

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II
Scuola Politecnica e delle Scienze di Base



Dipartimento di ingegneria Civile, Edile e Ambientale
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

**IL PUMP SCHEDULING PER L'OTTIMIZZAZIONE ENERGETICA
DEGLI IMPIANTI ELEVATORI A SERVIZIO DEI SISTEMI
ACQUEDOTTISTICI**

Relatore:

CH.MO PROF. ING. MAURIZIO GIUGNI
CH.MO PROF. ING. FRANCESCO DE PAOLA

Candidato:

PASSARIELLO DOMENICO
N49/636

SOMMARIO

- OBIETTIVO
- PUMP SCHEDULING
- HARMONY SEARCH & EPANET
- CASO STUDIO : IMPOSTAZIONI E CONFIGURAZIONE
- RISULTATI ELABORAZIONI
- CONCLUSIONI

SOMMARIO

- **OBIETTIVO**
- PUMP SCHEDULING
- HARMONY SEARCH & EPANET
- CASO STUDIO : IMPOSTAZIONI E CONFIGURAZIONE
- RISULTATI ELABORAZIONI
- CONCLUSIONI

OBIETTIVO

L'obiettivo, perseguito nel seguente lavoro di tesi, consiste nel ridurre al minimo il costo operativo degli impianti elevatori a servizio di sistemi acquedottistici, garantendo al tempo stesso all'utenza un servizio efficiente e di qualità.

Il tema è stato impostato come un problema di ottimizzazione (Pump Scheduling), risolto tramite l'utilizzo di un algoritmo meta-euristico, noto come Harmony Search Multi-Objective (HSMO), supportato dal simulatore idraulico EPANet 2.0 al fine di verificare il funzionamento del sistema ed il soddisfacimento dei vincoli di natura idraulica prefissati.

SOMMARIO

- OBIETTIVO
- **PUMP SCHEDULING**
- HARMONY SEARCH & EPANET
- CASO STUDIO : IMPOSTAZIONI E CONFIGURAZIONE
- RISULTATI ELABORAZIONI
- CONCLUSIONI

PUMP SCHEDULING

L'obiettivo del Pump Scheduling consiste nel pianificare l'operazione di "N" pompe per un intervallo di tempo prefissato (ad es., 24 ore), in modo tale che i vincoli idraulici del sistema siano soddisfatti, riducendo al minimo il costo operativo totale, che include i costi energetici e di manutenzione dei gruppi di pompaggio. A tal fine le funzioni da minimizzare sono:



COSTO ENERGIA

$$\text{Min } C_T = \sum_{i=1}^{24} C(t) \cdot E(t)$$

Dove:

- C_T Costo totale di energia nelle 24h;
- t Generico intervallo di tempo;
- $C(t)$ Costo unitario durante l'intervallo di tempo t ;
- $E(t)$ Energia utilizzata nell'intervallo di tempo t (funzione del livello nei serbatoi, $H(t)$, della portata $Q_p(t)$ e del rendimento di ciascuna pompa).



NUMERO DI SWITCH

$$\text{Min } TN_{SW} = \sum_{i=1}^{24} N_{SW}(t)$$

Dove:

- TN_{SW} Numero totale di accensioni/spegnimenti delle pompe durante un periodo di 24h;
- $N_{SW}(t)$ Numero di accensioni/spegnimenti della singola pompa nell'intervallo di tempo t .

SOMMARIO

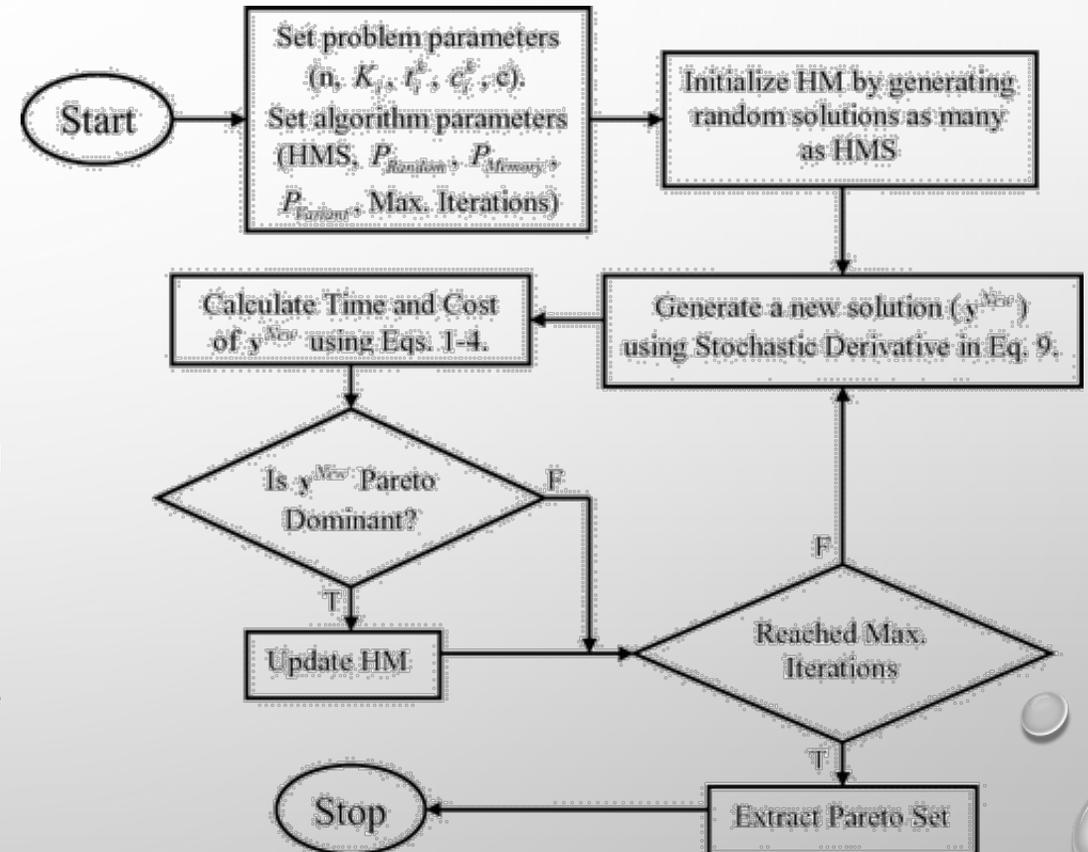
- OBIETTIVO
- PUMP SCHEDULING
- **HARMONY SEARCH & EPANET**
- CASO STUDIO : IMPOSTAZIONI E CONFIGURAZIONE
- RISULTATI ELABORAZIONI
- CONCLUSIONI

