

MODELLAZIONE IN MOTO VARIO DI UNA RETE DI DISTRIBUZIONE IDRICA REALE SOGGETTA ALL'ATTIVITÀ DELL'UTENZA

Valentina Marsili¹, Silvia Meniconi², Stefano Alvisi³, Caterina Capponi⁴, Bruno Brunone⁵ & Marco Franchini⁶

(1) Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Ferrara (Ferrara); (2) Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Perugia (Perugia); (3) Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Ferrara (Ferrara); (4) Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Perugia (Perugia); (5) Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Perugia (Perugia); (6) Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Ferrara (Ferrara)

ASPETTI CHIAVE

- *Approccio stocastico per la modellazione dei transitori indotti dall'utenza nelle reti di distribuzione idrica*
- *Modellazione della domanda su diverse scale temporali e assumendo tempi di manovra variabili*
- *Applicazione dell'approccio ad una rete di distribuzione idrica reale sottoposta a monitoraggio della pressione e dei consumi delle singole utenze*

1 PREMESSA

Le reti di distribuzione idrica sono continuamente soggette a transitori di pressione che si instaurano ogni volta che nel sistema viene effettuata una manovra o un'azione programmata o accidentale, come ad esempio, l'accensione o lo spegnimento di un gruppo di pompaggio, l'apertura o la chiusura di una valvola ma anche in conseguenza alla semplice attività dell'utenza, come evidenziato da recenti studi (Marsili et al., 2020). Tuttavia, lo studio del comportamento delle reti di distribuzione, e la relativa modellazione avviene generalmente assumendo condizioni di moto stazionario (Jung & Karney, 2017), mentre la caratterizzazione in moto vario è prevalentemente riservata a sistemi che presentano configurazioni elementari (per esempio, i sistemi di adduzione). Le reti di distribuzione presentano una struttura topologica molto più articolata dei sistemi di adduzione in quanto caratterizzati da maglie e diramazioni che ne rendono complessa l'analisi in moto vario. Tuttavia, proprio le configurazioni magliate, oppure le singolarità come le giunzioni e i terminali ciechi, possono potenzialmente essere alla base della sovrapposizione delle onde di pressione con un conseguente rischio di amplificazione degli effetti (Bohorquez et al., 2020). Queste variazioni di pressione possono determinare sia danni immediatamente evidenti (ad esempio, rottura delle condotte, movimento delle giunzioni, intrusione di agenti patogeni attraverso acqua non trattata), sia deterioramenti che evolvono nel tempo (Davis, 2001). Alla luce della complessità e dei potenziali effetti del fenomeno, emerge quindi l'importanza di esplorare e comprendere il comportamento dinamico anche dei sistemi di distribuzione idrica al fine di garantirne l'integrità e la sicurezza.

In letteratura, un numero limitato di studi si è occupato di modellazione delle reti di distribuzione in moto vario e la maggior parte di essi analizza i sistemi sottoposti a manovre insolite o comunque a singole manovre molto gravose. Recenti lavori hanno però provato che anche l'attività dell'utenza idrica può costituire una sollecitazione continua e non trascurabile (Marsili et al., 2020; Meniconi et al., 2022) che, sebbene generalmente di moderata entità, può implicare un potenziale danneggiamento nel lungo termine delle condotte e dei dispositivi presenti in rete per la loro elevata frequenza.

In questo lavoro, è presentato un approccio finalizzato alla modellazione in moto vario di reti di distribuzione soggette a transitori indotti dall'attività dell'utenza. L'approccio è applicato alla rete a servizio del centro urbano di Gorino Ferrarese (Ferrara, Italia). La rete serve circa 300 utenti ed è stata sottoposta ad un monitoraggio delle pressioni ad alta frequenza e dei consumi idrici dei singoli utenti a passo del minuto per una durata di due giorni. In particolare, durante il periodo di monitoraggio, la rete era sottoposta a condizioni ordinarie di funzionamento, ovvero le sole richieste idriche delle utenze agivano come forzante per il sistema.

