

Modelli di supporto alle decisioni per la valutazione di indicatori di performance dei sistemi di approvvigionamento idrico

R. ERMINI¹, M. MARGIOTTA¹, R. ATAOU¹

(1) Dipartimento di Ingegneria e Fisica dell'Ambiente, Università degli Studi della Basilicata, Italia
Email: ruggero.ermi@unibas.it, mariarosaria.margiotta@unibas.it, ar2177dott@unibas.it

Abstract

The complexity of water systems, the structural changes that characterize them and the need of adapt them to changing water demands requirements, require to evaluate the performance of water systems in different conditions. In this context performance indicators are very useful to quantitatively express the level of service of each element of the system, and therefore to support the programming and management phases in different operating conditions (normal or exceptional scenarios) and over time. The objective of this chapter is to introduce a methodology to express the state of the system through a set of performance indicators considering the conveyance efficiency, the regulation efficiency and the delivery efficiency of each element and of the whole system. All the indicators are referred to single scenarios, but different PI scenarios could be compared in order to assess the system performance evolutions in space (spatial uniformity) and in time (temporal uniformity). Referred to a specific case study (Sinni water system in Basilicata region) particularly representative of the complexity usually denoting water systems, values of the proposed indicators have been obtained and the results have been utilized to define the performance of each component, to identify the critical elements of the system and to evaluate the responses of each element in different conditions.

7.1 Premessa

La complessità dei sistemi idrici, l'evoluzione strutturale che li caratterizza, la necessità di adattarsi ad esigenze mutevoli dettate dalla variabilità delle disponibilità idriche e dalle crescenti esigenze delle utenze, richiedono lo sviluppo di approcci capaci di sintetizzare le prestazioni dei sistemi attraverso il ricorso a procedure di sicura e agile applicazione, che si basino su grandezze misurabili o riproducibili attraverso simulazioni numeriche (Walsky 1993).

In tale contesto, il gruppo di ricerca dell'Università della Basilicata da diversi anni, conduce studi volti a caratterizzare il comportamento delle differenti infrastrutture idrauliche, sintetizzando ed individuando i principali fattori che influenzano il servizio reso all'utenza (Ermini & al 1995) e mettendo a punto metodologie di valutazione del grado di performance locale e complessivo (Ermini & al 2000-04) garantito da singole opere o complesse infrastrutture.

In tali attività, l'Università della Basilicata, insieme al Danish Hydraulic Institute ed al Consorzio Intecno-DHI, ha già sviluppato modelli di valutazione delle criticità in atto o potenziali delle infrastrutture idrauliche di distribuzione, di drenaggio e di collettamento, perseguendo, così, un tempestivo trasferimento tecnologico delle metodologie messe a punto che sono state testate su differenti casi di studio nazionali e internazionali (Ermini & al 2005-07).

I risultati ottenuti nei contesti analizzati hanno costituito un valido punto di partenza sulla base del quale è stato possibile estendere anche ai sistemi idrici metodologie analoghe a quelle utilizzate in ambito urbano, ma introducendo ogni adattamento indispensabile alla rappresentazione delle diverse specificità dei sistemi e dei contesti esaminati (estensione spaziale, assortimento dei fabbisogni, variabilità delle disponibilità).

7.2 Metodologia adottata

7.2.1 Generalità

Le tecniche di analisi e valutazione del grado di risposta garantito da reti di distribuzione si sono sviluppate nel tempo mettendo a punto metodologie differenti: dai metodi analitici, come quelli di enumerazione dei percorsi e dei gruppi critici, (Wagner & al., 1988; Quimpo e Shamsi, 1989; Xu & al 1998; Quimpo 1997; Shinstine e Lansey 2002), di analisi dell'albero dei guasti (Tangena & al., 1984; Billington e Allan, 1987), e di simulazione Monte Carlo (Damelin et al., 1972) fino ai metodi di simulazione diretta (Wagner & al., 1988; Mays e Cullinane, 1986), di analisi di frequenza e di rischio (Su & al. 1987) e di combinazione fra analisi di rischio e simulazione diretta (Walski 1993). Con riferimento a Sistemi idrici, sono altresì diffuse metodologie di valutazione dell'affidabilità in termini complessivi (Hashimoto et al., 1982; Tang, 1985; Bao and Mays, 1990; Goulter, 1992; Mays, 1993; Tanyimboh, 1993; Bos, 1997; Burt

and Styles, 1997; Ermini, 2000), valutando il servizio all'utenza in termini di percentuale di soddisfacimento (Coelho, 1997), analizzando le criticità di funzionamento in termini di resilienza e di vulnerabilità (Fiering, 1982a-1982b; Todini, 2000; Gunderson and Walters, 2002, Ermini et al., 1998), esprimendo l'efficienza e l'efficacia di funzionamento del sistema (Levine, 1982; Bos and Nugteren, 1990; Weller, 1991, Merriam et al., 1983) o estendendo i concetti di uniformità ed equità nelle erogazioni (Clemmens and Bos, 1990, Molden and Gates, 1990).

In tutti i casi è ampiamente riconosciuta l'utilità di sintetizzare il comportamento idraulico, meccanico, gestionale ed economico dei sistemi indagati, in condizioni di esercizio o in predefiniti scenari di rischio conseguenti a fenomeni naturali (guasti, siccità, deficit idrico, contaminazioni accidentali) o a fenomeni indotti (contaminazioni indotte, errate regole gestionali), facendo ricorso ad indicatori sintetici (Performance Indicators) che garantiscono innumerevoli vantaggi:

- in fase di verifica, permettono di valutare sinteticamente lo stato del sistema e dei suoi componenti con riferimento a predefinite configurazioni o ipotesi di funzionamento;
- in fase di gestione, permettono di analizzare differenti condizioni di funzionamento, valutare per ciascuna il tipo di risposta atteso e selezionare quelle che risultano complessivamente migliori;
- in fase di pianificazione o di progettazione, permettono di esaminare differenti configurazioni o ipotesi di intervento e stimare preventivamente il tipo di servizio conseguente alle differenti scelte.

In tutti i casi la definizione dello stato del sistema, condotta secondo una metodologia oggettiva, garantisce un valido supporto nella selezione delle migliori alternative di intervento.

