

ANALISI PRESTAZIONALE
DEI SISTEMI E DEI SERVIZI IDRICI

C. Ciaponi

Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura dell'Università di Pavia

SOMMARIO

La memoria affronta, da un punto di vista generale, la valutazione delle prestazioni nel settore acquedottistico distinguendo gli approcci, essenzialmente di tipo industriale, finalizzati alla valutazione dell'efficacia, efficienza e costi dei servizi, dagli approcci di tipo più scientifico proposti per la misura delle prestazioni idrauliche dei sistemi.

Con riferimento a questi ultimi, la memoria si sofferma sull'analisi prestazionale delle reti di distribuzione basata sulla misura dell'affidabilità ottenuta attraverso indici definiti dal rapporto fra i volumi effettivamente erogati e quelli richiesti dall'utenza.

In particolare, sono trattate le problematiche riguardanti la simulazione idraulica delle reti di distribuzione con approccio PDA, l'analisi probabilistica delle fallanze meccaniche e la caratterizzazione della domanda.

1. Introduzione

La complessità dei problemi riguardanti la gestione delle risorse idriche e la necessità di approcci che analizzino in modo integrato tutti gli aspetti coinvolti (ambientali, sociali, economici e tecnici) ha portato negli ultimi anni, anche nel settore acquedottistico, allo sviluppo di nuove procedure per la misura delle prestazioni dei sistemi e dei servizi idrici.

Nel settore acquedottistico, lo sviluppo di queste metodologie sembra muoversi essenzialmente lungo due filoni distinti, anche se caratterizzati da alcune contiguità e intersezioni.

Il primo filone è nato e si è sviluppato in stretta connessione con il processo di industrializzazione dei *servizi idrici* con lo scopo principale di valutarne l'efficacia, l'efficienza e i costi. La valutazione si avvale di indicatori di prestazione sintetici aventi in genere una struttura molto semplice (spesso addirittura banale), i cui valori sono ricavati attraverso elaborazioni, il più delle volte elementari, dei dati raccolti e organizzati in un adeguato *data-base*. Questi indicatori sono per lo più individuati e proposti da Associazioni o Organizzazioni internazionali, ma non mancano contributi significativi da parte del mondo scientifico.

Al secondo filone, invece, possono essere ascritte le diverse metodologie di analisi finalizzate alla valutazione delle prestazioni idrauliche dei *sistemi idrici* (e soprattutto delle reti). Queste metodologie, molto più complesse di quelle sviluppate nell'ambito del primo filone, possono essere viste come la naturale evoluzione dei modelli e dei metodi di calcolo disponibili a partire dagli anni '60-'70 e consolidati nella pratica professionale. L'ambito di sviluppo è quello della ricerca scientifica; queste metodologie costituiscono, attualmente, l'oggetto della maggior parte dei lavori scientifici pubblicati su questioni riguardanti il settore acquedottistico.

Per entrambi i filoni, la letteratura è molto vasta e non è facile orientarsi fra i tanti lavori che, a partire dagli anni '80, sono stati pubblicati e dai quali, ancora oggi, non emerge un chiaro filo conduttore che porti a metodologie pienamente convincenti sotto il profilo concettuale e applicabili sul piano operativo.

In questa relazione, sono evidenziati, senza alcuna pretesa di completezza e di sistematicità, alcuni aspetti che meritano particolare attenzione.

2. Analisi prestazionale dei servizi idrici

Come già detto nell'introduzione, un importante filone di sviluppo dell'analisi prestazionale nel settore acquedottistico riguarda le metodologie (sviluppate in connessione con il processo di industrializzazione del servizio idrico) finalizzate alla misura, in termini di efficacia, di efficienza e di costo, dei livelli dei servizi idrici, quali risultano dalle caratteristi-

che strutturali degli impianti, dal contesto fisico e socio-economico dell'area servita, dalle pratiche operative e dalle modalità organizzative e amministrative che caratterizzano la gestione.

Queste metodologie si avvalgono essenzialmente di indicatori di prestazione sintetici (nella letteratura internazionale *performance indicators*, o più sinteticamente *PI*) che hanno avuto diverse formulazioni da parte di alcune istituzioni di rilevanza internazionale fra le quali la World Bank (Yepes e Dianderas, 1996), l'International Water Association (IWA) (Alegre et al., 2000; Alegre et al., 2006), l'Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts (ENGREF) (Guérin-Schneider, 2001) e l'American Water Works Association (AWWA) (AWWA, 2004). In Italia, un sistema di indicatori essenzialmente finalizzati alla valutazione dell'efficacia, dell'efficienza e dell'economicità con cui il gestore eroga il servizio idrico integrato è stato adottato dal Comitato per la Vigilanza sull'Uso delle Risorse Idriche (2006).

Di particolare rilievo, anche per il riconoscimento e la diffusione avuti a livello internazionale, risulta il sistema di indicatori noto come *IWA-PI* messo a punto nell'ambito dell'IWA (Alegre et al., 2006). Questo sistema è composto da 170 indicatori che trattano molteplici aspetti del servizio riguardanti, fra l'altro, le risorse idriche impiegate, le componenti fisiche del sistema (serbatoi, reti, potabilizzazione, ecc.), la frequenza dei controlli e delle rotture, l'entità delle perdite, il personale impiegato, i costi, i ricavi, i profitti, ecc. Tutto il sistema di valutazione è strutturato su una base di dati costituita da oltre 200 grandezze che attengono ai diversi aspetti del servizio. Tutti i dati richiesti sono in genere acquisibili senza eccessive difficoltà da un gestore che si applichi con una normale diligenza; essi possono derivare da informazioni che il gestore possiede direttamente (per quanto riguarda soprattutto gli aspetti economici e finanziari e quelli relativi al personale impiegato e all'utenza servita), da documentazione di archivio (dati sugli impianti – dati storici) o da misure (soprattutto dei volumi idrici che attraversano determinate sezioni dell'impianto ai fini della redazione dei necessari bilanci idrici). Per nessun dato è strettamente richiesto, almeno nella originaria formulazione IWA, l'utilizzo di modelli di simulazione, anche se in rari casi ne è suggerito l'uso.

La misura della prestazione viene effettuata mettendo in relazione, attraverso strutture matematiche molto elementari (spesso consistenti in una semplice divisione), due o più grandezze contemplate nel *data-base*. Le nuove grandezze così definite sono concepite in modo da quantificare la prestazione del sistema con riferimento ad un particolare aspetto; esse costituiscono quindi degli indicatori di prestazione e contribuiscono a rendere più facilmente visibile l'informazione quantitativa contenuta nel *data-base*.

La misura della prestazione va poi tradotta in un giudizio attraverso il confronto del valore ottenuto con valori di riferimento quali, ad esempio,

valori-obiettivo (in questo modo l'indicatore dà la distanza della prestazione dall'obiettivo desiderato), oppure valori relativi a periodi di valutazione precedenti (l'esame dell'andamento temporale dei valori dei PI dà un'utile informazione sull'efficacia delle azioni messe in atto dal gestore per correggere eventuali disfunzioni), oppure ancora valori ottenuti nell'ambito di altre realtà gestionali (al fine di evidenziare e spiegare eventuali differenze significative). Talvolta, soprattutto quando l'indicatore è costituito da una grandezza dimensionale il cui valore può essere interpretato solo da persone esperte, il giudizio viene attribuito con un voto compreso fra 0 e 1, assegnato attraverso opportune curve di penalità (Coelho, 1997).

La semplicità del sistema di valutazione e della struttura del *data-base* ha indotto alcuni autori a ritenere questo tipo di valutazione troppo generale e incapace di riconoscere tutti gli aspetti specifici del sistema oggetto di valutazione. Questa critica è in parte condivisibile; ad esempio, con riferimento alle disfunzioni che affliggono l'utenza, gli indicatori del tipo *IWA-PI* si limitano a contabilizzare il numero e/o l'entità degli eventi indesiderati che si sono verificati nel periodo di valutazione (della durata minima di un anno), senza fornire alcun supporto per una diagnosi circa le cause che hanno determinato questi eventi e per la definizione dei necessari interventi correttivi.

Tuttavia, va riconosciuta la notevole utilità di questo approccio, sia per una valutazione interna da parte del gestore che attraverso gli indicatori ha modo di tenere sotto controllo i risultati della sua attività, sia per una valutazione esterna da parte di chi ha il compito di vigilare sull'azione del gestore.

La disponibilità di indicatori di facile applicazione atti a misurare le prestazioni del servizio, con riferimento ai diversi aspetti e in modo comprensibile per tutti i soggetti coinvolti, consente di rafforzare e rendere più efficace la rappresentazione del pubblico interesse nel rapporto fra Autorità pubblica e gestore. Infatti, attraverso PI opportunamente scelti, l'Autorità pubblica può esprimere in modo più concreto, eventualmente anche attraverso formulazioni con valenza contrattuale, ciò che si aspetta dal servizio e può seguire l'evoluzione temporale della sua qualità, evidenziando così i miglioramenti ottenuti e/o eventuali derive che richiedono correzioni di indirizzo o di intervento.

L'utilizzo dei medesimi PI in diversi ambiti territoriali rende inoltre possibile la comparazione fra diverse gestioni, introducendo stimoli concorrenziali. Infine, i PI rendono visibili i miglioramenti del servizio difficilmente percepiti dall'utenza (ad esempio quelli relativi al rinnovo delle reti sotterranee con conseguente riduzione delle perdite idriche), permettendo anche di giustificare eventuali aumenti della tariffa.

