

UN INDICATORE COMPOSITO PER LA SOSTITUZIONE DEI CONTATORI IDRICI IN UN SISTEMA DI DISTRIBUZIONE URBANO

C.M. Fontanazza¹, G. Freni², G. La Loggia¹, V. Notaro¹ & V. Puleo¹

- (1) Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale ed Aerospaziale, Università degli Studi di Palermo, Viale delle Scienze, Palermo 90128, Italy
e-mail: fontanazza@idra.unipa.it; glal@idra.unipa.it; notaro@idra.unipa.it; puleo@idra.unipa.it
- (2) Facoltà di Ingegneria ed Architettura, Università “Kore” di Enna, Cittadella Universitaria, Enna 94100, Italy
e-mail: gabriele.freni@unikore.it

SOMMARIO

All'interno di un sistema di distribuzione, i contatori volumetrici a turbina sono gli strumenti più diffusamente utilizzati per la misura dei consumi idrici degli utenti. Essi forniscono dati indispensabili all'ente gestore per l'emissione delle fatture, la redazione del bilancio idrico del sistema, l'identificazione di rotture o malfunzionamenti, di furti d'acqua e di comportamenti anomali degli utenti. E' evidente pertanto l'importanza di tali strumenti di misura per la gestione tecnica ed economica del servizio idrico. I contatori sono intrinsecamente caratterizzati da errori di misura che vengono spesso trascurati dai gestori del servizio idrico, generando una parte delle cosiddette perdite idriche apparenti: volumi idrici consegnati alle utenze ma non contabilizzati.

Il presente studio ha l'obiettivo di offrire ai gestori del servizio idrico uno strumento che consenta l'analisi delle prestazioni dei contatori durante il loro esercizio e suggerisca, di conseguenza, una strategia di sostituzione degli stessi, al fine di ridurre al minimo le perdite apparenti legate alla sottomisurazione dei contatori. La procedura proposta per l'analisi delle prestazioni si basa sulla determinazione di un “Indicatore di Sostituzione” ottenuto come combinazione di alcuni dei parametri che influenzano significativamente l'accuratezza di tali strumenti di misura come l'età del contatore, la pressione in rete, il volume idrico che attraversa lo strumento di misura.

Un'analisi Monte Carlo è stata condotta al fine di testare l'affidabilità e la robustezza dell'indicatore proposto. La metodologia proposta è stata applicata a un caso di studio reale: un piccolo distretto di misura identificato all'interno della rete di distribuzione della città di Palermo (Italy).

1 INTRODUZIONE

In una rete di distribuzione le perdite idriche in genere si distinguono in *reali* e *apparenti*: le prime sono perdite fisiche che possono avere luogo nella rete di adduzione, di distribuzione e negli allacci alle utenze; le seconde, invece, sono da intendersi come perdite finanziarie del gestore e rappresentano il mancato guadagno da questi percepito a seguito di un volume prelevato dalla rete e utilizzato dagli utenti, ma non da questi pagato. Tali perdite sono da ascrivere generalmente a furti d'acqua, a errori di lettura e fatturazione e a errori di misura dei contatori. In particolare gli errori di misura sono di solito considerati il contributo più rilevante alle perdite apparenti e anche il più difficile da quantificare (Rizzo & Cilia, 2005; Criminisi et al., 2009; Kanakoudisa & Tsitsifli, 2010). Tali errori sono legati alla precisione intrinseca del contatore la cui entità varia con la portata che attraversa il misuratore stesso. Diversi studi hanno dimostrato che le prestazioni dei contatori idrici possono essere influenzate dalle loro caratteristiche tecniche, dall'età e dall'usura, dal loro corretto dimensionamento e installazione, dalla qualità dell'acqua distribuita (Arregui et al., 2005), dalla pressione in rete (Fontanazza et al., 2010), dall'andamento temporale dei consumi (Arregui et al., 2006; Arregui et al., 2007) e dalla presenza di serbatoi di compenso presso le utenze (Rizzo & Cilia, 2005; Cobacho et al., 2008; Criminisi et al., 2009). E' evidente pertanto, come sia necessario per l'ente gestore avere una stima dell'andamento temporale degli errori di misura caratterizzanti il suo parco contatori, al fine di programmare un'opportuna campagna di sostituzione mirata a tenere le perdite idriche apparenti sotto controllo. Tuttavia, le pratiche tradizionali per la sostituzione dei contatori sono generalmente basate su semplici regole che si limitano a tenere in considerazione la sola età del contatore, i volumi totalizzati o banalmente la rottura del contatore stesso. In tal modo, però, sono trascurate le reali condizioni di lavoro dei contatori, le caratteristiche degli

impianti interni dei consumatori finali nonché l'andamento temporale dei loro consumi abituali (Arregui *et al.*, 2011).

Negli ultimi anni, in letteratura sono state proposte diverse metodologie per identificare la più idonea tipologia di contatore e la più adeguata frequenza di sostituzione (Arregui *et al.*, 2003; Arregui *et al.*, 2011). Alcune procedure richiedono test di laboratorio sui contatori e misure di campo del pattern dei consumi reali, altri invece utilizzano i dati di fatturazione forniti dal gestore. In generale, la più adeguata frequenza di sostituzione può essere ottenuta minimizzando una funzione rappresentativa del costo medio annuo del contatore, inteso come combinazione dei suoi costi fissi iniziali (costo per l'acquisto del contatore e per la sua installazione) e del costo dei suoi errori di misura (perdite apparenti). Un'anticipata sostituzione del contatore può aumentare tale costo medio annuo, in quanto i costi fissi iniziali hanno maggiore incidenza. Allo stesso modo, gli errori di misura dello strumento possono causare un'importante perdita di guadagno per il gestore.