I Performance Indicators (Alegre & al., 1997-2000), introdotti in altri contesti dell'ingegneria e dell'economia, vengono quindi diffusamente adottati anche nell'analisi del comportamento dei sistemi idrici.

7.2.2 *Prestazioni di un sistema idrico*

Stimare le prestazioni di un sistema idrico, con riferimento ad un particolare stato dello stesso, significa operare un confronto tra lo stato del sistema, in una particolare condizione, e una predefinita condizione di riferimento considerata ottimale.

In alternativa al confronto operato tra situazioni di funzionamento direttamente rilevate grazie ad un'attività di monitoraggio, oggi viene diffusamente riconosciuta l'utilità di effettuare il confronto tra scenari numericamente riprodotti attraverso modelli di calcolo che simulano il reale funzionamento dell'infrastruttura indagata. In questo modo è possibile analizzare il comportamento delle infrastrutture al variare degli scenari operativi di funzionamento, quindi esaminando le risposte del sistema per differenti input idrologici (disponibilità), oppure considerando molteplici

ipotesi di allocazione dei fabbisogni, ovvero ipotizzando differenti assetti o stati dell'infrastruttura.

Lo studio illustrato nel presente capitolo descrive un approccio combinato che prevede l'utilizzo delle informazioni rilevate direttamente, insieme alle informazioni dedotte attraverso simulazioni idrauliche. La struttura logica dell'approccio proposto per descrivere le performance del sistema si articola in fasi successive di approfondimento che prevedono: la scelta delle caratteristiche chiave prescelte per descrivere lo stato del sistema idrico, la definizione dei valori obiettivo di ogni parametro, la descrizione della metodologia di valutazione delle prestazioni e la definizione di PI capaci di analizzare la dinamiche di risposta del sistema nelle differenti condizioni.

Nei paragrafi che seguono ciascuna delle singole fasi descritte viene diffusamente approfondita mettendone in luce le specifiche caratteristiche.

7.2.2.1 Caratteristiche chiave del sistema

Lo stato di un sistema idrico di adduzione viene definito specificandone compiutamente le caratteristiche strutturali ed le condizioni di funzionamento idraulico. Le caratteristiche strutturali definiscono la geometria degli elementi del sistema, che sono generalmente invarianti, mentre i parametri di funzionamento idraulico descrivono lo stato di funzionamento dell'infrastruttura.

Con riferimento a quest'ultimo aspetto viene proposto un approccio che analizza separatamente il funzionamento idraulico del sistema idrico, in quanto infrastruttura di trasporto, e il funzionamento idraulico del sistema in termini di erogazioni assicurate alle utenze servite.

Il funzionamento idraulico dell'infrastruttura di trasporto viene compiutamente descritto attraverso:

- le portate (Q_{ij}) che fluiscono nei diversi tronchi, ovvero le capacità di trasporto dei singoli tronchi;
- le energie (H_{ij}) disponibili e quelle utilizzate lungo ciascun tronco per convogliare le diverse portate;
- le energia (ΔH_{ij}) dissipate per effettuare le necessarie regolazioni.

Mentre il servizio assicurato alle utenze viene espresso attraverso le portate (Q_i) erogate da ciascun nodo del sistema.

Nelle differenti condizioni esaminate, i due aspetti citati sono complementari, ben identificabili per ogni elemento del sistema, possono essere valutati con riferimento a differenti condizioni di funzionamento (scenari), a differenti scale spaziali e temporali e in diversi periodi di funzionamento (irriguo, non irriguo, crisi idrica) e quindi traducono perfettamente lo stato idraulico di ogni componente e dell'intero sistema idrico.

7.2.2.2 Obiettivi di funzionamento

Poiché, solo con riferimento ad un predefinito obiettivo è possibile esprimere il grado di soddisfacimento di un determinato indicatore e quindi

valutare le performance del sistema., per ciascuna caratteristica chiave deputata a tradurre lo stato del sistema sono state definite le corrispondenti condizioni ottimali, da utilizzare quali riferimenti nelle valutazioni degli stati del sistema.

In particolare, con riferimento alle caratteristiche chiave introdotte al paragrafo precedente, e considerando gli obiettivi di funzionamento che un sistema idrico deve soddisfare nel corso della propria esistenza, sono state introdotte quali condizioni ottimali:

- Le condizioni di Progetto, che definiscono lo stato di funzionamento ideale coerente con predefinite ipotesi di base e rispetto alle quali sono state dimensionate le infrastrutture;
- Le condizioni di Piano, definite ai diversi orizzonti temporali attraverso specifiche attività di pianificazione e programmazione svolte dai soggetti gestori;
- Le condizioni Critiche, che caratterizzano specifici scenari conseguenti a fenomeni particolari (crisi, etc.) allo scopo di verificare la capacità di risposta del sistema.

Per ciascuna delle condizioni citate, al variare delle situazioni esaminate, il confronto tra i parametri valutati e le specifiche condizioni obiettivo ha permesso di valutare le risposte del sistema, espresse in termini di grado di soddisfacimento, efficienza, efficacia ed altri indicatori sintetici.

7.2.2.3 Valutazione degli Indicatori di Performance PI

La metodologia definita per la valutazione dello stato di un sistema idrico permette di evidenziare separatamente le carenze dell'infrastruttura di trasporto e le carenze nel servizio reso agli utilizzatori, entrambe conseguenti alle caratteristiche strutturali dei differenti componenti e alle modalità di gestione che vengono attuate.

Attraverso i parametri chiave precedentemente introdotti, è possibile rappresentare lo stato del sistema ricorrendo ad indicatori numerici (adimensionali), ricavati valutando lo scostamento di ciascun parametro chiave dallo specifico valore obiettivo predefinito per esso.

Coerentemente con la schematizzazione proposta vengono introdotte due differenti tipologie di indicatori di performance: una che focalizza l'attenzione sul funzionamento idraulico dell'adduttore e l'altra che considera principalmente il servizio all'utenza.