Non mancano, tuttavia, alcuni aspetti problematici che riguardano essenzialmente l'affidabilità e l'accuratezza dei dati, la cui qualità dipende in grande misura dalla diligenza con la quale viene gestito il *data-base*.

Va ricordato che l'IWA raccomanda che per ogni dato, oltre all'affidabilità della fonte, sia stimato il grado di incertezza e la sua propagazione sull'indicatore.

Un altro aspetto problematico riguarda l'interpretazione dei valori ottenuti, resa difficile dal fatto che i valori di riferimento non sono sempre facilmente definibili, soprattutto in presenza di disomogeneità esterne¹. A ciò si aggiunge anche la difficoltà di aggregare gli indici, che sono molto numerosi, in giudizi globali (Liserra et al., 2007).

Infine, va sottolineata la necessità che i sistemi di valutazione, attualmente incentrati sulla misura dell'efficacia e dell'efficienza dei servizi, prendano in considerazione anche altri aspetti di interesse generale quale, ad esempio, la sostenibilità ambientale del sistema sottoposto a valutazione (Paoletti et al., 2007).

3. Analisi prestazionale dei sistemi acquedottistici

Un secondo filone di sviluppo dell'analisi prestazionale nel settore degli acquedotti comprende le metodologie finalizzate alla valutazione tecnica delle prestazioni dei sistemi acquedottistici.

La principale prestazione che ci si attende da un sistema idrico è che, in tutte le condizioni che verosimilmente si potranno presentare nell'arco della sua vita utile, esso fornisca all'utenza acqua di buona qualità, in quantità sufficiente a soddisfare la richiesta e con una pressione sufficiente a garantire l'erogazione². Più avanti saranno ricordate anche altre prestazioni che devono essere garantite, ma questa è senza dubbio la principale.

Lo scopo dell'analisi prestazionale è quello di valutare se, ed eventualmente in che misura, la prestazione richiesta è soddisfatta. Poiché gli aspetti relativi alla qualità dell'acqua vengono in genere trattati indipendentemente dagli altri, nel seguito si farà riferimento all'analisi dei soli aspetti idraulici, analisi che può essere condotta secondo due diversi approcci.

Il primo, di tipo deterministico, si limita a verificare che la prestazione sia soddisfatta con riferimento ad un numero limitato di condizioni operative di funzionamento (condizioni di progetto). Se, per tutte le condizioni di progetto prefissate, il sistema fornisce le prestazioni desiderate, il risultato dell'analisi è un giudizio di adeguatezza; nel caso di non adeguatezza, l'analisi fornisce anche gli elementi diagnostici per indirizzare opportunamente gli interventi correttivi.

¹ Le disomogeneità esterne sono quelle riferite a fattori non controllabili dal gestore (ad esempio: altimetria dell'area, densità abitativa, caratteristiche dei suoli, ecc.).

² Questa definizione, invero un po' generica, può essere precisata con riferimento, ad esempio, agli standard sui livelli di servizio garantiti dalla Carta dei servizi.

Il secondo approccio, di tipo probabilistico, valuta invece il comportamento del sistema con riferimento ad una molteplicità di condizioni di lavoro che non sono normalmente prese in considerazione a livello progettuale, ma che hanno comunque una qualche probabilità di accadimento. L'elaborazione statistica dei risultati consente una valutazione in termini probabilistici del grado di soddisfazione della prestazione richiesta; il valore o i valori di probabilità così ottenuti forniscono la misura dell'efficacia prestazionale del sistema.

3.1 L'approccio deterministico

Il modo più comune e consolidato di effettuare l'analisi prestazionale di un sistema acquedottistico o di qualche sua componente è basato su un approccio deterministico, consistente nella valutazione della capacità del sistema indagato di soddisfare la domanda dell'utenza sotto ben determinate condizioni.

Così ad esempio, nel caso di una rete di distribuzione idrica, l'analisi prestazionale convenzionale consiste generalmente nella sua verifica idraulica ammettendo la piena disponibilità di tutte le componenti impiantistiche e assumendo la domanda di punta valutata nel giorno di massimo consumo.

Oltre a questa verifica, spesso viene effettuata anche quella in condizioni di utilizzo della rete con funzione antincendio a cui si aggiungono, talvolta, una o più verifiche in condizioni di fuori servizio di un tronco principale³. Se tutte queste verifiche danno esito positivo la rete è considerata adeguata; diversamente, per la rete oggetto di analisi viene emesso un giudizio di inadeguatezza e, sulla base delle carenze che l'analisi è in grado di evidenziare, si individuano gli interventi correttivi.

Questo tipo di approccio, pur molto adottato, presenta alcuni limiti. Innanzitutto, gli scenari assunti a base delle verifiche sono in numero molto limitato e, poiché ad essi non è associabile un valore di probabilità, assumono un significato più che altro convenzionale. Inoltre, l'analisi fornisce un giudizio di adeguatezza o di non adeguatezza, ma non è capace di graduare questo giudizio attraverso una sua misura che consenta di confrontare fra loro soluzioni o impianti diversi.

Questi limiti sono particolarmente enfatizzati nei lavori scientifici degli autori che propongono metodologie basate sull'approccio alternativo (quello probabilistico). Tuttavia, non si può ignorare che l'analisi deterministica è quella tuttora usata nella totalità delle applicazioni concrete e che, se applicata in modo ingegneristicamente corretto con l'uso di adeguati coefficienti di sicurezza, porta a risultati sostanzialmente robusti.

³ In questi casi, la domanda viene assunta sulla base di criteri ormai consolidati nella prassi progettuale (Ippolito, 1960; Iannelli, 1967).

3.1 L'approccio probabilistico

Uno dei primi contributi alla soluzione del problema relativo alla misura della prestazione di un sistema acquedottistico è stato dato, all'inizio degli anni '80, da Hashimoto et al. (1982). Secondo questi autori, l'efficacia del sistema può essere quantitativamente misurata sulla base delle fallanze che esso presenta nel corso della sua vita utile (con il termine di *fallanza* si indica qualsiasi violazione delle prestazioni rispetto a quelle che devono essere garantite all'utenza). In particolare, l'efficacia del sistema è definita e può essere misurata attraverso i seguenti tre concetti:

1. *affidabilità*: misura la probabilità che il sistema si trovi in uno stato di non fallanza;
2. *resilienza*: misura la rapidità con cui il sistema recupera la piena funzionalità partendo da uno stato di fallanza;
3. *vulnerabilità*: misura il probabile danno conseguente alle fallanze.

Si consideri ad esempio, un sistema di distribuzione idrica per il quale $Q_r(t)$ rappresenta la portata richiesta e $Q(t)$ la portata effettivamente erogata, entrambe funzione del tempo.

Si consideri il sistema in stato di fallanza se $Q(t) < Q_r(t)$ e si ammetta che nel corso della sua vita utile (di durata T), il sistema presenti M periodi di fallanza.

La Figura 1 rappresenta il j -esimo stato di fallanza di durata d_j nel corso della quale il sistema è caratterizzato da un deficit volumetrico di fornitura W_j :

$$W_j = \int_{t_i}^{t_i + d_j} [Q_r(t) - Q(t)] dt \quad (1)$$

In questa situazione, i tre indicatori di Hashimoto et al. (1982) sono definiti come segue.

1) *Affidabilità (Rel)*: è la probabilità che lo stato S del sistema corrisponda ad una condizione di non fallanza NF , ovvero:

$$Rel = P [S \in NF] \quad (2)$$

nel caso in esempio, quindi:

$$Rel = 1 - \frac{\sum_{j=1}^M d_j}{T} \quad (3)$$

2) *Resilienza (Res)*: è la probabilità condizionata che al tempo (t) lo stato S del sistema corrisponda ad una condizione di fallanza F e che al tempo ($t+1$), corrisponda invece ad una condizione di non fallanza NF ovvero:

$$Res = P[S(t+1) \in NF; S(t) \in F] \quad (4)$$

Nel caso in esempio, può essere definita come l'inverso della durata media della fallanza (*Kjeldsen & Rosbjerg, 2004*):

$$Res = \left[\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M d_j \right]^{-1} \quad (5)$$

3) *Vulnerabilità (Vul)*: è la somma dei danni h_j associati ad ogni stato di fallanza, ciascuno moltiplicato per la sua probabilità e_j :

$$Vul = \sum_{j=1}^M e_j h_j \quad (6)$$

Nel caso in esempio, assumendo come valore del danno il deficit idrico W_j connesso con ogni stato di fallanza e assumendo, per semplicità, per ogni evento di fallanza la stessa probabilità ($e_1 = e_2 \dots = e_M = 1/M$), si ottiene:

$$Vul = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M W_j \quad (7)$$

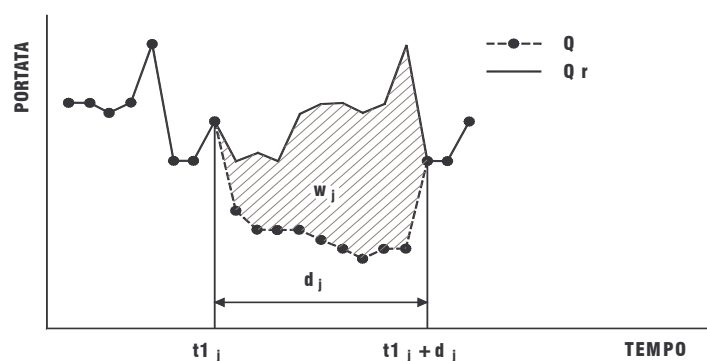


Fig. 1 – Rappresentazione del j -esimo intervallo di fallanza di un sistema distributore (Kjeldsen & Rosbjerg, 2004)

Il sistema oggetto di valutazione è quindi facilmente caratterizzabile con tre indici che ne misurano le prestazioni in termini globali. Nel caso di una rete di distribuzione, se fossero note le funzioni $Q(t)$ e $Q_r(t)$ in corrispondenza di tutti i nodi di erogazione, si potrebbero calcolare gli stessi indici per ogni nodo, ottenendo così una misura delle prestazioni anche a livello locale, utile soprattutto per identificare le zone più a rischio.