2 MATERIALI E METODI

Di seguito sono presentati la metodologia finalizzata alla modellazione in moto vario delle reti di distribuzione sottoposte ad attività dell'utenza, la rete a cui l'approccio è applicato e i relativi dati di campo

che hanno permesso di validare l'approccio proposto.

2.1 La metodologia

L'approccio di modellazione finalizzato a riprodurre il comportamento dinamico di una rete sottoposta a transitori indotti dall'attività dell'utenza è basato sull'implementazione del metodo delle caratteristiche (Wylie and Streeter, 1993), riservando particolare attenzione alla caratterizzazione dei consumi idrici. Infatti, mentre nel caso in cui si analizzi la risposta di una rete ad una singola manovra (ad esempio, l'apertura di un idrante o lo spegnimento di una pompa) questa può essere descritta deterministicamente, nel caso in cui l'attenzione è posta sull'analisi della risposta di una rete alle variazioni delle richieste idriche, è preferibile una caratterizzazione stocastica di quest'ultime a fronte della loro natura aleatoria. In particolare, sono state investigate diverse modalità di caratterizzazione dei consumi. In primo luogo, sono stati adottati due differenti approcci per caratterizzare temporalmente la domanda partendo dai volumi osservati in campo ad un assegnato passo, ad esempio del minuto. Con riferimento alla singola utenza, il primo approccio (denominato nel seguito UNIF) prevede di distribuire in modo uniforme il volume osservato, ad esempio in un minuto, sui 60 s che compongono tale minuto. Il secondo approccio (denominato nel seguito VAR) prevede di concentrare il volume osservato in un minuto in impulsi di entità e durata più realistici definiti sulla base di serie storiche osservate al secondo, ancorché per altre utenze. In secondo luogo, con riferimento al tempo di manovra, t_{man} , con cui avviene l'attivazione dei dispositivi domestici (sia in fase di apertura che di chiusura), si è assunto che le variazioni di consumo avvengano linearmente in un certo intervallo temporale. Una prima ipotesi prevede che la manovra avvenga istantaneamente ($t_{man} = 0$, o t_0). La seconda ipotesi, invece, prevede che il tempo di manovra corrisponda a qualche frazione di secondo e vari casualmente tra 0.2 e 0.5 s (t_{rand}) sulla base di una serie di test condotti nel Laboratorio di Idraulica dell'Università di Ferrara finalizzati a ricavare il tempo di manovra su diverse tipologie di rubinetto (a manopola, a miscelatore). Complessivamente, quattro scenari di domanda (UNIF e t_0 , UNIF e t_{rand} , VAR e t_0 e VAR e t_{rand}) sono stati considerati come forzante del modello di simulazione del comportamento dinamico della rete. I risultati ottenuti dalla simulazione dei diversi scenari di domanda sono confrontati con i dati di pressione osservati in campo al fine di identificare l'approccio che consente di riprodurre al meglio il comportamento del sistema. Questo confronto è effettuato in un contesto stocastico, ovvero in termini di parametri statistici (media μ (m), varianza σ^2 (m²), valore minimo min (m) e massimo max (m)) delle distribuzioni delle pressioni.