Con riferimento al funzionamento idraulico dell'adduttore (Figura 7.1) vengono definite:

- **la capacità di trasporto**, che viene valutata come rapporto tra le capacità di trasporto, misurate o simulate, degli elementi del sistema e le analoghe capacità valutate in specifici scenari di riferimento (progetto, funzionamento irriguo, funzionamento potabile);
- **l'efficienza di trasporto**, che viene espressa, per ogni tronco omogeneo, attraverso il rapporto tra l'energia utilizzata per addurre le portate richieste e l'energia disponibile nel sistema;

- **L'efficienza di regolazione**, che viene espressa attraverso il rapporto tra l'energia spesa per regolare la portata addotta nel singolo elemento e l'energia disponibile.

Capacità di trasporto		
Performance Indicator	Espressione	Note
Efficienza di trasporto	$PI_T = \eta_{\text{prova}} / \eta_{\text{eff}} = Q_{\text{eff}} / Q_{\text{prova}}$	Confronto tra i valori di scabrezza assunti in fase di progetto dell'opera (η_{prova}) e quello ricavato in esercizio (η_{eff}).
Efficienza di trasporto		
Performance Indicator	Espressione	Note
Efficienza energetica	$PI_{ET} = H_{\text{utilizzata}} / H_{\text{disponibile}}$	Efficienza di trasporto, confronto tra le energie utilizzate e disponibile
	$PI_{ER} = H_{\text{regolazione}} / H_{\text{disponibile}}$	Efficienza di regolazione, confronto tra l'energia spesa per regolare la portata e quella disponibile
	$PI_{PT} = P_{\text{utilizzata}} / P_{\text{utilizzabile}}$	Efficienza di trasporto, confronto tra la potenza utilizzata e quella invece utilizzabile
	$PI_{PR} = P_{\text{regolazione}} / P_{\text{utilizzabile}}$	Efficienza di regolazione, confronto tra la potenza spesa per regolare il flusso e quella disponibile

Fig. 7.1 Capacità di trasporto degli elementi del sistema

Le grandezze introdotte e descritte (Figura 7.1) permettono di analizzare il comportamento di ogni singola opera dell'intero sistema idrico e definiscono indicatori locali attraverso i quali è possibile evidenziare ogni criticità associabili alle grandezze esaminate e, quindi, risultano essere dei PI del sistema di trasporto.

Erogazioni		
Performance Indicator	Espressione	Note
Efficacia	$PI_{Q,EA} = Q_E / Q_R$	Se $Q_E > Q_R$ Efficace
Stress	$PI_{Q,ES} = Q_E / Q_{EP}$	se $Q_E > Q_{EP}$
Efficienza	$PI_{Q,EE} = Q_R / Q_E$	con $Q_E > Q_R$
Grado di utilizzo	$PI_{Q,GU} = Q_E / Q_{EP}$	se $Q_E < Q_{EP}$
Elasticità residua	$PI_{Q,ER} = 1 - PI_{Q,GU}$	$Q_E < Q_{EP}$
Con: Q_E la portata erogata $Q_{E,max}$ la massima portata erogata Q_{EP} la portata erogata di progetto (fabbisogni) Q_R la portata erogata richiesta (fabb.attuale)		

Fig. 7.2 Servizio reso alle utenze

Con riferimento al servizio reso alle utenze (Figura 7.2), considerando i differenti scenari operativi nell'ambito dei quali vengono effettuate le diverse valutazioni e facendo riferimento alle Erogazioni Richieste, ai Fabbisogni e alle Erogazioni effettive misurate sono state definite:

- **l'efficacia di erogazione**, valutata in ogni nodo di erogazione attraverso il rapporto tra la portata erogata e il fabbisogno;
- **l'efficienza di erogazione**, espressa in ogni nodo di erogazione come rapporto tra le portate richieste dell'utilizzatore e quelle effettivamente erogate;
- **il grado di stress, il grado di utilizzo** e l'elasticità residua delle derivazioni, valutate confrontando le portate erogate e quelle erogabili e quelle previste da progetto così come proposto nella figura sotto riportata.

Al variare dei parametri idraulici considerati nelle valutazioni (Richieste, Fabbisogni, Erogazioni misurate) e modificando i valori obiettivo prefissati è possibile analizzare diversi scenari operativi (progetto, esercizio irriguo e non, esercizio massimo e minimo) e valutare le caratteristiche di risposta del sistema a differenti sollecitazioni, ottenendo così un'ampia casistica delle modalità di funzionamento delle singole opere e dell'intero sistema idrico.

Gli indicatori introdotti sono tutti espressi attraverso rapporti tra parametri omogenei e risultano quindi adimensionali; ciò garantisce la possibilità di operare confronti tra scenari differenti senza introdurre distorsioni di scala e quindi assicurando una diffusa validità dell'approccio proposto che risulta anche di agevole applicazione pratica.

7.2.2.4 Aggregazione dei PI e analisi delle criticità

Lo stato del sistema valutato localmente attraverso gli indicatori introdotti permette di individuare le principali criticità dei singoli elementi che compongono il sistema, sulla base delle quali è possibile localizzare le vulnerabilità riferite al singolo scenario di riferimento considerato nella specifica analisi.

Una struttura particolarmente complessa come un sistema idrico che viene assoggettato a scenari dinamicamente molto complessi, deve poter rispondere adeguatamente non solo a singole sollecitazioni, ma anche a condizioni di funzionamento variamente alternate.

Diventa quindi essenziale poter sintetizzare il comportamento del sistema al variare del tempo, delle regole di gestione adottate e del gruppo di componenti analizzati. Infatti è dalla risposta del sistema nel suo complesso che deriva la capacità di quest'ultimo di far fronte alle differenti situazioni in cui esso si troverà ad operare.

In analogia con studi condotti da altri autori (Clemmens and Bos, 1990, Molden and Gates, 1990), vengono quindi introdotti i concetti:

- di **Equilibrio o Uniformità spaziale**, la capacità del sistema di garantire livelli di servizio simili per tutti gli elementi, in uno specifico scenario;

- di Stabilità o Costanza temporale, la capacità del sistema di garantire livelli di servizio simili nel tempo, in un singolo componente.