In realtà, le cose non sono così semplici perché, pur prescindendo, per ora, dalle difficoltà di stima delle portate $Q(t)$ e $Q_r(t)$, le definizioni dei tre indici date sopra si basano sul presupposto che il sistema possa essere caratterizzato solo da due stati (lo stato F di fallanza e lo stato NF di non fallanza) definiti attraverso un unico valore di soglia. Questi indici, quindi, non sono in grado di tenere conto del funzionamento parziale del sistema, cioè del fatto che il livello di servizio può essere comunque non nullo anche se non pienamente rispondente alla richiesta⁴.

Inoltre, è facile riconoscere che i valori dei tre indici dipendono in modo che varia caso per caso (e quindi in modo imprevedibile) dal valore

⁴ Secondo Tanyomboh et al. (2001), ogni definizione che non sia in grado di quantificare le fallanze parziali non è appropriata per essere usata nell'analisi prestazionale dei sistemi acquedottistici. Risulta quindi necessario affiancare ad una valutazione che faccia riferimento al rispetto assoluto degli standard, anche una valutazione ausiliaria che consideri insoddisfacenti solo le riduzioni significative dei livelli di servizio, ove il termine significativo va riferito sia all'entità, sia all'incidenza spazio temporale dello scostamento (Bertola e Rejtano, 2004). È stato pertanto suggerito che il concetto di affidabilità, intesa come probabilità che il sistema funzioni correttamente (rispettando la sua missione) in un dato periodo di tempo, fosse integrato da una misura dell'estensione spaziale e temporale delle fallanze (Walski, 1987) e della conseguenza della fallanza in termini di entità dei volumi idrici richiesti e non forniti (Xu, 1990).

della soglia; piccole variazioni della soglia, insignificanti sotto il profilo pratico, possono infatti determinare, per i tre indici, variazioni molto sensibili che, per gli ultimi due indici, possono assumere valori sia positivi che negativi, a seconda dei casi. Ciò determina una interpretazione piuttosto problematica della misura, la cui decifrabilità è ulteriormente complicata dall'uso contemporaneo di tre indicatori.

Di fatto, il sistema di valutazione di Hashimoto et al. (1982), per quanto spesso citato e richiamato da molti altri autori⁵, è stato superato da altri criteri di valutazione che hanno cercato di sintetizzare la misura della prestazione attraverso un unico concetto, in genere identificato nell'affidabilità. A questa grandezza, peraltro, sono stati attribuiti significati via via diversi, che hanno superato l'originaria definizione sopra indicata. I concetti di resilienza e di vulnerabilità sono stati praticamente abbandonati, anche se la misura delle conseguenze delle fallanze (vulnerabilità) è stata spesso inglobata nelle definizioni che sono state date al concetto di affidabilità⁶.

Va infine osservato che, l'analisi prestazionale dovrebbe essere applicata all'intero sistema acquedottistico, comprensivo di tutte le sue componenti, dalla captazione alla distribuzione. In realtà, lo studio della misura delle prestazioni si è per lo più incentrato sulle singole componenti e in particolare sulle reti di distribuzione. Non è chiaro se ciò sia avvenuto perché la rete di distribuzione costituisce l'anello debole dell'intero sistema idropotabile, dove si concentrano i problemi funzionali particolarmente percepiti dall'utenza, oppure per il fatto che la rete, con la sua complessità topologica e la grande varietà delle condizioni di lavoro cui è sottoposta, presenta problemi di calcolo molto ardui e quindi molto stimolanti per i ricercatori.

4. Indici per la misura dell'affidabilità basati sui deficit di erogazione

Sul concetto di affidabilità applicata ai sistemi di distribuzione idrica, da tempo sono aperte tre importanti questioni: quale sia la sua definizione; come debba essere misurata; quali siano i valori accettabili. Su queste questioni, in un passato non lontano le posizioni dei vari autori erano molto divergenti, ma negli anni più recenti si può cogliere una significativa convergenza su alcuni criteri che sembrano prevalere su altri.

Così, ad esempio, molti autori si riconoscono nella definizione di affidabilità del sistema come capacità di soddisfare l'utenza in tutte le condizioni operative che possono presentarsi durante la sua vita utile. Sembra,

⁵ Sui concetti formulati da *Hashimoto et al* (1982) sono stati proposti diversi indici da vari autori (fra gli altri, *La Loggia e Mazzola*, 1989).

⁶ E' stato anche osservato che la resilienza non va tenuta esplicitamente in conto, stante la sua forte correlazione con la vulnerabilità (*Kjeldsen & Rosbjerg*, 2004).

inoltre, consolidarsi la misura dell'affidabilità attraverso indici basati sul rapporto fra i volumi effettivamente erogati W_E nel periodo di valutazione e il volumi W_R richiesti dall'utenza⁷ (fra gli altri: Gupta & Bhawe, 1994; Gargano & Pianese, 2000; Tanymboh et al., 2001; Bertola & Nicolini, 2004):

$$R = \frac{W_E}{W_R} \quad (8)$$

Questa definizione, che può essere applicata alla scala globale del sistema o alla scala locale del singolo nodo di erogazione, ha il vantaggio, rispetto ad altri indicatori, di avere un significato fisico semplice ed immediatamente riferibile al livello di prestazione fornito all'utenza. Inoltre, in un'ottica industriale, indici di questo tipo consentono al gestore di valutare i quantitativi di acqua che potrebbero essere fatturati in più se la rete fosse messa in condizione di funzionare al meglio.

Per alcuni autori (Bertola & Nicolini, 2004; Gupta & Bhawe, 1994; Tanymboh et al., 2001) l'indice di affidabilità coincide con il rapporto sopra indicato, calcolato su un arco di tempo lungo. Con questa impostazione il concetto di affidabilità perde il suo rigoroso significato probabilistico per assumere un significato più vicino a quello di indice prestazionale. Altri autori (Gargano & Pianese, 2000) cercano di mantenere all'indice di affidabilità un significato probabilistico definendolo come la probabilità che il deficit di fornitura non superi un prefissato valore di soglia.

Gli indici di affidabilità possono essere diversamente formulati a seconda dell'impostazione che viene data. Nel seguito sono riportate alcune possibili formulazioni che, secondo una prassi piuttosto diffusa, sono espresse in termini di portate⁸.

4.1 Domanda stazionaria e diversi possibili stati di lavoro

Per un'assegnata rete di distribuzione, soggetta a diversi possibili stati di lavoro per quanto riguarda la disponibilità dei suoi componenti (ogni stato di lavoro è definito dall'indice k con $k=1, NS$ essendo NS il numero delle condizioni di lavoro analizzate), si consideri un'unica configurazione di domanda (domanda stazionaria) definita dal valore della portata Q_{r_j} richiesta ad ogni nodo (ogni nodo è identificato con l'indice j con $j=1, NN$ essendo NN il numero dei nodi).

⁷ In una visione più attenta all'uso sostenibile delle risorse idriche, il volume idrico richiesto (domanda), che nell'accezione corrente comprende anche sprechi e usi impropri dell'acqua, può assumere il significato di "dotazione idrica massima sostenibile".

⁸ Gli indici espressi in termini di portate mantengono il significato della (8) basato sui deficit volumetrici, purchè gli intervalli temporali assunti nel calcolo siano costanti.

Si indichi con Q_j la portata effettivamente erogata al nodo j -esimo, valutata in funzione del carico al nodo ($Q_j = Q_{rj}$ se il carico al nodo è maggiore o uguale a quello necessario per soddisfare la domanda; $0 < Q_j < Q_{rj}$ se il carico al nodo è inferiore a quello necessario per soddisfare la domanda).

Con queste assunzioni, possono essere formulati i seguenti indici:

$$R_{j,k} = \frac{Q_{j,k}}{Q_{rj}} \quad \text{indice locale per la condizione di lavoro } k\text{-esima} \quad (9)$$

$$RR_k = \frac{\sum_{j=1}^{NN} R_{j,k} Q_{rj}}{\sum_{j=1}^{NN} Q_{rj}} \quad \text{indice globale per la condizione di lavoro } k \quad (10)$$

$$R_j = \sum_{k=1}^{NS} (R_{j,k} w_k) \quad \text{indice locale per insieme condizioni lavoro} \quad (11)$$

$$RR = \sum_{k=1}^{NS} (RR_k w_k) \quad \text{indice globale per insieme condizioni lavoro} \quad (12)$$

Nelle (11) e (12), w_k è il peso attribuito al valore della condizione di lavoro k -esima; esso può coincidere con i valori di probabilità associati ad ogni condizione di lavoro presa in esame.