La natura multidimensionale del problema può essere descritta da un indicatore composito in grado di tenere in considerazione i differenti fattori che influenzano le performance dei contatori idrici.

Negli ultimi anni sono state proposte alcune procedure standardizzate per la costruzione di indicatori compositi (OECD, 2008) riconducibili essenzialmente: alla selezione degli indicatori elementari e al trattamento di eventuali dati mancanti, alla loro normalizzazione, all'assegnazione di un peso a ciascun indicatore elementare e alla loro finale aggregazione (OECD, 2008; Saltelli *et al.*, 2008). Ciascuna di tali fasi tuttavia non presenta una soluzione univoca: ad esempio l'operatore può scegliere uno tra i tanti metodi di normalizzazione presentati in letteratura. Pertanto, il risultato finale, ovvero l'indicatore composito, è generalmente affetto da un'incertezza intrinseca legata alle scelte soggettive fatte dall'operatore. In molti studi al fine di testare l'affidabilità e la robustezza di indicatori compositi, l'incertezza a loro intrinseca è stata valutata mediante apposite analisi (Brand *et al.*, 2007; Saisana, 2008; Saisana *et al.*, 2009; Saisana & Saltelli, 2010).

Il presente studio ha l'obiettivo di offrire ai gestori uno strumento affidabile per stabilire la priorità di sostituzione dei contatori in una rete di distribuzione urbana per mezzo di un indicatore composito chiamato "*Indicatore di Sostituzione, (IS)*". L'indicatore proposto consente di analizzare le performance del contatore durante la sua vita utile, suggerendo un'adeguata strategia di sostituzione, con il fine di ridurre al minimo le perdite apparenti legate alla sottomisurazione dei contatori. In accordo con tale obiettivo, per la definizione di *IS* sono stati selezionati alcuni indicatori elementari come l'età del contatore, la pressione in rete e i volumi idrici che attraversano il contatore. È stata condotta inoltre un'analisi di incertezza di tipo Monte Carlo per verificare l'affidabilità e la robustezza dell'indicatore proposto rispetto sia alla soggettività nella scelta della formulazione da assegnare all'indicatore stesso sia all'errore intrinseco nella stima delle variabili di stato del sistema.

La metodologia proposta è stata applicata a un caso di studio reale: un piccolo distretto di misura identificato all'interno della rete di distribuzione della città di Palermo (Italy), che serve 164 utenze residenziali, ciascuna dotata di un contatore volumetrico di tipo multi-jet e di serbatoio privato.

2 MATERIALI E METODI

Un indicatore composito viene generalmente definito sulla base di un quadro teorico dove diversi parametri o componenti (indicatori elementari) sono selezionati, combinati e pesati al fine di riflettere la struttura del fenomeno analizzato. Nel presente lavoro, si è ottenuto l'indicatore composito *IS* come combinazione di alcuni importanti parametri: l'età del contatore, la pressione in rete e i volumi che passano all'interno del contatore. L'indicatore composito è stato poi usato per fornire un efficace ordinamento (ranking) per la sostituzione dei contatori installati in una rete di distribuzione.

Per la costruzione dell'indicatore composito *IS* sono state seguite le linee guida proposte dall'OECD (2008). Le procedure analitiche intervenute nella definizione di questo indicatore sono diverse. In primo luogo è stato necessario individuare gli indicatori elementari. Questi sono stati scelti in funzione della loro misurabilità, consistenza analitica e rilevanza rispetto al fenomeno analizzato. Per ogni variabile selezionata (età del contatore, volume d'acqua che attraversa il contatore, pressione in rete) è stato identificato il relativo data set, le procedure per il trattamento dei dati mancanti e per la normalizzazione delle variabili. In seguito per ottenere l'indicatore composito *IS*, sono stati assegnati dei pesi agli indicatori elementari normalizzati che sono stati infine aggregati.

L'indicatore *IS* proposto è stato testato su un piccolo distretto (Figura 1) che ricade nella sottorete 11 (Noce-Uditore), che è una delle 17 sottoreti in cui l'intera rete di distribuzione della città di Palermo è suddivisa.

