

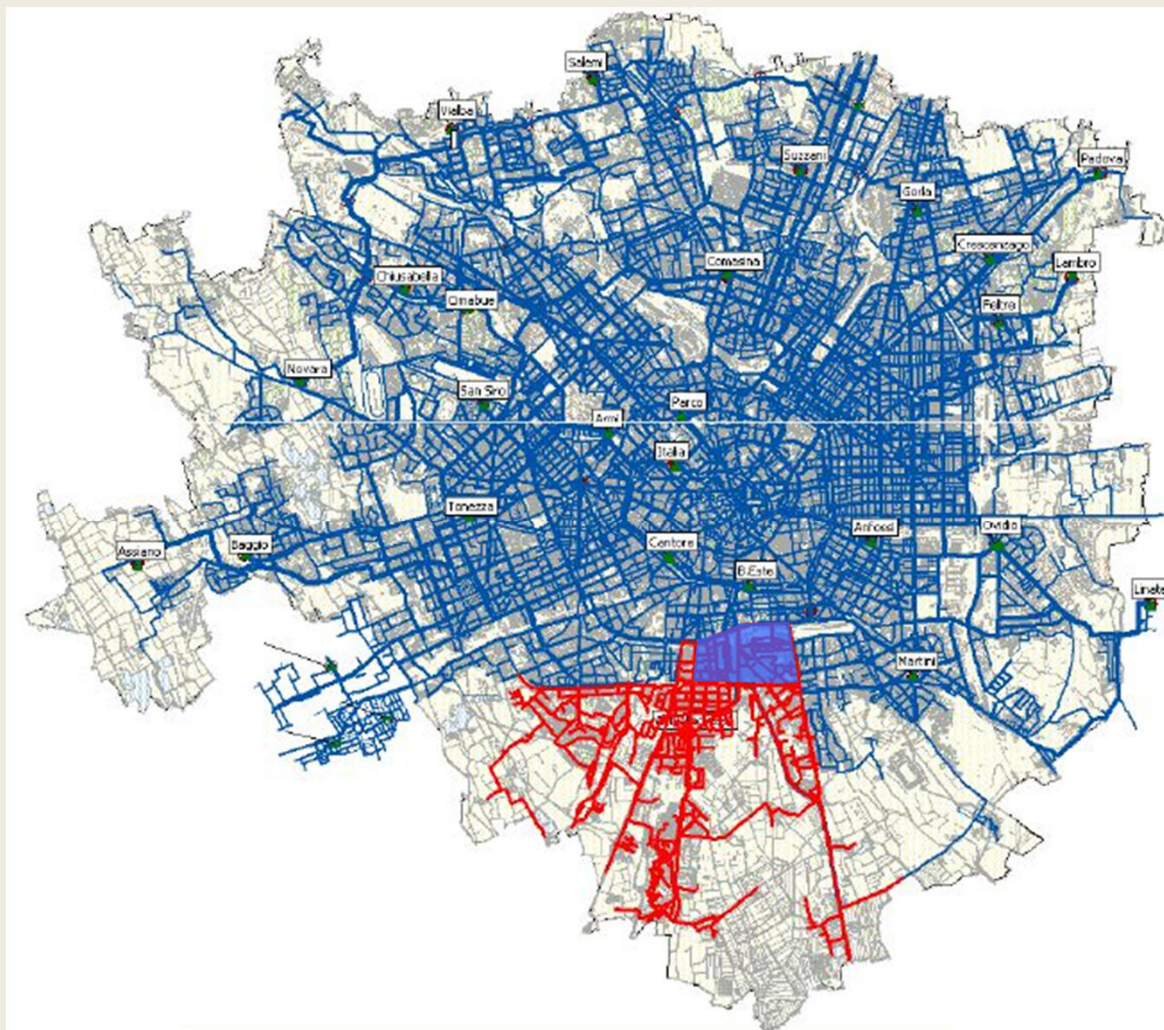


La gestione della pressione come strumento per migliorare l'efficienza energetica e ridurre le perdite in una rete idrica

Marco Franchini (1), Carlo Alessandro Carrettini (2), Carlo Chiesa (2)
(1) Università degli Studi di Ferrara, (2) Metropolitana Milanese

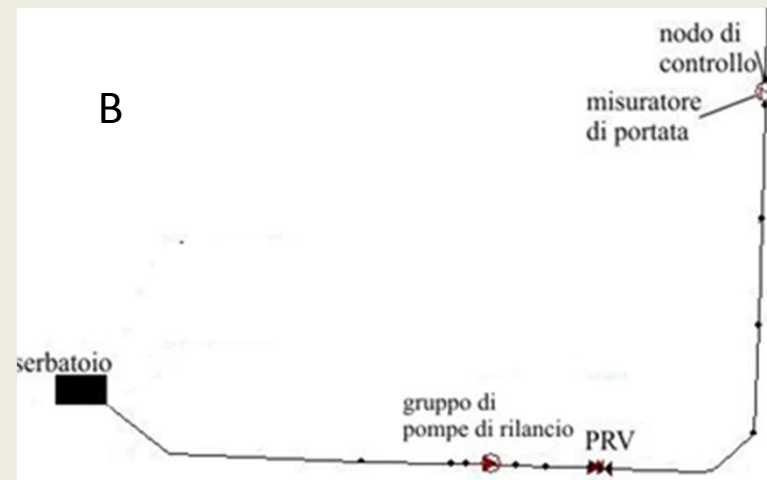
La tematica

Il controllo della pressione finalizzato al risparmio energetico e alla riduzione delle perdite: l'esperienza del distretto di Abbiategrasso (Milano)





Questo distretto è alimentato dalla centrale Abbiategrasso comprendente un gruppo di tre pompe, che solleva acqua da un serbatoio a terra che a sua volta la riceve, sempre mediante sollevamento, da un sistema di pozzi ubicato in prossimità della centrale. Attualmente il sistema di pozzi fornisce una portata media nelle 24 ore di 350 l/s, pressoché pari alla domanda media giornaliera del distretto identificato: ciò consente di non stressare eccessivamente la falda a cui attingono gli stessi pozzi.