HARMONY-SEARCH

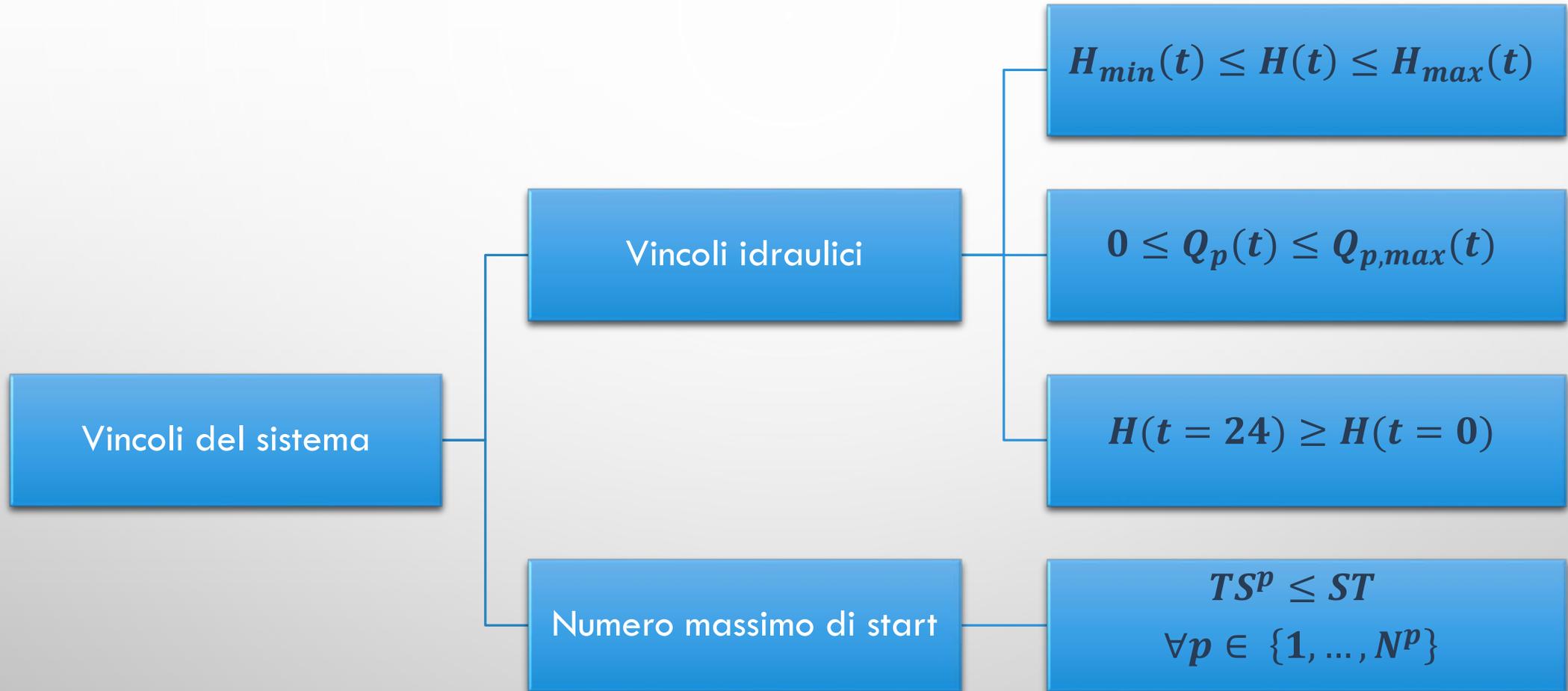
Gli algoritmi meta-euristici sono stati ideati per superare gli inconvenienti degli algoritmi tradizionali. Il metodo Harmony Search (HS) è ispirato al principio musicale jazz del perfetto stato di armonia.

I passi dell'algoritmo HS in dettaglio sono:

1. Formulazione del problema;
2. Impostazione dei parametri dell'algoritmo;
3. Messa a punto per l'inizializzazione della memoria (HM);
4. Improvvisazione armonica (selezione casuale, regolazione del passo);
5. Aggiornamento della memoria;
6. Cadenza (restituisce la migliore armonia mai trovata e memorizzata).