Con riferimento ai differenti parametri ricavati, sono state introdotte due metodologie di aggregazione degli indici che rispondono alla duplice esigenza di confrontare tra loro i PI ricavati per i diversi elementi, per poter rilevare i diversi gradi di criticità riscontrati, e di confrontare tra loro i PI ricavati per il singolo elemento al variare del tempo, per valutare la frequenza con cui si presentano eventuali criticità.

L'Equilibrio o Uniformità spaziale è espressa, per un singolo scenario, attraverso il grado di variazione (CV) dei PI valutati in gruppi di nodi o sull'intero sistema:

$$CV_S (PI_{xx}) = \sigma_S (PI_{xx}) / \mu_S (PI_{xx}) \quad (7.1)$$

La Stabilità o Costanza temporale, è espressa dal valore del coefficiente di variazione (CV) dei PI ricavati in uno specifico elemento, al variare del tempo ovvero degli scenari considerati:

$$CV_t (PI_{xx}) = \sigma_t (PI_{xx}) / \mu_t (PI_{xx}) \quad (7.2)$$

Coefficienti di variazioni prossimi allo zero indicano omogeneità tra i dati esaminati e quindi segnalano che il sistema presenta comportamenti più equilibrato nello spazio e più uniformi nel tempo. Con riferimento agli indicatori ricavati con le (8.1) e (8.2) un ulteriore elemento di sintesi può essere espresso attraverso la media temporale o spaziale dei CV valutati, ma tale ulteriore indicatore risulta essere poco rappresentativo del comportamento del sistema in quanto eccessivamente sintetico.

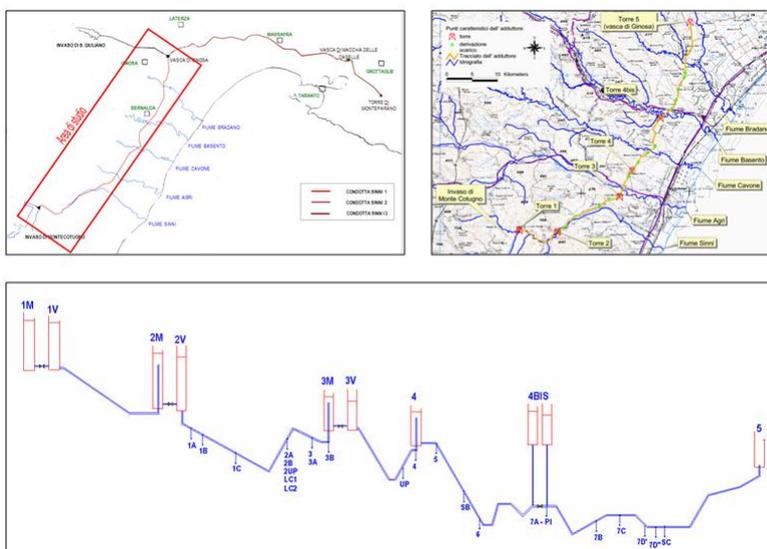


Fig. 7.3 Caso di studio: Schema Senni

7.3 Caso di studio

Per evidenziare come gli indicatori proposti riescano ad esprimere le condizioni di funzionamento di ogni elemento del sistema e permettano di localizzarne eventuali criticità, la metodologia proposta è stata applicata ad uno specifico caso di studio (acquedotto del Sinni in Basilicata), particolarmente rappresentativo delle complessità che caratterizzano un sistema idrico.

Lo schema prescelto (Sinni-1) è costituito da un adduttore di particolare importanza presente nella regione Basilicata, che si sviluppa dalla diga di Monte Cotugno (Senise), fino alla vasca di carico di Ginosa. L'opera, che ha una lunghezza complessiva di circa 65 km ed è realizzata con condotte DN3000, parte in acciaio e parte in CAP, svolge funzione sia di trasporto di estremità (utenze Puglia e Basilicata), che di alimentazione delle utenze irrigue del Metapontino (Consorzio di Bradano e Metaponto) e delle utenze industriali e potabili dell'arco ionico della Basilicata e di parte della Puglia.

Lo schema è costituito da 5 tronchi consecutivi delimitati da singole o coppie di torri piezometriche di regolazione, viene gestito e monitorato attraverso una struttura di telecontrollo centralizzata ed è stato progettato per convogliare una portata massima (teorica) di circa 20 mc/s, da erogare alle 21 derivazioni intermedie e, attraverso la torre finale, alle ulteriori utenze di valle. L'infrastruttura alimenta utenze potabili, industriali ed irrigue, ed è quindi assoggettata a regimi sensibilmente variabili nel corso dell'anno.

7.3.1 Efficienza di Trasporto

Le performance del sistema correlate alla capacità di trasporto sono state valutate considerando separatamente l'intrinseca capacità di trasporto dell'adduttore e l'efficienza idraulica legata alle modalità di funzionamento delle singole opere che compongono l'intera infrastruttura.

Il primo elemento (PI_T) viene espresso attraverso il confronto tra il valore teorico della scabrezza equivalente adottato in sede di progettazione delle opere e quello reale, deducibile sperimentalmente dalle osservazioni disponibili.

Con riferimento allo specifico caso di studio analizzato, il valore della scabrezza equivalente reale n_{eff} è stato valutato schematizzando il modello idraulico dello schema e ricavando, per differenti simulazioni, i valori di scabrezza compatibili con i valori di portata e carico rilevati grazie alle attività di monitoraggio condotte. Confrontando i valori di 'n' assunto in fase di progetto dell'opera ($n_{prog}=0.0127$) e il valore medio ricavato come descritto ($n_{eff} = 0.015$) si determina l'Indicatore di Efficienza di Trasporto:

$$PI_T = n_{prog} / n_{eff} = Q_{eff} / Q_{prog} \quad (7.3)$$

definito come rapporto tra le due scabrezze equivalenti reale e teorica, che indica come la capacità di trasporto dell'adduttore sia inferiore di circa il 15% rispetto a quella ipotizzata in fase di progetto.