A) Schema della rete del distretto e collocazione del gruppo di pompe di rilancio e del nodo critico in termini di carico di pressione (pressione minima); B) rappresentazione schematica del serbatoio a terra, del gruppo di pompe di rilancio, della valvola PRV di regolazione della pressione e del nodo di controllo in termini di carico di pressione.

I problemi affrontati nello studio del distretto sono:

- O caratterizzazione di domande e perdite in funzione della pressione;
- O ottimizzazione energetica ed economica del funzionamento delle pompe che attingono al campo pozzi del distretto;
- O valutazione del risparmio energetico delle pompe di rilancio a valle del serbatoio di Abbiategrasso in relazione al contenimento della pressione (pompe di rilancio a numero di giri variabile).

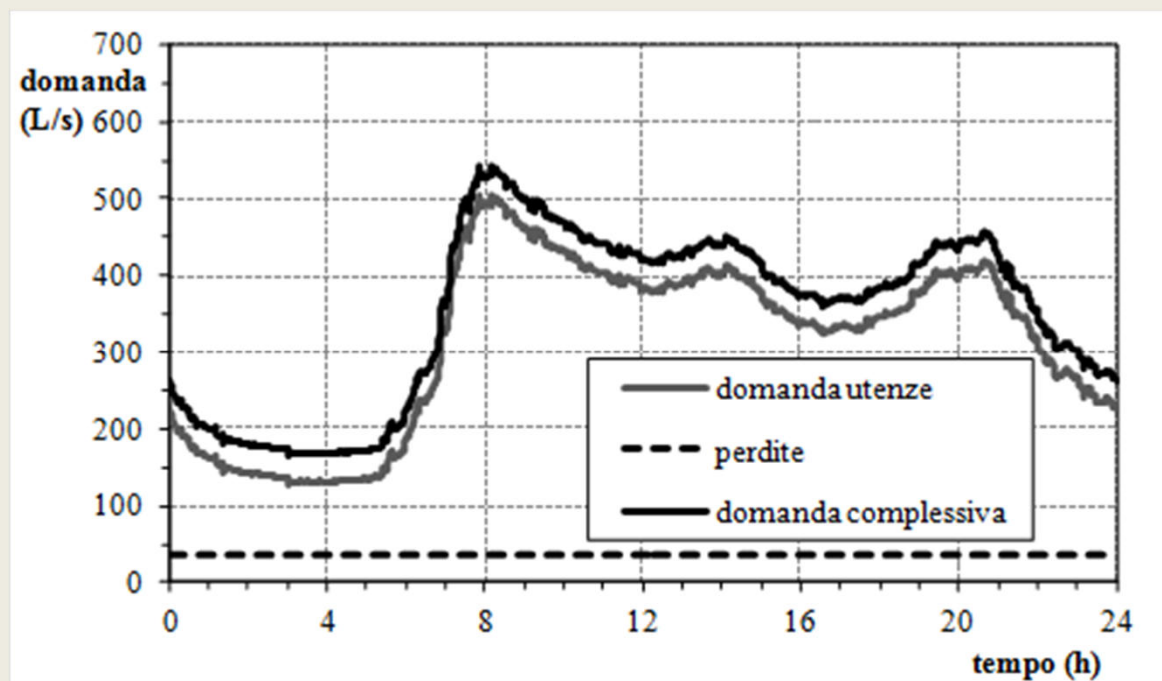
Legame fra portata D effettivamente erogata all'utenza quando c'è una pressione h nel nodo di interesse.

$$D / D_{rif} = \left(h / h_{rif} \right)^{N_3}$$

D_{rif} portata effettivamente erogata quando nel nodo c'è una pressione h_{rif} .

Caratterizzazione della domanda attuale

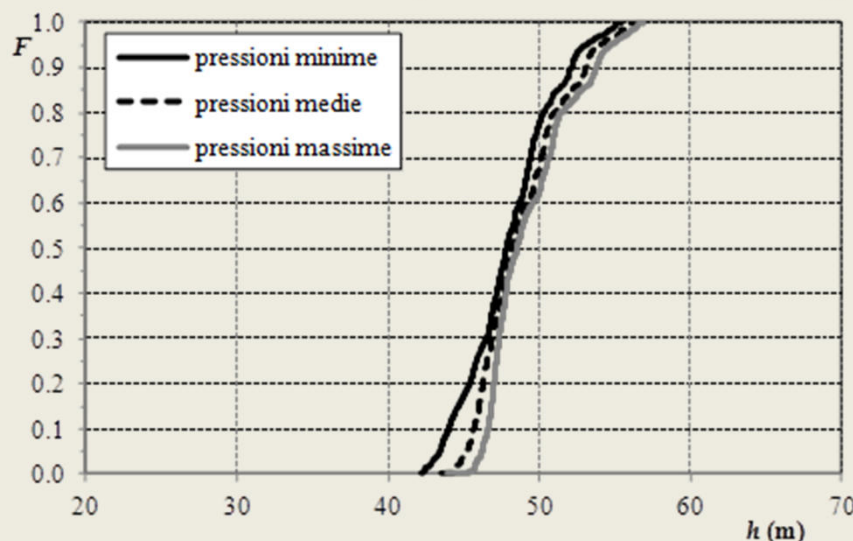
La domanda complessiva media nelle 24 ore del distretto, pari a 352 l/s, comprende 315 l/s di domanda media delle utenze e 37 l/s di perdite (volume giornaliero = $3.21 \times 10^3 \text{ m}^3$, pari a 10.5 % dell'erogazione totale). Nella figura si riporta l'andamento della domanda delle utenze, delle perdite (inizialmente ipotizzate costanti e attribuite ai vari nodi in modo proporzionale alla lunghezza dei tronchi che vi convergono) e della domanda complessiva del distretto di interesse nel giorno di riferimento (18 novembre 2009).



