

THE NETWORK TOPOLOGY IN WDS REHABILITATION

Carla Tricarico, Giovanni de Marinis

Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale – Dipartimento di Ingegneria Civile e  
Meccanica via Di Biasio 43 03043 Cassino (Frosinone) Italy c.tricarico@unicas – demarinis@unicas.it

**Extended abstract.** Rehabilitation problems of inadequate infrastructures lead to the identification of solutions characterized by a trade-off between network performance and costs minimization. In this situation, the approach typically used in the technical literature is based on operating with duplication/substitution on the existing components of the system, i.e. pipes diameters, pumps, tanks volume, in order to improve its reliability with the lower cost. Usually the possibility of adding new components in the system in order to improve its performance it is left only to the design of new areas.

In this work, a methodology which takes into consideration also the possibility to add new components at the search of the lower cost in an optimal rehabilitation problem is proposed, by considering the existing topology as a decision variable.

An optimization technique based on a genetic algorithm and coupled with a pressure-driven hydraulic solver has been applied by taking into account the water demand at each network node as a random variable modelled by means of a probabilistic approach. In this fashion, the search of the optimal configurations has been undertaken by taking into consideration the hydraulic reliability of the systems. The algorithm has been further allowed to close existing pipes, on a piecewise, random basis, for simulating possible breakages and thus accounting for some measure of the mechanical reliability of the system. The methodology adopted for the cases study presented in this work considers solely the pipes as decision variables. However, the other potential components of the network, such as tanks, pumps, valves, etc. could be added as options without invalidating the proposed approach.

The study of the influence of the network layout on optimal rehabilitation configurations has been undertaken by comparing the application of a rehabilitation algorithm in two different fashions. Firstly, the algorithm has been applied to the network by considering the classical rehabilitation approach in which the network layout is predetermined, allowing solely the possibility of duplicating or substituting the existing pipes in situ. Subsequently, the algorithm has been re-run, instead permitting the freedom in deciding the network topology by modifying the layout through the closure of existing pipes and adding new links between nodes, in addition to the possibility of duplicating or substituting the existing pipes. The candidate links are all the possible physical connections which can be sensibly realized from an engineering point of view. Obtained results on two case studies networks demonstrate that the influence of the network topology among the decision variable leads to optimal configurations more reliable and at the same time less costly. The increase of the loops number, by adding few new links, results in significant reduction of the total rehabilitation costs with a greater performance of the system. Furthermore, as a function of the networks analyzed, it is possible also to detect a threshold value in the number of loops which can characterize the optimal solution.

**Sommario.** L'identificazione della soluzione da adottare nella risoluzione di un problema sia gestionale sia progettuale di un sistema acquedottistico è strettamente dipendente dalla scelta dei parametri di input del problema che, una volta impostati, inducono il progettista all'identificazione della configurazione ottimale di funzionamento nel rispetto degli obiettivi prefissati che solitamente si riconducono alla massimizzazione dell'efficienza del sistema con il minimo costo. La conoscenza dei parametri di input, pertanto, incide sulla soluzione finale e

una loro scelta accurata può condurre all'individuazione di soluzioni più performanti a costo minore. Al fine di contribuire all'identificazione di soluzioni che possano condurre ad un minor rischio di fallanza nel servizio erogato all'utenza, coniugando un minor costo di riabilitazione, in questo lavoro si vuole porre l'attenzione sull'incidenza dello schema topologico sulla performance del sistema. In particolare la robustezza dello schema topologico e la sua ridondanza legata anche al numero di maglie sono state analizzate attraverso l'utilizzo di una tecnica di ottimizzazione basata su algoritmi genetici, considerando altresì la possibile rottura delle condotte costituenti la rete e assumendo la richiesta idrica da parte dell'utenza quale variabile aleatoria modellandola con approccio probabilistico. La metodologia presentata è stata applicata ad un semplice caso di letteratura ed ad una rete acquedottistica reale, dimostrando l'efficacia nell'ottenere configurazioni di funzionamento più affidabili con costi contenuti quando lo schema topologico della rete non si assume noto a priori ma lo si considera tra le variabili decisionali del problema da ottimizzare.

## 1. Introduzione

La riabilitazione/progettazione e la successiva gestione di un sistema acquedottistico hanno da sempre destato grande interesse nella Comunità scientifica che ha proposto diverse tecniche volte ad ottimizzare il corretto funzionamento della rete (e.g. Kapelan *et al.*, 2006; Giustolisi *et al.*, 2007; Arena *et al.*, 2010; Do Guen Yoo *et al.*, 2010; Marchi *et al.*, 2013), affidando la scelta della soluzione ottimale, sia in termini economici sia affidabilistici, alla possibilità di sostituire/raddoppiare componenti già esistenti nel sistema, quali i diametri delle condotte, gli impianti di sollevamento, oppure il volume dei serbatoi, etc. (e.g. Berardi *et al.*, 2008; Alvisi & Franchini, 2009; Tricarico *et al.*, 2006; Morley *et al.*, 2012). In letteratura tecnica, a differenza della pratica tecnica, l'aggiunta di nuove componenti – come ad esempio l'inserimento di nuove tubazioni in riferimento allo schema topologico – viene in genere considerata quale opzione per il progetto di nuove zone di espansione (e.g. Halhal *et al.*, 1997) e non quale possibile variabile decisionale per problemi di riabilitazione (e.g. Rowell & Barnes, 1982; Goulter & Morgan, 1985; Goulter, 1987; Jacobs & Goulter, 1989; Tolson *et al.*, 2004; Ostfeld, 2005; Afshar & Jabbari, 2008). Tuttavia, il considerare lo schema topologico della rete non un dato di input ma una variabile decisionale del problema, anche in un progetto di riabilitazione di un sistema esistente, può incidere significativamente sulla prestazione finale della rete conducendo all'individuazione di soluzioni non solo maggiormente valide da un punto di vista tecnico, ma anche più affidabili con un minore impegno di risorse economiche (e.g. Tricarico *et al.*, 2014).