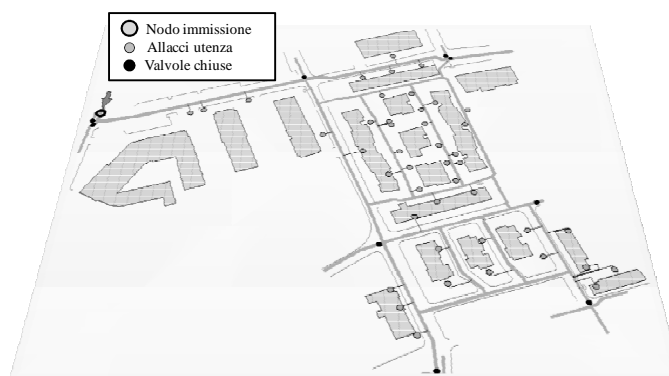


Figura 1. Il distretto di misura: descrizione schematica della rete

Questa porzione di rete è costituita da tubazioni in polietilene con diametri variabili da 110 a 225 mm. A tali tubazioni sono allacciate 44 diramazioni che servono complessivamente 164 contatori. Tutte le utenze del distretto sono dotate di serbatoi privati, a causa delle condizioni di erogazione discontinua verificatesi in passato. I contatori installati sono del tipo multi-jet, costituiti per il 96% da misuratori di diametro di 15 mm, mentre per il rimanente 4% da diametri tra 25 e 50 mm. Il distretto è stato idraulicamente delimitato chiudendo tutte le valvole poste ai limiti del suo contorno tranne una, di maggiori dimensioni, usata durante la sperimentazione come unico nodo di alimentazione del distretto. Al fine di rilevare l'andamento temporale delle pressioni e delle portate in ingresso al distretto, in corrispondenza dell'unico nodo d'immissione sono stati installati un misuratore di pressione e un misuratore di portata elettromagnetico. La campagna di monitoraggio si è protratta per circa tre mesi (Dic. 2009 – Apr. 2010). Durante tale periodo il distretto è stato alimentato con continuità con una portata media di circa 1,6 l/s con un coefficiente di punta oraria pari a 2,9, mentre la pressione si è attestata su valori medi di 3,3 bar. Prima dell'inizio del monitoraggio è stata testata l'assenza di perdite reali sia nella rete sia negli impianti interni e nei serbatoi privati. La prima verifica è stata condotta con l'ausilio di "noise logger" e di analisi sulle portate notturne, mentre per la seconda verifica sono state avviate specifiche analisi sulle utenze e grazie alla loro collaborazione sono state individuate e rimosse le perdite nei loro impianti interni. Non sono stati rilevati usi non autorizzati e la lettura dei contatori è stata verificata due volte da due operatori diversi.

I dati sull'età dei contatori installati nel distretto, compresa tra 1 e 20 anni sono stati forniti dal gestore (Tabella 1). I contatori da 1 a 10 anni sono di classe C e quelli da 10 a 20 anni di classe B (75/33/CEE).

DIAMETRO	1-5 ANNI	5-10 ANNI	10-15 ANNI	15-20 ANNI	TOT	%
13 mm	80	31	33	13	157	95.7%
25 mm	3	1	0	0	4	2.4%
40 mm	1	1	0	0	2	1.2%
50 mm	0	1	0	0	1	0.6%
TOT	84	34	33	13	164	100.0%
%	51.2%	20.7%	20.1%	7.9%	100.0%	

Tabella 1. Classificazione dei contatori sulla base dell'età e dei diametri

Poiché l'indicatore composito *IS* è basato anche sui parametri di pressione e portata, le serie temporali di queste due variabili sono state analizzate eliminando eventuali dati mancanti. In particolare, è stato determinato un completo data set per i valori della pressione esercitata su ciascun contatore come differenza tra il valore di pressione rilevato al nodo di immissione (fornito dal misuratore ivi installato con una frequenza di acquisizione pari a 30 minuti) e la quota geodetica del contatore. L'andamento non stazionario della pressione, causato dalla variazione dinamica e stocastica dei pattern di consumo delle utenze e dalle condizioni al contorno del distretto (Preis et al., 2010), è stato trascurato perché produrrebbe perdite minori rispetto all'accuratezza di misura dello strumento. Anche per i volumi totali che attraversano ciascun contatore è stato ottenuto un data set continuo con una risoluzione di 30 minuti sulla base dei dati raccolti dal gestore per ciascuna utenza, dei pattern di domanda e dei metodi di sostituzione dei dati mancanti.

I dati mancanti spesso ostacolano lo sviluppo di un indicatore composito robusto. In letteratura sono stati proposti tre approcci generali al problema: *i)* cancellazione dei dati; *ii)* imputazione singola; *iii)* imputazione multipla. Con il primo approccio i dati mancanti vengono semplicemente omessi dall'analisi. L'errore standard in generale crescerà in un campione di dati ridotto, mentre se una variabile presenta più del 5% di dati mancanti, l'approccio non può essere applicato (*Little & Rubin, 2002*). Gli altri due approcci considerano i dati mancanti come parte dell'analisi e pertanto tentano di assegnare nuovi valori o attraverso una singola imputazione, i.e. assumendo che tutti i valori siano uguali a uno dei parametri statistici del data set a disposizione come la media, la mediana o la moda, o attraverso una regressione o una imputazione multipla, dove l'assegnazione dei nuovi valori ai dati mancanti è affidata a un processo casuale che riflette la tendenza centrale dei dati e l'incertezza (*OECD, 2008*).

Nel presente studio, la serie temporale delle pressioni non mostrava dati mancanti nel periodo di analisi, mentre la serie delle portate ne presentava il 7%, pertanto non è stato seguito l'approccio della cancellazione dei dati, e si sono adottati due metodi con imputazione singola e una regressione lineare. Il primo metodo con imputazione singola ha assegnato ai dati mancanti il valore minimo registrato durante il periodo di monitoraggio, mentre il secondo ha considerato la sensibilità dello strumento (il valore della portata di avviamento relativa al misuratore), la regressione lineare invece è stata basata sull'applicazione del pattern giornaliero medio di consumo precedentemente elaborato in *Fontanazza et al. (2006)*.