Considerando, invece, la geometria del sistema: ovvero le quote piezometriche dei nodi principali, unitamente alle caratteristiche delle tubazioni e alle portate addotte, sono stati definiti Indicatori di Performance che confrontano l'energia disponibile lungo ciascun tronco omogeneo con l'energia utilizzata per convogliare una certa portata Q (Figura 7.4) e con l'energia dissipata per effettuare le eventuali regolazioni (Figura 7.5). Ciò permette di esprimere sinteticamente l'efficacia di trasporto (PI_{ET}) e la criticità di regolazione (PI_{ER}).

Tronchi	Torri	Hu/Hd												Invernale analisi in T Media	Irriguo analisi in T media	Hu energia utilizzata per le derivazio Hd energia disponibile per il tratto Hr energia residua	
		Inverno						Irriguo									
	T 1 m - T 1 v	0.03	0.03	0.03	0.05	0.05	0.05	0.06	0.09	0.14	0.18	0.18	0.07	0.04	0.11		
T 1 v - T 2 m	T 2 m - T 2 v	0.58	0.59	0.53	0.52	0.50	0.52	0.29	0.48	0.43	0.24	0.26	0.49	0.54	0.39		
T 2 v - T 3 m	T 3 m - T 3 v	0.04	0.04	0.08	0.08	0.08	0.09	0.28	0.09	0.09	0.21	0.20	0.08	0.06	0.15		
T 3 v - T 4	T 4 m - T 4 b m	0.67	0.75	0.64	0.52	0.53	0.53	0.44	0.47	0.32	0.19	0.20	0.54	0.62	0.38		
T 4 b m - T 4 b v	T 4 b m - T 4 b v	0.07	0.07	0.07	0.10	0.10	0.10	0.33	0.13	0.19	0.26	0.24	0.12	0.08	0.19		
T 4 b v - T 5		0.23	0.23	0.20	0.28	0.28	0.28	0.29	0.35	0.52	0.60	0.65	0.35	0.25	0.43		
	media	0.35	0.22	0.35	0.38	0.37	0.35	0.24	0.34	0.30	0.33	0.32	0.28	0.33	0.31		
intero schema	media	0.28	0.28	0.27	0.27	0.27	0.27	0.28	0.28	0.28	0.29	0.29	0.28				
solo torri	media	0.62	0.67	0.58	0.52	0.51	0.52	0.36	0.47	0.38	0.22	0.23	0.52				
solo tronchi	media	0.14	0.12	0.15	0.18	0.18	0.17	0.24	0.20	0.25	0.32	0.32	0.18				
	media				0.15					0.24							

Fig. 7.4 Efficienza di Trasporto (PI_{ET})

Tronchi	Torri	Hr/Hd												Invernale analisi in T Media	Irriguo analisi in T media	Hu energia utilizzata per le derivazio Hd energia disponibile per il tratto Hr energia residua	
		Inverno						Irriguo									
	T 1 m - T 1 v	0.97	0.97	0.97	0.95	0.95	0.95	0.94	0.91	0.87	0.82	0.82	0.93	0.96	0.89		
T 1 v - T 2 m	T 2 m - T 2 v	0.42	0.41	0.47	0.48	0.50	0.48	0.71	0.52	0.57	0.76	0.74	0.51	0.46	0.61		
T 2 v - T 3 m	T 3 m - T 3 v	0.96	0.96	0.92	0.92	0.92	0.91	0.72	0.91	0.91	0.79	0.80	0.92	0.94	0.85		
T 3 v - T 4	T 4 m - T 4 b m	0.33	0.25	0.36	0.48	0.47	0.47	0.56	0.53	0.68	0.81	0.80	0.46	0.38	0.62		
T 4 b m - T 4 b v	T 4 b m - T 4 b v	0.93	0.93	0.93	0.90	0.90	0.90	0.67	0.87	0.81	0.74	0.76	0.88	0.92	0.81		
T 4 b v - T 5		0.77	0.77	0.80	0.72	0.72	0.72	0.71	0.65	0.48	0.40	0.35	0.65	0.75	0.57		
	media	0.65	0.78	0.65	0.62	0.63	0.65	0.76	0.66	0.70	0.67	0.68	0.72	0.67	0.69		
intero schema	media	0.72	0.72	0.73	0.73	0.73	0.73	0.72	0.72	0.72	0.71	0.71	0.72				
solo torri	media	0.38	0.33	0.42	0.48	0.49	0.48	0.64	0.53	0.62	0.78	0.77	0.48				
solo tronchi	media	0.86	0.88	0.85	0.82	0.82	0.83	0.76	0.80	0.75	0.68	0.68	0.82				
	media				0.85					0.76							

Fig. 7.5 Efficienza di Trasporto residua (PI_{ER})

Valutazioni sono state effettuate anche con riferimento a confronti effettuati tra le potenze utilizzate, disponibili e spese per regolazioni, con evidenti analogie di significato.

Tronchi nei quali sono più bassi i valori di PI_{ET} indicano maggiore ridondanza della capacità di trasporto del tronco e, contestualmente, presenza di dispositivi di regolazione di maggiore importanza; ovvero elementi critici perché lontani da configurazioni di equilibrio stabile.

Viceversa, strutture di regolazione con elevati PI_{ET} indicano elementi con condizioni di funzionamento prossime al limite fisico di funzionamento e, quindi, dotate di scarsa ridondanza residua.

L'efficienza di trasporto (PI_{ET}), che presenta valori elevati allorché il funzionamento dell'elemento considerato è prossimo alla capacità di trasporto massima dello stesso, permette di riconoscere come lo schema considerato sia caratterizzato da una modesta efficienza di trasporto (0.12-0.32), necessari di evidenti manovre di regolazione (0.22-0.67), principalmente concentrate nelle torri T2 e T3 ed abbia comportamenti generalmente contrapposti tra i periodi irrigui e quelli invernali. Si conferma l'efficienza di trasporto massima valutata attraverso i confronti fra le scabrezze equivalenti ($n^2=0.72$ prossimo a $(H_u/H_d)_{max}=0.75$).

La presenza di PI elevati ($PI>1$) nell'ultimo tronco, nel periodo irriguo, permette di riconoscere come in tale periodo venga privilegiato il servizio di estremità, indispensabile a soddisfare le utenze di valle (priorità potabile).