In tale lavoro si propone pertanto un criterio di riabilitazione che, portando in conto tra le variabili decisionali lo schema topologico della rete, considera quali obiettivi la minimizzazione dei costi totali di riabilitazione e la minimizzazione del rischio di non soddisfare adeguatamente la richiesta di portata da parte dell'utenza, valutando le configurazioni ottimali anche in funzione della probabilità di rottura di una condotta.

## 2. Metodologia

Lo studio dei sistemi acquedottistici, sia in fase di progetto e/o riabilitazione sia in fase gestionale, non può prescindere dal considerare la richiesta idrica da parte dell'utenza servita quale una variabile aleatoria. Pertanto la caratterizzazione e la quantificazione dell'incertezza della domanda idrica deve essere affrontata attraverso un approccio probabilistico: la domanda idrica richiesta in ogni nodo è modellata come una variabile aleatoria indipendente distribuita con una predefinita Funzione Densità di Probabilità (PDF). I parametri e il tipo di distribuzione adottati in questo particolare studio derivano da analisi sperimentali condotte su reali sistemi di distribuzione idrica. Nello specifico, si è adottata la distribuzione Log-Normale con media pari alla richiesta idrica ai nodi della rete e assumendo un coefficiente di variazione (CV) uguale ad 0.1 (Tricarico *et al.*, 2007; Gargano *et al.*, 2010).

La metodologia di ottimizzazione proposta si basa sui seguenti obiettivi: (1) la minimizzazione dei costi totali di riabilitazione  $C_{TOT}$  - somma dei costi strutturali  $C_{ST}$  e dei mancati introiti  $C_{LR}$  - e (2) la minimizzazione del rischio della rete ( $K_{MR}$ ) di mancato soddisfacimento della richiesta idrica dell'utenza - Economic Level of Risk (ELR) (Tricarico *et al.*, 2014) - considerato, in questo particolare studio, come il massimo dei rischi stimati ad ogni nodo della rete ( $K_i$ ), quest'ultimo fornito dalla

(3). In tal modo il modello ricerca le soluzioni ottimali tra le configurazioni più affidabili in ogni nodo. In ogni caso,  $K_{Net}$  può anche essere stimato considerando la somma o il valore medio dei rischi valutati ai nodi senza che ciò incida sulla metodologia proposta.

Minimizzare

$$C_{Tot} = C_{ST} + C'_{LR} \quad (1)$$

Minimizzare

$$K_{Net} = \max\{K_i\} \quad (2)$$

Il  $K_i$  è stato considerato come il prodotto della probabilità di fallanza nel soddisfare la richiesta idrica e la conseguenza di ciò. Il danno causato agli utenti nel non soddisfare completamente la richiesta idrica è stato stimato considerando solo il volume idrico non erogato così come ottenuto dall'analisi idraulica. In tale lavoro non si è espressamente fatto riferimento alle considerazioni socio-economiche connesse a tale danno, così come la tipologia di utenti (e.g. utenze residenziali, ospedali, centri commerciali, uffici pubblici, etc.) e alla stima del danno economico conseguente al mancato soddisfacimento della richiesta.

$$K_i = (1 - R_i) \left[ \frac{\sum_{s=1}^{N_s} Q_{REQ_{i,s}} - \sum_{s=1}^{N_s} Q_{DELI_{i,s}}}{\sum_{s=1}^{N_s} Q_{REQ_{i,s}}} \right] \quad \forall i \in \{1, \dots, N_n\} \quad (3)$$

dove  $Q_{REQ}$  and  $Q_{DELI}$  sono rispettivamente la portata richiesta e erogata all'utenza posta nell' $i$ -mo nodo;  $N_n$  è il numero di nodi nella rete e  $N_s$  rappresenta il numero di campioni generati attraverso l'approccio probabilistico utilizzato per portare in conto la natura aleatoria della portata. Il primo termine della (3) rappresenta la probabilità di fallanza, dove  $R_i$  è l'affidabilità idraulica del nodo  $i$ -simo stimata in funzione dei volumi idrici effettivamente serviti all'utenza in funzione del carico disponibile:

$$R_i = \frac{\sum_{s=1}^{N_s} (Q_{DELI_{i,s}} / Q_{REQ_{i,s}})}{N_s} \quad \forall i \in \{1, \dots, N_n\} \quad (4)$$

mentre la conseguenza della fallanza è valutata attraverso il secondo fattore della (3).

Al fine di confrontare i mancati introiti con i costi strutturali, i  $C_{LR}$ , costi annui costanti, sono stati attualizzati ( $C'_{LR}$ ) con riferimento ad una proiezione temporale di  $n$  anni rappresentante la vita utile dell'intervento di ottimizzazione:

$$C'_{LR} = C_{LR} \cdot [1 - (1 + i)^{-n}] / i$$

dove  $i$  è il tasso di interesse.