Una volta ottenuta una serie temporale continua sia per le pressioni che per i volumi idrici misurati dai vari contatori, è stato necessario normalizzare tali variabili in modo da consentire il confronto tra gli indicatori elementari aventi dimensioni differenti. In linea generale, le procedure di normalizzazione dovrebbero considerare le proprietà dei dati, così come l'obiettivo dell'indicatore composito. Diversi metodi sono stati proposti in letteratura (*Freudenberg, 2003; Jacobs et al., 2004*) come per esempio il metodo *Min-Max*, la *Standardizzazione* (or *z-scores*) e la *Distanza da un punto di riferimento* che sono stati presi in esame nel presente studio e rispettivamente espressi dalle seguenti equazioni 1, 2 e 3:

$$I_{q,c} = \frac{x_{q,c} - \min(x_q)}{\max(x_q) - \min(x_q)} \quad (1)$$

$$I_{q,c} = \frac{x_{q,c} - \text{mean}(x_q)}{\text{std}(x_q)} \quad (2)$$

$$I_{q,c} = \frac{x_{q,c}}{x_{qref}} \quad (3)$$

dove $x_{q,c}$ è il generico valore dell'indicatore elementare q per il contatore c , $c=1, \dots, M$, con M numero totale dei misuratori analizzati; $I_{q,c}$ è il relativo valore normalizzato; $\min(x_q)$, $\max(x_q)$, $\text{mean}(x_q)$ and $\text{std}(x_q)$ sono rispettivamente il valore minimo, quello massimo, la media e la deviazione standard di x_q relativi a tutto il campione di dati e x_{qref} è un valore di riferimento relativo a ciascun indicatore elementare. In particolare il metodo *Min-Max* normalizza ciascun parametro in un intervallo $[0,1]$, sottraendo il valore minimo e dividendo per la differenza tra il valore massimo e quello minimo dell'indicatore. La *Standardizzazione* (o *z-score*) converte i parametri a una scala comune con media nulla e deviazione standard pari a 1. I parametri con valori estremi perciò hanno un effetto maggiore sull'indicatore composito. Il metodo della *Distanza da un punto di riferimento* misura la posizione relativa di un dato parametro confrontandolo con un punto di riferimento, come il valore medio, il massimo valore, etc. Nel presente lavoro come valore di riferimento è stato adottato il massimo valore assunto da ciascun indicatore elementare con riferimento al periodo di monitoraggio.

Dopo aver normalizzato i tre indicatori elementari (età, pressione e volumi erogati) si è proceduto all'assegnazione di pesi espliciti a ciascuno di essi al fine di riflettere l'importanza relativa di ciascuna componente. In letteratura esistono differenti procedure per l'assegnazione dei pesi: alcuni approcci si affidano a modelli statistici, altri invece compensano le componenti che sono ritenute più (o meno) influenti, a seconda del parere degli esperti. Di solito, i pesi espliciti esprimono una sorta di compensazione tra le componenti: un surplus per una componente è compensato da un deficit in un'altra. Frequentemente si assume che:

$$\sum_{q=1}^Q w_q = 1, \quad \text{con } 0 \leq w_q \leq 1, \quad \text{per } q = 1, \dots, Q \quad (4)$$

dove w_q è il peso assegnato ad ogni componente elementare I_q e Q è il numero totale delle componenti elementari. In particolare, nel presente studio tre metodi alternativi sono stati usati: (i) *pesi uguali* per

ciascun indicatore elementare; (ii) peso pari all'inverso del valore medio assunto dalla variabile nell'intero periodo di monitoraggio; (iii) pesi basati sui giudizi dati dagli esperti e per i quali sono stati assunti i seguenti valori:

$$w_{et\grave{a}} = 0.3 \quad w_{pressione} = 0.1 \quad w_{portata} = 0.6 \quad (5)$$

Infine relativamente alla scelta delle tecniche di aggregazione sono stati applicati due approcci: uno additivo (equazione 6) e uno moltiplicativo o geometrico (equazioni 7):

$$IS_c = \sum_{q=1}^Q w_q I_{q,c} \quad (6)$$

$$IS_c = \prod_{q=1}^Q (I_{q,c})^{w_q} \quad (7)$$

dove IS_c è l'indicatore composito per lo specifico contatore c -esimo. Per tutti i contatori, quindi, è stato possibile stabilire un ranking di sostituzione coerente con i valori valutati di IS_c .