Caratterizzazione di domande e perdite in funzione della pressione

Simulazione 1a (di riferimento): riprodurre il cielo piezometrico nel distretto compatibile con quello osservabile quando il distretto è parte integrante dell'intera rete (situazione per la quale sono disponibili le domande e le perdite)

- Simulazione *demand-driven* fatta ipotizzando un carico di pressione fisso nel nodo di controllo (a monte dell'intera rete) pari a 48,28 m che è il carico di pressione mediamente osservato nel giorno di riferimento 18 novembre 2009 (distretto unito al resto della rete);
- Domande ai nodi variabili nell'arco della giornata (in accordo alla giornata di riferimento) ma indipendenti dalla pressione; Le perdite costanti nella giornata ma variabili da nodo.
- Stima del carico di pressione media in ogni nodo.



Distribuzione di frequenza F dei carichi h di pressione in tre diversi momenti della giornata (ora di massimo consumo: ore 8.00 – pressione minima; ora di medio consumo: ore 6.30 – pressioni medie; ora di minimo consumo: ore 4.00 – pressioni massime) ottenuti nelle simulazioni 1a e 1b (praticamente fra loro coincidenti), condotte imponendo un carico di pressione pari a 48.28 m nel serbatoio fittizio preposto all'alimentazione del distretto.

Caratterizzazione di **domande** e perdite in funzione della pressione

All'interno del modello, con l'obiettivo di legare l'erogazione D al nodo generico al carico h di pressione al nodo nel generico istante di simulazione, si può utilizzare la seguente relazione:

$$\frac{D}{D_{rif}} = Ca + (1 - Ca) \times \left[\left(\frac{h}{h_{rif}} \right)^{N_3} \right]$$

dove h_{rif} è il carico di pressione di riferimento, media temporale dei carichi di pressione osservati nello stesso nodo nella simulazione 1a. D_{rif} è la domanda di riferimento (variabile nel tempo) allocata allo stesso nodo nella simulazione 1a. Questa equazione riferita al generico nodo in cui convergono più utenze, consente di tenere conto della frazione Ca di utenze munite di autoclave, per le quali $D/D_{rif}=1$ visto che esse non vedono mutare il proprio consumo al variare della pressione di servizio, e della frazione $1-Ca$ di utenze sprovviste di autoclave, per le quali vale la relazione:

$$D / D_{rif} = \left(h / h_{rif} \right)^{N_3}$$

Caratterizzazione di **domande** e perdite in funzione della pressione

L'esponente N_3 della precedente formula può essere calcolato mediante la seguente media pesata, al fine di considerare la ripartizione dei consumi in consumi interni (sciacquone, lavatrice, ecc.), modestamente influenzati dalla pressione, e consumi esterni, fortemente dipendenti dalla pressione:

$$N_3 = IC \times N_{3i} + OC \times N_{3o}$$

dove IC e OC rappresentano le frazioni delle due diverse tipologie di consumo e N_{3i} e N_{3o} gli esponenti ad esse associati.

Nel caso del distretto di Abbiategrasso, successivamente ad indagini di campo, è stata riscontrata una frazione Ca di utenze munite di autoclave pari a 0.65. Considerando nell'equazione soprastante valori caratteristici di N_{3i} e N_{3o} rispettivamente pari a 0.04 e 0.45 e frazioni IC e OC rispettivamente pari a 0.95 e 0.05, si ottiene un valore dell'esponente N_3 pari a 0.0605.

Caratterizzazione di domande e perdite in funzione della pressione

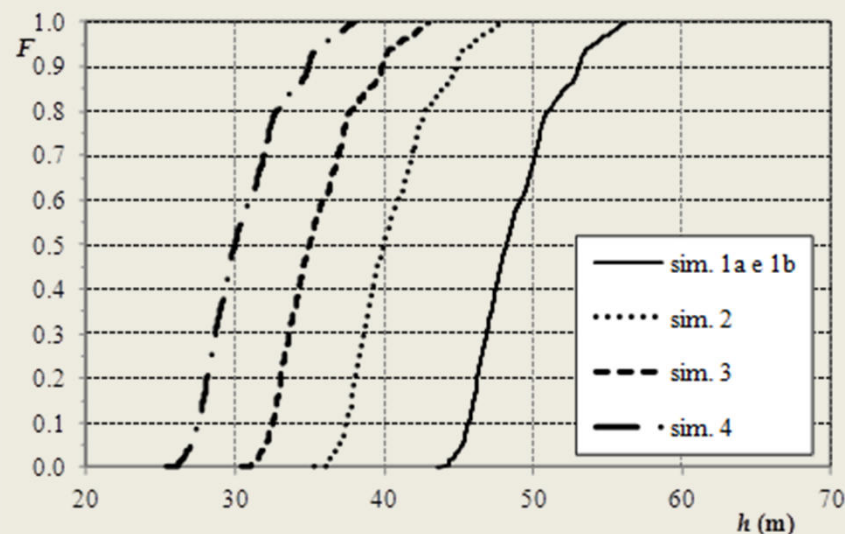
La portata persa Q_L al generico nodo è stata valutata mediante la seguente relazione:

$$\frac{Q_L}{Q_{L,rif}} = \left(\frac{h}{h_{rif}} \right)^{N_1}$$

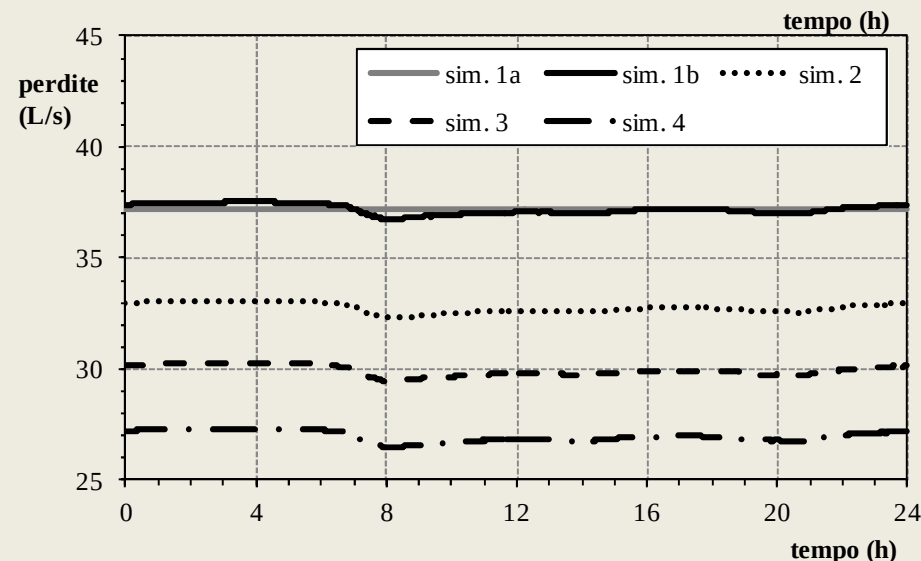
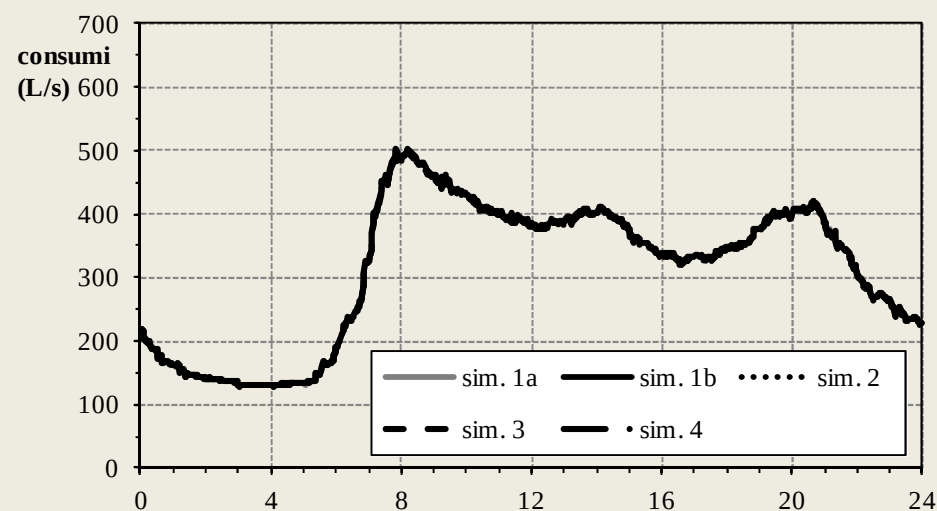
dove $Q_{L,rif}$ è la portata persa (costante) di riferimento allocate allo stesso nodo nella simulazione 1a. L'esponente N_1 della formula è stato posto pari a 0.69, sulla base di una stima in funzione dell'*Infrastructure Leakage Index* (ILI) e alla percentuale di perdite reali sui tubi rigidi dedotta a livello di intera rete.

Simulazione 1b. Stesse condizioni al contorno: carico a 48,22 m nel nodo di controllo.

Simulazioni 1a e 1b



I risultati sono praticamente coincidenti in termini di pressione ai nodi e consumi totali con quelli della simulazione 1a. Per quanto riguarda le perdite si osserva invece una chiara oscillazione attorno ai valori costanti assunti nella simulazione 1a.



Si è dunque parametrizzato il modello in modo da poter eseguire una simulazione pressure-driven capace di riprodurre il cielo piezometrico nelle diverse fasi del giorno compatibile con quello del giorno di riferimento. A questo punto è possibile indagare l'effetto della pressione sulla domanda e sulle perdite.

Effetto della pressione su domanda e perdite

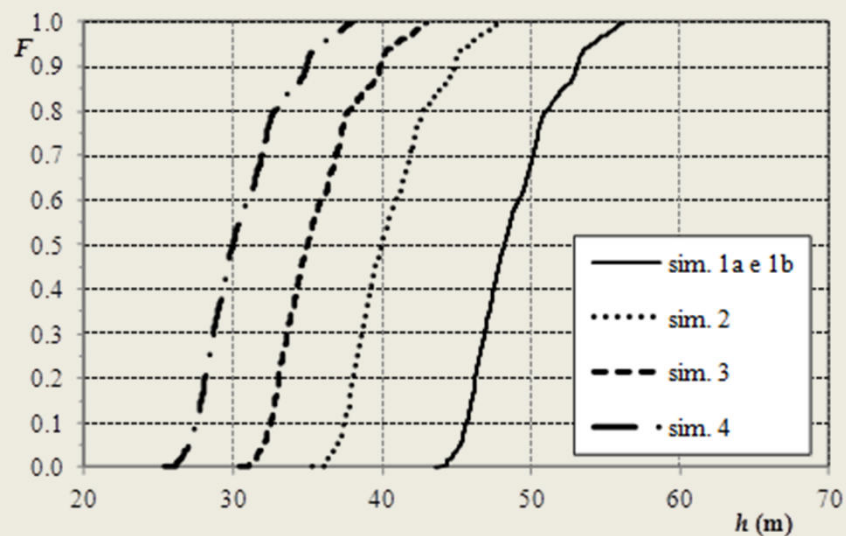
Simulazioni 2, 3 e 4. Eseguite con modalità *pressure-driven* imponendo il carico nel nodo di controllo in modo da avere nella rete i seguenti valori di pressione media: 40 m, 35 m e 30 m. Non sono stati considerati valori più bassi del carico al serbatoio fittizio e della pressione media in rete perché il funzionamento con carico medio di pressione pari a 30 m porta ad avere al nodo critico della rete un carico di pressione minimo pari a 24.19 m, valore di poco superiore alla soglia minima di 22 m prefissata dall'ATO.