Le sopra descritte funzioni obiettivo sono vincolate dalle seguenti equazioni idrauliche:

$$\sum_{j=1}^{N_{i,i}} q_j - Q_{DELI} = 0 \quad (i = 1, \dots, N_n) \quad (6)$$

$$H_{j,u} - H_{j,d} = r_j \cdot q_j^\varepsilon \quad (j = 1, \dots, N_t) \quad (7)$$

e soggette alle variabili decisionali:

$$D_k \in D \quad (k = 1, \dots, N_d) \quad (8)$$

dove  $q_j$  è la portata defluente nella  $j$ -sima condotta;  $H_{j,u}$  è il carico al nodo di monte della  $j$ -sima condotta;  $H_{j,d}$  è il carico al nodo di valle della  $j$ -sima condotta; con riferimento al tratto  $j$ -simo,  $r_j$  e  $\varepsilon$  sono rispettivamente il coefficiente e l'esponente della formula di resistenza;  $N_{i,i}$  è il numero di condotte connesse all' $i$ -simo nodo della rete;  $N_t$  è il numero complessivo di tratti della rete.  $D_k$  è il valore della  $k$ -sima variabile decisionale discreta;  $D$  è il set discreto delle possibili opzioni di riabilitazione;  $N_d$  è il numero delle variabili decisionali.

Le possibili opzioni di riabilitazione prese in considerazione in tale lavoro hanno riguardato la possibilità non solo di raddoppiare e/o sostituire le condotte esistenti ma anche di poter aggiungere tratti di condotte non esistenti attualmente nel sistema e tecnicamente possibili.

Al fine di portare in conto anche l'affidabilità meccanica dei link del sistema topologico, si è introdotta nell'algoritmo la possibilità di chiudere condotte esistenti in maniera random in modo da simulare la rottura di un tronco.

La metodologia qui proposta è stata applicata considerando quali variabili decisionali i soli diametri delle tubazioni, tuttavia si presta ad essere applicata anche considerando altre variabili decisionali quali valvole di regolazione, componenti elettromeccaniche, etc.

L'ottimizzazione è stata effettuata mediante l'algoritmo genetico *rnNSGAI* (Morley, 2008) mentre il comportamento idraulico del sistema è stato modellato attraverso un simulatore *pressure driven* e in particolare *EPANETpdd* (Morley & Tricarico, 2008).

### 3. Case Studies e analisi dei risultati

Ai fini dell'applicazione della metodologia proposta si è scelta *in primis* una rete semplice al fine di poter efficacemente comprendere l'importanza nel considerare lo schema topologico quale variabile decisionale del problema di ottimizzazione (*rete A*). Successivamente la medesima metodologia è stata applicata anche ad una rete acquedottistica esistente maggiormente complessa per poterne validare i risultati (*rete PSG*). La metodologia di ottimizzazione per entrambi i casi di studio presi in esame è stata applicata due volte separatamente:

- la prima volta considerando un *approccio classico* di analisi di un problema di ottima riabilitazione della rete in cui si è considerato lo schema topologico esistente quale dato di input e quali variabili decisionali del problema la possibilità di raddoppiare e/o sostituire le condotte esistenti con altre atte ad incrementare la performance del sistema;
- la seconda volta portando in conto nel computo delle variabili decisionali del problema lo schema topologico, lasciando così all'algoritmo nella ricerca dell'ottimo la possibilità anche di modificare lo schema esistente non solo raddoppiando e/o sostituendo tratti già esistenti ma potendone aggiungere anche di nuovi, creando nuove connessioni tecnicamente possibili tra nodi che possono essere individuate a priori dal progettista.

I risultati ottenuti dalle due differenti simulazioni che mirano a risolvere lo stesso problema sono poi state messe a confronto al fine di valutare l'incidenza dello schema topologico nelle configurazioni finali sia da un punto di vista tecnico, i.e. maggiore performance della rete, sia considerando aspetti economici, non meno importanti al fine di programmare interventi riabilitativi e gestionali da effettuarsi nell'esercizio dell'opera.

Per entrambe le analisi si sono effettuate diverse simulazioni con l'algoritmo genetico *rnNSGAI* utilizzando diverse popolazioni iniziali (i.e. random seeds) e si è assunta una età minima del cromosoma di 20 generazioni. In tutte le simulazioni si è considerata una popolazione di 100 individui e si sono considerate 1.000 generazioni. Nel processo di ottimizzazione la natura aleatoria della richiesta idrica si è portata in conto generando 20 campioni di domanda con l'Ipercubo Latino, rivalutando poi al termine delle simulazioni le soluzioni trovate utilizzando 100.000 campioni generati attraverso il metodo Monte Carlo. Al fine di applicare la metodologia *pressure driven* (*EPANETpdd*) si è considerata che la pressione minima richiesta ai nodi per il pieno soddisfacimento della domanda idrica dell'utenza è di 20m. La stima del mancato introito per i volumi idrici non erogati e pertanto non fatturati, a titolo di esempio, è stata ottenuta considerando il costo unitario dell'acqua pari a 1€/m<sup>3</sup> e al fine di confrontare tali costi con quelli strutturali si è considerato un numero di anni *n* di vita utile dell'opera pari a 50 e un tasso di interesse del 3,2%. Inoltre, la probabilità di rottura delle condotte è stata assunta pari al 30% dei tratti complessivi, mantenendo, come sopra precisato a titolo esemplificativo, tale valore costante prescindendo dalle caratteristiche delle tubazioni stesse.

La prima rete considerata, chiamata rete A, è caratterizzata da 1 maglia, 11 condotte, 10 nodi e un serbatoio (Fig. 1a). Il carico al serbatoio è stato assunto costante e pari a 280m e per le caratteristiche di input dei nodi e dei tratti si rimanda a Tricarico et al., 2014.

