

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

DIPARTIMENTO
D.I.C.A.M.

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE

TESI DI LAUREA

In

Sistemi Idraulici Urbani M

**Contributo dell'algorithmo euristico GHEST nella caratterizzazione energetica di
una rete di distribuzione idrica**

CANDIDATA:

Anna Peronace

00000643225

RELATORE:

Chiar.mo Prof. Sandro Artina

CORRELATORI:

Ing. Cristiana Bragalli

Ing. Andrea Bolognesi

Anno Accademico 2012/13

Sessione II

Parole chiave dell'elaborato:

Bilancio energetico, qualificazione dei consumi, GHEST, ottimizzazione, rete di distribuzione idrica.

SOMMARIO

INTRODUZIONE.....	5
CAPITOLO 1: Il problema energetico in un sistema acquedottistico	7
Introduzione	7
1.1: I fattori che in un sistema acquedottistico influenzano i consumi energetici	7
1.1.1: Qualifica del legame tra complessità strutturale del sistema acquedottistico ed il dispendio energetico	7
1.1.2 : Qualifica del rapporto tra potenza assorbita dai sistemi di pompaggio e strategie di ottimizzazione del servizio idrico	8
1.1.3 : Influenza del livello idrico del serbatoio di compenso sui consumi energetici della rete di distribuzione associata	10
1.1.4 : Qualificazione del legame tra potenza assorbita dalle pompe e perdite idriche in rete	12
1.2 : Il bilancio di energia in un sistema di distribuzione idrico: approccio generale	16
1.3: I diversi contributi al bilancio energetico complessivo del sistema	19
1.3.1: Energia scambiata con i sistemi esterni Ein e Eout	19
1.3.2: L'energia inerente ai gruppi di pompaggio.....	20
1.3.3: L'energia derivante dai serbatoi esterni alla rete di distribuzione.....	20
1.3.4: L'energia dell'acqua fornita agli utenti.....	20
1.3.5: L'energia dissipata per attrito dalla rete.....	21
1.3.6: L'Energia associata all'acqua persa.....	21
1.3.7: L'Energia associata ai serbatoi interni alla rete di distribuzione.....	21
CAPITOLO 2: L'Algoritmo euristico GHEST.....	23
Introduzione	23
2.1 : Algoritmi euristici.....	23
2.1.1:Algoritmi genetici (GA)	24
2.1.2 : Strategie evolutive (ES)	24
2.2 : La funzione obiettivo nelle strategie che si ispirano alle teorie evolutive della specie.	25
2.3 : GHEST (Genetic Heritage Evolution by Stochastic Transmission).....	26

2.3.1 : Il problema matematico di base in una strategia di ottimizzazione di una rete di distribuzione idrica.....	26
2.3.2 : Presentazione dell’algoritmo GHEST.....	27
2.4 : Il simulatore idraulico Epanet2.....	29
CAPITOLO 3: La rete di studio.....	33
Introduzione	33
3.1: Caratteristiche della rete “Cabrera_network”	33
3.2 : Risposta della rete alla simulazione idraulica con Epanet	35
3.2.1: Gli esiti della simulazione in termini energetici	35
3.2.2: L'alimentazione idrica della Cabrea_network.....	36
3.2.3: Valori medi dei parametri idraulic	37
3.3: Considerazioni conclusive	40
CAPITOLO 4: Gli scenari di valutazione	41
Introduzione	41
4.1 : Approccio generale all’interpretazione dei risultati.....	41
4.2 : Caratterizzazione del legame tra il consumo ed il diametro delle condotte	42
4.3 : Caratterizzazione del legame tra il consumo energetico e perdita idrica.....	50
4.3.1 : Primo gruppo di elaborazioni.....	50
4.3.2 : Secondo gruppo di elaborazioni.....	51
4.4 : Caratterizzazione del legame tra consumo energetico e tipologia di pompa a servizio della rete.....	53
4.4.1 : Prima fase della ricerca.....	53
4.4.2 : Seconda fase della ricerca.....	59
4.5 : Considerazioni conclusive	69
CAPITOLO 5: Caratterizzazione energetica di una rete di distribuzione idrica tramite l’impiego dell’algoritmo GHEST	71
Introduzione	71
5.1 : Risoluzione del problema di ottimizzazione energetica di un sistema di distribuzione idrica tramite l’impiego dell’algoritmo GHEST	71
5.2 : Implementazione in ambiente MATLAB del problema di ottimizzazione dei consumi energetici di una rete di distribuzione idrica.....	73
5.2.1 : Dati sfruttati nel codice EMG_Energy.m	74