4.2 Domanda variabile nel tempo e prefissato stato di lavoro

Se si considera, per un prefissato stato di lavoro del sistema, una domanda variabile nel tempo definita attraverso n configurazioni di portate Q_{rj} richieste ai nodi (ciascuna definita per l' i -esimo intervallo di tempo ($I = 1, n$) di durata Δt (con Δt costante per gli n intervalli considerati), gli indici prestazionali assumono la seguente formulazione:

$$R_{j,i} = \frac{Q_{j,i}}{Q_{rj,i}} \quad \text{indice locale per l'intervallo } i\text{-esimo} \quad (13)$$

$$R_j = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{j,i}}{\sum_{i=1}^n Q_{r_{j,i}}} \quad \text{indice locale per l'intero periodo considerato} \quad (14)$$

$$RR_i = \frac{\sum_{j=1}^{NN} R_{j,i} Q_{r_{j,i}}}{\sum_{j=1}^{NN} Q_{r_{j,i}}} \quad \text{indice globale per l'intervallo } i\text{-esimo} \quad (15)$$

$$RR = \frac{\sum_{j=1}^{NN} \sum_{i=1}^n Q_{j,i}}{\sum_{j=1}^{NN} \sum_{i=1}^n Q_{r_{j,i}}} \quad \text{indice globale per l'intero periodo considerato} \quad (16)$$

4.3 Domanda variabile nel tempo e diversi stati di lavoro

La terza situazione esaminata fonde insieme le due precedenti e si propone di valutare gli indici prestazionali di una rete soggetta a NS diversi possibili stati di lavoro per quanto riguarda la disponibilità dei suoi componenti (ogni stato di lavoro è definito dall'indice k con $k=1, NS$ ed ha una probabilità associata pari a w_k) e caratterizzata da una domanda variabile nel tempo, definita come nel precedente paragrafo 4.2.

Ripetendo il calcolo della (14) e della (16) per ognuna delle NS condizioni meccaniche di lavoro della rete si ottengono i seguenti indici:

$$R_{j,k} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{j,i,k}}{\sum_{i=1}^n Q_{r_{j,i}}} \quad \text{indici locali (in numero pari a } NS) \quad (17)$$

$$RR_k = \frac{\sum_{j=1}^{NN} \sum_{i=1}^n Q_{j,i,k}}{\sum_{j=1}^{NN} \sum_{i=1}^n Q_{r,j,i}} \quad \text{indici globali (in numero pari a NS)} \quad (18)$$

E' quindi possibile calcolare, attribuendo ad ogni condizione di lavoro un peso pari alla sua probabilità associata, i seguenti indici:

$$R_j = \sum_{k=1}^{NS} (R_{j,k} w_k) \quad \text{indici locali per l'insieme delle condizioni di lavoro} \quad (19)$$

$$RR = \sum_{k=1}^{NS} (RR_k w_k) \quad \text{indice globale per l'insieme delle condizioni di lavoro} \quad (20)$$

4.4 Indicatori supplementari

E' facile riconoscere che gli indici sopra indicati non sono in grado di descrivere completamente l'affidabilità del sistema, in quanto, come evidenziato in Tabella 1, deficit idrici caratterizzati da diversi gradi di gravità in relazione alla distribuzione spaziale e temporale delle fallanze possono determinare valori uguali degli indici.

Tabella 1- Incapacità degli indici di misurare la gravità delle situazioni di deficit idrico

| Grado di gravità | Deficit (Qr-Q)/Qr | per % tempo | per % nodi | Indice globale | Indice locale |
|-------------------------|--------------------------|--------------------|-------------------|-----------------------|----------------------------------|
| poco grave | 10% | 100% | 100% | 0,9 | 0,9 |
| grave | 100% | 10% | 100% | 0,9 | 0,9 |
| gravissimo | 100% | 100% | 10% | 0,9 | 0 per 10% nodi 1 per 90% nodi |

E' stato quindi suggerito di introdurre i seguenti indici supplementari

(Gupta & Bhave, 1994):

1) *Fattore temporale*: rappresenta il rapporto fra la durata delle situazioni inaccettabili e la durata totale considerata:

$$F_t = \frac{\sum_{k=1}^{NS} \sum_{j=1}^{NN} \sum_{i=1}^n \beta_{j,i} \Delta t}{NS \cdot NN \cdot T} \quad (21)$$

- $\beta = 1$ se $Q_{j,i}/Qr_{j,i} \geq$ valore accettabile (ad esempio 0,5);
- $\beta = 0$ se $Q_{j,i}/Qr_{j,i} <$ valore accettabile
- $T =$ durata totale del periodo considerato

2) *Fattore nodale*: corrisponde alla media geometrica⁹ degli indici nodali:

$$F_n = \left[\prod_{j=1}^{NN} R_j \right]^{1/NN} \quad (22)$$

L'indice globale di prestazione RR può essere quindi così corretto:

$$RR_c = RR \cdot F_t \cdot F_n \quad (23)$$

L'applicazione dei coefficienti correttivi ai casi indicati in Tabella 1, porta a trovare per i tre diversi gradi di gravità i seguenti indici prestazionali: situazione poco grave: $RR_c = 0,81$; situazione grave: $RR_c = 0,73$; situazione gravissima: $RR_c = 0$.

5. Il calcolo dell'affidabilità

Il calcolo dell'affidabilità *ex ante* secondo l'impostazione sopra indicata richiede di surrogare mediante la modellistica matematica le infor-

⁹ Come è noto, una proprietà della media geometrica è che i valori piccoli (rispetto alla media geometrica) sono molto più importanti dei valori grandi e che è sufficiente la presenza di un unico valore nullo per rendere nulla la media.

mazioni (non disponibili) circa le fallanze che il sistema presenterà nell'arco della sua vita utile e consiste essenzialmente in una elaborazione e valutazione statistica degli indici prestazionali (in genere definiti in funzione dei deficit di fornitura), calcolati attraverso la simulazione idraulica del sistema a partire dai molteplici scenari di funzionamento, ciascuno caratterizzato dal punto di vista probabilistico.

L'elaborazione statistica (che può consistere anche in una semplice media) di questi indici porta al calcolo dell'affidabilità.

Nella definizione degli scenari, vengono introdotti, tenendo conto della loro distribuzione probabilistica, i fattori che possono determinare situazioni di fallanza del sistema e che sono:

- *fattori meccanici* quali guasti, interruzioni dell'alimentazione elettrica o messe fuori servizio di qualche componente del sistema (tubazioni, pompe, valvole, ecc);
- *fattori idraulici* quali variazioni casuali (sia nel tempo che nello spazio) della domanda e/o riduzioni della conduttanza idraulica delle tubazioni per via del loro invecchiamento.

Va sottolineato che proprio perché il calcolo cerca di pesare, ai fini della valutazione finale, i vari indici prestazionali in base alla probabilità dei fattori di fallanza che li hanno determinati, possono essere trattati solo i fattori di fallanza esprimibili in termini probabilistici. Non possono invece entrare nel calcolo le incertezze sulla cui caratterizzazione probabilistica non si è in grado di fare ragionevoli ipotesi.

Le impostazioni proposte in letteratura sono molte e si distinguono per la tipologia delle cause di fallanza prese in considerazione: alcune considerano solo le cause meccaniche, altre solo quelle idrauliche, altre ancora cercano di includere nella valutazione entrambi i tipi di fallanza. Molto diversificate risultano anche le tecniche di calcolo proposte, per lo più basate su simulazioni di lungo periodo (anche 50-100 anni), in genere effettuate con risoluzione oraria, nell'ambito delle quali gli elementi affetti da aleatorietà o da incertezza sono simulati in modo stocastico avvalendosi di tecniche Monte Carlo. Raramente sono dichiarati i numeri delle simulazioni necessarie per la convergenza delle tecniche M.C. e gli esempi applicativi riportati in letteratura sono sempre riferiti a reti costituite da un numero molto piccolo di componenti.

In molti lavori, attraverso opportune semplificazioni, si cerca di impostare il calcolo in modo da ridurre significativamente il numero delle simulazioni del comportamento della rete e non mancano tentativi di ricondurre una parte del problema a forme chiuse da accoppiare, eventualmente, alle simulazioni numeriche (Xu & Goulter, 1998; Salandin & Darvini, 2007).

L'analisi presenta alcuni aspetti cruciali, sui quali nei successivi paragrafi è richiamata l'attenzione.

5.1 La simulazione idraulica del comportamento del sistema

Per il calcolo corretto degli indici di affidabilità secondo l'impostazione sopra indicata, occorre valutare l'effettiva portata erogata nei casi in cui la pressione in uno o più nodi risulti inferiore a quella necessaria per l'erogazione della portata richiesta. Va però ricordato che i modelli di calcolo attualmente utilizzati per la verifica idraulica delle reti fissano per ogni nodo (identificato con l'indice j), la portata erogata Q_j (dato del problema) assumendola pari alla portata richiesta Q_{rj} , con l'ipotesi implicita che il carico piezometrico H_j (incognita del problema) sia sufficiente a soddisfarla. Questi modelli, indicati in letteratura con la sigla DDA (Demand-Driven Analysis), danno risultati corretti solo nel caso in cui la verifica idraulica della rete sia positiva, ovvero nel caso in cui, per ogni nodo, il carico piezometrico H_j risulti maggiore o uguale al valore H_{rj} richiesto per soddisfare la domanda. Se invece il calcolo mette in evidenza l'esistenza di nodi critici per i quali $H_j < H_{rj}$, i risultati forniti dal modello non sono corretti, giacché le portate Q_j assegnate come erogate dai nodi critici non sono compatibili con i valori dei carichi H_j risultanti dal calcolo.