2.2 Il caso studio e i dati di campo

L'approccio è applicato alla rete che serve il centro urbano di Gorino Ferrarese (Ferrara). La rete è connessa da una singola condotta di adduzione alla rete che serve il centro urbano di Goro, posizionato circa 6 km a monte. I sistemi di Goro e Gorino Ferrarese sono entrambi alimentati da un serbatoio e da una stazione di pompaggio posizionati a monte di Goro. Le condotte della rete di Gorino Ferrarese si sviluppano per una lunghezza totale di circa 9.5 km e hanno diametri variabili tra 60 mm e 160 mm. I materiali costituenti le tubazioni sono prevalentemente PVC e, in minor misura, fibrocemento. La rete serve circa 300 utenze di tipo domestico e commerciale di piccola scala. Il pattern del consumo idrico totale è di tipo residenziale e varia tra un massimo di circa 3 L/s nelle ore di punta ad un minimo di circa 0.2 L/s nelle ore notturne. La campagna di misure si è svolta nel gennaio 2018 per una durata di due giorni utilizzando tre sensori associati a *data logger* per l'acquisizione simultanea della pressione (con una frequenza di campionamento di 100 Hz) installati in tre punti strategici della rete, indicati con P1, P2 and P3 (Figura 1a). In particolare, P1 e P2 sono posizionati all'interno del centro urbano, caratterizzato da un numero rilevante di utenze, mentre P3 si trova sulla condotta di adduzione proveniente da Goro a circa 800 m a monte rispetto alla porzione magliata della rete che serve il nucleo di Gorino Ferrarese. In aggiunta, per l'intera durata della campagna di misure, sono state monitorate: (i) la pressione e la portata in corrispondenza della sezione a valle della stazione di pompaggio a passo di 15 minuti (acquisite dal sistema di telecontrollo del gestore della rete), (ii) e il consumo idrico delle utenze di Gorino Ferrarese con passo del minuto attraverso *smart meter* magnetici installati in corrispondenza di ciascuna utenza e georeferenziati nel modello idraulico della rete.

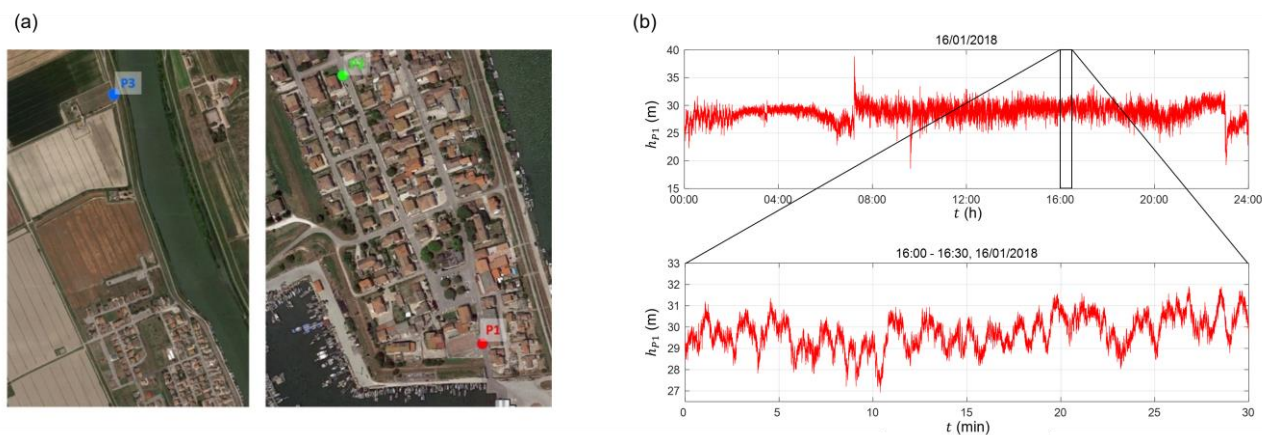


Figura 1. Monitoraggio della rete di Gorino Ferrarese: (a) posizione delle sezioni di misura della pressione nella rete e (b) serie storica delle pressioni osservate in corrispondenza della sezione di misura P1 con riferimento all'intera giornata del 16/01/2018 e ad una finestra temporale di 30 minuti (16:00-16:30, 16/01/2018).

Dall'analisi dei segnali osservati in campo in corrispondenza delle tre sezioni di misura, è evidente come durante il giorno l'andamento della pressione non sia stazionario (Figura 1b). Si possono osservare sia lunghe oscillazioni (con periodi superiori al minuto) sia fluttuazioni molto brevi (con periodi inferiori al secondo) che portano i valori di pressione a variare in una banda di circa 4 m. Da un lato, è possibile riscontrare una buona corrispondenza delle oscillazioni di lungo termine in tutte e tre le sezioni di misura. Tale circostanza sembra indicare che l'intera rete presenti un comportamento comune nel lungo termine, probabilmente legato alle proprie caratteristiche geometriche e meccaniche. Dall'altro, le fluttuazioni con periodi inferiori al secondo, pur essendo presenti in tutti i punti della rete, variano in ampiezza in base dall'attività dell'utenza nei pressi della sezione di misura. Ciò è confermato dal fatto che le sezioni situate nel centro urbano (P1 e P2) presentano un segnale di pressione più reattivo rispetto a quella sulla linea di adduzione (P3).