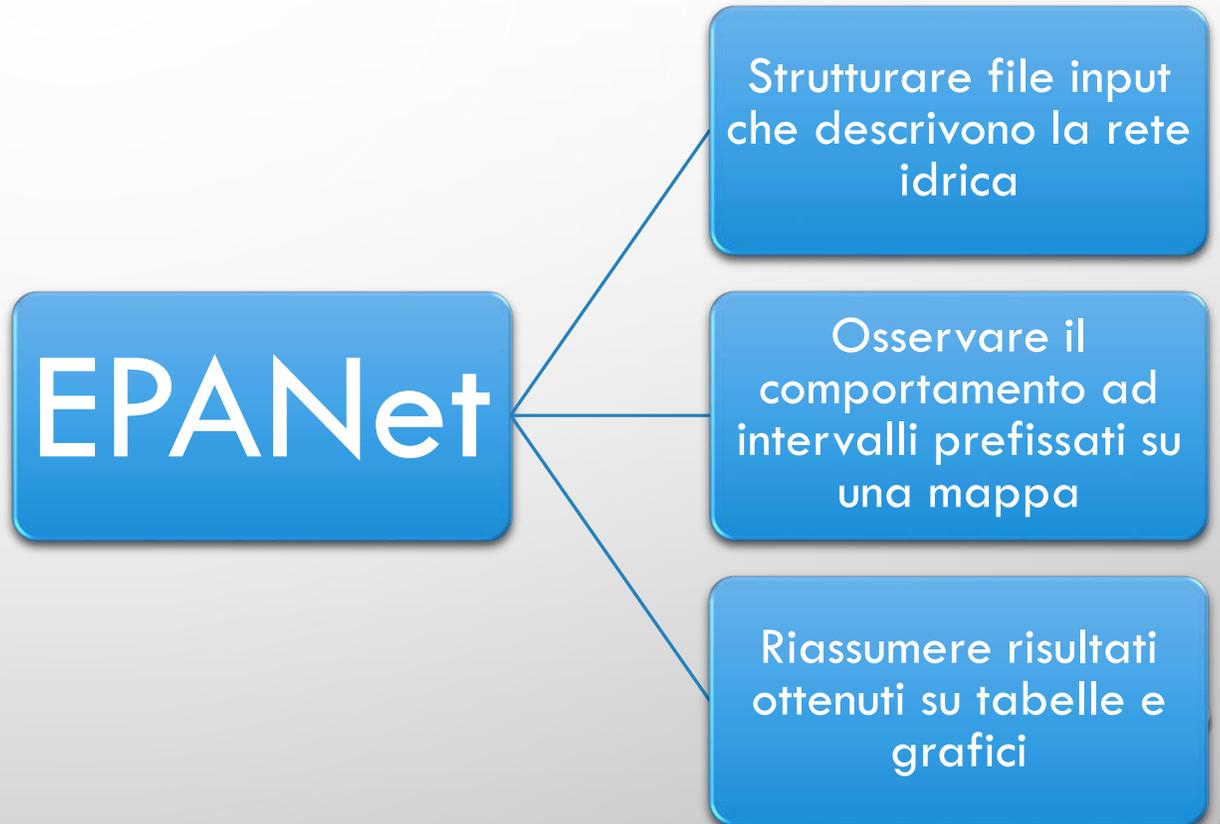
VINCOLI DEL SISTEMA



MODELLO DI SIMULAZIONE IDRAULICA: EPANET

EPANet è un software di simulazione qualitativa dei sistemi di distribuzione idrica, sviluppato dal Water Supply and Water Resources Division dell'Environmental Protection Agency degli Stati Uniti.

Esso permette di realizzare simulazioni estese al lungo periodo relative al funzionamento idraulico del sistema (portata, pressioni, qualità dell'acqua).



SOMMARIO

- OBIETTIVO
- PUMP SCHEDULING
- HARMONY SEARCH & EPANET
- **CASO STUDIO : IMPOSTAZIONI E CONFIGURAZIONE**
- RISULTATI ELABORAZIONI
- CONCLUSIONI

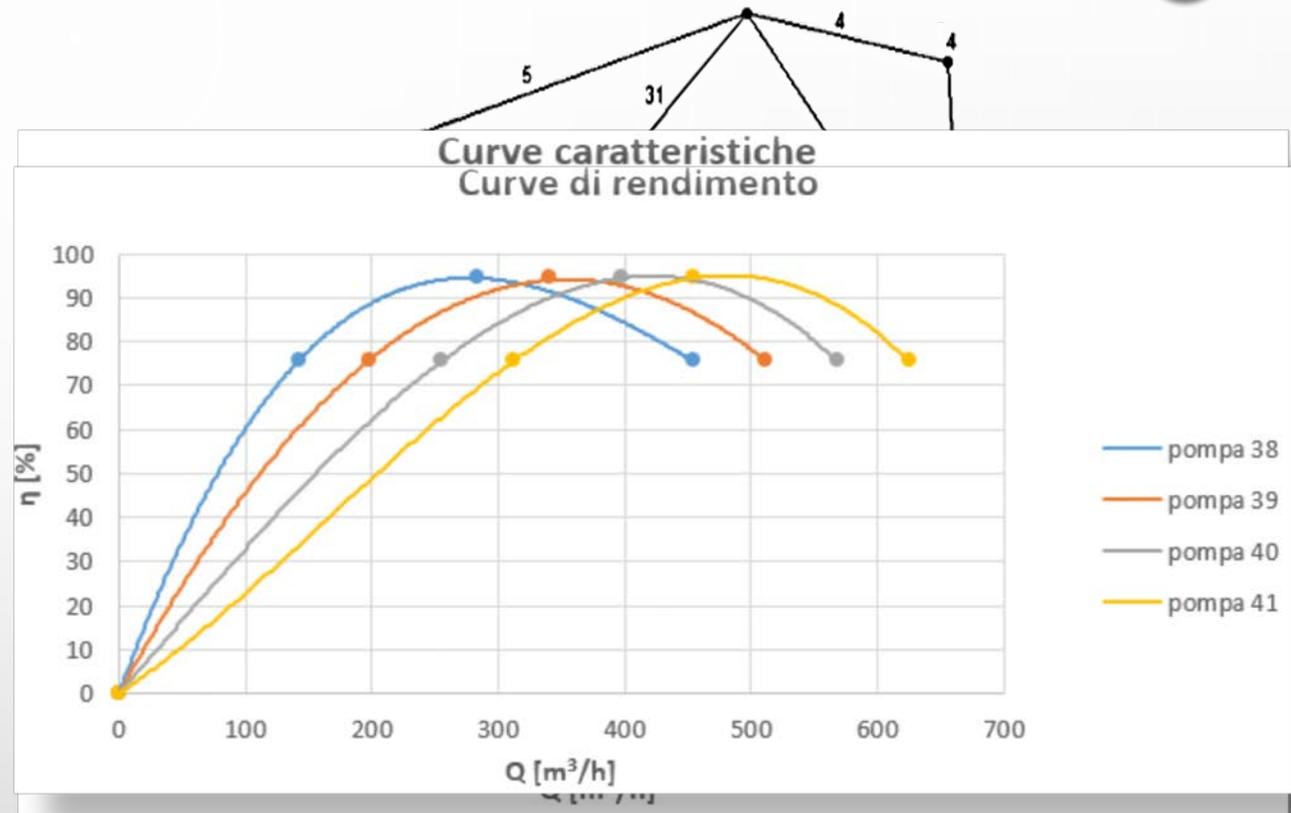
CASO STUDIO

La rete di distribuzione utilizzata per questo lavoro è Anytown, una rete ideale, già nota in letteratura.

Questa rete è composta da 19 nodi con quote geodetiche comprese tra 6.1 e 36.6 metri sul livello medio del mare (m.s.l.m.m).