Nella seguente Tabella si riportano i valori di pressione media nel distretto e di domanda complessiva, consumo delle utenze e perdite, ottenuti nelle simulazioni 2, 3 e 4, a confronto con i valori corrispondenti delle simulazioni 1a e 1b (praticamente coincidenti tra di loro).

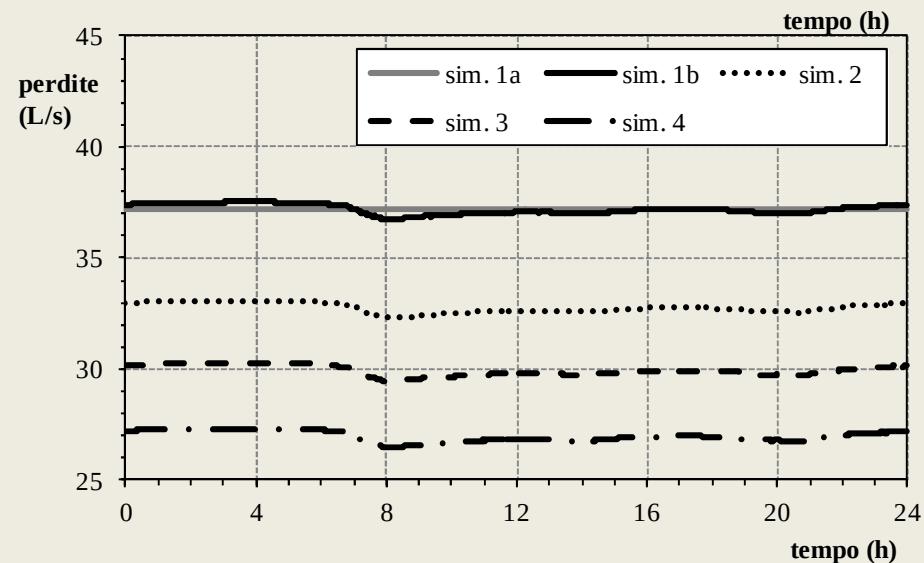
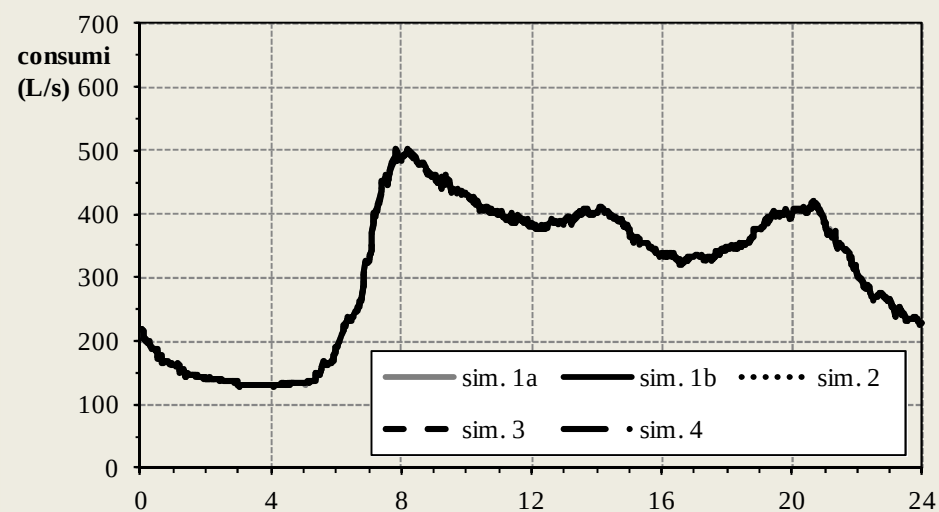
Simulazione	pressione nel serbatoio fittizio	pressione media nel distretto	Domanda media complessiva	Consumo medio utenze	Perdite medie (l/s)
	(m)	(m)	(l/s)	(l/s)	(l/s)
1a e 1b	48.28	48.23	352	315	37
2	40.04	40	346	313	33
3	35.04	35	343	313	30
4	30.04	30	339	312	27

L'analisi dei dati in tabella mostra che riducendo la pressione media nel distretto di 18.23 m, il consumo delle utenze si riduce in modo poco significativo (attorno all'1%); la riduzione percentuale delle perdite è invece più evidente (dell'ordine del 27%). La bassa riduzione dei consumi all'abbassarsi della pressione è dovuta all'alta percentuale di utenti che usufruiscono di autoclave e della bassa percentuale di consumi esterni.

Simulazioni 2, 3 e 4



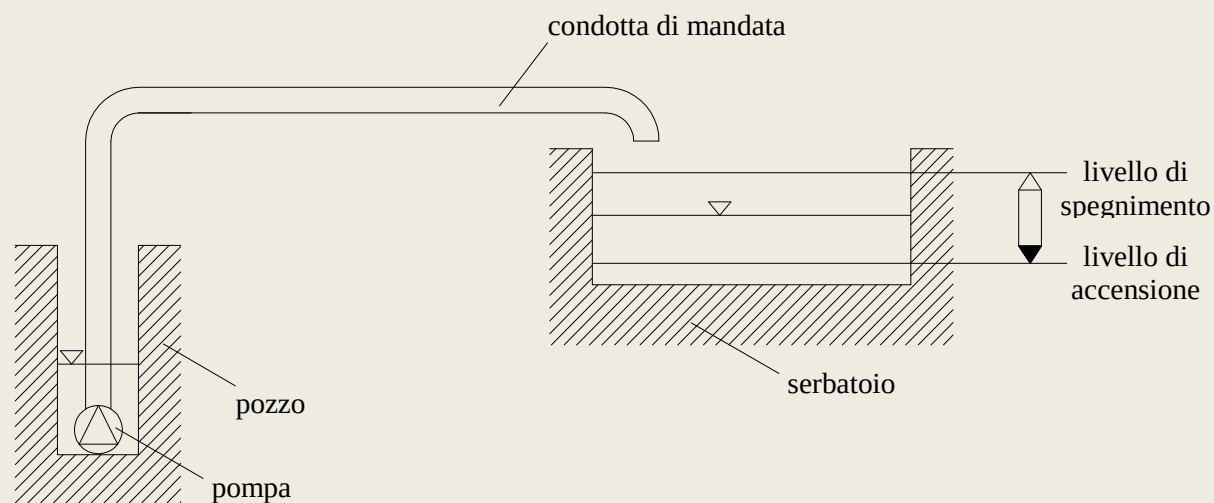
Distribuzione di frequenza F dei carichi h di pressione medi giornalieri nel distretto, ottenuti nelle simulazioni 2, 3 e 4