5.3 : Soluzioni ottenute dall'impiego di GHEST	75
5.4 : Caratterizzazione energetica delle retiottimizzate (<i>solbest</i>)	80
CAPITOLO 6: Il bilancio energetico di una rete di distribuzione idrica.....	83
Introduzione.....	83
6.1: Strategia seguita nel calcolo dei bilanci energetici idrici.....	83
6.2: Bilancio energetico per una rete ad alimentazione ON_OFF.....	84
6.3: Bilancio energetico per una rete ad alimentazione diretta.....	88
Conclusioni.....	91
Bibliografia	

Introduzione

Un complesso di distribuzione idrica è per natura costituito da un'ingente quantità di elementi quali condotte, serbatoi, pompe ed altri dispositivi idraulici, che, creando un impianto in pressione, connettono la risorsa idrica con la domanda idropotabile dell'utenza; data questa complessità intrinseca, il loro consueto esercizio comporta grandi impieghi energetici. Ciò nonostante, l'odierno trend tecnico/scientifico incoraggia la gestione e progettazione degli stessi al fine di un generale risparmio di energia. Questo perché il recupero energetico negli acquedotti, oltre che per vantaggi economici dovuti al sostenimento dell'esercizio stesso, implica soprattutto una razionalizzazione dell'impiego di risorsa idrica.

Questo è il contesto scientifico culturale in cui il presente elaborato si colloca, proponendosi l'obiettivo di una completa caratterizzazione energetica della rete di distribuzione *Cabrera_network*.

In particolare, il primo capitolo costituisce il supporto teorico a questo studio, in quanto sono stati riportati alcuni tra gli esiti più interessanti ai quali la letteratura scientifica in materia sia pervenuta e che in qualche modo hanno suggerito la varietà degli aspetti su cui indagare ai fini della qualificazione energetica di un sistema di distribuzione idrico.

Il secondo capitolo tratta gli algoritmi euristici mirati alla risoluzione dei problemi di ottimizzazione per le reti di distribuzione idrica **WDN** (*Water Distribution Network -WDN*). Questi, nella loro essenza matematica, sono chiamati quindi a risolvere complessi problemi di programmazione non lineare a variabili miste sinteticamente indicati come "MINLP" (*Mixed Integer Non Linear Programming*). In particolare, ci si interessa alla descrizione dettagliata della strategia euristica **GHEST** grazie alla quale si è contribuito al raggiungimento dell'obiettivo della ricerca.

Il terzo capitolo, invece, considera più nello specifico l'oggetto di studio, cioè la *Cabrera_network*. Si tratta di una versione modificata di una rete di distribuzione ad alimentazione *ON-OFF* gentilmente fornita da E. Cabrera e MA Pardo (RETE CABRERA ORIGINALE).

Il quarto capitolo connota per la *Cabrera_network* i legami intercorrenti tra i consumi energetici ed aspetti come il dimensionamento della rete, le perdite idriche e la pompa centrifuga sfruttata. A tal proposito si impiegano "classici" mezzi informatici quali fogli Excel ed il simulatore idraulico Epanet2. Bisogna inoltre precisare che il valore di energia che nella tesi viene sottoposto ad analisi coincide con il reale impiego di kw-h/day da parte della rete durante una simulazione idraulica di 24 ore (E_v).

Il quinto capitolo provvede alla risoluzione del problema di ottimizzazione energetica dell'oggetto di studio tramite l'implementazione dell'algoritmo GHEST in ambiente MATLAB. I risultati a cui si perviene non solo mostreranno la potenza di questa strategia nel pervenire a configurazioni di reti che minimizzino gli impieghi di E_v , ma confermeranno i legami di cui sopra. Oltre al fatto che verranno sfruttati per stabilire l'influenza della regolarizzazione del livello idrico massimo nel serbatoio di compenso sui consumi complessivi.