La rete è alimentata da un serbatoio a livello variabile, tank (id 21), con funzionamento a gravità, e da un serbatoio a livello fisso, reservoir (id 20), che immette la portata richiesta mediante 4 pompe in parallelo, ognuna delle quali ha una sua curva caratteristica e di rendimento.

Il tank è posto ad una quota pari a 65.53 m.s.l.m.m. e ha un diametro di 12.20 m.



CARATTERISTICHE IDRAULICHE DELLA RETE ANYTOWN

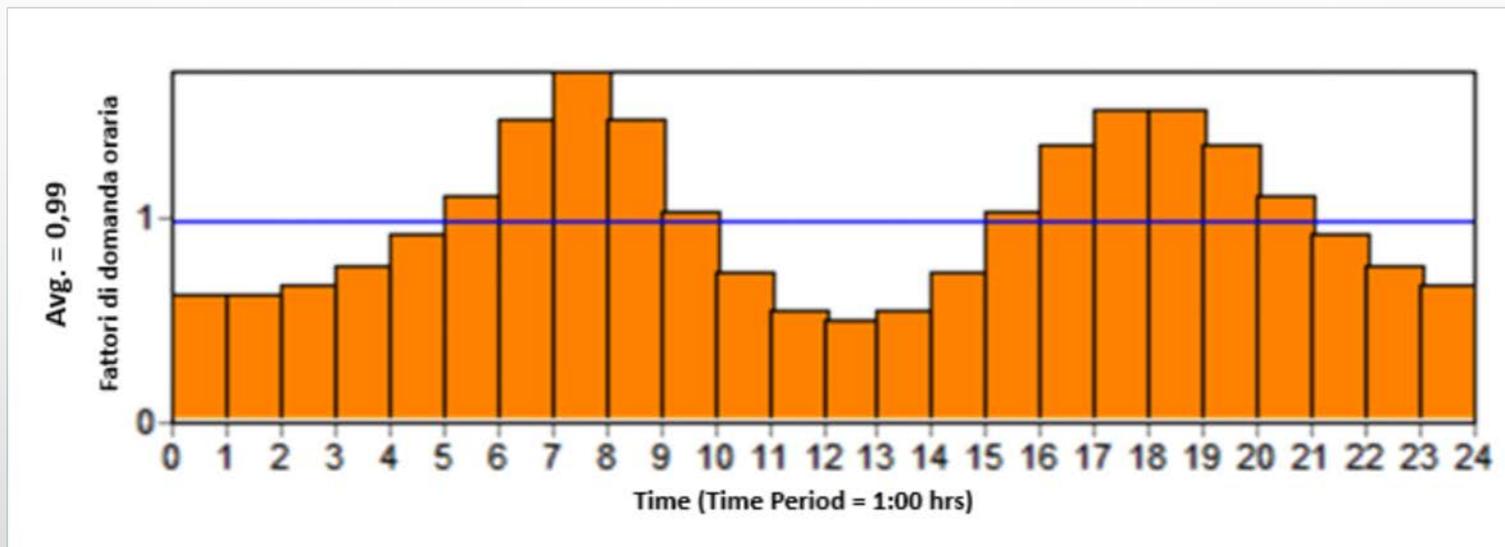
pipe [ID]	start node [ID]	end node [ID]	length [m]	diameter [mm]	roughness [-]
1	1	2	30.48	762.0	130
2	2	3	3657.60	304.8	120
3	3	4	1828.80	254.0	120
4	4	5	1828.80	254.0	120
5	5	6	3657.60	203.2	120
6	6	7	3657.60	203.2	120
7	7	8	1828.80	203.2	120
8	8	9	1828.80	203.2	120
9	9	10	1828.80	203.2	120
10	2	10	3657.60	304.8	70
11	2	11	3657.60	406.4	70
12	3	11	2743.20	304.8	70
13	11	12	1828.80	304.8	70
14	11	13	1828.80	254.0	70
15	11	16	1828.80	304.8	70
16	10	16	1828.80	203.2	70
17	3	12	1828.80	254.0	120
18	12	13	1828.80	254.0	70
19	16	13	1828.80	254.0	70
20	3	5	2743.20	254.0	120
21	12	14	1828.80	304.8	70
22	14	13	1828.80	254.0	70
23	15	13	1828.80	254.0	70
24	15	16	1828.80	304.8	70
25	17	16	1828.80	203.2	120
26	10	17	1828.80	254.0	120
27	9	17	2743.20	254.0	130
28	8	17	1828.80	254.0	120
29	15	17	1828.80	203.2	120
30	14	15	1828.80	254.0	70
31	5	14	1828.80	254.0	120
32	6	14	1828.80	254.0	120
33	6	15	1828.80	203.2	120
34	6	17	1828.80	203.2	120
35	17	18	30.48	304.8	120
36	18	19	30.48	304.8	120
37	19	21	304.80	304.8	100

node [ID]	elevation [m. s. l. m. m.]	demand [LPS]
1	6.096	0
2	6.096	18.595
3	15.240	7.438
4	15.240	7.438
5	15.240	7.438
6	24.384	7.438
7	36.576	7.438
8	36.576	7.438
9	36.576	7.438
10	15.240	18.595
11	15.240	18.595
12	15.240	18.595
13	15.240	37.190
14	15.240	18.595
15	36.576	7.438
16	15.240	18.595
17	36.576	29.752
18	36.576	0
19	36.576	0
20	3.048	-
21	65.532	-

Accanto sono riportate, in riferimento alla rete Anytown, le caratteristiche idrauliche delle tubazioni nonché le quote geodetiche e le portate medie erogate caratterizzanti ciascun nodo.

PATTERN DI DOMANDA

Il periodo di ottimizzazione nel seguente lavoro è fissato ad un giorno, con intervalli di un'ora ciascuno, in modo da avere 24 intervalli uguali, coerentemente al pattern di domanda.