7.3.2 *Efficienza di Erogazione*

Con riferimento alle Erogazioni alle utenze, che definiscono lo scenario operativo nell'ambito del quale vengono effettuate le diverse valutazioni e facendo riferimento alle Richieste, ai Fabbisogni e ai Limiti di funzionamento si sono analizzate le Erogazioni teoriche (previste da progetto), quelle effettive misurate, oltre che quelle massime e quelle minime.

In generale si è fatto riferimento, per ogni singolo scenario ed analizzando le erogazioni relative a ciascun nodo di erogazione:

- alle Portate Richieste di Progetto Q_{RP}
- alle Portate Erogate Q_E
- alle Portate Erogabili Q_e

e sono stati valutati PI che esprimono quantitativamente i valori così come descritto in Figura 7.2, ovvero capaci di esprimere: l'efficacia, l'efficienza, il grado di utilizzo, l'elasticità residua e il grado di stress di ogni singola derivazione.

Sulla base degli indicatori introdotti sono evidenziate con colorazioni differenti, per ogni scenario, le condizioni di funzionamento di ogni derivazione e sono facilmente individuabili i nodi più critici, ovvero con funzionamento più prossimo a condizioni al limite.

Con riferimento ad uno specifico scenario (singola colonna), è evidente come i PI definiti (Figura 7.6) permettano di riconoscere condizioni di

7.3.3 Uniformità Spaziale e Temporale

Con riferimento al caso di studio esaminato risulta particolarmente utile esprimere l'Uniformità Spaziale con cui si presentano i PI valutati localmente, ricavando il valore del coefficiente di variazione $Cv(PI_{ET})_s$.

Più il Cv tende a zero più risultano omogenei i funzionamenti dei diversi elementi e, quindi, più equilibrato è il funzionamento del sistema e maggiore significato ha il suo valore medio che può essere ricavato considerando differenti (T) scenari e ricavando la media temporale $1/T \sum CV(PI_{ET})_s$.

Analogamente è possibile valutare l'uniformità temporale con la quale si presentano i PI di uno stesso elemento nei differenti scenari, ricavando il Cv della serie temporale $CV(PI_{ET})_t$. L'analisi delle uniformità spaziali e temporali ricavata con riferimento agli indicatori relativi agli elementi di trasporto (Figura 7.8 e 7.9) esprime disomogeneità strutturali delle opere o regimi di funzionamento molto variabili nel tempo.

Mentre l'uniformità spaziale e quella temporale ricavate con riferimento ai PI connessi al servizio all'utenza permettono, rispettivamente di verificare l'omogeneità con cui viene distribuita la risorsa e la variabilità del regime di funzionamento a cui sono assoggettati i diversi elementi.

Nel caso esaminato l'efficienza di trasporto dei diversi tronchi di adduttore (uniformità spaziale) è poco omogenea in inverno (0.81-0.97), rispetto al periodo irriguo (0.44-0.77), indicando sensibili differenze di funzionamento dei diversi tronchi, meno accentuate nel periodo irriguo nel quale aumenta l'efficienza di trasporto.

Viceversa l'uniformità temporale delle Efficienze di Trasporto denota una variabilità dei regimi di funzionamento più sensibile nel periodo irriguo (0.44-0.53), che nel periodo invernale (0.20-0.32). Ancora una volta gli elementi di regolazione (Torri) denotano comportamenti diametralmente opposti a quelli manifestati dagli elementi di trasporto (Tronchi).

		Hu/Hd																				
		Inverno				Irriguo								Invernale				Irriguo				
														analisi in T				analisi in T				
														Media	SQM	CV tronchi	CV torri	media	sqm	CV tronchi	CV torri	
	T 1 m - T 1 v																					
T 1 v - T 2 m	T 2 m - T 2 v	0.03	0.03	0.03	0.05	0.05	0.05	0.06	0.09	0.14	0.18	0.18	0.07	0.04	0.01	0.26		0.11	0.06	0.51		
T 2 v - T 3 m	T 3 m - T 3 v	0.58	0.59	0.53	0.52	0.50	0.52	0.29	0.48	0.43	0.24	0.26	0.49	0.54	0.04		0.07	0.39	0.12	0.53	0.31	
T 3 v - T 4	T 4 - T 4b m	0.67	0.75	0.64	0.52	0.53	0.53	0.44	0.47	0.32	0.19	0.20	0.54	0.62	0.10		0.16	0.38	0.15	0.44	0.39	
T 4 b m - T 4b v	T 4b v - T 5	0.07	0.07	0.07	0.10	0.10	0.10	0.33	0.13	0.19	0.26	0.24	0.12	0.08	0.02	0.20		0.19	0.09	0.44		
		0.23	0.23	0.20	0.28	0.28	0.28	0.29	0.35	0.52	0.60	0.65	0.35	0.25	0.04		0.15	0.43	0.15		0.35	
		0.35	0.22	0.35	0.38	0.37	0.35	0.24	0.34	0.30	0.33	0.32	0.28	0.33	0.06		0.19	0.31	0.04		0.13	
															medie	0.26	0.14		medie	0.49	0.29	
intero schema		media	0.28	0.28	0.27	0.27	0.27	0.28	0.28	0.28	0.29	0.29	0.28									
		sqm	0.26	0.28	0.24	0.20	0.20	0.20	0.11	0.17	0.16	0.15	0.16									
		Cv	0.93	1.02	0.89	0.74	0.74	0.74	0.41	0.63	0.55	0.51	0.56	0.70								
		media			0.86					0.59												
solo torri		media	0.62	0.67	0.58	0.52	0.51	0.52	0.36	0.47	0.38	0.22	0.23	0.52								
		sqm	0.06	0.11	0.08	0.00	0.02	0.01	0.11	0.00	0.08	0.04	0.04	0.04								
		Cv	0.10	0.16	0.13	0.00	0.03	0.02	0.29	0.01	0.21	0.18	0.18	0.07								
		media			0.09					0.14												
solo tronchi		media	0.14	0.12	0.15	0.18	0.18	0.17	0.24	0.20	0.25	0.32	0.32	0.18								
		sqm	0.14	0.10	0.13	0.14	0.14	0.13	0.11	0.13	0.17	0.17	0.19	0.12								
		Cv	0.97	0.81	0.90	0.81	0.79	0.77	0.44	0.67	0.70	0.53	0.61	0.69								
		media			0.86					0.63												