In particolare, dalla combinazione casuale delle procedure elementari sopra descritte (elaborazione dei dati mancanti, normalizzazione, assegnazione dei pesi e aggregazione degli indicatori elementari), è stato possibile ottenere 54 differenti formulazioni a ciascuna delle quali è corrisposto uno specifico ranking di sostituzione dei contatori. Inoltre, nell'elaborazione dell'indicatore composito è stata considerata anche l'accuratezza delle misure relative agli indicatori elementari. A tal fine, fatta eccezione per l'età dei contatori, che è stata supposta certa in quanto direttamente indicata sul contatore, è stato assegnato un errore di misura alle serie temporali delle pressioni e dei volumi idrici misurati dai contatori. Nello specifico, ai dati di pressione è stato applicato casualmente, secondo una distribuzione uniforme, l'errore del $\pm 2\%$ in accordo con l'accuratezza dello strumento installato nel nodo di misura. Con riferimento ai dati relativi ai volumi idrici misurati dai contatori, gli errori di misura sono stati assegnati sempre casualmente all'interno di intervalli determinati dall'analisi delle curve di errore di contatori già sostituiti nell'ambito della rete cittadina e studiati in precedenti ricerche (Fontanazza *et al.*, 2010). In tale studio, in particolare, sono state ricavate le curve di errore - per data classe di età del contatore, e per dati valori della pressione di esercizio e portata circolante - tramite dei test di laboratorio effettuati con l'ausilio di un banco prova conforme alle norme ISO4064: 2005. I risultati di tali prove hanno mostrato che l'accuratezza dello strumento diminuisce al crescere dell'età e aumenta con la pressione. In particolare tale influenza si è mostrata più rilevante nel caso di un profilo di consumi caratterizzato dalla presenza di serbatoi privati e distribuzione continua, come quello che caratterizza il distretto in esame. Inoltre, per i contatori di età compresa tra 0 e 5 anni, l'aumento di pressione da 0.5 a 2.0 bar produceva una riduzione di quattro volte della percentuale di perdite apparenti, mentre per i misuratori di età compresa tra 10 e 15 anni tale riduzione era solo dell'1%. L'influenza della pressione sulle prestazioni dello strumento quindi è rilevante per i nuovi contatori mentre per quelli più vecchi è progressivamente mascherata dal logorio delle parti meccaniche dovuto all'invecchiamento.

L'analisi di incertezza condotta nel presente studio, quindi, ha voluto analizzare non solo gli effetti delle scelte soggettive fatte dall'operatore nella costruzione dell'indicatore composito, ma anche dell'incertezza connessa agli errori di misura delle variabili di stato che compongono l'indicatore IS . A tal fine, sono state eseguite 10.000 Simulazioni Monte Carlo combinando casualmente le 54 diverse formulazioni dell'indicatore IS con le diverse serie temporali di dati di pressione e portata ottenute applicando l'errore di misura. E' opportuno sottolineare che il numero delle simulazioni Monte Carlo effettuate è stato stabilito attraverso delle analisi preliminari, finalizzate a investigare la significatività del campione casuale utilizzato e la conseguente affidabilità delle analisi (Bertrand-Krajewski *et al.*, 2002). Pertanto, è stato necessario svolgere lo studio utilizzando campioni di numerosità progressivamente crescente fino a che si fosse attestato che i risultati non subivano ulteriori sostanziali variazioni. L'analisi svolta ha avuto quindi il duplice obiettivo di valutare l'efficacia dell'indicatore IS nell'individuare i contatori da sottoporre prioritariamente a sostituzione e di valutarne la robustezza dal momento che i valori dell'indicatore sono influenzati da scelte soggettive del gestore (che ne fissa la formulazione) e dagli errori di misura legati alle variabili utilizzate per la determinazione degli indicatori elementari.

3 RISULTATI E DISCUSSIONE

I risultati dell'analisi d'incertezza svolta sono stati sintetizzati in Figura 2 dove gli ordinamenti

(ranking) di sostituzione dei contatori, basati sui valori di IS ottenuti per ciascun contatore, sono rappresentati nel forma di un grafico boxplot. I rettangoli rappresentano l'intervallo tra il 25° e il 75° percentile degli ordini di classifica assunti dal contatore mentre i segmenti descrivono l'intervallo tra il 5° e il 95° percentile. Analizzando il grafico, possono essere fatte alcune interessanti considerazioni:

- la distanza tra il 25° e il 75° percentile è generalmente piccola, mentre la distanza tra il 5° e il 95° percentile è abbastanza elevata; questo significa che la selezione della formulazione di IS e l'incertezza relativa alle misure può avere un impatto rilevante sul ranking di sostituzione anche se è possibile una stima robusta del ranking con riferimento ai percentili centrali (50°).
- Cinque contatori nel grafico mostrano un evidente comportamento differente con un box più grande tra il 25° e il 75° percentile; questi contatori sono connessi a grandi condomini con una larga variabilità delle portate registrate mentre gli altri sono tutti contatori da 15 mm connessi a singoli utenti con caratteristiche tra loro omogenee.
- Escludendo questi contatori, la larghezza media dei box è intorno a 8.5; considerando una frequenza annua di sostituzione uguale al 5% (che corrisponde per il caso analizzato alla sostituzione di 8 contatori per anno) e assumendo la mediana del ranking per pianificare la sostituzione, l'errore nella sostituzione può essere di più di un anno con il 50% di confidenza.

