

Modello per il dimensionamento e la ristrutturazione ottimale dei sistemi di distribuzione idrica



1. Introduzione

Le continue critiche dell'opinione pubblica e dei media sugli sprechi dell'acqua potabile e le inefficaci gestioni dei pubblici acquedotti, obbligano i Gestori di questi impianti ad accelerare quei processi di trasformazione tanto attesi e da tempo previsti dalla normativa vigente (L. 36/94 - Galli) volti alla riforma dei servizi idrici. Ciò comporterà, nel breve periodo, la formazione di un processo industriale (e non artigianale come attualmente avviene) della produzione dell'acqua e della sua distribuzione.

Le continue emergenze determinate dalla indisponibilità di risorse idriche per fini idropotabili, ma anche industriale e agricolo, impone che i Gestori affrettino la rivisitazione dei programmi d'investimento che dovranno sempre più rivolgersi al contenimento degli sprechi e all'ammodernamento della rete preposta alla distribuzione di una sempre più scarsa risorsa.

A Palermo, dove le carenze infrastrutturali fecero scattare non più tardi di un anno fa il grido d'allarme per le forti perdite della rete idrica (valutate intono al 40%), è stato necessario ricorrere all'appostamento di somme ingenti nonché all'opera del Genio Militare per il risanamento di reti obsolete e forse in parte mal gestite, comunque con problematiche già note da tempo e sempre rimandate. Così, secondo la previsione del Programma Operativo "Ampliamento e adeguamento delle disponibilità e dei sistemi di adduzione delle risorse idriche nelle regioni dell'obiettivo 1", la spesa per servire nell'immediato poco meno di mezzo milione di abitanti risulterà di oltre € 108

milioni, equivalente ad un costo procapite e per metro di tubazione rispettivamente di € 455 e € 255.

Non solo i casi come quello citato, certamente importanti sul piano finanziario e ingegneristico, richiedono l'adozione di appropriati mezzi in grado di definire i disservizi ed i tronchi di rete che necessitano un ammodernamento, ovvero ristrutturazione, in modo che i livelli minimi di servizio siano garantiti pur attenendosi ad una giusta economia di spesa. I Gestori devono quindi proporre oggi - entro accettabili limiti finanziari - programmi/progetti di potenziamento, adeguamento o ristrutturazione dei vari settori impiantistici che compongono il pubblico acquedotto. Essi divengono perciò protagonisti, non solo come pianificatori, ma anche come ideatori-progettisti di interventi comunque complessi.

Primo importante passo che il Gestore di una rete dovrà compiere per poter individuare tra i molteplici interventi quelli prioritari, è quello di analizzare attraverso opportune analisi numeriche il comportamento delle reti nello stato attuale e nelle possibili configurazioni future. Queste ultime, specie per i settori di rete con rami obsoleti o deficitari, sono di difficile determinazione sia per la numerosità delle combinazioni possibili, sia perché associata ad ognuna di queste vi è un aspetto economico da considerare che rende estremamente impegnativa la ricerca della configurazione ottimale avente peraltro un intrinseco livello di sicurezza.

Per la ricerca della migliore soluzione si può ricorrere, come detto, all'ausilio di appropriati software che combinino le tecniche di programmazione dinamica con pac-

Ing. Luca Frascini
Ing. Stefano Cecchi

 **aquacontest**

Servizi di ingegneria integrata

AquaContest S.a.s.
Via dei Mille, 195/A
27100 Pavia
Tel. +39 0382 531820
E-mail: info@aquacontest.com
Web-site: www.aquacontest.com

chetti che sfruttano consolidati algoritmi d'analisi numerica e di programmazione lineare ai fini della determinazione della soluzione a minimo costo, sia per quanto riguarda l'ampliamento delle reti sia per l'ammodernamento dei tronchi esistenti.