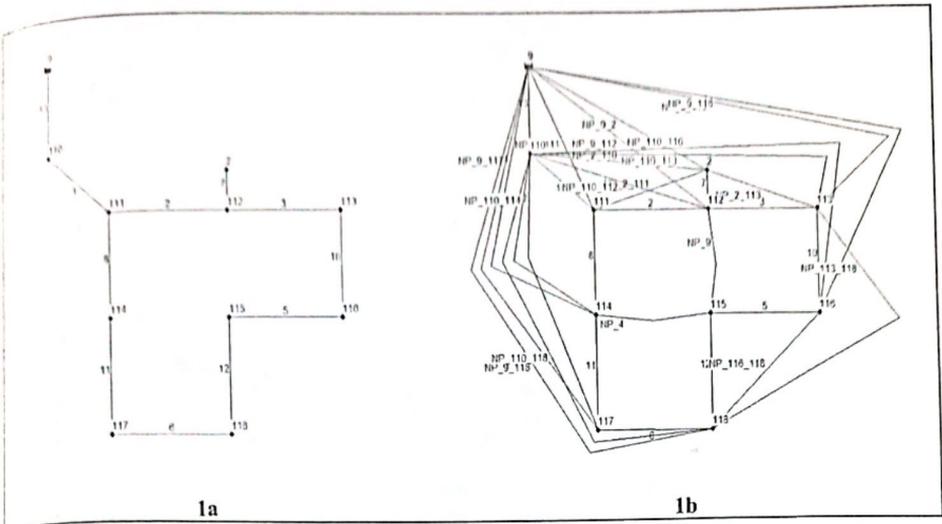


Fig. 1 - Configurazioni rete A (1a) e rete A-AC (1b)  
 Figure 1 - Networks A topology (1a) and A-AC topology (1b)

Il problema di ottimizzazione è stato risolto:

- considerando - come in un classico problema di riabilitazione - la possibilità di non variare le 11 condotte esistenti o di raddoppiarle con uno dei 18 nuovi diametri assunti a riferimento e riportati in tabella 1. Il numero totale di possibili soluzioni, i.e. configurazioni, è così uguale a  $19^{11}$ ;
- considerando, non solo la possibilità di raddoppiare le condotte esistenti come nel classico approccio di riabilitazione prima considerato, ma anche la possibilità di aggiungere nuove connessioni tra i nodi della rete scegliendo tra i diametri riportati in tabella 1. Le possibili nuove condotte sono assegnate prima del processo di ottimizzazione quali variabili decisionali (Fig. 1b - Network A-AC). Si considerano tutte le possibili connessioni tra i nodi anche non esistenti nello schema topologico originario della rete fatto salvo quelle connessioni non possibili da un punto di vista tecnico, i.e. quelle che possono tagliare le condotte esistenti originariamente o edifici della zona. Logicamente da un punto di vista ingegneristico, dovrebbero essere assegnate quali variabili decisionali per risolvere il problema quelle nuove connessioni che sono tecnicamente realizzabili. In questo caso, sulla base dei tratti considerati e riportati in figura 1b, A-AC, il numero totale di possibili soluzioni, i.e. configurazioni della rete, è uguale a  $19^{11} \times 19^{21} = 19^{32}$ .

DN	75	90	110	125	140	160	180	200	250	280	315	355	400	450	500	630	710	800
D(mm)	66	79.2	96.8	110.2	123.4	141	158.6	176.2	220.4	246.8	277.6	312.8	352.6	396.6	440.6	555.2	625.8	705.2
C (€/m)	100	105	118	123	133	141	150	163	194	212	241	269	303	345	407	562	707	852

Tab. 1 - Diametri per il raddoppio o l'inserimento di una nuova tubazione in rete e i relativi costi assunti nelle analisi  
 Table 1 - Available diameters for duplication or for new pipes and relative costs

Grazie alla semplicità della rete esaminata si è potuto effettuare una rapida e immediata analisi dell'influenza dello schema topologico sulle soluzioni di riabilitazione in termini sia di costi sia di affidabilità del sistema. I risultati ottenuti dall'applicazione a questa rete hanno portato ai Fronti di Pareto riportati in figura 2.

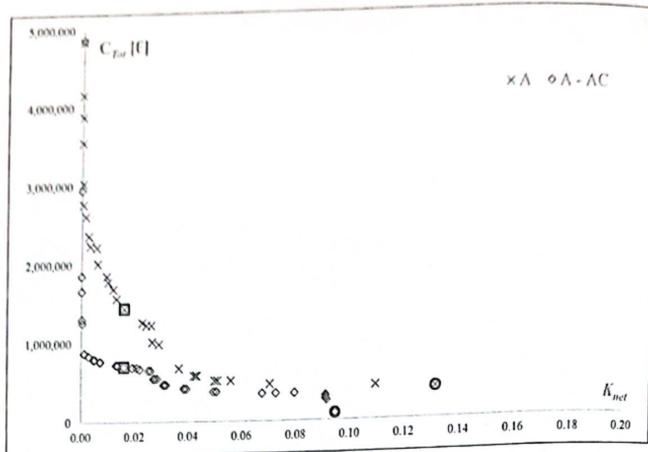


Fig. 2 - Fronti di Pareto delle configurazioni A e A-AC ottenuti dalle due metodologie a confronto  
 Figure 2 – Pareto Fronts for the A and A-AC configurations obtained by the methodologies comparison

Come ci si può aspettare, al crescere dei costi totali di riabilitazione, il potenziale rischio di fallanza nell'erogare la portata richiesta agli utenti si riduce. In particolare, per entrambi i Fronti di Pareto riportati, mediante l'estensione al rischio dell'ottimizzazione costi-affidabilità proposta da Tricarico et al. (2006), è possibile notare che la configurazione ottimale cerchiata in figura 2, è relativa a quella particolare soluzione del Pareto Front cui corrisponde il minimo costo totale di riabilitazione, i.e. il minimo costo strutturale e il minimo mancato introito dovuto alla fallanza del servizio. Questa soluzione, chiamata ELR (Economic Level of Risk), può essere considerata quale soluzione ottimale da adottare in un programma di riabilitazione o quale configurazione "soglia" che possa aiutare il progettista nel ricercare la configurazione di riabilitazione da adottare tra quelle che presentano un valore di rischio minore di quello soglia identificato.