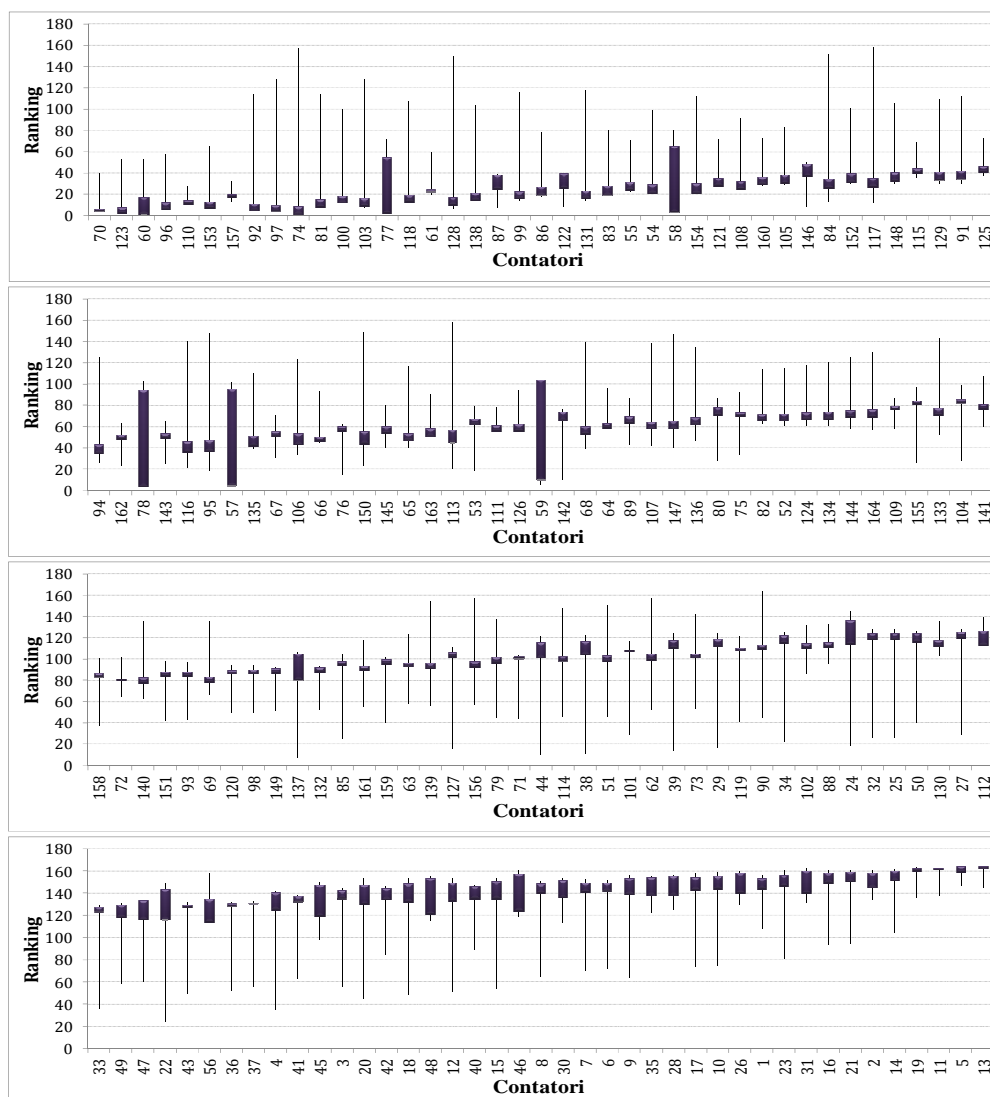


Figura 2. Grafico boxplot dei ranking di sostituzione per i contatori ottenuti considerando sia le diverse formulazioni di IS che gli errori di misura degli strumenti: i rettangoli rappresentano il 25° ed il 75° percentile mentre i segmenti rappresentano il 5° ed il 95° percentile

La maggior parte della variabilità mostrata è dovuta alla selezione della formulazione dell'indicatore come mostrato dalla Figura 3, che riporta il grafico boxplot ottenuto considerando solo una formulazione di *IS*: imputazione del minimo valore registrato per i valori delle portate mancanti, normalizzazione Min-Max (eq. 1), pesi uguali e aggregazione additiva (eq. 6). L'incertezza nel ranking è molto più piccola ed è soltanto causata dagli errori di misura associati ai dati di pressione e portata.

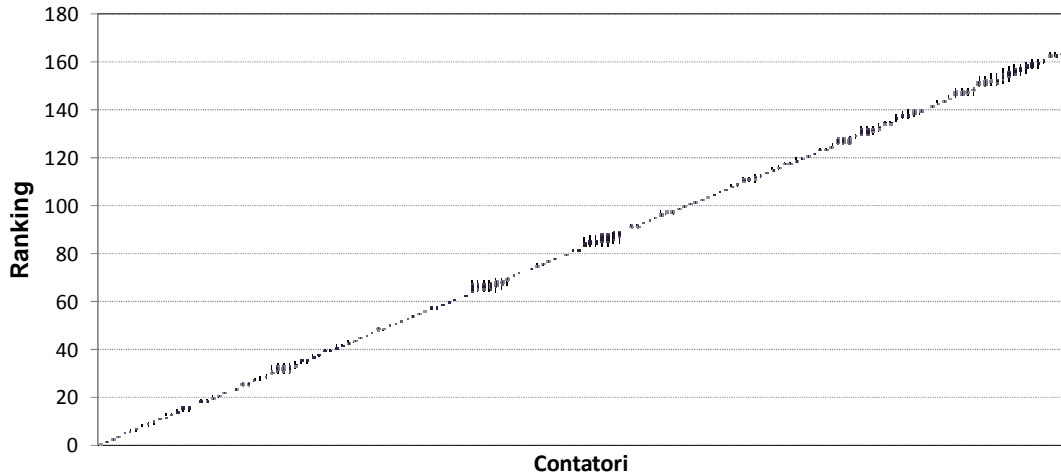


Figura 3. Grafico boxplot dei ranking di sostituzione per i contatori ottenuti considerando un'unica formulazione di *IS* e l'incertezza legata agli errori di misura degli strumenti: i box rappresentano il 25° ed il 75° percentile mentre i segmenti rappresentano il 5° ed il 95° percentile

