due sorgenti rende l'analisi più realistica, poiché comporta la possibilità di considerare più soluzioni per alimentare le utenze. D'altro canto, la presenza di più utenze, consente di distinguere tra condizioni locali e globali, secondo la distinzione introdotta in precedenza.

La rete considerata è di tipo indiretto, cioè ogni tratto di tubazione può essere alimentato in entrambe le direzioni. Quando un'utenza è selezionata come obiettivo dell'analisi, al fine di determinarne i valori di *indisponibilità* e *numero atteso di guasti*, può essere considerata come un punto di arrivo del flusso. Quando invece l'utenza non è selezionata come obiettivo, si comporta come una valvola, consentendo il flusso in entrambe le direzioni. Una sorgente è un punto di partenza del flusso: ogni tratto di tubazione connesso a una sorgente, è quindi da considerarsi diretto, poiché consente il flusso in una sola direzione.

La Tabella 2 riporta i valori dei Ratei di Guasto (λ) e di Tempo di Riparazione ($MTTR$) utilizzati per questo esempio.

Tabella 2. Ratei di guasto e tempi di riparazione utilizzati nell'esempio applicativo

Componente	Modo di guasto	Rateo di guasto λ (h^{-1})	MTTR (h)
Tratto di tubazione	Perdita	$1,541 \times 10^{-05}$ ($h^{-1} Km^{-1}$)	24
Valvola	Bloccata chiusa	$3,000 \times 10^{-06}$	1
	Perdita	$5,000 \times 10^{-08}$	24
Utenza	Bloccata chiusa	$3,000 \times 10^{-06}$	1
	Perdita	$5,000 \times 10^{-08}$	24
Sorgente	Fuori servizio	$5,337 \times 10^{-04}$	3,5

6. ANALISI CON ALBERI DEI GUASTI

L'analisi con *alberi dei guasti* consente di valutare le condizioni di affidabilità e disponibilità locali calcolando il *numero atteso di guasti* e l'*indisponibilità* per ogni utenza della rete. Nel caso dell'esempio proposto, la presenza di tre utenze rende necessaria la costruzione di tre *alberi dei guasti* aventi come Evento Top la perdita del volume riscaldato corrispondente a ciascuna utenza.

La Tabella 3 riporta i risultati dell'analisi ottenuti con il software STARS Studio.

Tabella 3. Risultati ottenuti tramite FTA

	Top Event 1	Top Event 2	Top Event 3
Indisponibilità	9.617×10^{-6}	9.617×10^{-6}	7.679×10^{-6}
Numero Atteso di Guasti	4.863×10^{-2}	4.863×10^{-2}	4.416×10^{-2}
Numero di MCS	425	425	261
Massimo ordine MCS	5	5	4
Tempo di missione:	8760	8760	8760
Boundary Conditions	No	No	No
CutOff	No	No	No

Una volta determinati i parametri locali, gli Indici di Affidabilità possono essere calcolati secondo la definizione del paragrafo precedente. I valori sono riportati nella Tabella 4.

Tabella 4. Valore degli Indici Affidabilistici

Indice	Valore
SAIFI	$5,492 \times 10^{-06}$
SAIDI	$9,391 \times 10^{-06}$

7. METODO DI RICERCA DEI CUT SET

7.1 Teoria dei grafi

Al fine di spiegare la tecnica di *ricerca dei cut set* è opportuno introdurre brevemente i fondamenti della *teoria dei grafi*.

Un *grafo* è una struttura relazionale costituita da un insieme finito di oggetti, detti nodi, e un insieme finito di connessioni, dette archi. In Figura 2, è rappresentata sia la rete di teleriscaldamento sia il grafo ad essa associato; questa rete è molto semplice ed è costituita da una sorgente S (centrale termica), due valvole V₁ e V₂, un'utenza U e quattro tronchi di tubazione. Questa dualità di rappresentazione, consente di considerare indifferentemente la rete o il grafo associato, poiché entrambi questi termini si riferiscono allo stesso insieme di relazioni.