Dal confronto dei due Pareto Fronts determinati con le due metodologie (Fig. 2) è possibile notare come il permettere le variazioni dello schema topologico conduca a soluzioni dominanti in termini di costi e rischio. Per il caso in studio qui esaminato, una significativa differenza tra i due Fronti di Pareto è evidente per soluzioni con il più basso valore del rischio (i.e.  $K_{Net} \leq 0,04$ ).

Il Pareto Front relativo alla rete A-AC è caratterizzato da soluzioni con configurazioni con un diverso numero di maglie al variare del valore del rischio. Ad ogni modo è interessante notare che anche se, come atteso, l'incremento del numero di maglie nella rete riduce il rischio di non fornire la portata richiesta, le soluzioni ottenute per la rete A-AC non rivelano configurazioni con più di tre maglie. Questo risultato evidenzia che per la rete in considerazione, le tre maglie possono essere considerate un valore soglia e ogni ulteriore incremento del numero di maglie non corrisponde ad un miglioramento in termini di performance o costi. Questo risultato suggerisce la presenza di una soglia nella ridondanza, i.e. nel numero di maglie, al fine di ottenere una rete affidabile con il più basso costo di riabilitazione. Da un lato il sistema magliato è importante in quanto, ordinariamente, più maglie sono presenti, più affidabile è la rete. D'altro canto, i risultati ottenuti per il caso in studio evidenziano che è economicamente conveniente avere una soglia nella ridondanza del sistema al fine di identificare una configurazione ottimale di funzionamento.

In particolare, una analisi dei costi delle soluzioni ELR trovate per i due Pareto Fronts ottenuti mediante i due approcci è riportato in tabella 2 e figura 3. Come può evincersi dal confronto riportato, la soluzione ELR per la rete A-AC ha un valore di rischio minore con un minore costo di riabilitazione. Le configurazioni iniziali della rete, relative ad una sola maglia, devono essere maggiormente rinforzate, impiegando un costo totale di riabilitazione nettamente maggiore, per raggiungere lo stesso livello di rischio. Ad ogni modo, questo logico risultato evidenzia l'importanza di portare in conto tra le variabili decisionali del problema lo schema topologico della rete, modificandolo al fine di ottenere configurazioni più affidabili e al contempo meno costose.

	$K_{Net}$	$C_{Tot}$ [€]
Net A (1 maglia)	0,13	386.850
Net A-AC (2 maglie)	0,09	248.342

Tab. 2 - Confronto delle soluzioni ELR tra la rete A e A-AC  
Table 2 - ELR comparison between Net A and Net A - AC

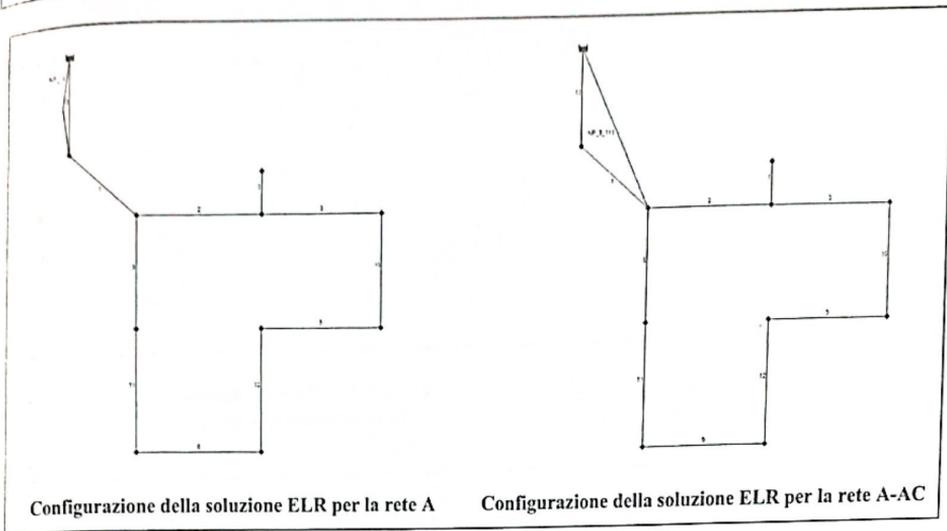


Fig. 3 - Schemi topologici delle configurazioni ELR presentati in tabella 2  
Figure 3 - Networks A topologies for configurations presented in table 2

In tabella 3 si portano a confronto i costi totali di riabilitazione per soluzioni aventi lo stesso livello di rischio ( $K_{Net} = 0,016$ ). Queste soluzioni, evidenziate graficamente da un quadrato in Figura 2, mostrano che al fine di ottenere lo stesso livello di performance, i tradizionali metodi di ottimizzazione adottati necessitano di duplicare un maggior numero di condotte al fine di raggiungere un livello di rischio equivalente a quello ottenuto dalle soluzioni in cui lo schema topologico è considerato una variabile aleatoria e in cui l'aggiunta di poche condotte risulta in soluzioni maggiormente robuste con una considerevole riduzione dei costi necessari. Le configurazioni della rete corrispondenti alle soluzioni di questo confronto sono illustrate in figura 4.