Riconoscendo l'importanza di questo nuovo modo di concepire lo studio di una rete idrica, un gruppo di professionisti, supportati da ricercatori universitari, hanno predisposto e sviluppato un modello numerico per l'analisi, la progettazione e la gestione assistita di impianti idrici rivolto alla risoluzione delle seguenti problematiche:

- o dimensionamento e ristrutturazione di generiche reti idriche in cui la fase di ristrutturazione è interpretata come "un dimensionamento ottimale ex novo" dello stato di fatto in cui i tronchi esistenti vengono progressivamente sostituiti o mantenuti, secondo un'opportuna procedura gerarchica di tipo iterativo nel rispetto dei vincoli progettuali;

- o studio della vulnerabilità di sistemi acquedottistici esistenti e per la ricerca della configurazione ottimale delle reti che richiedono progressivi processi di ammodernamento ovvero di ristrutturazione. Con procedure di programmazione lineare viene svolta in forma automatica l'analisi di Affidabilità di Funzionamento della rete per la ricerca della configurazione impiantistica che minimizza il rapporto tra costi di investimento e costi legati all'incremento dei fattori di sicurezza dell'impianto;

- o ricerca delle soluzioni ottimali ai problemi legati all'estensione ed all'interconnessione di più sistemi idrici, che stante la loro complessità, prevedono spesso di-

mensionamenti ridondanti con configurazioni economicamente ed energeticamente onerose.



2. Teoria e metodologia del modello



2.1 Teoria di base del modello di dimensionamento

Come è noto, il dimensionamento idraulico di un sistema di condotte in pressione, sia esso a ramificazioni aperte o a maglie chiuse, rappresenta un problema matematicamente indeterminato e caratterizzato da un numero di incognite maggiore del numero delle equazioni idrauliche disponibili. Alcuni dei modelli proposti in letteratura predisposti per eseguire un dimensionamento diretto delle tubazioni, affrontano il problema assegnando già a priori specifici parametri, come le portate circolanti o le pressioni ai nodi, oppure individuando delle funzioni globali di costo da minimizzare mediante la programmazione lineare e non lineare. Nella maggior parte dei casi la preliminare definizione di alcune variabili costituisce il limite stesso del metodo di calcolo che, diversamente, dovrebbe ricercare la soluzione in modo autonomo.

Per superare le difficoltà legate alla scelta di queste variabili, si può ricorrere ad una metodologia che consente di definire le portate circolanti attraverso la minimizzazione del percorso compiuto dall'acqua per pervenire dai punti di alimentazione ai punti di utenza (Frascini L., 1981). Si può infatti dimostrare che in una rete ramificata aperta, nel rispetto delle equazioni

di continuità ai nodi, l'individuazione del minimo della funzione:

$$F.O._1 = \sum_{i=1}^{L_1} |q_i| l_i \quad (1)$$

con q_i portata circolante nel tronco i -esimo di lunghezza l_i , fornisce una configurazione di portate circolanti negli $L-M$ tronchi (con M numero delle maglie) che verifica la condizione di minimo percorso tra i punti di alimentazione e di erogazione (Marchetti M., 1949; Ippolito G., 1960).

Calcolata la distribuzione delle portate, la determinazione della configurazione ottimale dei diametri e delle quote piezometriche nei nodi delle reti ramificate che minimizzano nel loro insieme il costo in opera delle tubazioni, può essere risolto sempre con tecniche di programmazione lineare, attraverso una seconda funzione obiettivo che identifica il minimo costo dell'opera:

$$F.O._2 = \sum_{d=1}^R \sum_{i=1}^{L_d} C_{id} \cdot l_{id} \quad (2)$$

in cui il funzionale è esteso alle R possibili suddivisioni dell' i -esimo tronco nei vari diametri commerciali, ognuna di lunghezza l_{id} . La grandezza C_{id} rappresenta il costo unitario della condotta posata nel tronco i -esimo di lunghezza l_{id} relativa al diametro d -esimo.

Il funzionale $F.O._2$ viene ovviamente calcolato nel rispetto dei vincoli di pressione nei punti di erogazione e delle equazioni del moto che possono dipendere da tubazioni con caratteristiche idrauliche differenti tra loro.

Detto funzionale è applicato a tutti i tronchi con portate circolanti non nulle. Avendo l'operazione di apertura della rete attribuito ad alcuni

tronchi una portata nulla nei nodi di estremità, è necessario, ai fini del ripristino delle maglie, attribuire ad essi un diametro che normalmente viene assegnato a discrezione, pur rispettando alcune regole (minimo diametro) che tengano conto dell'estensione del bacino servito da ciascuna di loro.