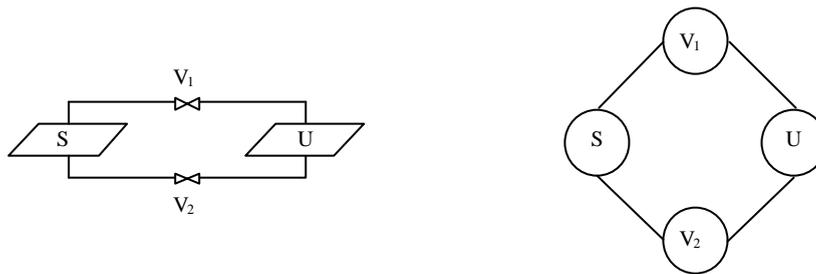


Figura 2. Rete di teleriscaldamento e grafo associato

Un *grafo* si definisce orientato o diretto se composto da archi che si riferiscono a relazioni tra coppie ordinate di nodi mentre si definisce indiretto nel caso in cui gli archi si riferiscano a relazioni tra coppie non ordinate; i due diversi tipi di grafi sono rappresentati in Figura 3.

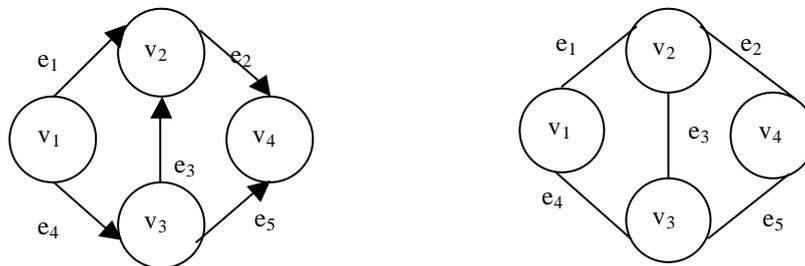


Figura 3. Grafi diretti ed indiretti

Ogni *grafo* può essere espresso tramite una *matrice di incidenza*. La *matrice di incidenza* D di un *grafo* G è formata da un numero di colonne pari al numero di archi del grafo e da un numero di righe pari al numero di nodi; l'elemento d_{ij} della matrice D può assumere valore 1 o -1 se il nodo i-esimo è connesso all'arco j-esimo mentre assume valore 0 in caso contrario.

Le matrici di incidenza per i grafi di Figura 3 sono rappresentate in Figura 4.

	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5
v_1	1	0	0	1	0
v_2	-1	1	-1	0	0
v_3	0	0	1	-1	1
v_4	0	-1	0	0	-1

	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5
v_1	1	0	0	1	0
v_2	1	1	1	0	0
v_3	0	0	1	1	1
v_4	0	1	0	0	1

Figura 4. Matrici di incidenza di grafi diretti ed indiretti

Ovviamente, se il grafo G ha A archi e N nodi, la dimensione della matrice è $A \times N$. La matrice di incidenza contiene tutte le informazioni di un grafo ma in un formato più accessibile per un calcolatore.

7.2 Gli algoritmi ricorsivi per la determinazione dei cut set

Il primo passo per analizzare una rete con il metodo di *ricerca dei cut set* riguarda la costruzione della *matrice di incidenza*. La matrice per la rete di Figura 1 è riportata nel seguito.

Nodi	Archivi												N_1	N_2
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9	T_{10}	T_{11}	T_{12}		
V_1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V_2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
V_3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
V_4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
V_5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V_6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
V_7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
V_8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
V_9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
U_1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
U_2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
U_3	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0
S_1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
S_2	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

A partire dalla *matrice di incidenza*, i *minimal cut set* vengono determinati attraverso due fasi:

- determinazione dei *minimal cut set* (MCS_i) di un grafo con nodi perfetti;
- determinazione dei *cut set* dedotti (DCS_i) di un grafo con archi e nodi guastabili a partire dai MCS_i della rete con nodi perfetti; al termine della procedura si perviene ai *minimal cut set* della rete reale (MCS_i) mediante l'utilizzo di un processo sistematico di eliminazione.