Ai fini dell'applicazione dell'approccio proposto alla rete di Gorino Ferrarese, si è assunta una finestra di simulazione pari a 600 s e come condizione al contorno di monte si è posta la stazione di pompaggio che alimenta le reti di Goro e Gorino Ferrarese.

3 RISULTATI E DISCUSSIONE

Per brevità, sono discussi nel seguito i risultati dell'applicazione dell'approccio con riferimento alla sezione di misura P1, ma considerazioni analoghe possono essere fatte per le altre due sezioni di misura P2 e P3. Con riferimento ai parametri statistici, il valore medio, μ , del segnale osservato (29.14 m) viene efficacemente colto da tutti e quattro gli approcci di caratterizzazione della domanda che mostrano scostamenti limitati (± 0.01 m). L'approccio UNIF determina una varianza, σ^2 , dei segnali di pressione più contenuta rispetto a quella osservata (0.48 m^2), mentre quest'ultima viene ripresa efficacemente dalla domanda VAR ($\sigma^2 = 0.56 \text{ m}^2$ per t_0 e $\sigma^2 = 0.56 \text{ m}^2$ per t_{rand}). Ciò è confermato anche dal confronto delle distribuzioni cumulate (DC) di frequenza del segnale osservato e dei segnali simulati a fronte dei quattro scenari di domanda (Figura 2a). Da tale esame emerge che le DC relative alle simulazioni con approccio UNIF presentano un andamento che si scosta significativamente da quello dei dati osservati, soprattutto per la minor variabilità, mentre quelle relative alla domanda VAR meglio riprendono la distribuzione dei valori di pressione osservati. L'analisi dei valori minimi, min , e dei massimi, max , evidenzia che la domanda VAR associata a variazioni di consumo istantanee (t_0) produce picchi molto significativi e irrealistici che tendono a ridursi ed assumere valori più vicini agli osservati quando si considerano variazioni di domanda più gradualmente (t_{rand}). Alla luce di questi risultati, l'approccio di modellazione della domanda più efficace nel riprodurre il comportamento dinamico della rete è quello che prevede una caratterizzazione della domanda a impulsi (VAR) con manovre gradualmente (t_{rand}). Bisogna sottolineare che la domanda VAR è frutto di una rielaborazione realistica dei dati di consumo sulla base di serie storiche e, di conseguenza, la sua definizione non è unica. Per investigare l'effetto della non

univocità della domanda VAR, nelle Figure 2b e 2c è riportato il confronto tra il segnale osservato e quelli simulati a fronte di due versioni della domanda VAR (i.e. VAR_A e VAR_B), assumendo tempi di manovra gradualmente (t_{rand}). Tale elaborazione evidenzia che, per quanto i segnali di pressione simulati a fronte della domanda VAR_B (Figura 2c) mostrino picchi e oscillazioni leggermente diversi rispetto alla simulazione con la domanda VAR_A (Figura 2b), anche la seconda versione della domanda VAR_B riesce a cogliere in modo efficace i parametri statistici del segnale osservato confermando l'approccio VAR e t_{rand} come il più adatto per riprodurre il comportamento dinamico di una rete di distribuzione soggetta all'attività dell'utenza.