Questo approccio convenzionale è stato fino ad ora ritenuto soddisfacente in quanto lo scopo del calcolo di verifica idraulica è sempre stato quello di validare il dimensionamento della rete e di evidenziare, in caso di verifica negativa, la necessità di una correzione. L'esigenza di calcolare, ai fini della valutazione degli indici di affidabilità, l'erogazione effettiva anche nelle situazioni di pressione insufficiente richiede invece un approccio diverso, indicato in letteratura con la sigla PDA (Pressure-Driven Analysis), atto a identificare la soluzione che soddisfi non solo le consuete equazioni del moto e di continuità, ma anche le equazioni $Q_j=f(H_j)$ che in ogni nodo mettono in relazione la portata erogata e il carico piezometrico (misurato rispetto al piano stradale) effettivamente disponibile.

Ciò pone due problemi piuttosto complessi.

Il primo riguarda la definizione del legame, per ogni nodo della rete, fra la portata erogata Q_j e il carico piezometrico H_j . Questo legame dipende, infatti, da molteplici fattori, fra i quali particolarmente importanti sono la configurazione e le dimensioni della rete secondaria alimentata dal nodo, nonché la distribuzione spaziale (in senso planimetrico ed altimetrico) degli apparecchi erogatori.

La valutazione di questi elementi, che peraltro possono presentare una grande variabilità per i diversi nodi, richiederebbe un'informazione di dettaglio che non è praticamente mai disponibile nell'ambito delle normali attività diagnostiche sulle reti. Ne consegue che il legame $Q_j = f(H_j)$ può essere introdotto nei calcoli di verifica idraulica solo attraverso schemi molto generali, necessariamente grossolani.

In genere, la portata effettivamente erogata viene definita, in funzione

della portata richiesta Q_{rj} , attraverso la relazione (Gupta & Bhawe, 1996):

$$Q_j = \alpha_j Q_{rj} \quad (24)$$

nella quale α_j assume valori compresi fra zero e uno, in relazione al valore della pressione. Lo schema più diffuso fissa per la pressione due valori di soglia:

- H_{minj} = valore della pressione al di sotto del quale l'erogazione è nulla; questo valore può essere assunto pari a zero o pari a 2÷3 m;
- H_{rj} = valore della pressione richiesta per soddisfare la domanda Q_{rj}

e assume le seguenti relazioni:

$$\alpha_j = 1 \quad \text{per } H_j \geq H_{rj} \quad (25)$$

$$\alpha_j = 0 \quad \text{per } H_j \leq H_{minj} \quad (26)$$

$$0 < \alpha_j < 1 \quad \text{per } H_{minj} < H_j < H_{rj} \quad (27)$$

Per la definizione dei valori di α_j secondo la (27), sono state proposte in letteratura diverse espressioni (Wagner et al., 1988; Fujiwara & Ganesharajah, 1993; Fujiwara & Li, 1998; Tucciarelli et al., 1999), che però portano a valutazioni fra loro molto differenti, senza che un qualche criterio razionale possa supportare la scelta. Più recentemente, attraverso la simulazione idraulica delle innumerevoli situazioni (generate in modo casuale) che possono caratterizzare l'area servita dal nodo ed elaborando statisticamente i risultati ottenuti, sono state ricavate funzioni di legame mediamente rappresentative delle situazioni reali (Ciaponi et al., 2011).

Un altro problema che si pone riguarda le soluzioni numeriche connesse con l'approccio PDA.

La strada maestra sembra essere quella di risolvere l'intero sistema formato dalle equazioni di continuità e del moto, integrate dalle equazioni di legame fra la portata erogata e la pressione al nodo, secondo formulazioni recentemente proposte in letteratura (Todini, 2003; Cheung et al., 2005; Giustolisi et al. 2007). Tuttavia, allo stato attuale, i metodi numerici per la soluzione del sistema non sono ancora sufficientemente sperimentati, soprattutto per quanto riguarda gli aspetti relativi alla loro convergenza, che potrebbe essere resa problematica dalla particolare struttura formale delle relazioni di legame $Q_j = f(H_j)$. Stante la disponibilità e diffusione di collaudati ed efficaci pacchetti software basati sull'analisi DDA, diversi autori si sono orientati verso procedure di calcolo che, pur

impostate secondo una logica PDA, possano utilizzare i solutori idraulici convenzionali di tipo DDA già disponibili.

Fra queste procedure, meritano di essere citate quelle che simulano i nodi critici come nodi-serbatoio a carico fissato e a portata incognita (Bhave, 1981; Ozger & Mays, 2003; Todini, 2003) e che non tengono conto delle relazioni di legame $Q=f(H)$. Alcuni calcoli esemplificativi presentati da Ardeni et al. (2007) mostrano però che queste procedure, proprio perché non tengono conto dei vincoli di legame fra la portata erogata e il carico disponibile al nodo, portano a risultati che in alcuni casi sono poco verosimili.

Più affidabili sembrano, invece, altre procedure che, pur avvalendosi di solutori idraulici già consolidati, includono i vincoli di legame $Q_j=f(H_j)$ ai nodi. Fra queste procedure, particolarmente interessante è quella che utilizza in modo opportuno l'opzione offerta dal pacchetto software EPANET-2 (Rossman, 2000) di schematizzare l'erogazione attraverso particolari dispositivi (*emitters*) la cui portata in uscita è legata alla pressione da una legge imposta.

Ardeni et al. (2007) hanno mostrato che la procedura EPANET-emitters, che ha il pregio di essere molto semplice, porta a risultati praticamente sovrapponibili con quelli ottenuti con una procedura iterativa che fornisce, a meno di piccole approssimazioni, la soluzione esatta.

Ardeni et al. (2007) hanno anche evidenziato, nel caso di reti caratterizzate da carenze pressorie in alcuni nodi, i rilevanti errori connessi con una verifica idraulica di tipo convenzionale o con procedure semplificate che cerchino di valutare le portate effettivamente erogate sulla base della piezometria calcolata con una verifica idraulica di tipo DDA. Ciò pone seri dubbi su molti lavori presentati in letteratura che, per il calcolo dell'affidabilità delle reti in base ai deficit pressori e/o dei volumi idrici, fanno riferimento a simulazioni di tipo DDA.

5.2 L'analisi probabilistica delle fallanze meccaniche

Fra i più importanti fattori aleatori che incidono sulle prestazioni del sistema vanno considerate le indisponibilità temporanee di uno o più componenti del sistema determinate da fallanze meccaniche (guasti di apparecchiature elettromeccaniche, messe fuori servizio di tubazioni per riparazioni, ecc.).

Molti autori includono nella valutazione dell'affidabilità solo le fallanze relative alle condotte. Su et al. (1987) hanno inoltre messo in evidenza che l'indisponibilità simultanea di due tubazioni ha una probabilità molto bassa e che, quindi, i risultati in termini di affidabilità variano molto poco considerando l'indisponibilità di un solo componente o l'indisponibilità combinata di più componenti. In molti lavori, quindi, l'evento di fallanza meccanica viene identificato con l'indisponibilità di una sola condotta della rete.

Poichè le condotte sono componenti riparabili, l'analisi probabilistica della fallanza meccanica è svolta da molti autori (Khomsy et al., 1996; Gargano & Pianese, 2000; Tanyomboh et al., 2001) sulla base del concetto di disponibilità (*availability*) che tiene conto sia della probabilità di guasto, sia del tempo necessario per ripararlo. La disponibilità A_i , definita per ogni i -esimo componente come la probabilità che esso sia disponibile al momento del bisogno, è valutabile con la relazione:

$$A_i = \frac{MTTF_i}{MTTF_i + MTTR_i} \quad (28)$$

nella quale $MTTF$ (Mean Time To Failure) è il tempo medio di fallanza e $MTTR$ (*Mean Time To Repair*) è il tempo medio di riparazione¹⁰.

Il complemento all'unità della disponibilità A_i è la indisponibilità (*unavailability*) U_i , ovvero la probabilità che il componente non sia disponibile:

$$U_i = 1 - A_i = \frac{MTTR_i}{MTTR_i + MTTF_i} \quad (29)$$

Una volta stimate le due grandezze A_i e U_i , è immediato il calcolo delle probabilità associate ai diversi stati di lavoro della rete.

La probabilità che nessun tronco della rete sia indisponibile, e che quindi la rete funzioni con tutti i suoi tronchi attivi, è data dalla seguente espressione:

$$p(0) = \prod_{i=1}^{NT} A_i \quad (30)$$

La probabilità che il tronco f , e solo quello, sia indisponibile è:

$$p(f) = p(0) \frac{U_f}{A_f} \quad (31)$$

I valori delle probabilità calcolabili con la (30) e con la (31) possono essere utilizzati come coefficienti di peso w_k per mediare opportunamente nelle relazioni (11), (12), (19) e (20) gli indici prestazionali ricavati per le

¹⁰ I valori di $MTTF$ e di $MTTR$ sono facilmente ricavabili una volta che siano noti il *tasso di fallanza* λ (numero annuo delle rotture per unità di lunghezza della tubazione) e il *tasso di riparazione* μ_i (inverso del tempo medio di riparazione): $MTTF_i = 365/(\lambda_i L_i)$ e $MTTR_i = 1/\mu_i$

diverse condizioni di lavoro del sistema.

Un approccio alternativo, seguito da alcuni autori (Salandin & Bertola, 1996; Bertola & Nicolini, 2004; Salandin & Darvini, 2007) consiste invece nel definire, a partire dalla conoscenza delle funzioni di densità di probabilità (PDF) dei tempi di guasto e di riparazione e con l'ausilio di tecniche Monte Carlo, delle storie campione, ovvero delle possibili successioni dei diversi stati di funzionamento regolare e di fallanza meccanica in cui il sistema transita e di simularne in continuo il comportamento idraulico. Dall'analisi statistica dei risultati ottenuti per un numero adeguato di storie campione viene poi calcolata l'affidabilità nodale e globale.