Il sesto ed ultimo capitolo vuole invece sintetizzare il contributo percentuale degli aspetti analizzati in un complessivo bilancio energetico della rete. Più precisamente, si adotta la strategia proposta da Cabrera in *Cabrera et al.*(2010) e, per questioni di completezza, si analizzano i casi di alimentazione ON-OFF e diretta della *Cabrera_network*.

Al di là delle specifiche Conclusioni, cui si rinvia, l'elaborato consente di cogliere un più generale profilo di ordine metodologico: l'importanza di una visione d'insieme del problema, dalla quale, nel caso di specie, emerge che la scelta più ragionevole, al fine dell'ottimizzazione energetica, consiste nell'individuazione del più idoneo modello di pompa alimentante la rete. Per poi, data l'onere progettuale e applicativo che comporta, provvedere al reinvestimento dei capitali risparmiati in attività volte alla riduzione delle perdite idriche. Sono questi infatti, i due aspetti che più incidono sui consumi energetici nel caso di studio.

1. Il problema energetico in un sistema acquedottistico

Introduzione

I sistemi acquedottistici, data la loro complessità, richiedono elevati quantitativi di energia per la loro ordinaria attività. Detti quantitativi sono poi suscettibili di variare in relazione a fattori legati alle caratteristiche strutturali della rete, alla presenza di perdite idriche ed alla tipologia di alimentazione. Si deve tenere conto però che il nuovo trend tecnico/scientifico è volto all'ottimizzazione energetica di questi sistemi, sicuramente per la quantità di energia recuperata ma soprattutto per un più consapevole impiego della risorsa idropotabile. A tal proposito si presenta una strategia di valutazione dei fattori che in un complesso acquedottistico influenzano i consumi energetici, adottando un approccio di ricerca suggerito da Cabrera in Cabrera et al.(2010) .

1.1 I fattori che in un sistema acquedottistico influenzano i consumi energetici.

Il presente paragrafo vuole dare un'idea al lettore dei diversi aspetti che in un sistema di acquedotto concorrono alla definizione del consumo energetico, in modo che ci si possa capacitare della complessità della questione in parola. Infatti, il problema reale, non risiede nell'individuazione delle fonti di consumo o produzione energetiche, ma nel comprendere la loro interazione nella definizione di un valore complessivo di bilancio energetico che riesca in qualche modo a sintetizzare le prestazioni del sistema.

1.1.1 *Qualifica del legame tra complessità strutturale del sistema acquedottistico ed il suo dispendio energetico.*

La complessità strutturale del sistema idrico, concepita banalmente come numero di condotti, influenza le perdite idriche concentrate e distribuite che in esso si possono manifestare, con conseguente variazione dell'impiego energetico. Per esplicitare il binomio perdita idrica complessiva (associata ad una certa architettura di rete) e variazione percentuale di costo energetico, ci si può riferire agli studi fatti da Colombo et al. (2002), dai quali emerge un legame sancito da una famiglia di polinomi del secondo ordine del tipo *eq.1*:

$$ax^2 + bx = y \quad eq.1$$

In particolare lo studio da cui emerge ciò, ha previsto il confronto della relazione di cui sopra per reti di distribuzione con struttura diversa.

Quali:

- un solo condotto (*single pipe*);
- una rete costituita da due maglie chiuse (*2loop*);
- una costituita da 10 maglie chiuse (*10loop*);
- una rete a struttura più complessa (*Walski*) nelle due condizioni #1 e#2 in cui si hanno perdite idriche localizzate crescenti.