	$K_{Net}$	$C_{Tot}$ [€]
Net A (1 maglia)	0,016	1.440.000
Net A-AC (3 maglie)	0,016	698.987

Tab. 3 - Analisi dei costi tra le soluzioni dei Fronti di Pareto A e A - AC per uno stesso valore di rischio

Table 3 - Cost analysis of the Pareto Front solutions with the same network performance and relative solutions for Net A and Net A-AC

La seconda rete esaminata è la porzione di rete del sistema acquedottistico di Piedimonte San Germano - Fr (PSG) localizzata nel Basso Lazio. La rete, già assunta in qualità di case study dagli Autori in alcuni lavori cui si rimanda per le caratteristiche topologiche (e.g. Tricarico et al., 2006) si presenta maggiormente complessa e caratterizzata da 45 condotte, 12 maglie, 33 nodi e un unico serbatoio posto a quota 150m. Assumendo quali possibili diametri di raddoppio gli stessi riportati in tabella 1, si può evidenziare che il numero totale di possibili soluzioni, i.e. configurazioni, è uguale a  $3,50 \times 10^{57}$ . Analogamente a prima, lo schema topologico iniziale riportato in figura 5a è stato modificato (PSG AC) considerando 8 nuove possibili connessioni tra i nodi da considerare quali variabili decisionali del problema ( $5,94 \times 10^{67}$ ), figura 5b.

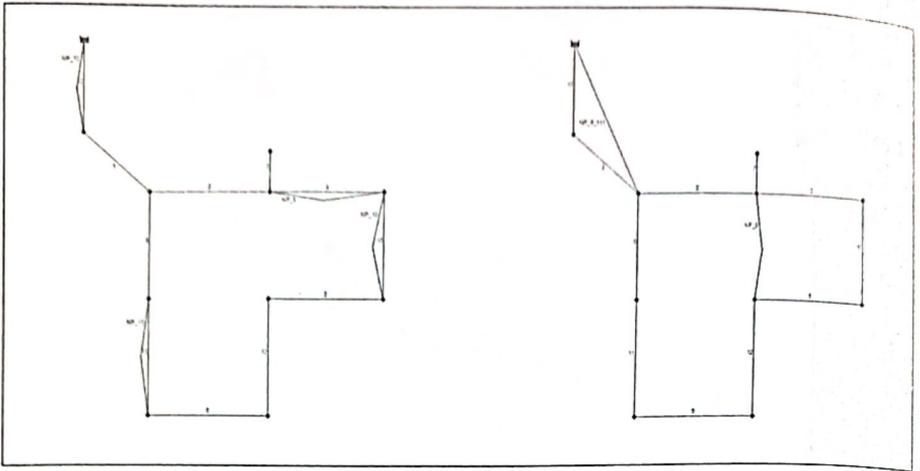


Fig. 4 - Schemi topologici delle configurazioni presentate in tabella 3  
 Figure 4 - Networks topologies for configurations presented in table 3

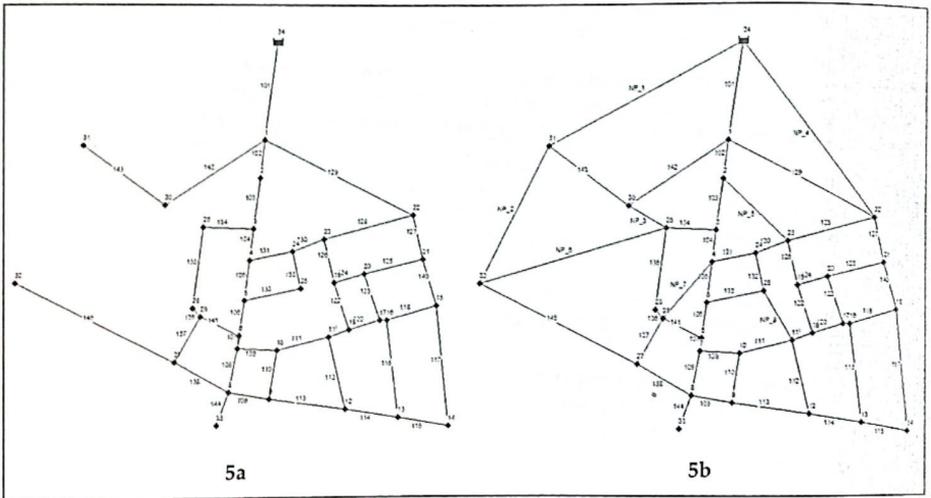


Fig. 5 - Configurazioni rete PSG (5a) e rete PSG-AC (5b)  
 Figure 5 - Networks PSG topology (5a) and PSG-AC topology (5b)

I risultati ottenuti dalla metodologia sopra esposta sono riportati in figura 6, in cui i due Fronti di Pareto sono posti a confronto.

Analogamente a quanto riportato per la rete A, anche per questo caso in studio al ridursi del rischio di fallanza nel servire l'utenza con la portata richiesta, il costo degli interventi riabilitativi aumenta. Il Pareto Front relativo alle simulazioni che portano in conto lo schema topologico della rete tra le variabili decisionali (PSG-AC) è dominante rispetto al tradizionale approccio di riabilitazione (PSG), seppure in questo caso, essendo anche minore il numero di nuove connessioni tecnicamente possibili tra i nodi, la differenza tra i costi e le performance delle diverse configurazioni risulta meno evidente.