2.2 Procedura sviluppata nel modello

Quanto sopra trova giusta applicazione per proporzionare le nuove tratte di una rete idrica, ma è inadatto per i problemi di ristrutturazione, dove invece è richiesto di ridimensionare tronchi esistenti che appalesano inefficienze funzionali e/o strutturali. Per tenere conto di queste situazioni si è riconosciuta efficace la metodologia qui di seguito sintetizzata che prevede quattro fasi consequenziali.

A. Verifica della rete

Nel caso di sistemi esistenti la verifica della rete, necessaria per definire il comportamento globale del sistema e identificare i corretti flussi su ogni tronco, va eseguita con un modello in grado di simulare il funzionamento di valvole, serbatoi ed impianti di pompaggio.

Diverse procedure possono essere scelte al riguardo: metodi di bilanciamento dei carichi o delle portate, ai metodi del gradiente oppure ancora a metodi legati alla potenza meccanica dissipata (Cao C., 1963; Iannelli G., 1967; Todini E., 1979; Mantica I. ed Altri, 1992; Contro R. ed Altri, 1980; Capponi C., 1984; Curto G. ed Altri, 1976). Per le applicazioni che interessano la metodologia qua proposta, si è fatto ri-

ferimento al metodo di H. Cross del bilanciamento dei carichi rettificato con una procedura che tiene conto di assumere alimentazioni a carico piezometrico variabile e a distribuzione spaziale della rete.

Tale approccio può essere applicato, con alcuni accorgimenti, anche alla progettazione di nuove reti introducendo dei parametri che sintetizzino eventuali vincoli tecnico-funzionali.

B. Determinazione della lunghezza equivalente

I risultati ottenuti (pressioni, portate circolanti, perdite di carico, ecc.) attraverso la fase di verifica sopra detta sono fondamentali per definire un criterio di intervento sulla configurazione delle condotte e sui punti di alimentazione. Se da un lato i diametri e le lunghezze dei tronchi influiscono direttamente sull'aspetto economico, dall'altro la configurazione delle portate circolanti permette di valutare i percorsi preferenziali tra i punti di alimentazione e di erogazione.

Le variabili lunghezza, diametro e portata circolante vengono infatti utilizzate per definire il parametro "lunghezza equivalente" che tiene conto delle caratteristiche geometriche, idrauliche e funzionali della rete verificata (stato di fatto). Prendendo in considerazione la funzione obiettivo FO_1 , è immediato riconoscere che la configurazione delle portate di progetto, da cui deriva la scelta dei tronchi della rete ramificata aperta da dimensionare in modo ottimale minimizzando la FO_2 , dipende direttamente dalla lunghezza delle condotte (l_i).

La lunghezza geometrica del tronco viene di fatto sostituita dal parametro equivalente (L_{eq}) che permette di definire la porzione di rete

ramificata aperta caratterizzata dai tronchi esistenti più convenienti da un punto di vista funzionale:

$$L_{eq} = f(l_i, D_i, q_i) = f_1(l_i) \cdot f_2(D_i) \cdot f_3(q_i) - \frac{\ln(\lambda \cdot l_i) \cdot \ln(\theta \cdot q_i)^{\delta}}{D_i^{2.5\delta}} \quad (3)$$

in cui i tre operatori λ , δ e θ hanno validità nei seguenti intervalli:

$$\lambda = \left[\frac{1}{\min(l_i)}; 10 \right] \quad (4.1)$$

$$\delta = [0.1; 2.0] \quad (4.2)$$

$$\theta = \left[\frac{0.01}{\max(q_i)}; \frac{1}{\max(q_i)} \right] \quad (4.3)$$

Ogni operatore è stato singolarmente valutato nel corso di simulazioni di reti anche complesse (con oltre 300 tronchi) giungendo a risultati soddisfacenti. Non si esclude tuttavia che futuri approfondimenti possano migliorare il processo di definizione della rete ramificata aperta.

L'introduzione della lunghezza equivalente risponde al principio di favorire la ristrutturazione delle condotte che presentano lunghezza minore, diametro e portata maggiori: questa filosofia identifica l'intervento che privilegia il più possibile i percorsi preferenziali rilevati nella fase di verifica e che minimizza il numero delle condotte da ristrutturare.