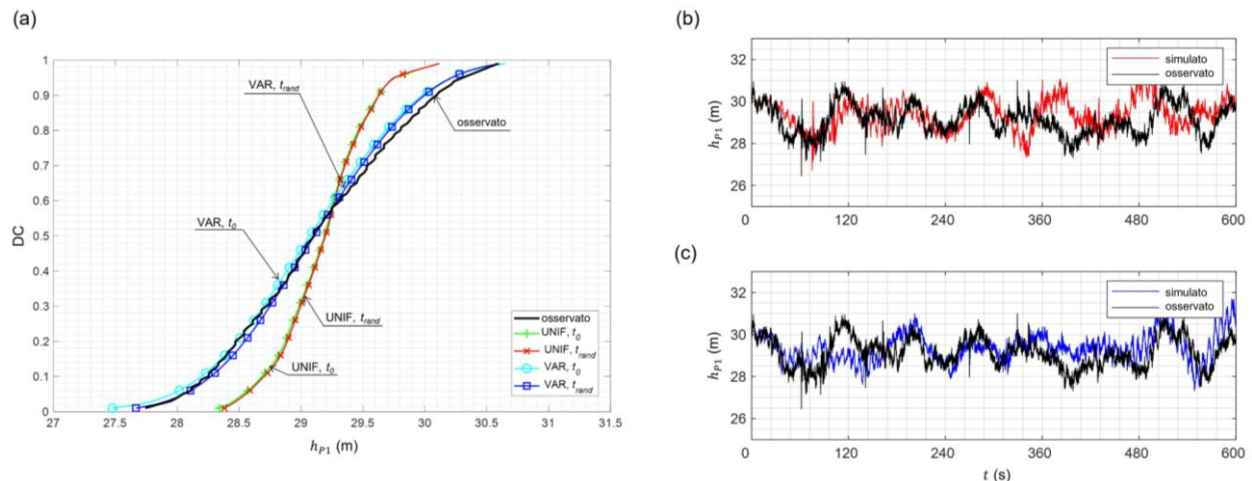


Figura 2. Approccio stocastico per la simulazione dei transitori: (a) distribuzione cumulata (DC) della pressione osservata e simulata a fronte dei diversi scenari di domanda nella sezione P1; (b) e (c) confronto tra le pressioni osservate (segnale nero) e simulate per due versioni della domanda ricostruita realisticamente, ovvero VAR_A (t_{rand}) e VAR_B (t_{rand}).

4 CONCLUSIONI

Le reti di distribuzione, tradizionalmente modellate, progettate e gestite in condizioni stazionarie, sono in realtà soggette a fenomeni di moto vario nel loro funzionamento ordinario. Questo studio presenta un approccio stocastico per la modellazione in moto vario delle reti di distribuzione sottoposte ad attività dell'utenza che consente di ottenere informazioni utili sul comportamento dinamico del sistema. L'approccio è stato applicato ad una rete reale, quella a servizio di Gorino Ferrarese (Ferrara), e validato sulla base dei dati di pressione acquisiti ad alta frequenza (i.e. 100 Hz) in tre sezioni della rete. Dallo studio sono emerse le seguenti considerazioni: (i) una rielaborazione realistica della domanda di ogni utente permette di ottenere segnali di pressione simulati che riproducono efficacemente, da un punto di vista stocastico, quello osservato; (ii) per cogliere l'ampiezza dei picchi di pressione, i tempi di manovra che caratterizzano le variazioni iniziali e finali delle celle di consumo devono essere associati a valori realistici della durata della manovra, dell'ordine cioè di una frazione di secondo, in linea con quelli dei dispositivi sanitari domestici, escludendo così le manovre istantanee.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Bohorquez, J., Lambert, M.F. & Simpson A.R. Identifying head accumulation due to transient wave superposition in pipelines Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 146 (1), 04019044
- Davis, A. L. Hydraulic Transients in Distribution Systems. Proc., World Water and Envir. Res. Congress, Orlando, Florida, 2001.
- Jung, B. S. & Karney, B. A practical overview of unsteady pipe flow modeling: from physics to numerical solutions. Urban Water Journal, 2017, 14(5), 502–508.
- Marsili V., Meniconi, S., Alvisi, S., Brunone, B. & Franchini, M. Experimental analysis of the water consumption effect on the dynamic behaviour of a real pipe network. Journal of Hydraulic Research, 2020, 59(3), 477–487.
- Meniconi, S., Maietta, F., Alvisi, S., Capponi, C., Marsili, V., Franchini, M., & Brunone, B. (2022). Consumption change-induced transients in a water distribution network: Laboratory tests in a looped system. Water Resources Research, 58, e2021WR031343.
- Wylie, E. B. & Streeter, V. L. Fluid transients in systems. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1993.