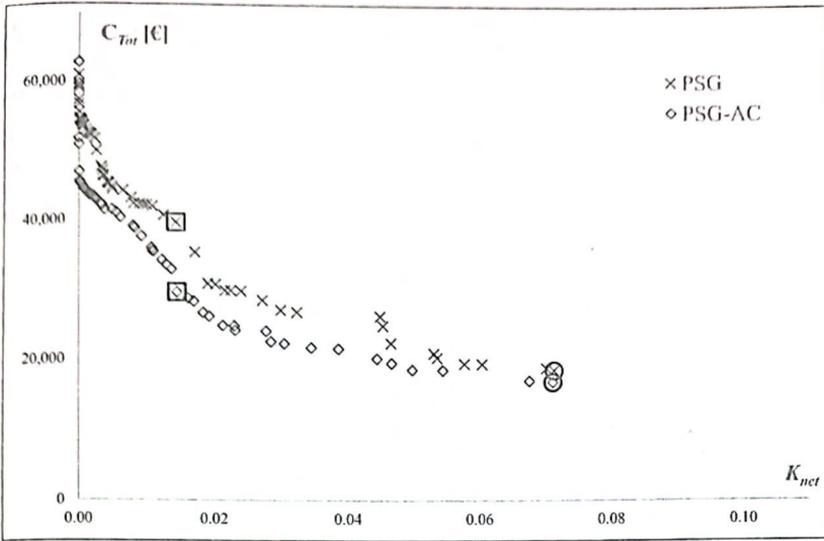


Figura 6 - Fronti di Pareto delle configurazioni PSG e PSG-AC ottenuti dalle due metodologie a confronto  
 Figure 6 - Pareto Fronts for the PSG and PSG-AC configurations obtained by the methodologies comparison

In tabella 5 si portano a confronto le due soluzioni cerchiata in figura 6 e relative alla soluzione ELR, valore limite nella ricerca delle soluzioni ottimali. Anche in questo caso la soluzione PSG-AC presenta un costo inferiore con una maggiore efficienza, pur mantenendo in tal caso lo stesso numero di maglie.

	$K_{Net}$	$C_{Tot}$ [€]
Net PSG (12 maglie)	0,0714	18.387
Net PSG-AC (12 maglie)	0,0711	16.738

Tab. 5 - Confronto delle soluzioni ELR tra la rete PSG e PSG-AC  
 Table 5 - ELR comparison between Net PSG and Net PSG - AC

Dal confronto dei costi totali di riabilitazione per configurazioni aventi lo stesso livello di rischio ( $K_{Net} = 0,015$ ), evidenziate graficamente da un quadrato in figura 6 e riportate in tabella 6, si evidenzia ancora una volta come lo schema topologico portato in conto quale dato di input e non considerato tra le variabili decisionali del problema porti a soluzioni con un costo maggiore per raggiungere la stessa efficienza. Le configurazioni della rete corrispondenti alle soluzioni di questo confronto sono illustrate in figura 7.

	$K_{Net}$	$C_{Tot}$ [€]
Net PSG (12 maglie)	0,015	39.527
Net PSG-AC (15 maglie)	0,015	29.502

Tab. 6 - Analisi dei costi tra le soluzioni dei Fronti di Pareto PSG e PSG - AC per uno stesso valore di rischio  
 Table 6 - Cost analysis of the Pareto Front solutions with the same network performance and relative solutions for Net PSG and Net PSG-AC

Anche nel caso della rete di PSG, al ridursi del rischio e all'incrementarsi dei costi totali, il massimo numero di maglie considerate è pari a 15, che possono, per il caso in esame, essere considerate quale valore soglia di ridondanza.

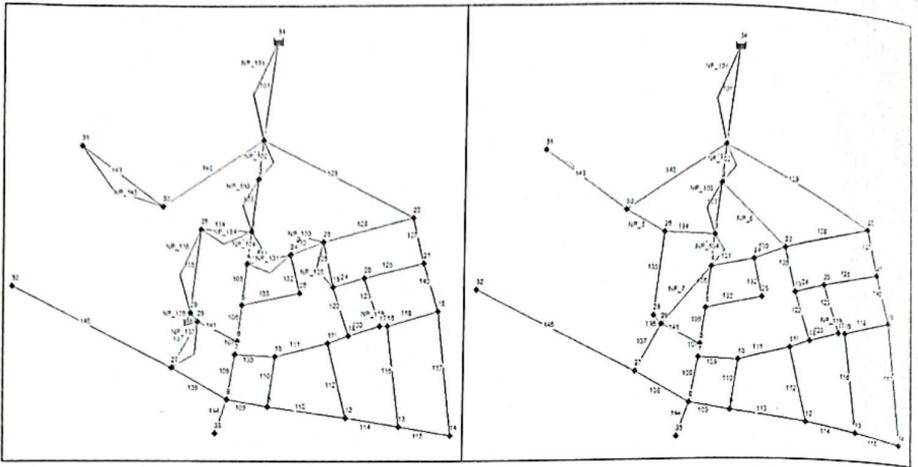


Fig. 7 - Schemi topologici delle configurazioni presentate in tabella 6  
 Figure 7 - Networks topologies for configurations presented in table 6

#### 4. Conclusioni

In un classico problema di ottimizzazione per l'analisi del corretto funzionamento di un sistema acquedottistico, caratterizzato da un *trade-off* tra efficienza della rete e costi totali da sostenere per raggiungerla, si è analizzata l'incidenza dello schema topologico nel conseguimento delle configurazioni ottimali di riabilitazione.

Dai risultati ottenuti si evince che il portare in conto la topologia del sistema tra le variabili decisionali e non assumerla quale dato di input noto apriori, porta a soluzioni maggiormente affidabili e al contempo derivanti da un minor impegno economico.

La metodologia proposta, considerando la richiesta ai nodi della rete modellata attraverso un approccio probabilistico e assumendo anche una probabilità casuale di rottura delle componenti del sistema, ed in particolare delle condotte, ha altresì evidenziato un valore soglia nella ridondanza della rete legato ad un numero massimo di maglie da progettare al fine di avere un'elevata efficienza del servizio.