La deformazione geometrica della rete esistente, dovuta alla sostituzione della lunghezza reale con quella equivalente, interessa unicamente il primo problema di programmazione lineare (FO_1). Il dimensionamento dei diametri, che

avviene minimizzando la funzione obiettivo FO_2 , utilizza infatti le lunghezze reali delle condotte. La sostituzione del parametro li riportati nell'espressione (1) con le q_i dati dalla (3) modifica la funzione obiettivo FO_1 come segue:

$$F.O._1 = \sum_{i=1}^I |q_i| \frac{\ln(\lambda \cdot l_i) \cdot \ln(\theta \cdot q_i)^{q_i}}{D_i^{2.85}} \quad (1.1)$$

Applicando questa funzione si ottiene quindi una nuova rete ramificata aperta sulla quale quindi si può ricercare la funzione di minimo costo data dalla funzione FO_2 .

C. Ristrutturazione ottimale intermedia

L'applicazione della funzione obiettivo $F.O._2$ porta ad escludere i tronchi di chiusura che nella rete ramificata aperta risultavano privi di portata transitante.

Nel caso della ristrutturazione la chiusura delle maglie non costituisce un problema di dimensionamento in quanto le tratte sono esistenti e caratterizzate da valori reali di scabrezza e diametro. Per questo motivo i tronchi esclusi nella prima fase del calcolo ($F.O._1$) dal dimensionamento ottimale ($F.O._2$) assumono le stesse caratteristiche iniziali dello stato di fatto.

Ne consegue una rete che potremmo chiamare "mista", formata in buona parte da tronchi nuovi (appena dimensionati) e per il resto da esistenti.

D. Normalizzazione

Il risultato più significativo indotto dal ripristino delle maglie è la ridistribuzione delle portate circolanti nei tronchi. L'aumento del numero di condotte rispetto alla configurazione aperta ridimensionata, determina una complessiva diminuzione delle perdite di carico con un sen-

sibile aumento delle piezometriche ai punti di erogazione.

Da un punto di vista tecnico-economico, questa ridondanza può essere interpretata come un indice di ristrutturazione attraverso il quale valutare di quanto l'intervento intermedio si discosti dalla configurazione ottimale a cui si perviene applicando una quarta procedura, denominata "normalizzazione", che, prendendo in considerazione la configurazione iniziale e la rete mista parzialmente dimensionata, realizza una sostituzione incrociata dei soli tronchi corrispondenti alla rete ramificata considerando che i tronchi di chiusura sono uguali in entrambi i sistemi idrici. La permuta interessa una coppia di tronchi alla volta e segue una gerarchia di priorità che viene ridefinita ad ogni step di calcolo in base ai risultati forniti dalle verifiche di funzionamento eseguite sulle due reti di distribuzione.

La procedura di normalizzazione trasferisce, tronco per tronco, le condotte dimensionate dalla rete mista alla rete iniziale e, viceversa, le condotte esistenti dello stato di fatto alla rete mista verificando, ad ogni sostituzione, il rispetto dei vincoli di progetto: la prima rete, che inizialmente non garantiva i valori minimi di piezometrica, vede gradualmente aumentare il numero di nodi che li rispettano, mentre la seconda, che presentava una sensibile ridondanza dimensionale, subisce l'effetto contrario.

Se mettessimo insieme le configurazioni di entrambi i sistemi idrici che garantiscono i vincoli di progetto, disporremmo di una serie di soluzioni tra le quali individuare l'intervento con il minor numero di nuove condotte, e quindi di minor costo, a cui attribuire il significato

di ristrutturazione ottimale sotto il profilo tecnico-economico. Poiché questa configurazione è compresa, per definizione, tra quella dello stato di fatto e quella della rete ristrutturata in modo ridondante, la procedura di normalizzazione fornirà sempre una soluzione accettabile dal punto di vista funzionale.



2.3 Considerazioni sull'applicabilità della procedura a casi particolari

Numerose analisi hanno dimostrato l'efficienza della metodologia permettendo la risoluzione di problemi che considerano l'aumento di affidabilità di un sistema idrico, l'inserimento di nuovi allacciamenti e la redistribuzione dei punti di alimentazione in reti fortemente sbilanciate.