Per analizzare reti con più utenze, come quella dell'esempio applicativo in esame, è necessario considerare una sola utenza per volta come obiettivo del processo ricorsivo. In altre parole, se il grafo presenta tre utenze, sarà necessario ripetere tre volte l'enumerazione del *cut set*. In questo senso, il procedimento è simile a quello previsto dall'analisi con *alberi dei guasti*, ma in questo caso, i *cut set* sono ottenuti direttamente, senza bisogno di costruire i tre alberi.

7.3 Rete con nodi perfetti

L'algoritmo per la determinazione dei *cut set* per una rete a nodi perfetti si basa sul principio di partizione [9, 10]. In base al principio di partizione, definito per reti con una sola sorgente, vengono definiti due insiemi mutualmente escludentesi: il primo (insieme X) contenente solo il nodo sorgente, il secondo (Y), contenente tutti gli altri nodi. In generale la procedura percorsa dall'algoritmo consiste nel rimuovere un nodo dall'insieme Y e aggiungerlo all'insieme X una volta che è stato analizzato.

Al fine di prendere in esame reti con più sorgenti, l'algoritmo qui proposto comporta la definizione di tre sistemi mutualmente escludentesi X , Y e S ; l'insieme X contiene i nodi già analizzati, l'insieme Y i nodi da analizzare e l'insieme S le sorgenti. Scelto un nodo obiettivo, l'algoritmo preleva dalla *matrice di incidenza*, gli archi connessi al nodo, che corrispondono alle colonne che presentano valore non nullo all'incrocio con la

riga relativa al nodo in esame. Questi archi rappresentano il primo *cut set* della rete poiché il loro guasto non consente l'alimentazione dell'utenza. I *cut set* successivi sono generati usando l'equazione ricorsiva:

$$CS_i = [CSR \hat{E}C_i] - [CSR \mathcal{C}C_i] \quad (1)$$

dove CSR , rappresenta il cammino seguito fino a questo momento;
 C_i , rappresenta gli archi del nodo attualmente sondato;
 CS_i , è il nuovo cutset determinato.

Il processo ricorsivo, termina quando il gruppo $Y = \{0\}$, perché significa che tutti i nodi sono stati sondati e quindi si sono elencati tutti i *cut set* locali di quell'obiettivo.
 Applicando l'algoritmo in questo modo si ottengono i *cut set* della rete. Questi *cut set* (CS_i) sono da ridurre ai minimi termini (MCS_i) attraverso un semplice algoritmo.

Con riferimento alla Figura 5 in cui è riportata una parte della Figura 1, scegliendo come obiettivo il nodo (utenza) U_1 si ottiene:

$$\begin{aligned} X &= \{U_1\} \quad S = \{S_1, S_2\} \\ Y &= \{U_2, U_3, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, V_7, V_8, V_9\} \end{aligned} \quad (2)$$

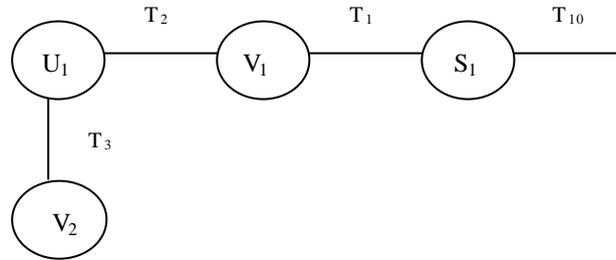


Figura 5. Esempio tratto dalla Figura 1

Dato il nodo obiettivo U_1 , l'algoritmo ricava dalla *matrice di incidenza* gli archi incidenti per quel nodo: (T_2, T_3). Questi archi rappresentano il primo *cut set* della rete poiché un loro guasto non consente di alimentare l'utenza U_1 .

$$CS_1 = \{T_2, T_3\} \quad (3)$$

Ai fini di questo esempio di applicazione, l'arco T_3 verrà trascurato e l'attenzione focalizzata sull'arco T_2 . L'arco T_2 individua due nodi: U_1 e V_1 ; U_1 appartiene all'insieme X (nodi analizzati) e viene quindi scartato; il nodo V_1 appartiene all'insieme Y (nodi da analizzare) e di conseguenza viene preso in considerazione.