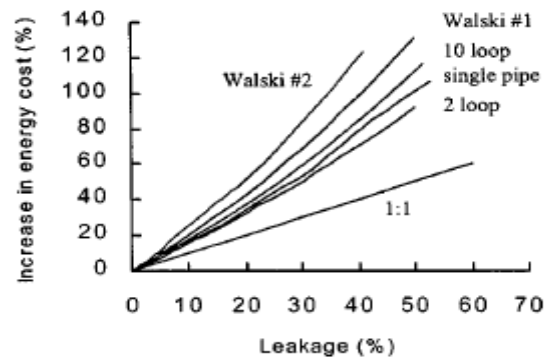


Figura 1: legame tra l' incremento percentuale del costo dell'energia-%perdite idriche

(FONTE: "Energy and costs of leaky pipes" Colombo et al. 2002)

Nella figura presentata, la curva del costo dell'energia, nel caso sistema *10-loop*, è descritto con una grande accuratezza della funzione sottostante

$$0.012x^2 + 1.63x = y$$

dove y ed x sono rispettivamente l'incremento percentuale del costo dell'energia e le perdite idriche. Inoltre, è possibile osservare che per la rete *Walski* l'incremento del costo energetico legato all'aumento delle perdite idriche.

1.1.2 Qualifica del rapporto tra potenza assorbita dai sistemi di pompaggio e strategie di ottimizzazione del servizio idrico.

Tra gli aspetti soggetti a valutazione, nel tentativo di rendere i sistemi acquedottistici più performanti in termini energetici e di impiego di risorsa idropotabile, vi è la modalità di erogazione del servizio di distribuzione.

Interessante in questo senso è lo studio affrontato da Colombo et al. (2009) in cui vengono messi a confronto gli effetti della riduzione delle pressioni in rete, pur mantenendo lo standard di un buon servizio, e quelli dovuti all'assunzione di misure che riducono la domanda idrica Q_T . Questo porta ad i risultati rappresentati nelle sottostanti figure.

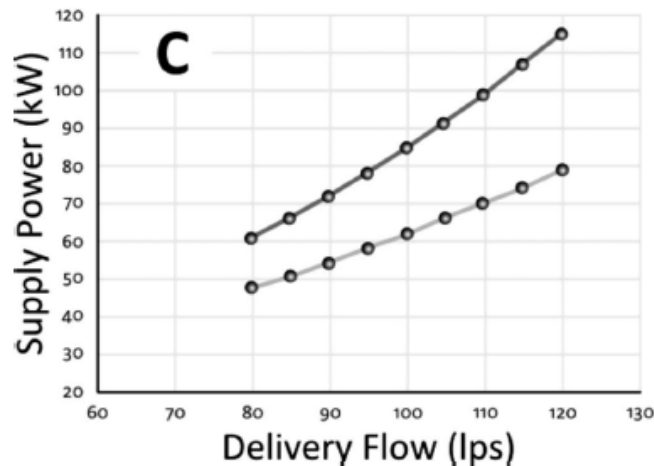


Figura 2: impatto delle strategie di riduzione delle domanda idrica sulla potenza assorbita dalle pompe

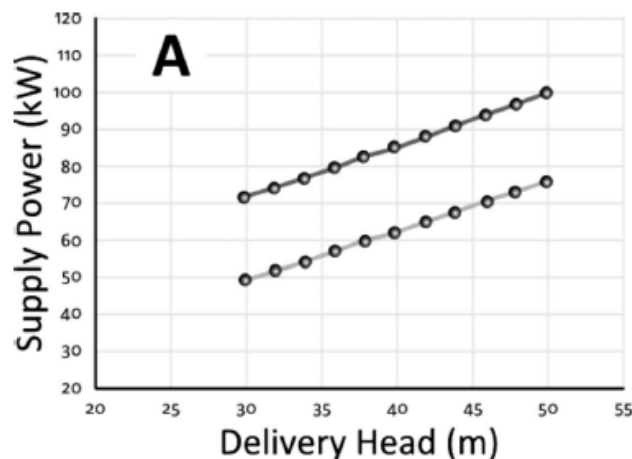


Figura 3: impatto del controllo delle pressioni sulla potenza assorbita delle pompe

(FONTE: " *Leaks and Water Use Representation in Water Distribution System Models: Finding a Working Equivalence*" Colombo et al.(2009))

Per una migliore comprensione dei risultati si precisa che:

- nella trattazione la Q_T viene intesa come dipendente dalla somma della domanda idrica realmente richiesta dalle utenze più le perdite idriche concentrate presenti in rete;
- ci si riferisce ad un solo ramo di analisi lungo un km ai cui estremi sono allocate perdite in quantità sempre definite;
- si analizzano due scenari di dissipazione per attrito una per un diametro ampio 0.25m (sopra) l'altro 0.3(m) (sotto).