Entrambi gli approcci richiedono, per la definizione di *MTTF* e di *MTTR* o per la parametrizzazione della distribuzione di probabilità della fallanza¹¹ e dei tempi di riparazione¹², la stima del tasso di fallanza λ e del tasso di riparazione μ .

Il tasso di fallanza λ è di norma assunto costante nel tempo sulla base del noto diagramma “a vasca da bagno” che evidenzia come, dopo un breve periodo iniziale dove il componente può risentire di alcuni difetti di costruzione non emersi durante il collaudo, il tasso di fallanza si riduce stabilizzandosi su valori che rimangono grosso modo costanti per gran parte della sua vita (durante la quale i guasti hanno una natura essenzialmente aleatoria), fino al periodo di vecchiaia durante il quale il tasso cresce rapidamente per guasti prevalentemente dovuti all'usura.

Il tasso di rottura dipende, come è facilmente intuibile, da innumerevoli fattori spesso legati anche a situazioni locali e molto particolari. I valori pubblicati in letteratura spaziano da minimi dell'ordine di 0,05 rotture/(km anno) a massimi dell'ordine di 1 rottura/(km anno)¹³ con una notevole dispersione (particolarmente grande per i diametri più piccoli) dalla quale, tuttavia, emerge in generale un andamento di λ decrescente con il diametro.

Ai fini del calcolo dell'affidabilità, il tasso di rottura λ è spesso stimato attraverso formule di regressione che lo legano al diametro D della condotta. Fra queste, le più utilizzate a livello internazionale sono quella proposta da Su et al. (1987), ricavata dall'analisi dei dati relativi alla città di St. Louis:

$$\lambda = 0,0261 + \frac{16192}{D^{3,26}} + \frac{118}{D^{1,3131}} + \frac{183558}{D^{3,5792}} \quad (32)$$

¹¹ di norma assunta di tipo esponenziale

¹² Di norma assunta esponenziale o uniforme

¹³ Secondo *Pelletier et al.* (2003), si può ritenere che una rete sia in buone condizioni per $\lambda \leq 0,2$, in condizioni accettabili per $0,2 < \lambda < 0,4$ e in condizioni cattive per $\lambda \geq 0,4$.

(λ è espresso in numero di rotture per chilometro e per anno e D è espresso in millimetri) e quella di *Mays* (1989) che dà direttamente la stima di *MTTF*:

$$MTTF = 0,21218 D^{1.462131} \quad (33)$$

(*MTTF* è espresso in anni e D in pollici).

Piuttosto scarse sono le indagini riferite alla situazione italiana. Fra queste, si ricordano l'analisi condotta sugli interventi di riparazione sulla rete idrica di Verona (*Bertola & Pavia, 2002*) regolarizzati con la regressione:

$$\lambda = 2,08546 - 0,854936 \log D \quad (34)$$

e quella sulla rete di Tricarico (*Ermini et al., 1998*) i cui dati, elaborati insieme a quelli di St. Louis hanno portato alla seguente relazione:

$$\lambda = 116 D^{-1,05} \quad (35)$$

In entrambe le espressioni λ è espresso in numero annuo di rotture per chilometro e D in millimetri.

In altri lavori, i dati relativi alle rotture sono serviti per l'analisi e la sperimentazione di metodi probabilistici per la loro modellazione (*Alvisi et al., 2007*).

Oltre all'incertezza legata al fatto che λ dipende da fattori spesso legati a situazioni locali, va sottolineato che, ai fini della valutazione dell'affidabilità della rete nei confronti delle fallanze meccaniche, andrebbero tenuti in conto solo gli interventi di riparazione che comportano la necessità di mettere fuori servizio qualche condotta. L'analisi di circa 2500 dati riferiti a riparazioni eseguite dal 1998 al 2005 su un sistema acquedottistico di circa 700 km dell'appennino pavese ha consentito di riconoscere che la maggior parte degli interventi di riparazione eseguiti (68% sui tubi in acciaio; 66% sui tubi in PE e 39% sui tubi in PVC) non ha richiesto l'isolamento del tronco oggetto di intervento (*Ciaconi et al., 2009*). L'utilizzo ai fini del calcolo dell'affidabilità delle espressioni sopra riportate, ricavate con riferimento a tutte le riparazioni, non è pertanto corretto.

Per quanto riguarda il tempo medio di riparazione *MTTR*, l'esame della (29) e della (31) porta a riconoscere che la probabilità di fallanza di un tronco è direttamente proporzionale alla sua indisponibilità U che, a sua volta, dipende quasi linearmente dal suo tempo medio di riparazione *MTTR*. La stima di *MTTR* assume quindi una notevole importanza nell'ambito della valutazione dell'affidabilità connessa alle fallanze meccaniche, come peraltro già messo in evidenza da *Walters & Knezevic*

(1988). I dati relativi ai tempi di riparazione sono però piuttosto scarsi e il valore di $MTTR$ è in genere stimato assegnando dei valori indicativi. Il valore più frequentemente adottato è pari a 1 giorno (Khomsî et al., 1996; Gargano & Pianese, 2000; Shinstine & Lansley, 2002). Altri autori (fra gli altri: Bertola & Nicolini, 2004) considerano il tasso di riparazione ($\mu = 1/MTTR$) una variabile casuale per la quale viene definita una distribuzione di probabilità uniforme o esponenziale. In realtà, sembrerebbe ragionevole ammettere che il tempo di una riparazione che richieda la messa fuori servizio di una condotta dipenda in buona misura dal suo diametro. Una relazione ottenuta attraverso la regressione di alcuni dati sperimentali è stata proposta da Walski e Pelliccia (1982):

$$MTTR = 6,5 D^{0,285} \quad (36)$$

nella quale $MTTR$ è espresso in ore e il diametro D della condotta in pollici.

5.3 La simulazione della domanda idrica

La caratterizzazione della domanda e l'eventuale valutazione delle incertezze ad essa connesse rappresenta un argomento di notevole importanza per la valutazione dell'affidabilità di un sistema di distribuzione idrica.

Come evidenziato in numerosi studi condotti anche con riferimento a situazioni italiane (Molino et al., 1986; Lamberti et al., 1994), l'andamento nel tempo della domanda idrica è governato da una molteplicità di fattori dinamici i cui effetti possono essere riconosciuti in un *trend* di lungo periodo (dipendente essenzialmente dallo sviluppo socio-economico dell'utenza), in una ciclicità stagionale (legata agli aspetti climatici che condizionano l'uso dell'acqua, ma anche a fattori economici quali il turismo, le produzioni stagionali, ecc.) e in una ciclicità giornaliera (essenzialmente legata ai ritmi e alle abitudini di vita dell'utenza). Accanto a queste componenti strutturali del diagramma dei consumi, si associa una rilevante componente aleatoria che è intrinseca nella natura di un servizio a domanda.

In genere, nelle simulazioni finalizzate al calcolo dell'affidabilità, si tiene conto solo della ciclicità giornaliera definita attraverso un insieme di valori orari medi; talvolta, viene messa in conto anche la componente aleatoria¹⁴ introducendo una forzante stocastica avente un'assegnata di-

¹⁴ Ciò costringe, ovviamente, a generare un numero elevato di scenari di domanda (che, in alcune impostazioni, sono verificati per ogni situazione di fallanza meccanica esaminata) con un notevole aggravio del calcolo.

stribuzione di probabilità, per la cui definizione sono semplicemente assunte delle ipotesi esemplificative non supportate da alcuna indagine sperimentale.

La domanda calcolata per tutto il sistema viene in genere ripartita fra i vari nodi di erogazione in proporzione all'entità della rispettiva utenza servita. La domanda di ogni nodo mantiene quindi nei diversi intervalli temporali di valutazione un'incidenza costante rispetto alla domanda di tutta la rete.

Nei rari casi in cui l'aleatorietà viene considerata nei singoli nodi in forma indipendente dagli altri nodi (per tenere conto della variabilità spaziale della domanda), la necessità di una corretta, e non solo esemplificativa, caratterizzazione statistica si acuisce poiché le aleatorietà locali presentano un'incidenza maggiore rispetto a quelle che caratterizzano la domanda globale. In questo caso, poi, si aggiunge la difficoltà di definire domande locali aleatorie fra loro indipendenti la cui somma deve però risultare coerente con la caratterizzazione statistica della domanda globale.

Molto raramente si considera nel modello di domanda la situazione in cui la rete deve assolvere anche al servizio antincendio e ciò, probabilmente, per la difficoltà di valutare la probabilità di accadimento di questo scenario.

6. La misura di altri aspetti funzionali

La valutazione dell'affidabilità del sistema descritta nei precedenti paragrafi è orientata a misurare l'attitudine del sistema a fornire all'utenza, in tutte le condizioni che verosimilmente si possono presentare nell'arco della sua vita, acqua in quantità sufficiente a soddisfare la richiesta e con una pressione sufficiente a garantire l'erogazione.

Nell'ambito della valutazione di un progetto o di un sistema esistente, sarebbe però utile misurare anche alcune prestazioni che non sono oggetto di una diretta percezione da parte dell'utenza, ma che sono comunque importanti ai fini di un funzionamento efficace ed efficiente del sistema.