#### Bibliografia

- Afshar M.H., Jabbari E. (2008). Simultaneous layout and pipe size optimization of pipe networks using genetic algorithm. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 33(2B), pp. 391-409.
- Alvisi S., Franchini M. (2009). Multiobjective optimization of rehabilitation and leakage detection scheduling in water distribution systems, *Journal of Water Resources Planning and Management* 135(6), pp. 426-439.
- Arena C., Fortunato A., Mazzola M.R. (2010). Planning Rehabilitation Actions on Water Distribution Networks in Condition of Data Scarcity, *ASCE, Proceeding of 12th International Water Distribution Systems Analysis conference*, 12-15 September 2010, Tucson, AZ, USA
- Berardi L., Giustolisi O., Kapelan Z., Savić D.A. (2008). Development of pipe deterioration models for water distribution systems using EPR. *Journal of Hydroinformatics* 10(2), pp. 113-126.
- Do Guen Yoo, Hwan Don Jun, Joong Hoon Kim (2010). Determination of Rehabilitation Priority Order of Subareas in Water Distribution Systems Considering Relative Importance of Pipes, *Proceedings of the 12th International Water Distribution Systems Analysis conference*, 12-15 September 2010, Tucson, AZ, USA
- Gargano R., Tricarico C., de Marinis G. (2010). Residential water demand - daily trends, *ASCE, Proceedings of 12th International Water Distribution Systems Analysis conference*, 12-15 September 2010,

- Fucson, AZ, USA ISBN (print): 978-0-7844-1203-9 pp. 1314-1323, (doi: [http://dx.doi.org/10.1061/41203\(425\)118](http://dx.doi.org/10.1061/41203(425)118))
- Giustolisi O., Kapelan Z., Savić D.A. (2007). A simulation model for detecting topological changes in a water distribution network, ASCE, World Environmental and Water Resources Congress 2007: Restoring Our Natural Habitat, Tampa, Florida United States, May 15-19, 2007 ISBN 9780784409275
- Goulter I.C., Morgan D.R. (1985). An integrated approach to the layout design of water distribution networks, *Civil Engineering Systems* 2, June.
- Goulter I.C. (1987). Current and future use of systems analysis in water distribution network design, *Civil Engineering Systems* 4, December.
- Halhal D., Walters G.A., Ouazar D., Savić D. (1997). Water Network Rehabilitation with Structured Messy Genetic Algorithm, *Journal of Water Resources Planning and Management - ASCE* 123(3), pp. 137-146.
- Jacobs P., Goulter I.C. (1989). Optimization of redundancy in water distribution networks using graph theoretic principles. *Engineering Optimization* 15(1), pp. 71-82.
- Kapelan Z., Savić D., Walters G. A., Babayan A. (2006). Risk and Robustness based Solutions to a Multiobjective Water Distribution System Rehabilitation Problem under Uncertainty, *Water Science and Technology* 53(1), pp. 61-75.
- Marchi A., Salomons E., Ostfeld A., Kapelan Z., Simpson A.R., Zecchin A.C., Zecchin C., Maier H. R., Wu Z.Y., Elsayed S.M., Song Y., Walski T., Stokes C., Wu W., Dandy G.C., Alvisi S., Creaco E., Franchini M., Saldarriaga J., Pez D., Hernandez D., Bohrquez J., Bent R., Coffrin C., Judi D., McPherson T., van Hentenryck P., Matos J. P., Monteiro A. J., Matias N., Yoo D.G., Lee M. H., Kim J.H., Iglesias-Rey P. L., Martinez-Solano F. J., Mora-Meli D., Ribelles-Aguilar J.V., Guidolin M., Fu G., Reed P., Wang Q., Liu H., McClymont K., Johns M., Keedwell E., Kandiah V., Jasper M.N., Drake K., Shafiee E., Barandouzi M.A., Berglund A.D., Brill D., Mahinthakumar G., Ranjithan R., Zechman E.M., Morley M. S., Tricarico C., de Marinis G., Tolson B.A., Khedr A., Asadzadeh M. (2013). The Battle of the Water Networks II (BWN-II), *Journal of Water Resources Planning and Management - ASCE*, doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)JWR.1943-5452.0000378](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)JWR.1943-5452.0000378)
- Morley M.S. (2008). A Framework for Evolutionary Optimization Applications in Water Distribution Systems, PhD Thesis, Centre for Water Systems, University of Exeter, UK. 278pp.
- Morley M.S., Tricarico C. (2008). Pressure Driven Demand Extension for EPANET (EPANETpdd). – Technical Report 2008-02, Centre for Water Systems, University of Exeter, UK. 10pp.
- Morley M.S., Tricarico C., de Marinis G. (2012). Multiple - Objective evolutionary algorithm approach to water distribution system model design, *Proceedings of the 14th Water Distribution Systems Analysis Conference, WDSA2012, Adelaide, Australia*, ISBN 978-1-922197-58-9, pp. 551-559.
- Ostfeld A. (2005). Water Distribution Systems Connectivity Analysis, *Journal of Water Resources Planning and Management - ASCE* 131(1)
- Rowell W.F., Barnes J.W. (1982). Obtaining Layout of Water Distribution Systems. *Journal of the Hydraulics Division - ASCE* 108, pp. 137-148.
- Tolson B.A., Maier H.R., Simpson A.R., Lence B.J. (2004). Genetic algorithms for reliability-based optimization of water distribution systems *Journal of Water Resources Planning and Management - ASCE*, 130(1), pp. 63-72.
- Tricarico C., Gargano R., Kapelan Z., Savić D.A., de Marinis G. (2006). Economic Level of Reliability for the Rehabilitation of Hydraulic Networks, *Journal of Civil Engineering and Environmental Systems*, 23(3), pp. 191-207.
- Tricarico C., de Marinis G., Gargano R., Leopardi A. (2007). Peak Residential Water Demand, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Water Management*, 160(2), pp. 115-121.
- Tricarico C., Morley M.S., Gargano R., Kapelan Z., de Marinis G., Savić D.A. (2014). The influence of the existing network layout on water distribution system redesign analysis, *Journal of Hydroinformatics*, 16(6), pp. 1375-1389.