Le procedure di ottimizzazione lineari e non lineari sviluppate per il dimensionamento e la ristrutturazione di condotte, forniscono la soluzione impiantistica a minore costo in modo diretto evitando le tradizionali procedure iterative, svolte attraverso ripetute verifiche di funzionamento, che si limitano a esaminare l'aspetto idrodinamico a discapito di quello economico e delle condizioni di servizio variabile.

Inoltre, qualora si associ la metodologia sopra esposta a tecniche di simulazioni dinamica, si addiuvano ad un metodo di controllo della rete che fornisce informazioni circa il comportamento non stazionario dell'impianto idrico quando sottoposto a condizioni di funzionamento variabili nel tempo; si possono così riconoscere configurazioni d'esercizio che sul piano tecnico-

economico sono inidonee a causa dei seguenti fenomeni:

- fughe d'acqua (continue) su tratte assegnate oppure concentrate in alcuni nodi di rete;
- perdite dal troppo pieno dei serbatoi;
- richieste straordinarie di portata in particolari nodi della rete;
- impiego temporizzato di idranti per i casi di incendio;
- fuori servizio di condotte, serbatoi ed impianti di pompaggio;
- depressioni della rete per effetto di autoclavi.



3. Applicazioni: rete antincendio della raffineria ENI S.p.A. di Venezia

La metodologia proposta ha trovato applicazione nella verifica di funzionalità idraulica della rete antincendio della Raffineria ENI S.p.A. di Venezia (EniVe), attività che, ponendosi nell'ambito di una più ampia razionalizzazione dello stabilimento, è finalizzata al conseguimento della certificazione EMAS. Lo studio, commissionato nel luglio 2002 dalla Divisione Refining & Marketing, è il risultato della collaborazione tra le società di ingegneria AUSY di Sannazzaro de Burgondi (PV) e la società Aquacontest di Pavia.

Scopo del lavoro è stato la simulazione di funzionamento dell'impianto antincendio di raffineria e l'individuazione di eventuali aspetti da ottimizzare o riqualificare, sia sul piano strutturale che impiantistico, tenendo conto dei requisiti minimi di esercizio posti da EniVe nell'eventualità che si verificassero distintamente una serie di 17 eventi critici. Le proposte di intervento

sulla rete dovevano essere tali da garantire il pieno rispetto della normativa vigente e delle severe specifiche ENI in tema di sicurezza.

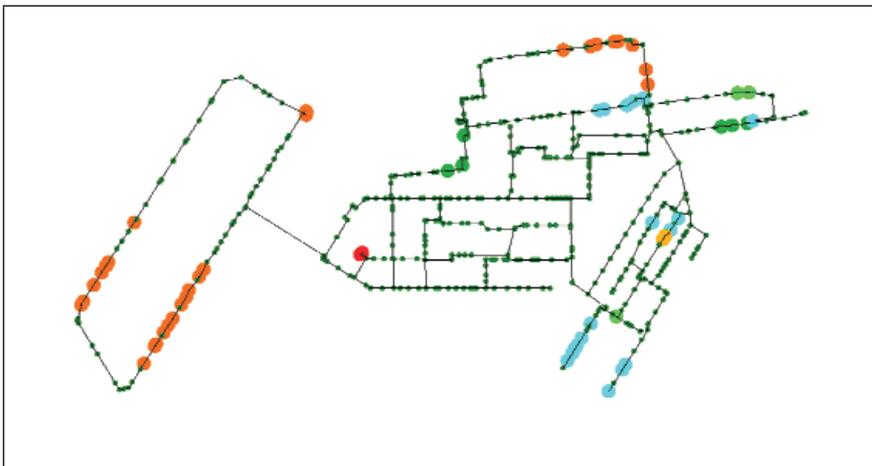
Le specifiche tecniche richiedevano che in tutti i 17 eventi fosse garantita una pressione agli stacchi superiore o uguale a 10 bar con una portata massima di 3.500 mc/h; inoltre ogni evento doveva sottostare ad una diversa attivazione dei gruppi di pompaggio esistenti in funzione della riserva d'acqua disponibile nel complesso petrolifero. La struttura della rete, come schematizzata nel modello idraulico riportato in Fig. 1, consisteva di 2 sotto reti interconnesse rispettivamente di 2.210 m (76 nodi) e di 7.815 m (292 nodi). Ciascuna rete era composta da tubazioni in acciaio di diametro variabile da 125 mm a 400 mm. I nodi delle due reti costituivano i punti di interconnessioni, di alimentazione e di erogazione (impianti Sprinkler, impianti schiuma, idranti e monitori).