Il pattern di domanda utilizzato, suddiviso in intervalli di consumo di un'ora, evidenzia due picchi dei consumi:

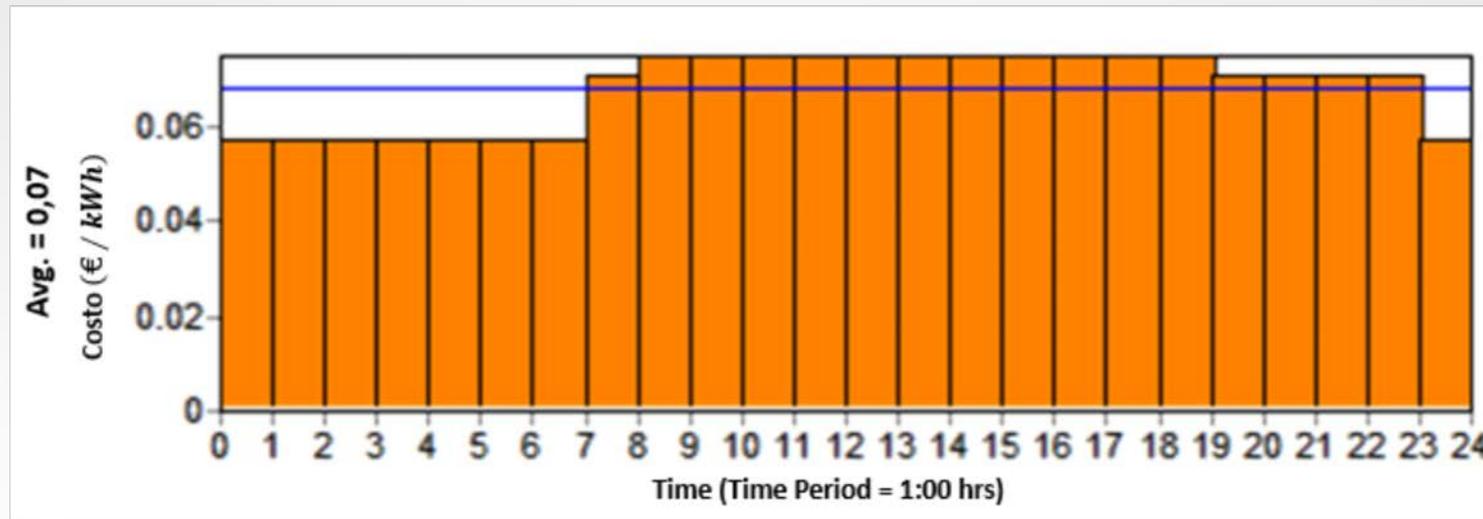
- uno mattutino che va dalle 06:00 alle 09:00
- uno pomeridiano che va dalle 16:00 alle 20:00.

La minor richiesta d'acqua si verifica tra le 23:00 e le 02:00 e tra le 11:00 e le 14:00.

TARIFFA ELETTRICA

La tariffa elettrica, utilizzata ai fini del calcolo del costo dell'energia, è quella tri-oraria, proposta dal Servizio Elettrico Nazionale (SEN), più precisamente:

- **Fascia F1** : dalle ore 08:00 alle 19:00 → 0,075 €/kWh
- **Fascia F2** : dalle ore 07:00 alle 08:00 e dalle 19:00 alle 23:00 → 0,071 €/kWh
- **Fascia F3** : dalle ore 00:00 alle 07:00 e dalle 23:00 alle 24:00 → 0,057 €/kWh



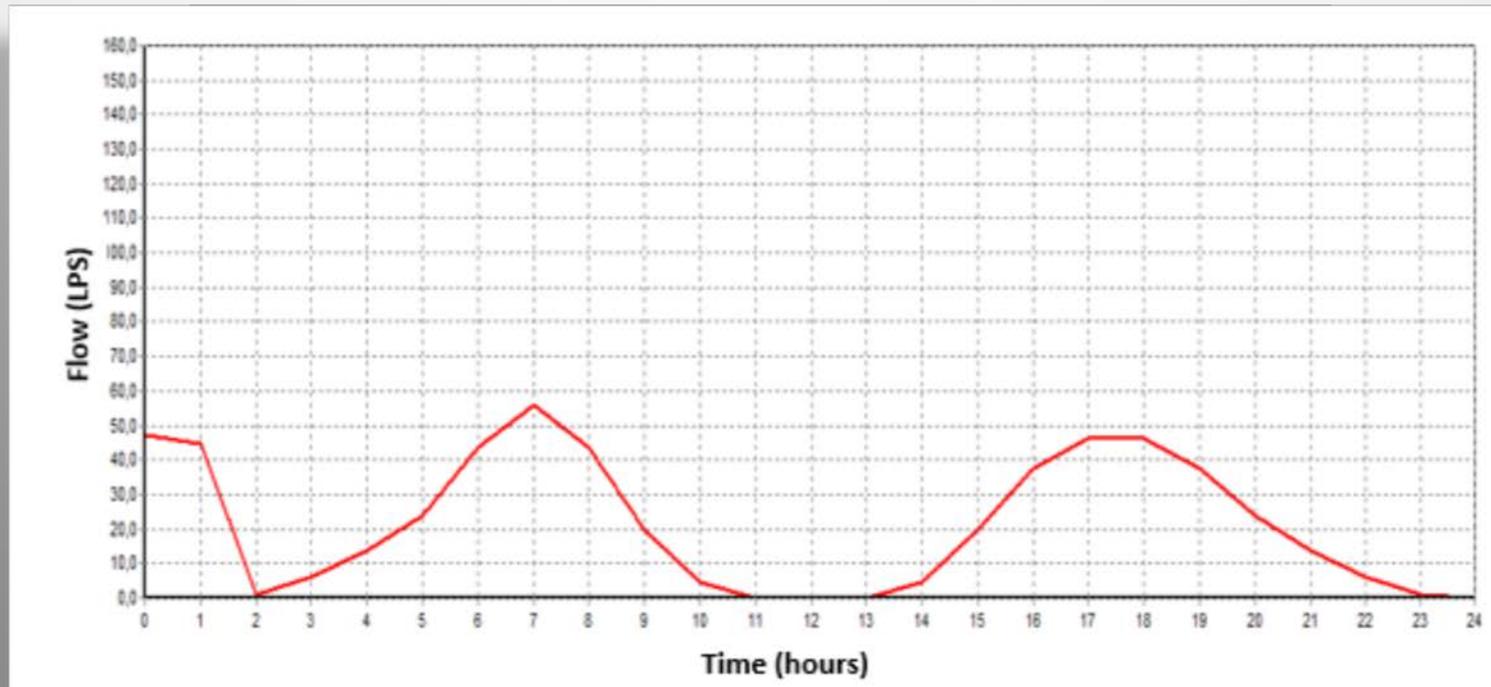
SOMMARIO

- OBIETTIVO
- PUMP SCHEDULING
- HARMONY SEARCH & EPANET
- CASO STUDIO : IMPOSTAZIONI E CONFIGURAZIONE
- **RISULTATI ELABORAZIONI**
- CONCLUSIONI

IPOTESI FUNZIONAMENTO CONTINUO DELLE 4 POMPE INSTALLATE

Inizialmente sono stati analizzati i costi di gestione e di manutenzione della rete Anytown ipotizzando un funzionamento continuo delle 4 pompe durante il periodo di ottimizzazione.