Pianese & Villani (1994 a, 1994 b), ad esempio, hanno proposto alcuni indici finalizzati a misurare l'adeguatezza del sistema sotto il profilo idraulico, con particolare riferimento agli aspetti relativi all'eccesso di velocità in condotta (condizione che può indurre vibrazioni dannose per la tenuta dei giunti) e all'eccesso di oscillazione del carico al nodo (condizione che, quando frequentemente ripetuta, crea tormento sui giunti).

Un altro indicatore di prestazione importante, mai citato in letteratura, dovrebbe misurare la probabilità che la pressione scenda sotto valori minimi ritenuti di sicurezza al fine di evitare situazioni di depressione in condotta. L'indicatore dovrebbe eventualmente misurare anche l'estensione temporale e spaziale di questa situazione.

Altri indicatori, utili soprattutto nel confronto fra soluzioni diverse, dovrebbero misurare l'efficienza energetica in termini di potenza dissipa-

ta rispetto alla potenza erogata.

Infine, per i sistemi acquedottistici funzionanti in condizioni di scarsità di risorsa, vanno citati gli indicatori di equo soddisfacimento della domanda idrica e di equo accesso alla risorsa (La Loggia et. al, 2005), mirati alla misura dell'equità con cui una rete di distribuzione alimentata con portate inferiori alla richiesta riesce a distribuire la risorsa.

7. Le prestazioni con riferimento agli aspetti qualitativi

Gli aspetti relativi ai legami fra la qualità dell'acqua distribuita e la funzionalità idraulica della rete sono molto complessi e poco studiati (come spesso avviene per gli argomenti con forti connotati interdisciplinari) anche se ultimamente sono oggetto di attenzione crescente.

In generale, si può dire che le caratteristiche qualitative dell'acqua possono subire nella rete di distribuzione alcune alterazioni per una serie di fenomeni quali: precipitazione e flocculazione di certe sostanze, decadimento degli agenti disinfettanti con conseguente crescita batterica, azione di corrosione delle pareti della condotta, infiltrazione di acque esterne in caso di depressione, tutti fenomeni il cui effetto negativo aumenta con il perdurare della permanenza dell'acqua in rete.

Fra questi fenomeni, di particolare importanza risulta lo sviluppo del biofilm che si forma sulle pareti delle tubazioni e che, per la presenza e persistenza di diverse specie microbiche, costituisce un problema cruciale nel controllo della qualità delle acque potabili. Come è stato messo recentemente in evidenza da ricercatori dell'Istituto Superiore di Sanità italiano (Bonadonna & Della Libera, 2005), l'entità dello sviluppo del biofilm è condizionata, oltre che dalla disponibilità dei nutrienti, dal tempo di permanenza in rete e dalla temperatura dell'acqua.

E' quindi importante che il tempo di permanenza dell'acqua in rete sia il minimo possibile e ciò si traduce, in termini di funzionalità idraulica della rete, nel criterio che le velocità in condotta siano sufficientemente elevate e che sia ridotto al minimo il percorso dell'acqua dai nodi di alimentazione ai nodi di erogazione. Va, peraltro, ricordato che questo ultimo criterio, suggerito in alcuni classici testi italiani (Marchetti, 1949; Ippolito, 1960), ha informato per molti anni la progettazione delle reti di distribuzione idrica, almeno in Italia; attualmente, però, questo criterio non sembra trovare spazio nelle nuove impostazioni progettuali, più attente agli aspetti affidabilistici.

Recentemente è stato evidenziato che nelle reti dimensionate secondo il convenzionale criterio di minimizzazione dei costi di costruzione, la configurazione delle portate circolanti per l'assegnata domanda di progetto rispetta con buona approssimazione il criterio del minimo percorso dell'acqua all'interno della rete (Ciaponi & Papiri, 2007). Ciò sembrerebbe rivalutare, almeno in parte, l'impostazione progettuale basata su

criteri di ottimalità puramente economica, impostazione che, poiché determina un dimensionamento della rete che favorisce la minima permanenza dell'acqua in rete, implica di fatto il rispetto di un criterio di affidabilità per quanto riguarda la qualità dell'acqua.

8. Conclusioni

La valutazione delle prestazioni dei sistemi acquedottistici rappresenta un argomento di grande interesse, sia tecnico che scientifico, con riflessi importanti nella gestione del servizio idrico integrato. La rilevanza delle ricadute sulla qualità della vita dei cittadini e sull'economia del nostro Paese richiede che, nell'esame delle diverse proposte metodologiche, l'attenzione sia focalizzata su tre aspetti importanti: la qualità concettuale della valutazione della prestazione, in termini di correttezza metodologica e di completezza dell'analisi; l'applicabilità del metodo di misura; la capacità di tradurre la misura in un giudizio corretto e oggettivo.

Le considerazioni sviluppate in questa relazione evidenziano come la situazione attuale sia caratterizzata dalla disponibilità di diversi strumenti di valutazione, che tuttavia non sono sempre del tutto soddisfacenti e presentano notevoli spazi di miglioramento.

Le metodologie di analisi prestazionale quali quelle tipo *IWA-PI* sono caratterizzate da una adeguata qualità concettuale e da una buona applicabilità in termini operativi. Sono inoltre molto utili, sia per valutazioni interne all'organizzazione gestionale, sia per valutazioni esterne da parte delle autorità pubbliche di indirizzo e controllo. Attualmente incentrati sulla misura dell'efficacia e dell'efficienza dei servizi idrici, questi sistemi di valutazione si prestano ad essere sviluppati come supporto alle attività di pianificazione, anche introducendo nella valutazione aspetti di interesse generale quali l'efficienza energetica e la sostenibilità ambientale. I loro limiti sono essenzialmente legati alla necessità di un data-base assolutamente affidabile e alla non sempre facile ed oggettiva interpretazione dei risultati.

Per l'analisi prestazionale dei sistemi idrici, le analisi idrauliche di tipo convenzionale basate su un approccio deterministico presentano una buona qualità concettuale e un'ottima applicabilità ai casi reali, ma si caratterizzano per la difficoltà di tradurre i risultati in misure (e quindi in giudizi) circa l'efficacia prestazionale dei sistemi valutati.

L'esigenza di disporre di valutazioni quantitative dell'efficacia prestazionale dei sistemi ha stimolato, da ormai alcuni anni, lo sviluppo di metodologie basate su approcci probabilistici. Allo stato attuale, questi metodi presentano in genere un'eccellente qualità concettuale, ma stentano a connotarsi per un'effettiva applicabilità a casi che non siano puramente esemplificativi. Metodologie proposte in letteratura, concettualmente molto interessanti, ma che applicate a reti di una decina di tronchi richiedono alcuni giorni di calcolo sono certamente utili per un avanzamento

delle conoscenze, ma non danno alcun contributo ad un concreto progresso del settore acquedottistico. E' necessario che l'idea di quantificare in termini probabilistici le prestazioni dei sistemi idrici possa tradursi in metodologie applicabili a casi reali.

La ricerca sul tema dell'analisi prestazionale dei sistemi idrici ha quindi ancora molto spazio da esplorare, tenendo anche presente che una maggiore attenzione alle esigenze concrete del settore acquedottistico dovrebbe anche comportare il superamento della visione "rete-centrica" che fino ad oggi ha caratterizzato la ricerca e portare ad un approccio globale che tocchi anche aspetti fino ad ora ignorati quali, ad esempio, quello molto importante relativo alla qualità dell'acqua.

Bibliografia

1. Alegre H., Hirner W., Baptista J.M. & Parena R., (2000). "Performance Indicators for Water Supply Services". IWA Publishing, London, ISBN 1900222272, pp.160
2. Alegre H, Baptista J.M., Cabrera E., Cubillo F., Duarte P., Hirner W., Merkel W. & Parena R., (2006). "Performance Indicators for Water Supply Services – Second Edition" - IWA Publishing, London, ISBN 1843390515, pp. 289
3. Alvisi S., Grata S. & Franchini M., (2007) – "Analisi e confronto di due modelli probabilistici per la rappresentazione delle rotture in una rete acquedottistica". *Atti del Convegno "Approvvigionamento e Distribuzione Idrica: Esperienza, Ricerca ed Innovazione"*, Ferrara, 28-29 giugno.
4. Ardenti P, Ciaponi C., Franchioli L. & Papiri S., (2007). "Simulazione idraulica delle reti di distribuzione idrica in condizioni di pressione insufficiente in uno o più nodi". *Atti del 2° Convegno Nazionale di Idraulica Urbana*, Chia (Ca), 25-29 sett.
5. AWWA, (2004) – "Selection and Definition of Performance Indicators for Water and Wastewater Utilities" - ISBN 158321304x, pp.125
6. Bertola P. & Nicolini M., (2004). "Valutazione dell'affidabilità complessiva di una rete di distribuzione idrica con simulazioni quasi stazionarie di lungo periodo". *Atti del 29° Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Trento, pp. 141-148
7. Bertola P. & Pavia S., (2002). "Reti di distribuzione dell'acqua potabile e tasso di fallanza delle condotte". *L'Acqua*, Vol. 1-2, pp 124-130
8. Bertola P. & Rejtano B., (2004). "Definizioni e misure dell'affidabilità dei sistemi acquedottistici" – La gestione e l'affidabilità dei sistemi acquedottistici (a cura di P. Bertola e M. Franchini), Ed. Bios, ISBN 88-7740-384-5, pp. 97-108
9. Bhave P.R., (1981). "Node flow analysis of water distribution systems", *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 107, No. TE4, pp. 457-467
10. Bonadonna L. & Della Libera S., (2005). "Problemi di alterazione microbiologica: biofilm e biofouling (fenomeno, cause, effetti)". *Atti del Convegno "Influenza dei sistemi di distribuzione sulla qualità dell'acqua potabile"*, Genova, 18 novembre
11. Cheung P.B., Van Zyl J.E. & Reis L.F.R., (2005). "Extension of EPANET for pressure driven demand modelling in water distribution system". *International Conference on Computing and Control in the Water Industry "Water Management for the 21st century*, Exeter, UK, 5-7 sept.
12. Ciaponi C. & Papiri S., (2007). "Dimensionamento ottimale delle reti di distribuzione idrica: validità ed implicazioni del criterio del minimo percorso dell'acqua". *Atti del Convegno "Approvvigionamento e Distribuzione Idrica: Esperienza, Ricerca ed Innovazione"*, Ferrara, 28-29 giugno.