Fig. 7.8 Variabilità dell'Efficienza di Trasporto

		Hr/Hd																							
		Inverno							Irriguo							Invernale				Irriguo					
																		analisi in T		analisi in T					
																		Media	SCM	CV tronchi	CV torri	media	sqm	CV tronchi	CV torri
	T 1 m - T 1 v																								
T 1 v - T 2 m	T 2 m - T 2 v	0.97	0.97	0.97	0.95	0.95	0.95	0.94	0.91	0.87	0.82	0.82	0.93	0.96	0.01	0.01					0.89	0.06	0.06		
		0.42	0.41	0.47	0.48	0.50	0.48	0.71	0.52	0.57	0.76	0.74	0.51	0.46	0.04	0.04					0.09	0.61	0.12	0.19	
T 2 v - T 3 m	T 3 m - T 3 v	0.96	0.96	0.92	0.92	0.92	0.91	0.72	0.91	0.91	0.79	0.80	0.92	0.94	0.02	0.02					0.85	0.08	0.09		
		0.33	0.25	0.36	0.48	0.47	0.47	0.56	0.53	0.68	0.81	0.80	0.46	0.38	0.10					0.25	0.62	0.15		0.24	
T 3 v - T 4	T 4 - T 4b m	0.93	0.93	0.93	0.90	0.90	0.90	0.67	0.87	0.81	0.74	0.76	0.88	0.92	0.02	0.02					0.81	0.09	0.11		
		0.77	0.77	0.80	0.72	0.72	0.72	0.71	0.65	0.48	0.40	0.35	0.65	0.75	0.04					0.05	0.57	0.15		0.27	
T 4b v - T 5	T 4b v - T 4b v	0.65	0.78	0.65	0.62	0.63	0.65	0.76	0.66	0.70	0.67	0.68	0.72	0.67	0.05					0.09	0.69	0.04		0.06	
															media	0.02	0.12				media	0.09	0.19		
	media	0.72	0.72	0.73	0.73	0.73	0.73	0.72	0.72	0.72	0.71	0.71	0.72												
	sqm	0.26	0.28	0.24	0.20	0.20	0.20	0.11	0.17	0.16	0.15	0.16	0.19												
	Cv	0.36	0.39	0.33	0.28	0.28	0.28	0.16	0.24	0.22	0.20	0.23	0.27												
	media																								
	media	0.38	0.33	0.42	0.48	0.49	0.48	0.64	0.53	0.62	0.78	0.77	0.48												
	sqm	0.06	0.11	0.08	0.00	0.02	0.01	0.11	0.00	0.08	0.04	0.04	0.04												
	Cv	0.17	0.33	0.18	0.09	0.04	0.02	0.17	0.01	0.13	0.05	0.05	0.08												
	media																								
	media	0.86	0.88	0.85	0.82	0.82	0.83	0.76	0.80	0.75	0.68	0.68	0.82												
	sqm	0.14	0.10	0.13	0.14	0.14	0.13	0.11	0.13	0.17	0.17	0.19	0.12												
	Cv	0.16	0.11	0.15	0.18	0.17	0.16	0.14	0.17	0.23	0.24	0.28	0.15												
	media																								
	media																								

Fig. 7.9 Variabilità dell'Efficienza di Trasporto residua

7.4 Conclusioni

Nel caso di sistemi di adduzione, sono state messe a punto metodologie di valutazione di indicatori (PI) adimensionali che esprimono lo stato del sistema attraverso i concetti di: efficienza, efficacia e grado di utilizzo, per le derivazioni, e di efficienza di trasporto e di regolazione, per l'infrastruttura di adduzione.

La metodologia proposta si è dimostrata particolarmente utile per esprimere quantitativamente le performance di ogni componente e dell'intero sistema idrico analizzato, permettendo così di localizzare le differenti criticità dell'infrastruttura indagata, migliorando la conoscenza del sistema e supportandone le attività di monitoraggio e gestione, in modo da guidare le scelte in modo più consapevole e mirando al soddisfacimento di obiettivi strategici.

Bibliografia

- Alegre H., Baptista, J.M., Faria A.L. (1997). *A general framework of performance indicators in the scope of water supply*, Proc IWSA Workshop on Performance Indicators for transmission and distribution Systems, Lisbon.
- Alegre H., Himir, W., Baptista, J.M., Parena, R. (2000). *Performance Indicators for water supply systems*, Manual of best practice, IWA Publishing.
- Bao, Y., Mays, L.W. (1990). *Model for water distribution system reliability*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 116(9), 1119-1137.
- Billington, R., Allan, R.N. (1987). *Reliability evaluation of engineering systems: concept and technique*, Plenum Press, NY 1987
- Bos, M.G. (1997). *Performance indicators for irrigation and drainage*. Irrigation and Drainage Systems 11(2): 119-137.
- Bos, M.G., Nugteren, J. (1990). *On irrigation efficiencies*. 4th ed. Wageningen: International Institute for Land Reclamation and Improvement, Pub.n.19.
- Burt, C.M., Styles, S. (1997). *Irrigation Modernization Study - Appendix on Irrigation Indicators - World Bank-IPTRID-IIMI*.