Andamento delle perdite complessive di distretto nelle 24 ore nelle simulazioni 2, 3 e 4.

Ottimizzazione dei pompaggi dal sistema di pozzi che alimentano il serbatoio di Abbiategrasso

La procedura di ottimizzazione adottata ha permesso di giungere alla definizione delle modalità migliori di attacco-stacco delle pompe appartenenti al sistema di pozzi che alimentano il serbatoio a servizio del distretto di Abbiategrasso. Il criterio seguito è quello di minimizzare i costi complessivi di pompaggio e al contempo di mantenere un adeguato tirante di acqua in modo da assicurare il pescaggio alle pompe di rilancio. L'algoritmo di ottimizzazione utilizzato è NSGAI.



Ottimizzazione dei pompaggi dal sistema di pozzi che alimentano il serbatoio di Abbiategrasso

Sono state effettuate quattro ottimizzazioni; la prima è stata condotta considerando, come idrogramma di portata uscente dal serbatoio, l'andamento della domanda complessiva nel distretto della simulazione 1a, praticamente coincidente a quello della simulazione 1b, condotta considerando una pressione media di esercizio nel distretto pari a 48.23 m; le altre tre ottimizzazioni sono state effettuate considerando gli andamenti della domanda complessiva rilevati nelle simulazioni 2, 3 e 4, condotte considerando valori della pressione media di esercizio nel distretto rispettivamente pari a 40 m, 35 m e 30 m. In ognuna delle ottimizzazioni, il periodo di simulazione considerato è di 8 giorni per raggiungere la ciclicità.

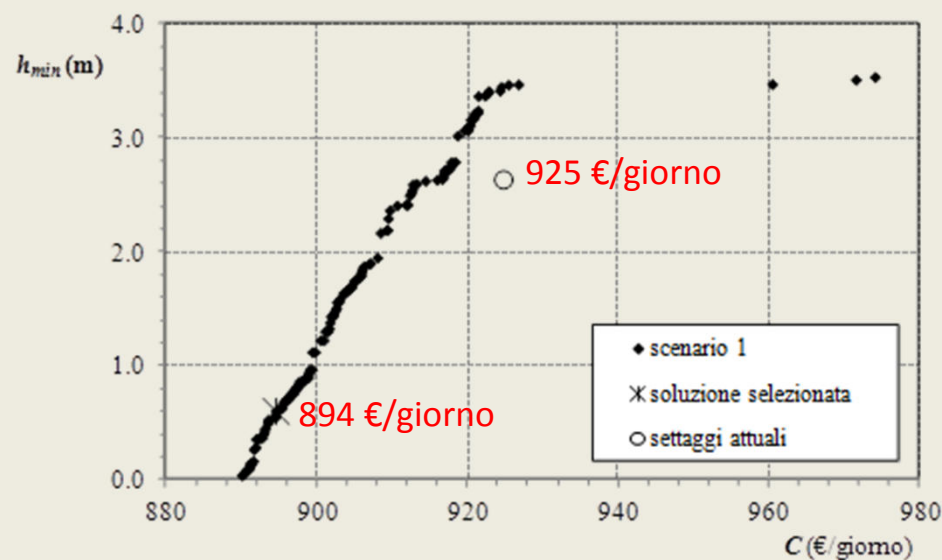
Portata Q singola pompa: 30 l/s. Potenza consumata per m ³ : 0.20 kW		
Fascia oraria	Orario	Costo unitario (€/kWh)
F1	8.00-19.00	0.1571
F2	7.00-8.00; 19.00-23.00	0.1612
F3	23.00-7.00	0.1252

Ottimizzazione dei pompaggi dal sistema di pozzi che alimentano il serbatoio di Abbiategrasso

In fase di ottimizzazione, è stato considerato un unico scenario di funzionamento del sistema di pompaggio caratterizzato dall'accorpamento delle 17 pompe in 5 gruppi composti rispettivamente da 4, 4, 3, 3 e 3 pompe (come peraltro funziona il sistema attualmente), visto che ottimizzazioni preliminari avevano dimostrato che l'ulteriore suddivisione dei gruppi di pompe non porta ad evidenti benefici.