Procedendo con l'utilizzo del simulatore idraulico EPANet, esso genera dei messaggi (warning), avendo impostato un ulteriore controllo consistente nella chiusura del tratto 37 qualora il tank raggiunga la quota di sfioro. Come si evince dai warning, la pompa 38 in particolari orari della giornata dovrà necessariamente spegnersi in quanto non riesce a fornire il carico richiesto.



RISULTATI ELABORAZIONE FUNZIONAMENTO CONTINUO

I risultati ottenuti, riportati in tabella, sono relativi ad un'ipotesi di funzionamento continuo di un impianto, ed evidenziano un costo energetico giornaliero pari a 2965.55 €/giorno con $N_{SW} = 6$, in quanto come visto precedentemente la pompa 38 non risulta essere sempre in funzione e la sua percentuale di utilizzo è pari a 84.45%.

L'impianto risulta essere comunque funzionante ma con costi elettrici onerosi ed efficienze bassissime.

Pompa [ID]	Utilizzazione giornaliera [%]	Efficienza media [%]	Energia elettrica [kWh/m ³]	Potenza media [kW]	Potenza di picco [kW]	Energia giornaliera [€/giorno]
38	84,45	13,41	9,70	279,51	300,59	384,60
39	100,00	16,46	3,64	409,05	432,00	669,13
40	100,00	21,43	2,28	525,92	555,43	860,32
41	100,00	26,46	1,75	642,73	678,86	1051,50
Costo totale (C_f)						2965,55
Numero switch						6

PUMP SCHEDULING PER LA RETE ANYTOWN

Di seguito sono riportati i risultati per la rete Anytown al problema del Pump Scheduling ottenuti con HSMO al variare del numero massimo di start (3,4,5) fissando il numero di iterazioni per ogni processo a 5000.

Max numero di start [-]	Numero iterazioni [-]	Costo totale energia giornaliero [€/giorno]	Numero totale switch [-]
3	5000	432,76	6
4	5000	420,87	8
5	5000	398,33	8

I risultati mostrano che il minor costo dell'energia giornaliera è 398.33 €/giorno con un numero totale di switch pari a 8 , imponendo un massimo numero di start pari a 5.

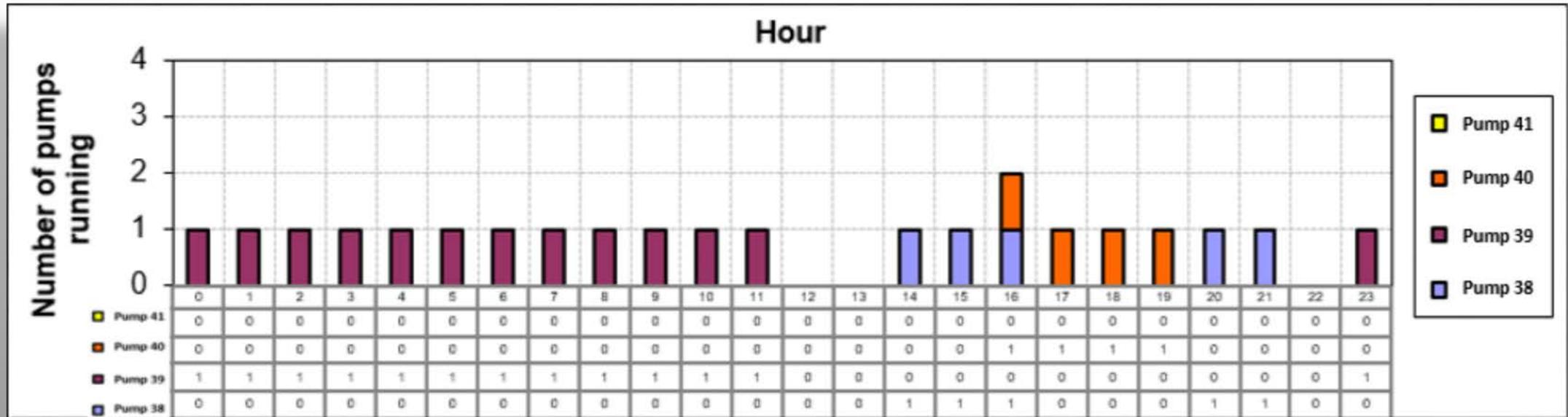
La peggiore soluzione dal punto di vista del costo energetico è quella che prevede 432.76 €/giorno ottenuta imponendo $ST = 3$. Tale soluzione registra un numero totale di switch pari a 6.

SOLUZIONE OTTIMALE: FUNZIONAMENTO CON ST=5

Analizziamo nel dettaglio i dati relativi alla soluzione migliore ottenuta imponendo un numero massimo di start pari a 5:

Pompa [ID]	Utilizzazione giornaliera [%]	Efficienza media [%]	Energia elettrica [kWh/m ³]	Potenza media [kW]	Potenza di picco [kW]	Energia giornaliera [€/giorno]
38	20,83	85,77	0,28	209,05	236,54	76,87
39	54,17	80,98	0,32	270,45	309,32	222,98
40	16,67	77,91	0,34	332,15	393,59	98,48
41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Costo totale(C_t)						398,33
Numero switch						8