Seguendo il percorso già indicato nel capitolo precedente, la prima fase dello studio è consistita nella preliminare schematizzazione della rete con attenta descrizione topolo-

gica dei suoi elementi caratteristici. Sono stati quindi definiti i valori di progetto: portate nei punti di erogazione, curve di funzionamento degli impianti di pompaggio, valvole d'intercettazione e riduzione, lunghezze, diametri e caratteristiche idrauliche delle tubazioni, ecc. ed eseguita la verifica idraulica dello stato di fatto per ciascuno dei 17 eventi con l'obiettivo di ricavare le portate circolanti nei tronchi e le quote piezometriche ai nodi nei diversi scenari.

Dopo la valutazione da parte dei responsabili ENI degli esiti delle verifiche, si è passati alla successiva fase di riqualificazione ottimale della rete ponendo l'attenzione agli eventi che generavano maggiore stress al sistema.

La comparazione dei valori di progetto con quelli di verifica ha poi permesso di identificare le zone in cui potevano essere migliorate sia le condizioni di pressione sia i limiti di velocità (analisi delle criticità del sistema), per quanto, le anomalie di funzionamento riscontrate solamente nei 3-4 eventi più gravi, fossero riconducibili soprattutto alla severità delle specifiche ENI in tema di sicurezza.



• Fig. 1 - Affidabilità comparata dello Stato di Fatto

Tali valutazioni si sono tradotte in una serie di schede, nel caso specifico 17 pari al numero degli eventi oggetto di studio, in cui la rete veniva rappresentata graficamente raffigurando nodi e tronchi con diversi colori e dimensioni in funzione della risposta del sistema ad ogni sollecitazione.

Lo studio si è poi concluso con la valutazione della affidabilità comparata dello stato di fatto su tutti i 17 eventi: il parametro utilizzato per esplicitare la risposta complessiva della rete alle diverse sollecitazioni, definito appunto “affidabilità comparata”, consiste in un indice numerico compreso tra 0 e 100 riferito sia ai nodi che ai tronchi. Nella Fig. 1 è riportata la scheda dell'affidabilità comparata dello stato di fatto in cui i diversi colori e le diverse dimensioni di nodi e tronchi evidenziano le criticità prestazionali e strutturali del sistema antincendio.

La fase conclusiva è consistita nell'ottimizzazione funzionale della configurazione delle condotte e dei sistemi di pompaggio attraverso la comparazione delle possibili soluzioni. Gli interventi proposti riguardarono: l'utilizzo di una tuba-

zione libera sottopassante la laguna per potenziare il flusso idrico tra il settore Est (Raffineria) e quello Ovest (Isola Petroli), la riqualificazione delle pompe esistenti e l'inserimento di nuove condotte per aumentare il carico idraulico nelle maglie e minimizzare gli effetti negativi dovuti alla rottura e/o fuori servizio di un tratto.

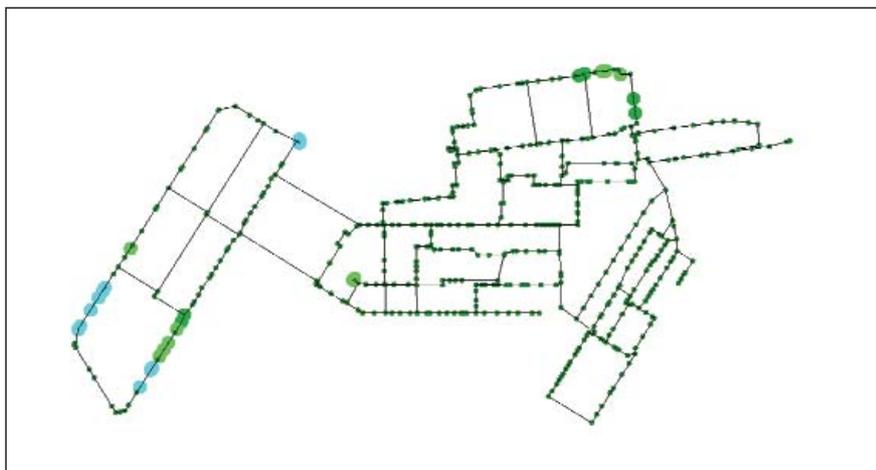
Una volta valutata la configurazione delle condotte e ridefinita l'attivazione degli impianti di pompaggio in grado di garantire la corretta funzionalità della rete, si è nuovamente eseguita una verifica di tutti gli eventi con l'obiettivo di dimostrare il beneficio apportato dall'intervento di riqualificazione anche per i casi che, allo stato attuale, non presentavano criticità.