Il nodo V_1 individua due archi incidenti, T_2 e T_1 , che vengono inseriti nel vettore archi del nodo attualmente sondato:

$$C_1 = \{T_2, T_3\} \quad (4)$$

A questo punto V_1 può essere rimosso dall'insieme Y e aggiunto all'insieme X .

$$X = \{U_1, V_1\} \quad Y = \{U_2, U_3, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, V_7, V_8, V_9\} \quad (5)$$

Utilizzando l'equazione ricorsiva (1) il risultato è il seguente:

$$\begin{aligned} CSR &= CS_1 \\ CS_2 &= [\{T_2, T_3\} \hat{E} \{T_1, T_2\}] - [\{T_2, T_3\} \mathcal{C} \{T_1, T_2\}] = \{T_1, T_3\} \end{aligned} \quad (6)$$

Nuovamente, è possibile ricavare dalla *matrice di incidenza* i nodi associati agli archi T_3 e T_1 e cioè, V_1 e S_1 . Il nodo V_1 appartiene all'insieme X e viene quindi scartato. Il nodo S_1 appartiene all'insieme S e viene anch'esso scartato. Per continuare l'enumerazione dei *cut set* è necessario tornare all'arco T_3 e ricominciare

con la ricerca. Una volta che tutti i *cut set* sono stati individuati, una semplice procedura di riduzione consente di ottenere i *minimal cut set*.

7.4 Rete reale con archi e nodi guastabili

La procedura proposta fino a questo punto consente di ricavare i *minimal cut set* per una rete con nodi perfetti; un secondo algoritmo consente di dedurre i *minimal cut set* per la rete con archi e nodi guastabili [11]. Il metodo si basa sul concetto secondo cui *il guasto di un nodo inibisce il funzionamento di tutti gli archi ad esso connessi*.

L'algoritmo inizia scegliendo un nodo obiettivo per il quale è possibile ricavare i MCS_i ottenuti con il primo algoritmo; il corrispondente DMC_i può essere ottenuto inserendo il nodo associato ai collegamenti nel MCS_i e conseguentemente cancellando i collegamenti relativi ai nodi inseriti.

Utilizzando la seguente equazione ricorsiva è possibile determinare tutti i DMC_i dagli MCS_i ottenuti con l'algoritmo per soli archi guastabili:

$$DMC_i = \{VS_i\} \dot{-} \{C_i\} - \{L_i\} \quad (8)$$

dove VS_i, è il gruppo di tutte le possibili combinazioni di nodi di {C_i};
L_i, sono i collegamenti incidenti dei nodi associati.

Considerando nuovamente l'esempio di Figura 5 e scegliendo come obiettivo il nodo U₁, il primo MCS₁ è:

$$MCS_1 = \{T_2, T_3\} \quad (9)$$

I nodi associati agli archi T₂ e T₃ si ricavano, al solito, dalla *matrice di incidenza*. Escludendo il nodo obiettivo U₁, si ottengono V₁ e V₂ da cui vengono generati i vettori VS_i.

$$\begin{aligned} VS_1 &= \{V_1\} \\ VS_2 &= \{V_2\} \\ VS_3 &= \{V_1, V_2\} \end{aligned} \quad (10)$$

A questo punto la prima combinazione di vertici {V₁} viene selezionata e gli archi incidenti in questi nodi {L₁}, vengono ricavati dalla matrice incidente, identificando gli archi corrispondenti nelle colonne che hanno 1 o -1 nelle righe relative ai nodi di V₁. Questo passo viene ripetuto fino a quando tutti i VS_i sono stati esaminati.