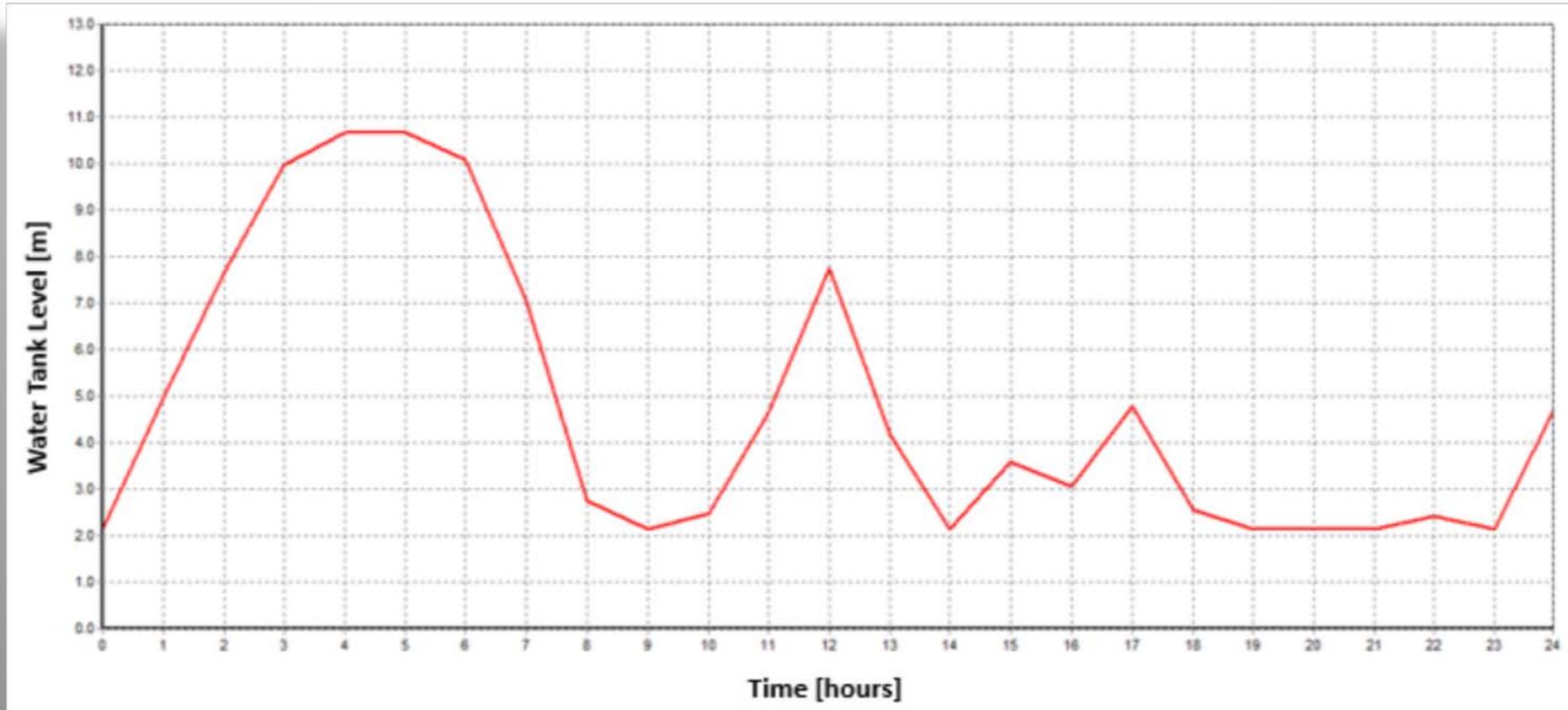
FUNZIONAMENTO POMPE NELL'ARCO DELLE 24 ORE



Riportando sotto forma di istogramma i risultati elaborati per $ST=5$, si evince che:

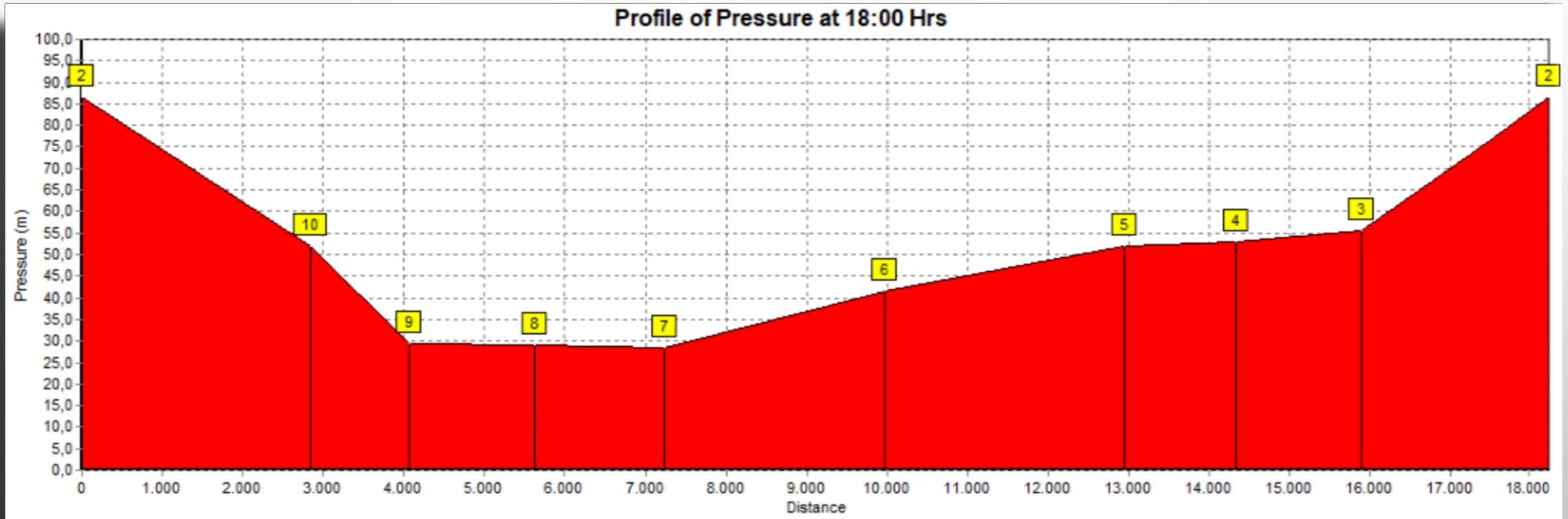
- La pompa 39 sia quella in funzione per il maggior numero di ore.
- La pompa 41 non risulta mai essere accesa.
- Negli intervalli orari 12-14 e 22-23 tutte le pompe sono spente.
- Nell'intervallo 16-17 risultano essere in funzione simultaneamente le pompe 38 e 40.