Al fine di validare la procedura proposta, i percentili relativi al ranking ottenuti dalle 10.000 simulazioni Monte Carlo sono stati posti a confronto con il ranking ottenuto in modo deterministico considerando le perdite apparenti valutate a partire dalle curve d'errore dei contatori ottenute in laboratorio tramite analisi su banco prova (Fontanazza *et al.*, 2010). Quest'ultima analisi è ovviamente la migliore perché è in grado di valutare direttamente le perdite apparenti per ciascun contatore sulla base della sua specifica curva di errore e dei consumi dell'utenza. Ovviamente, tale approccio impone che il contatore venga prima rimosso dalla rete e quindi testato con procedure standardizzate su apposito banco prova. La Figura 4 mostra i risultati ottenuti per alcuni contatori del distretto. Per tutti i contatori analizzati, il ranking basato sulla stima deterministica delle perdite apparenti ricade sempre nell'intervallo tra il 25° e il 75° percentile dei ranking ottenuti mediante l'ausilio dell'indicatore *IS*, dimostrando in tal modo l'adeguatezza di *IS* nel rappresentare la complessità dei parametri che influenzano le perdite apparenti.

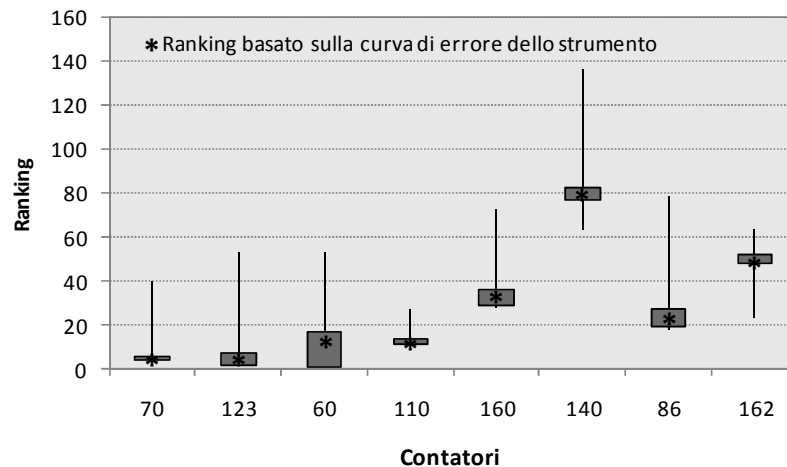


Figure 4. Confronto tra i percentili dei ranking di sostituzione ottenuti con *IS* e il ranking ottenuto dalla stima deterministica delle perdite apparenti a partire dalla curva di errore dei singoli contatori: i rettangoli rappresentano il 25° ed il 75° percentile mentre i segmenti rappresentano il 5° ed il 95° percentile

Come ultimo passo dell'analisi, un altro confronto è stato condotto tra i metodi di sostituzione tradizionali, basati solo sull'età del contatore (il più vecchio è il primo a esser sostituito), e l'uso della mediana (50° percentile) di *IS*. Nello specifico, fissato un tasso di sostituzione pari al 5% (ovvero la sostituzione di 8 contatori ogni anno), in accordo con le curve d'errore elaborate a posteriori per i vari contatori sono state valutate le perdite apparenti risultanti per l'intero distretto seguendo il ranking di sostituzione basato sulla sola età dei contatori e quello corrispondente alla mediana dei 10.000 ordinamenti ottenuti mediante *IS*. Dopo la prima sostituzione, il metodo basato sull'età dei contatori ha evidenziato il 6.5% di riduzione delle perdite apparenti a fronte dell'11% ottenuto seguendo il ranking basato su *IS*. Dopo la seconda sostituzione (secondo anno), il metodo basato sull'età fornisce una riduzione del 7.2% mentre l'analisi con *IS* produce una riduzione uguale al 8.7% dimostrando quindi che l'analisi dell'indicatore composito fornisce un valore aggiunto nella selezione dei contatori da sostituire.

4 CONCLUSIONI

Gli errori di misura dei contatori volumetrici sono responsabili, per una parte consistente, delle perdite apparenti e quindi hanno un impatto negativo sul bilancio economico dei gestori del servizio idrico integrato. La complessità dei fenomeni fisici che influenzano gli errori di misura nei vecchi contatori non consente di guidare la sostituzione degli stessi per mezzo di singoli parametri come l'età o i volumi idrici totalizzati. La sostituzione dopo la rottura del contatore, d'altra parte, determina perdite apparenti notevoli legate al consumo dell'utenza dal momento in cui il contatore ha smesso di funzionare al momento della sostituzione. Nel presente studio è stato proposto un nuovo indicatore composito di supporto al gestore nella pianificazione di efficaci campagne di sostituzione dei contatori mirate alla riduzione delle perdite apparenti. L'indicatore proposto tiene in considerazione tre dei più influenti parametri che possono interessare l'accuratezza della misura: l'età del contatore, il volume idrico transitato nel contatore e la pressione in rete. L'analisi ha mostrato che il ranking basato su tali indicatori compositi può essere influenzato da un'elevata incertezza soprattutto a causa della soggettività nella selezione della formulazione dell'indicatore. L'accoppiamento dell'analisi d'incertezza può mostrare l'impatto di tali scelte soggettive e l'uso di un'analisi statistica può aiutare a rendere l'indicatore più robusto. Il confronto con una procedura di ranking basata su una stima a posteriori delle curve d'errore dei contatori (un metodo che può soltanto essere usato come verifica visto che è richiesta la rimozione del contatore e test di laboratorio), offre buoni risultati confermando quindi *IS* come un affidabile strumento di suggerimento al gestore su quali contatori deve sostituire prima.