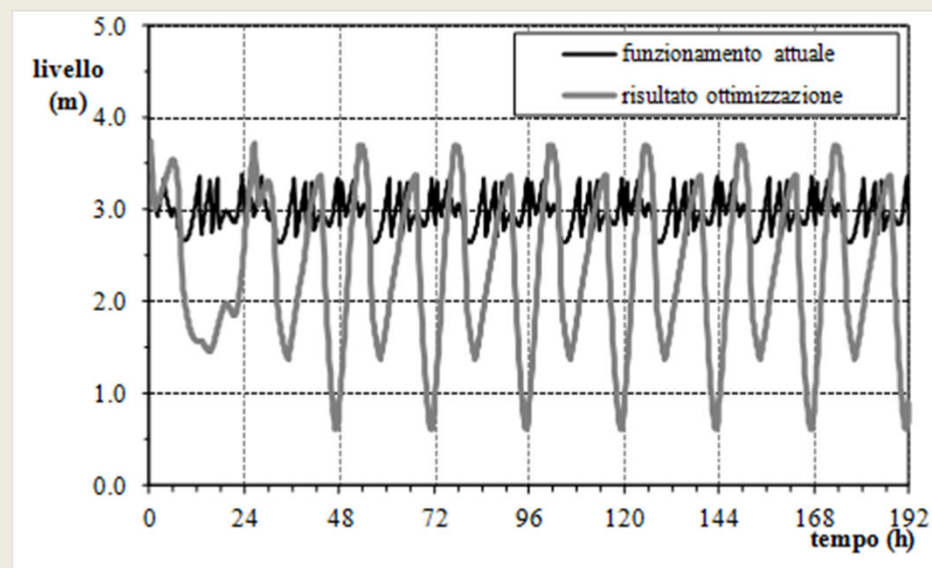
In fase di ottimizzazione, è stato adottato il vincolo in base a cui, per ogni gruppo di pompe, la distanza tra il settaggio di spegnimento e quello di accensione dovesse essere non inferiore a 0.20 m, per evitare che a causa di piccole oscillazioni del livello nel serbatoio o di errori dovuti all'imprecisione dello strumento di misura del livello il sistema possa essere esposto ad accensioni e spegnimenti eccessivamente ravvicinati o incontrollati.

Ottimizzazione dei pompaggi dal sistema di pozzi che alimentano il serbatoio di Abbiategrasso



Ottimizzazione 1 - risultati in termini di fronte di Pareto nello spazio costo C -livello minimo nel serbatoio (rispetto al fondo) h_{min} nello scenario 1. Soluzione selezionata e condizione di funzionamento basata sui settaggi attuali: differenza 31 €/giorno.

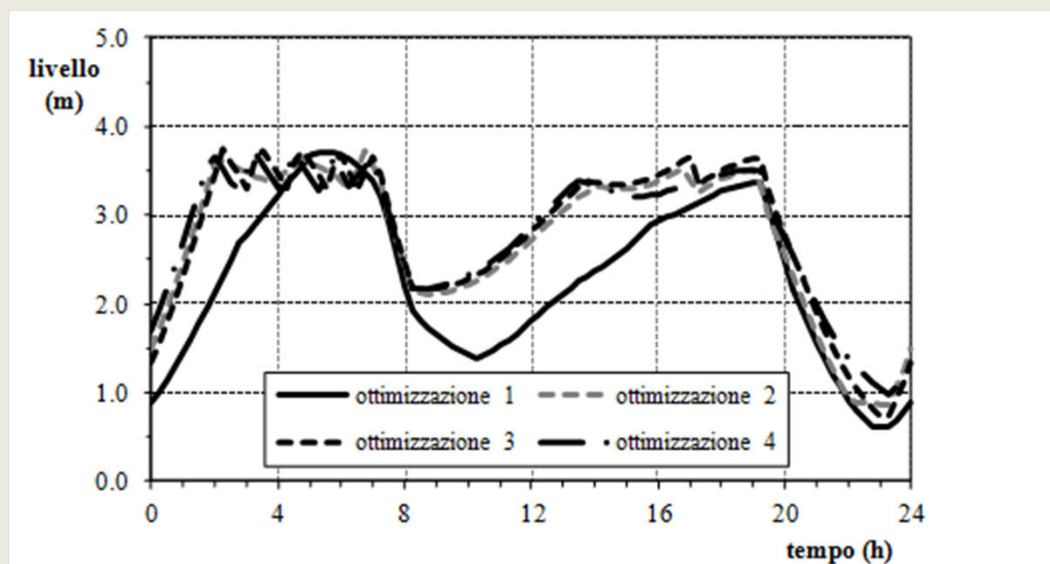
Ottimizzazione dei pompaggi dal sistema di pozzi che alimentano il serbatoio di Abbiategrasso



Risultati dell'ottimizzazione 1 - andamento del livello nel serbatoio rispetto al suo fondo nei 7 giorni consecutivi di simulazione per la soluzione ottimale prescelta e per la condizione di funzionamento basata sui settaggi attuali. La capacità del serbatoio viene sfruttata meglio con il settaggio nuovo.

Ottimizzazione dei pompaggi dal sistema di pozzi che alimentano il serbatoio di Abbiategrasso

Anche per le ottimizzazioni 2, 3 e 4, condotte considerando come portata uscente dal serbatoio la domanda complessiva nel distretto nel caso di pressione di esercizio rispettivamente pari a 40 m, 35 m e 30 m, sono state scelte soluzioni caratterizzate da valori di h_{min} vicine a 0.60 m. Per tali soluzioni, si riportano i risultati in termini di andamento del livello nel serbatoio nell'ultimo degli 8 giorni di funzionamento.



Risultati delle ottimizzazioni 1, 2, 3, 4 con riferimento all'ultimo giorno di simulazione, andamento del livello (rispetto al fondo del serbatoio).

Ottimizzazione dei pompaggi dal sistema di pozzi che alimentano il serbatoio di Abbiategrasso

Risultati delle ottimizzazioni 1, 2, 3, 4. Per ogni ottimizzazione, simulazione di riferimento e relativa pressione media nel distretto, costo C dei pompaggi dal campo pozzi e livello minimo h_{min} garantito nel serbatoio.