- Clemmens, A.J., Bos, M.G. (1990). *Statistical methods for irrigation system water delivery performance evaluation*. Irrigation and drainage systems 4: 345-365.
- Coelho, S.T. (1997). Performance in water distribution: A System Approach. Water engineering and management series. LNEC (National Civil Engineering Laboratory), Portugal.
- Damelin, E., Shamir, U., Arad, N. (1972). *Engineering and economic evaluation of the reliability of water supply*, WRR Vol 8/4.
- Ermini, R. (1995). *Consumi predite e sprechi nei sistemi idrici*, Rapporto finale su Studi per la gestione delle risorse idriche in Basilicata, PZ 1995
- Ermini, R., Fiorentino, M., Viparelli, R. (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, Vol III, Catania.
- Ermini, R. (2000). *Indici di prestazione per schemi idrici complessi*. Atti del XXVII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, IDRA2000 GE.
- Ermini, R., D'Anisi, L., Giugliano, R., Mangone, V. (2001). *Criteri gestionali per migliorare l'affidabilità di un sistema idrico, il caso del Ramo Sud dell'Acquedotto Basento-Camastra*, Congresso nazionale Condotte per acqua e gas, linee evolutive della realizzazione e della gestione, Ischia NA.
- Ermini, R., Mancini, I.M., Trulli, E. (2002). *Modellizzazione delle reti idriche di distribuzione per la gestione della qualità e sicurezza della risorsa erogata*, in Atti dei convegni dei Lincei, XX Giornata dell'ambiente Accettabilità delle acque per usi civili e agricoli, Roma.
- Ermini, R., Mangone, V., Viparelli, R. (2004). *Indici di rischio per la valutazione dell'affidabilità di un sistema acquedottistico*, IDRA 2004, TN.
- Ermini, R., Mangone, V., Viparelli, R. (2004). *Utilizzo di indici di rischio per la corretta gestione di uno schema acquedottistico*, IDRA 2004, TN.
- Ermini, R., Ingeduld, P. (2005). *Analisi delle criticità e valutazione dei livelli di servizio di reti di distribuzione*, 2 Seminario su La ricerca delle perdite e la gestione delle reti di acquedotto, PG.
- Ermini, R., Ingeduld, P., Zuccaro, G. (2006). *A Case Study of Water Distribution Network Reliability Assessment with Mike-Net*, Conference on Efficient Management of Water Networks, FE.
- Ermini, R., Ingeduld, P., Zuccaro, G. (2007). *Analisi di reti idriche con funzionamento discontinuo* Convegno Approvvigionamento e Distribuzione Idrica: Esperienza, Ricerca ed Innovazione, FE.
- Ermini, R., Di Santo, G., Vurro, M., Masciopinto, C., Canè, G., Masciale, R. (2007). *Un modello di calcolo delle criticità nei sistemi di drenaggio urbano*, Acqua e Città, Chia CA.
- Ermini, R., Ingeduld, P. (2007): *Servizio Idrico Integrato Analisi di Affidabilità, Rischio e Performance - DHI Software User Conference*, TO.
- Fiering, M.B. (1982a). *Alternative indices of resilience*. Water Resour. Res., 18(1), 33-39.
- Fiering, M.B., (1982b). *Estimates of resilience indices by simulation*. Water Resour. Res., 18(1), 41-50.
- Goulter, I.C. (1992). *Assessing the reliability of water distribution networks using entropy based measures of network redundancy*. Entropy and energy dissipation in water resources, V. P. Singh and M. Fiorentino, eds., Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 217-238.

- Gunderson, L.H., Waleters, C.J. (2002). *Resilience in water landscape of southern Florida. Resilience and the behavior of large scale systems*, L.H. Gunderson and L. Pritchard Jr., eds., Island Washington, D.C.
- Hashimoto, T., Stedinger, J.R., Loucks, D.P. (1982). *Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation*. Water Resour. Res. 18/1 14–20.
- Levine, G. (1982). *Relative water supply. An explanatory variable for irrigation systems*. Technical Report n.6, Cornell University. Ithaca, NY, USA.
- Mays, L.W., Cullinane, M.J. (1986). *A review and evaluation of reliability concept for design of water distribution systems* Miscellaneous Paper EL-86-1, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Quimpo, R.G., Shamsi, U.M. (1989). *Network reliability for water distribution system management* Proc 5th IAHR International Symposium on Stochastic Hydraulics University of Birmingham, UK.
- Quimpo, R.G., Wu, S.J. (1997). *Condition assessment of water supply infrastructure* J. of Infrastructure Systems, ASCE Vol 3/1.
- Shinstine, D.S., Lansley, K.E. (2002). *Reliability/Availability analysis of municipal distribution networks: case studies* J. Waterway Port Coastal Ocean Eng, ASCE, Vol 128/2.
- Su, Y.C., Mays, L.W., Duan, N., Lansey, K.E. (1987). *Reliability based optimization model for water distribution systems* J. Hyd Eng, ASCE vol114/12.
- Tang, Y.K. (1985). *Evaluation of water distribution network reliability*. Proc. ASCE Hydraulic Division Specialty Conference. Orlando, FL.
- Tangena, B.H., Foster, P.K. (1984). *Reliability of drinking water supply systems* Water Supply, vol.2.
- Tanyimboh, T.T. (1993). *An entropy-based approach to the optimum design of reliable water distribution networks*, PhD thesis, Civil Eng. Dept., University of Liverpool, UK.
- Todini, E. (2000). *Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach*. Urban Water, 2(3), 115–122.
- Mays, L.W. (1993). *Methodologies for reliability analysis of water distribution systems*, Proc. American Water Works Association 1993 Annual Conference.
- Merriam, J.L., Shearer, M.N., Burt, C.M. (1983). *Evaluating irrigation systems and practices. In design and operation of farm irrigation systems*; Jensen, M.E (ed). ASAE Monograph No.3. American Society of Agriculture Engineers.
- Molden, D.J., Gates, T.K. (1990). *Performance measures for evaluation of irrigation water delivery systems*. J. of irrigation and drainage engineering. ASCE, 116 (6), 804-823.
- Wagner, J.M., Shamir, U., Marks, D.H. (1988). *Water Distribution reliability: analytical methods* J. Water Resources Plan Mng, ASCE vol 114/3.
- Wagner, J.M., Shamir, U., Marks, D.H. (1988). *Water Distribution reliability: simulation methods* J. Water Resources Plan Mng, ASCE vol 114/3.
- Walski, T.M. (1993). *Practical aspects of providing reliability in water distribution system* Reliability Engineering and Systems Safety, vol42.
- Weller, J.A. (1991). *An evaluation of the Porac River Irrigation System*. Irrigation and Drainage Systems vol.5 1-17, Springer.
- Xu, C., Goulter, I.C. (1998). *Probabilistic model for water distribution reliability* J. Water Resources Plan Mng, ASCE, 124(4), 218-228.