Infine, il confronto dei risultati ottenuti mediante l'indicatore *IS* con quelli corrispondenti all'applicazione di una procedura tradizionale, basata sulla sola età dei contatori, ha mostrato che per fissato tasso di sostituzione annuale l'indicatore *IS* è in grado di definire una campagna di sostituzione più adeguata che permette una maggiore riduzione delle perdite apparenti e pertanto un più veloce recupero dei costi di sostituzione per il gestore.

BIBLIOGRAFIA

- Arregui, F. J., Cabrera, E., Cobacho, R. & Garcia-Serra J. Reducing apparent losses caused by meters inaccuracies, *Water Practice & Technology*, 2006, 1(4), doi: 10.2166/WPT.2006093.
- Arregui, F. J., Cobacho, R., Cabrera, E. Jr. & Espert V. Graphical Method to Calculate the Optimum Replacement Period for Water Meters, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2011, 137(1), doi:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000100.
- Arregui, F. J., Pardo, M. A., Parra, J. C. & Soriano, J. Quantification of meter errors of domestic users: a case study, *Proceedings of the Water Loss 2007 Conference*, Bucharest, Romania, 2007.
- Arregui, F., Cabrera, E. Jr., Cobacho, R. & Garcia-Serra, J. Key factors affecting water meter accuracy, *Proceedings of the Leakage 2005 Conference*, Halifax, Canada, 2005.
- Arregui, F., Cabrera, E.Jr., Cobacho R. & Palau V. Management strategies for optimum meter selection and replacement, *Water Science and Technology: Water Supply*, IWA Publishing 2003, 3(1-2), 143-152.
- Bertrand-Krajewski J.-L., Barraud S., Bardin J.-P. Uncertainties, performance indicators and decision aid applied to storm water facilities, *Urban Water*, (2002), Vol. 4, pp. 163-179.
- Brand, D.A., Saisana, M., Rynn, L.A., Pennoni, F. & Lowenfels, A.B. Comparative analysis of alcohol control policies in 30 countries, *PLoS Medicine*, 2007, 4(4), 752-759.
- Cobacho, R., Arregui, F., Cabrera, E. & Cabrera E. Jr. Private water storage tanks: evaluating their inefficiencies, *Water Practice & Technology*, 2008, 3(1), doi: 10.2166/WPT.2008025.
- Criminisi, A., Fontanazza, C.M., Freni, G. & La Loggia, G. Evaluation of the apparent losses caused by water meter

- under-registration in intermittent water supply, *Water Science and Technology*, 2009, 60(9), 2373-2382.
- Direttiva 75/33/CEE del Consiglio, del 17 dicembre 1974, per il ravvicinamento delle legislazioni degli Stati Membri relative ai contatori d'acqua fredda, *GU L 14 del 20.1.1975*, pagg. 1-9.
- Fontanazza, C. M., Freni, G., La Loggia, G. & Notaro, V. Effect of network pressure on apparent losses due to meters under-registration, *Proceedings of the Water Loss 2010 Conference*, Sao Paulo, Brazil, 2010.
- Fontanazza, C.M., Freni, G., La Loggia G. & Termini, D. Comparison of different stochastic models for urban water demand forecasting in drought conditions, *Proceedings of the 7th International Conference on Hydroinformatics HIC 2006*, Nice, France, 2006.
- Freudenberg, M. Composite indicators of country performance: a critical assessment, OECD Publishing, Paris, France, 2003.
- ISO 4064: 2005. Measurement of water flow in fully charged closed conduits - Meters for cold potable water and hot water; 2005.
- Jacobs, R., Smith, P. & Goddard, M. Measuring performance: an examination of composite performance indicators, CHE Technical Paper Series 29, Centre for Health Economics, University of York, 2004.
- Kanakoudisa, V. & Tsitsifli S. Results of an urban water distribution network performance evaluation attempt in Greece, *Urban Water Journal*, 2010, 7(5), 267-285.
- Little, R. J. A. & Rubin, D. B. Statistical Analysis with Missing Data, Wiley Interscience, J. Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2002.
- OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development, Handbook on Constructing Composite Indicators. Methodology and User Guide, OECD Publishing, Paris, France, 2008.
- Preis, A., Allen, M. & Whittle, A. J. On-line hydraulic modelling of a water distribution system in Singapore, *Proceedings of the 12th Water Distribution Systems Analysis Conference WDSA10*, Tucson, Arizona, 2010.
- Rizzo, A. & Cilia, J. Quantifying meter under-registration caused by the ball valves of roof tanks (for indirect plumbing systems), *Proceedings of the Leakage 2005 Conference*, Halifax, Canada, 2005.
- Saisana, M. & Saltelli, A. Uncertainty and Sensitivity Analysis of the 2010 Environmental Performance Index, Report 24269, European Commission, Joint Research Centre, Italy, 2010.
- Saisana, M. The 2007 Composite Learning Index: Robustness Issues and Critical Assessment, Report 23274, European Commission, Joint Research Centre, Italy, 2008.
- Saisana, M., Annoni, P. & Nardo, M., A robust model to measure governance in African countries, Report 23773, European Commission, Joint Research Centre, Italy, 2009.
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M. & Tarantola, S. Global sensitivity analysis. The Primer, John Wiley & Sons, England, 2008.