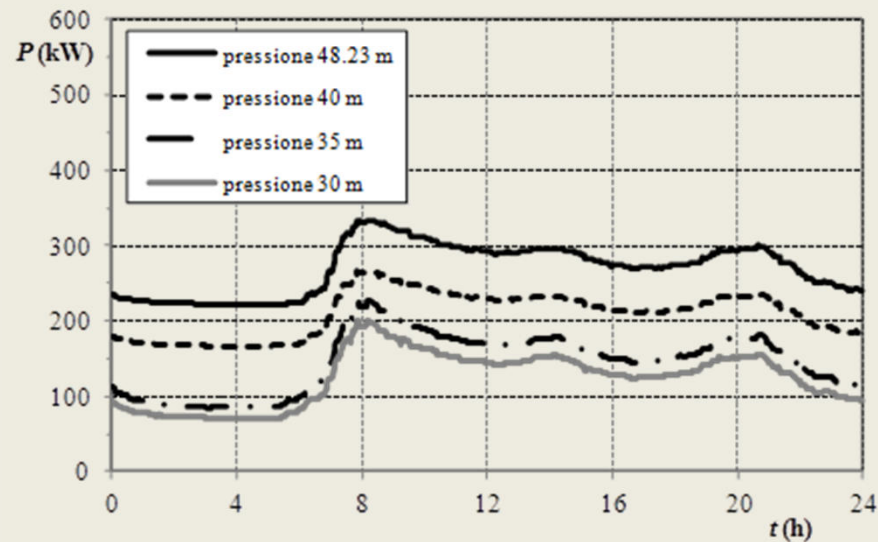
ottimizzazione	simulazione di riferimento	pressione media nel distretto (m)	C (€/giorno)	h_{min} (m)
1	1	48.23	894	0.61
2	2	40	882	0.87
3	3	35	870	0.71
4	4	30	860	0.97

Differenza fra il costo giornaliero attuale e quello relativo alla ottimizzazione 4: 35 €/giorno (risparmio su base annua $\cong$ 13000 €/anno)

Valutazione energetica ed economica dei rilanci dal serbatoio di Abbiategrasso

Simulazioni 5, 6, 7, 8

- o Livelli nel serbatoio di pescaggio connessi alle sequenze ottimizzate di attacco-stacco delle pompe del campo pozzi derivate, a loro volta, fissando nel nodo di controllo le pressioni di 48.28 m, 40.04 m, 35.04 m e 30.04 m a cui corrispondono pressioni medie nel distretto pari a 48.23 m (situazione attuale), 40 m, 35 m e 30 m.
- o Due (nuove) pompe di rilancio a numero di giri variabili di tipo KSB 400x50.



Andamento temporale delle potenze elettriche assorbite dal gruppo di rilancio al variare della pressione d'esercizio nel distretto

Valutazione energetica ed economica dei rilanci dal serbatoio di Abbiategrasso

Risultati delle simulazioni 5, 6, 7, 8. Per ogni simulazione, carico di pressione al nodo di controllo, carico di pressione d'esercizio nel distretto e costo dei pompaggi dal serbatoio.

Simulazione	pressione nel nodo di controllo (m)	pressione media nel distretto (m)	costi di pompaggio (€/giorno)
5	48.28	48.23	966
6	40.04	40	752
7	35.04	35	528
8	30.04	30	452

Considerazioni di sintesi sugli aspetti economici

Perdite

Simulazione	pressione nel serb. fittizio (m)	pressione media nel distretto (m)	domanda complessiva (l/s)	consumo utenze (l/s)	perdite (l/s)
1a e 1b	48.28	48.23	352	315	37
2	40.04	40	346	313	33
3	35.04	35	343	313	30
4	30.04	30	339	312	27

Costi pompaggi da campo pozzi

ottimizzazione	simulazione di riferimento	pressione media nel distretto (m)	C (€/giorno)	h_{min} (m)
1	1	48.23	894	0.61
2	2	40	882	0.87
3	3	35	870	0.71
4	4	30	860	0.97

Costo pompaggi di rilancio

Simulazione	pressione nel nodo di controllo (m)	pressione media nel distretto (m)	costi di pompaggio (€/giorno)
5	48.28	48.23	966
6	40.04	40	752
7	35.04	35	528
8	30.04	30	452

Considerazioni di sintesi sugli aspetti economici

Benefici energetici connessi alla riduzione della pressione media in rete

pressione media nel distretto (m)	costo pompe pozzi (€/giorno)	costi pompe rilancio (€/giorno)	spese trattamento (€/giorno)	ricavo (€/giorno)	guadagno (€/giorno)	beneficio (€/anno)
48.23	894	966	152	14128	12116	
40	882	752	150	14073	12289	63145
35	870	528	148	14034	12488	135780
30	860	452	146	13990	12531	151475

Riduzione tasso delle rottture

pressione media nel distretto (m)	riduzione % pressione	riduzione rottture rete/anno	riduzione rottture prese/anno	beneficio (€/anno)
48.23				
40	17	2.4	6.0	21000
35	27	3.8	9.6	33500
30	38	5.3	13.2	46250

Sintetizzando i risultati riportati nelle Tabelle, si osserva che l'abbassamento della pressione d'esercizio (pressione media in rete) dal valore attuale (48.23 m) al valore di 30 m porta ad un abbassamento dei ricavi per il minore consumo di acqua (i ricavi passano da 14128 a 13990 €/anno). A questo abbassamento corrisponde però un beneficio complessivo annuo vicino a 200000 € che discende dalla somma del beneficio conseguente alla riduzione delle rottture/anno (46250 €) con il beneficio derivante dalla minore potenza assorbita da tutte le pompe (151475 €) in ragione della minore prevalenza (abbassamento della pressione media in rete) e della minore portata sollevata (legata quest'ultima alla riduzione delle perdite).

Conclusioni

- Per studiare gli effetti sul consumo e sulle perdite della riduzione della pressione occorre implementare un modello **pressure-driven**;
- Il modello **pressure-driven** deve essere parametrizzato in base all'informazione disponibile sui consumi e sulle condizioni di pressione;
- Il risparmio energetico di sistemi a più pompe si ottiene con procedure di ottimizzazione mirate al minimo costo tenendo conto della struttura tariffaria
- I costi da tenere presente sono quelli connessi agli impianti di pompaggio, del trattamento dell'acqua, delle riparazioni rotture. Fra i benefici, anche se di difficile quantificazione, vi è anche l'allungamento del ciclo di vita dell'intera struttura.

Grazie
per la vostra
attenzione