Inoltre, la scheda di affidabilità comparata (Fig. 2) ha evidenziato un certo miglioramento funzionale soprattutto negli eventi più gravosi evidenziando altresì la selettività degli interventi proposti senza l'introduzione di ridondanze dimensionali.

4. Conclusioni

Alla luce dei risultati ottenuti, la società AquaContest ha registrato la metodologia illustrata sotto il nome di NAD® (Network Aided Design®) con la prospettiva di rendere al più presto fruibile un sistema informatizzato di dimensionamento e ristrutturazione ottimale di sistemi idrici in pressione.

In particolare, le recenti iniziative commerciali hanno come obiettivo la realizzazione di un'interfaccia grafica che consenta di gestire i risultati delle analisi di funzionamento e della progettazione secondo report personalizzabili dall'utente che, nel caso specifico degli Enti di gestione di reti complesse, risulterebbero estremamente efficaci a rappresentare una vasta gamma di scenari ed a riconoscere gli stati di crisi degli impianti nelle varie condizioni di utilizzo.



• Fig. 2 - Affidabilità comparata dopo la riqualificazione dell'impianto



5. Bibliografia

Bao Y. and Mays L., "Hydraulic reliability analysis of water distribution systems", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol 116, Sep. 1990, pp. 1119-1138.

Cao C., "Sulla convergenza del metodo di Cross". VIII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche; Pisa, 1963.

Ciaponi C. and Papiri S., "Contributo al dimensionamento ottimale delle reti di condotte in pressione a maglie chiuse", *Ingegneria Sanitaria*, N. 4, Luglio-Agosto 1985, pp. 209-217.

Clark R., Stafford C. and Goodrich J., "Water distribution systems - a spatial and cost evaluation", *Journal of Water Resources Plng. Mgmt. Div.*, ASCE, Vol 100, Mar. 1982, pp. 243-256.

Contro R., Franzetti S., "Verifica delle reti idrauliche in pressione mediante programmazione non lineare"; XVII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Palermo, 1980.

Cullinane M., Lansley K. and Mays L., "Optimization-availability-based design of water-distribution networks", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol 118, Mar. 1992, pp. 420-441.

Curto G., Cusimano M., Nobili G., "Un nuovo procedimento di calcolo automatico per la verifica delle reti idrauliche in pressione". XV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Roma, 1976.

Fraschini L., "Dimensionamento

idraulico di un sistema di condotte in pressione con minimizzazione dell'investimento", Università degli Studi di Pavia - Tesi di Laurea, 1980-1981.

Goulter I. and Coals A., "Quantitative approaches to reliability assessment in pipe networks", *Journal Transp. Engrg.*, ASCE, Vol. 112, Mar. 1986, pp. 287-301.

Guercio R. and Xu Z., "Linearized optimization model for reliability-based design of water systems", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol 123, Nov. 1997, pp. 1020-1026.

Iannelli G., "Elementi e dati per il proporzionamento delle reti di distribuzione"; *Ingegneria Sanitaria*, n. 4, 1967.

Ippolito Girolamo, "Elementi di programmazione lineare", Liguori Editore, Napoli, 1974, pp. 138.

Lansley K. and Mays L., "Optimization model for water distribution system design", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol 115, Oct. 1989, pp. 1401-1418.

Mantica I., Ribighini G., Savini F., "Problemi di verifica per reti idrauliche a maglie chiuse. Confronto fra metodi"; *Idrotecnica*, n. 2, 1992.

Tung Y., "Evaluation of water distribution network reliability", *Proc. ASCE Hydraulics Specialty Conf.*, New York, N.Y., 1985, pp. 359-364.

Wagner J., Shamir U. and Marks D., "Water distribution reliability: analytical methods", *Journal of Water Resour. Plng. Mgmt.*, ASCE, Vol. 114.