13. Ciaponi C., Franchioli L. & Papiri S., (2009). "La stima del tasso di fallanza delle condotte per la valutazione dell'affidabilità delle reti di distribuzione idrica". *Atti del 3° Convegno Nazionale di Idraulica Urbana*, Milano, 6-9 ottobre.
14. Ciaponi C., Franchioli L., Murari E. & Papiri S., (2011). "Un modello di legame Q-H per l'analisi PDA delle reti di distribuzione idrica". *Atti del 4° Convegno Nazionale di Idraulica Urbana*, Venezia, 21-24 giugno.
15. Coelho S. T., (1997). "Performance in water distribution: a system approach". Research Studies Press LTD, Taunton, Somerset, England, ISBN 0863802192, pp. 225
16. Comitato per la Vigilanza sull'uso delle Risorse Idriche, (2006). "Indicatori di prestazione dei servizi di acquedotto, fognatura e depurazione". Delibera n° 7 del 27/04/06
17. Ermini R., Viparelli R. & Fiorentino M., (1998). "Una metodologia per la valutazione dell'incidenza della vulnerabilità meccanica sul disservizio nelle reti acquedottistiche". *Atti del XXVI Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Catania.
18. Fujiwara O. & Ganesharajah T., (1993). "Reliability assessment of water supply systems with storage and distribution networks". *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 8, pp. 2917-2924
19. Fujiwara O. & Li J., (1998). "Reliability analysis of water distribution networks in consideration of equity, redistribution and pressure-dependent demand". *Water Resources Research*, Vol. 34, No. 7, pp. 1843-1850
20. Gargano R. & Pianese D., (2000). "Reliability as Tool for Hydraulic Network Planning". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol 126, n° 5, pp. 354-364
21. Giustolisi O., Savic D.A. & Kapelan Z., (2007). "Un modello di simulazione idraulica delle reti di distribuzione per la gestione delle perdite". *Atti del Convegno "Approvvigionamento e Distribuzione Idrica: Esperienza, Ricerca e Innovazione"*, Ferrara, 28-29 giugno
22. Guérin-Schneider L., (2001). "Introduire la mesure de performance dans la régulation des services d'eau et d'assainissement en France – Instrumentation et organisation" - Thèse de gestion, ENGREF, 447 p.
23. Gupta R. & Bhave P. R., (1994). "Reliability Analysis of Water Distribution Systems". *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 120, n° 2, pp. 447-460
24. Gupta R. & Bhave P.R., (1996). "Comparison of methods for predicting deficient-network performance", *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 122, No. 3, pp. 214-217
25. Hashimoto T., Loucks D. P. & Stedinger J., (1982). "Reliability, resilience and vulnerability for water resources system performance evaluation". *Water Resources Research*, 18(1), pp 14-20
26. Iannelli G., (1967). "Elementi e dati per il proporzionamento delle reti di distribuzione". *Ingegneria Sanitaria*, n° 4.
27. Ippolito G., (1960). "Appunti di Costruzioni Idrauliche". Liguori Editore, Napoli.
28. Khomsy D., Walters G.A., Thorley A.R.D. & Ouazar D., (1996). "Reliability Tester for water distribution networks". *Journal Computing in civil engineering*, ASCE, 10 (1), pp. 10-19.
29. Kjeldsen T. R. & Rosbjerg D., (2004). "Choice of reliability, resilience and vulnerability: estimators for risk assessments of water resources systems" - *Hydrological Science Journal* 49(5), 755-767.
30. La Loggia G., Fontanazza C., Freni G., Notaro V. & Oliveri E., (2005). "Programmazione e gestione dei sistemi acquedottistici in condizioni di scarsità di risorsa". Relazione generale presentata al 1° Convegno Nazionale di Idraulica Urbana, Sorrento, 28-30 settembre.
31. La Loggia G. & Mazzola M.R., (1989). "Syntetic performance indices in a real decision process, Closing the gap between theory and practice". *Proceedings of the Baltimore Symposium, IAHS*, Publ. N°180.

32. Lamberti P, Maiolo M., Mazzola M.R. & Veltri P., (1994). “Rapporto sui consumi idropotabili in Italia sul finire degli anni '80” – a cura di P. Bertola e L. Tagliatela, CUEN, Napoli.
33. Liserra T., Bragalli C., Maglionico M., Casadio A., Artina S. & Pilati S., (2007). “Indicatori di prestazione in sistemi acquedottistici aggregati mediante rete bayesiana”. *Atti del 2° Convegno Nazionale di Idraulica Urbana*, Chia (Ca), 25-29 sett.
34. Marchetti M., (1949). “Acquedotti” – Ed. Tamburini, Milano
35. Mays L.W., (1989). “Reliability analysis of water distribution system”. Ed. ASCE, New York, ISBN 0-87262-712-8
36. Molino B., Rasulo G. & Tagliatela L., (1986). “Struttura dei consumi idrici dell'area napoletana”. *Idrotecnica*, n° 6, pp. 371-381.
37. Ozger S.S. & Mays L. W., (2003). “A semi-pressure-driven approach to reliability assessment of water distribution networks”. *Proceedings of the Thirtieth Congress, International Association of Hydraulic Research*, Thessaloniki, Greece, 2003
38. Paoletti A., Becciu G., Sanfilippo U., Carnevali S. & Giamb Bruno S., (2007). “Indicatori di prestazione per il supporto alle decisioni nell'ambito della pianificazione dei sistemi acquedottistici”. *Atti del 2° Convegno Nazionale di Idraulica Urbana*, Chia (Ca), 25-29 sett.
39. Pelletier G., Mailhot A. & Villeneuve J., (2003). “Modeling water pipe breaks – Three case studies”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 129, No. 2, pp. 115-123
40. Pianese D. & Villani P., (1994 a). “Verifica di affidabilità delle reti idriche in pressione. Parte prima: valutazione mediante indici local”. *Atti del XXIV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Napoli, pp. T3b67-T3b80
41. Pianese D. & Villani P., (1994 b). “Verifica di affidabilità delle reti idriche in pressione. Parte seconda: valutazione mediante indici globali. Esempio di applicazione ad un caso di studio”. *Atti del XXIV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Napoli, pp. T3b81-T3b94
42. Rossman L.A., (2000). “EPANET 2 users manual”. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio
43. Salandin P. & Bertola P. (1996). “Analisi dell'affidabilità delle reti di distribuzione soggette a richiesta aleatoria”. *Atti del XXI Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Torino, pp. 217-228
44. Salandin P. & Darvini G., (2007). “Sistemi di distribuzione con rotture delle condotte e richiesta della portata aleatorie: una tecnica di valutazione dell'affidabilità”. *Atti del Convegno “Approvvigionamento e Distribuzione Idrica: Esperienza, Ricerca ed Innovazione”*, Ferrara, 28-29 giugno.
45. Shinstine D. S. & Lansley K.E., (2002). “Reliability/Availability analysis of municipal distribution networks: case studies”. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE 128(2), 140-151
46. Su Y., Mays L.W & Lansey K.E., (1987). “Reliability-based optimisation model for water distribution system”. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol 113, n° 12, pp. 1539-1556
47. Tanymboh T.T., Tabesh M. & Burrow R., (2001). “Appraisal of Source Head Methods for Calculating Reliability of Water Distribution Networks”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 127, n° 4, pp. 206-213
48. Todini E., (2003) . “A more realistic approach to the “Extended Period Simulation” of Water Distribution Networks”. *Proc. Advances in Water Supply Management CCWI Conference*, London.
49. Tucciarelli T., Criminisi A. & Termini D., (1999). “Leak analysis in pipeline system by means of optimal valve regulation”. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No. 3, pp. 277-285

50. Wagner J.M., Shamir U. & Marks D.H., (1988). "Water distribution reliability: simulation methods". *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 114, No. 3, pp. 276-294
51. Walski T. M. & Pelliccia A., (1982). "Economic Analysis for Water Main". *Journal of AWWA*, Vol 79, n° 3, pp. 140-147
52. Walski T.M., (1987). "Discussion of "Multi-objective optimisation of water distribution networks" *Civil Engineering System*, Vol 4, n° 1, pp. 215-217
53. Walters G. A. & Knezevic J., (1988). "The influence of reliability on the layout and design of water distribution networks". *Proceeding of Symposium on Reliability-Based Design in Civil Engineering*, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland, 1, pp. 237-243
54. Xu C. & Goulter I. C., (1998). "Probabilistic Model for Water Distribution Reliability". *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 124, n° 4, pp. 218-228
55. Yepes G. & Dianderas A., (1996). "Water and wastewater utilities indicators" Water Sanitation Division, The World Bank. Washington, Usa (downloadable from the website: <http://www.worldbank.org/html/fpd/water/pdf/indicators.pdf>)