I gruppi L_i sono:

$$\begin{aligned} L_1 &= \{T_1, T_2\} \\ L_2 &= \{T_3, N_1\} \\ L_3 &= \{T_1, T_2, T_3, N_1\} \end{aligned} \quad (11)$$

Applicando ora l'equazione (8), si deducono i DCS_i.

$$\begin{aligned} DCS_1 &= \{V_1\} \dot{-} \{T_2, T_3\} - \{T_1, T_2\} = \{V_1, T_3\} \\ DCS_2 &= \{V_2\} \dot{-} \{T_2, T_3\} - \{T_3, N_1\} = \{V_2, T_2\} \\ DCS_3 &= \{V_1, V_2\} \dot{-} \{T_2, T_3\} - \{T_1, T_2, T_3, N_1\} = \{V_1, V_2\} \end{aligned} \quad (12)$$

La procedura illustrata va ripetuta finchè tutti i MCS_i associati al nodo obiettivo selezionato non sono stati sondati. La semplificazione e la riduzione dei DCS_i ottenuti sono l'ultimo passo per ottenere i MCS_i, cioè i *minimal cut set* della rete reale.

7.5 Risultati

Una volta individuati tutti i *minimal cut set* della rete, i valori di *numero atteso di guasti* e *indisponibilità* per ciascuna utenza possono essere calcolati direttamente. Con riferimento all'esempio di Figura 1, si riportano in Tabella 5 i risultati che sono i medesimi ottenuti con l'analisi con *alberi dei guasti*. Come in precedenza, si possono poi determinare i valori degli indici SAIFI e SAIDI al fine di valutare le prestazioni globali del sistema.

Tabella 5. Risultati ottenuti con gli algoritmi ricorsivi

	Top Event 1	Top Event 2	Top Event 3
Indisponibilità	$9,617 \times 10^{-6}$	$9,617 \times 10^{-6}$	$7,679 \times 10^{-6}$
Numero Atteso di Guasti	$4,863 \times 10^{-2}$	$4,863 \times 10^{-2}$	$4,416 \times 10^{-2}$
Numero di MCS	425	425	261
Massimo ordine MCS	5	5	4
Tempo di missione:	8760	8760	8760

8. ANALISI CRITICA DEI RISULTATI

Come precedentemente discusso, l'analisi con *alberi dei guasti* permette la valutazione dell'affidabilità e della disponibilità locale di una rete. Quando un utilizzatore viene selezionato come obiettivo, la FTA fornisce i relativi MCS, i valori *indisponibilità* e *numero atteso di guasti*. Questa tecnica, calcolando gli indici di criticità, permette anche di apprezzare il contributo di ogni componente nell'ambito dell'*indisponibilità* e *numero atteso di guasti* totale. E' tuttavia richiesto un lavoro pesante in termini di tempo per la costruzione di un albero relativo ad ogni utenza della rete; inoltre il numero degli alberi cresce con l'aumentare della magliatura di una rete. Il metodo si rivela quindi poco efficiente nel caso di modifiche idraulico/strutturali dei sistemi, che richiedono la ricostruzione degli alberi dei guasti.

Gli stessi risultati trovati per mezzo degli *alberi dei guasti*, sono forniti dall'analisi con algoritmi ricorsivi per la ricerca del *cut set*, che si rivelano più rapidi e flessibili. Con questa tecnica, il compito dell'analista si riduce alla definizione della *matrice di incidenza* e la maggior parte del lavoro viene quindi trasferita al software. Nel caso di modifiche alla rete, è sufficiente aggiornare la matrice e far girare nuovamente l'algoritmo.

I tempi di calcolo non sono trascurabili. Nel caso dell'esempio proposto, l'algoritmo, implementato con MATLAB 6.0 su un processore da 1000 MHz, impiega circa 20 secondi per analizzare tutti gli obiettivi. Considerando il tempo globale di calcolo, il metodo è confrontabile con la FTA, sebbene in questo caso la presenza dell'analista non è richiesta per tutto il tempo. Inoltre, la costante crescita della velocità dei processori ridimensiona il problema. In ogni modo, lo sviluppo futuro del progetto riguarda l'ottimizzazione dell'algoritmo in modo da ridurre ulteriormente i tempi di calcolo.