VARIAZIONE DEL TIRANTE IDRICO NEL SERBATOIO

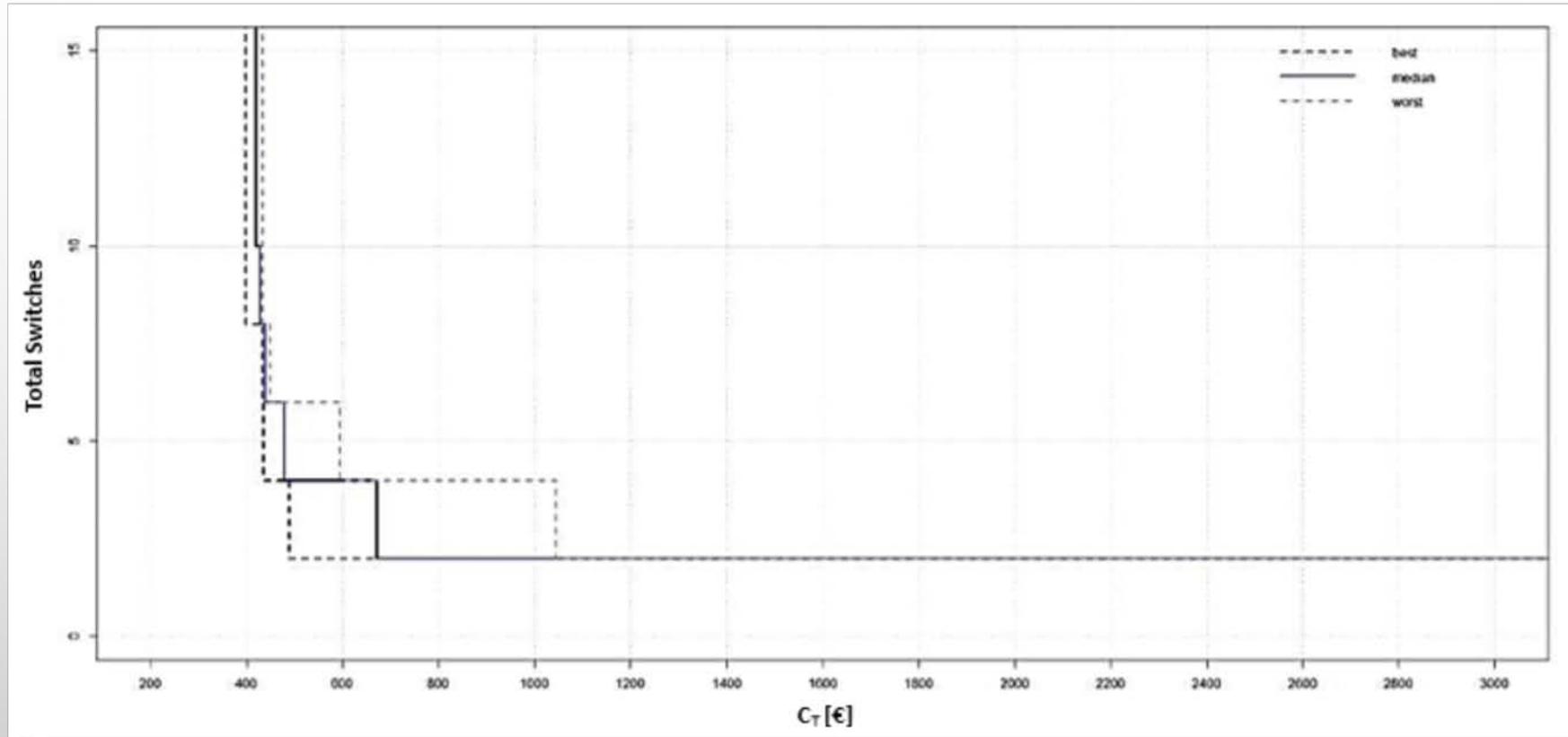


Dal grafico si nota come il tirante idrico nel tank durante il periodo di ottimizzazione risulti compreso tra il livello massimo e quello minimo, e di come lo stesso al termine delle 24 ore non risulti essere inferiore al valore iniziale, in accordo con i vincoli imposti.

PROFILI DI PRESSIONE PER L'ANELLO ESTERNO



FRONTE DI PARETO



Riportare i risultati sul Fronte di Pareto consente di trovare, in luogo di un'unica soluzione, una serie di esse, non dominate da altre, definite di compromesso tra i due obiettivi. Si osserva che è possibile ottenere una riduzione del costo totale C_T sempre maggiore all'aumentare del numero di switch.

SOMMARIO

- OBIETTIVO
- PUMP SCHEDULING
- HARMONY SEARCH & EPANET
- CASO STUDIO : IMPOSTAZIONI E CONFIGURAZIONE
- RISULTATI ELABORAZIONI
- **CONCLUSIONI**

CONCLUSIONI

- Questo lavoro dimostra come la riduzione dei costi energetici, per la fornitura di acqua potabile in un sistema di pompaggio, ottenuta mediante il Pump Scheduling, è una possibilità di risparmio fattibile ed efficiente.
- L'elaborazione ha dimostrato che all'aumentare del numero di start il costo energetico può essere ridotto grazie ad una maggiore flessibilità del sistema.
- Si osserva dall'interpretazione del Fronte di Pareto che il costo totale è inversamente proporzionale al numero di switch.
- L'efficienza dell'intero impianto risulta ottimizzata, in particolare:
 - Tutte le pompe raggiungono un'efficienza prossima all'80%;
 - In particolare la pompa 39, in funzione per il maggior numero di ore, raggiunge un'efficienza prossima all'81%;
 - La pompa 41 risulta essere sempre spenta, per cui potrà essere utilizzata come riserva.

The image features a light gray background with a subtle gradient. In the top-left and bottom-right corners, there are several realistic water droplets of various sizes, rendered with soft shadows and highlights to give them a three-dimensional appearance. The text "GRAZIE PER L'ATTENZIONE" is centered in the middle of the page in a bold, dark blue, sans-serif font.

GRAZIE PER L'ATTENZIONE