Per quanto riguarda la valutazione dei parametri globali della rete, l'applicazione degli Indici Affidabilistici Modificati, fornisce dei risultati soddisfacenti. Infatti, questo approccio consente di ottenere informazioni sintetiche e globali sull'affidabilità e sulla disponibilità caratteristiche della rete, anche nel caso di sistemi molto estesi; gli indici permettono di valutare tra differenti configurazioni tecniche e progettuali e di prendere in considerazione le diverse esigenze degli utilizzatori.

9. CONCLUSIONI

L'obiettivo dell'attività riguarda l'analisi dell'affidabilità e della disponibilità di un sistema complesso a rete magliata; questo lavoro ha proposto una metodologia basata sulla combinazione di un metodo di ricerca dei *cut set* tramite algoritmi ricorsivi e l'approccio a indici affidabilistici, che si è rivelato molto efficiente. Questa tecnica permette di valutare l'affidabilità e la disponibilità di una rete, sia dal punto di vista locale, cioè in corrispondenza di ogni utenza della rete, sia globale, prendendo in considerazione i guasti multipli e richiedendo un carico di lavoro e tempi di calcolo ragionevoli anche nel caso di sistemi a rete fortemente magliata e/o nel caso di modifiche idraulico/strutturali del sistema.

Gli sviluppi futuri riguarderanno la messa a punto del metodo in modo tale da ridurre ulteriormente i tempi di calcolo e considerare gli aspetti termo-fluidodinamici del problema [12].

10. BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Carpignano, A. Mosso, M. Piccini & A. Ponta, Merging FT/ET Approach with the Index Approach to Assess the Reliability and Availability of Heating Distribution Network, *Proc. of European Safety and Reliability Conference ESREL 2001*, Torino, Italy, september 16-20, pp. 365-372 (2001).
- [2] 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*, Seattle, WA USA, pp. 104-111 (2002).
- [3] R. Billinton, R. Allan, Reliability Evaluation of Power Systems, New York: Plenum, (1984).
- [4] M. Marseguerra, E. Zio, Principles of Monte Carlo simulation for application to reliability and availability analysis, *Tutorials notes of esrel 2001 european safety and reliability conference*, september, Torino, Italy, pp.37-61 (2001).
- [5] S.Pasquet, E. Chatelet, P.Thomas, Y. Dutuit, Analysis of a sequential non coherent and looped system with two approaches: Petri nets and Neural networks. In: *proceedings of European Safety and Reliability Conference ESREL'97*, June 17-20, Lisbon, Portugal, pp. 2257-2264 (1997).
- [6] A.L. Buchsbaum, M. Mhail, *MonteCarlo and Markov chain techniques for network reliability and sampling*, Networks, vol.25, pp.117-130 (1995).
- [7] L. B. Page, J. E. Perry, Reliability of directed networks using the factoring theorem, *IEEE Trans.Reliab.*, vol. 38, December, pp.556-562 (1989).
- [8] O. R. Theologou, J. G. Carlier, Factoring & reductions for networks with imperfect vertices, *IEEE Trans.Reliab.*, vol. 40, June, pp.210-217 (1991).
- [9] P. Jensen, M. Bellmore, An algorithm to determine the reliability of a complex system, *IEEE Trans.Reliab*, vol R-18, November, pp.169-174 (1969).
- [10] L. Yan, H. Taha, T.L. Landers, A recursive approach for enumerating *minimal* cutsets in a network, *IEEE Trans.Reliab.*, vol. 43, September, pp. 383-387 (1994).
- [11] N.S. Fard, T.H. Lee, Cutset enumeration of network systems with link and node failures, *Reliability engineering and system safety*, vol.35, pp.141-146 (1999).
- [12] W.-C. Yeh, A simple approach to search for all d-MCs of a limited-flow network, *Reliability engineering & system safety*, vol.44, June, pp.15-19 (2001).