Lo studio evidenzia due aspetti: il primo più ovvio, che ci dice come un buon dimensionamento dei condotti e quindi alla riduzione delle perdite per attrito porti ad un vantaggio energetico, il secondo invece ci informa sul fatto che l'assunzione di misure organizzative che mirano alla riduzione della domanda idrica (e quindi la riduzione delle perdite localizzate) impatta molto di più di un controllo delle pressioni.

1.1.3 Influenza del livello idrico del serbatoio di compenso sui consumi energetici della rete di distribuzione associata.

Per le aziende che operano la gestione del servizio idrico la maggior parte dei costi di energia che devono sostenere sono imputabili alla tipologia di funzionamento delle pompe. Quindi, una pianificazione ottimale di questo aspetto, potrebbe ridurre significativamente il costo, pur mantenendo l'intervallo di funzionamento delle macchine in un range di valori di portata accettabili. Ma, secondo uno studio condotto da K. Lansey (2010), un altro aspetto che concorre all'ottimizzazione dei consumi in un sistema di distribuzione, e che addirittura dà un contributo maggiore di quello dei pompaggi, è la modulazione del livello idrico al serbatoio di compenso presente nel sistema.

A dimostrazione dei contributi di questi aspetti, la ricerca in parola prevede la simulazione idraulica di una rete di distribuzione in cui, a per una domanda idrica sempre soddisfatta, sono state fatte variare le portate in transito nella pompa ed i livelli del serbatoio.

I risultati ottenuti vengono riportati nelle immagini seguenti, da cui emerge un legame tra energia richiesta dalla pompa e portata trasferita (figura 2a) descritto da una curva non lineare con concavità verso l'alto. Mentre, la relazione tra i consumi energetici imputabili alla pompa ed i livelli idrici iniziali del serbatoio, è descritta da una regressione lineare a tratti (figura 2b).

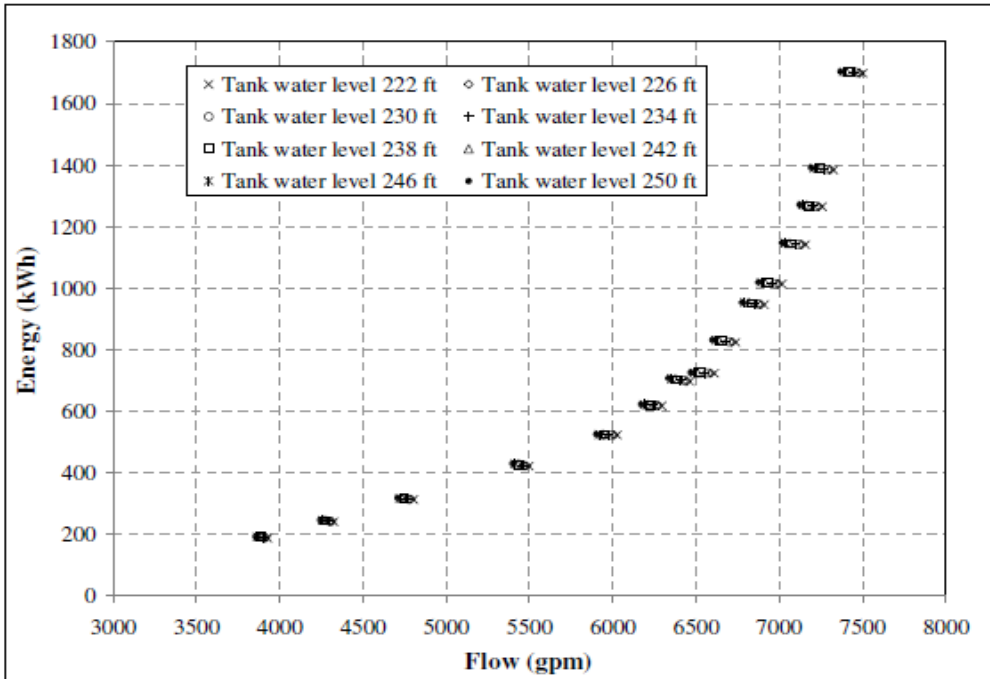


Figure 2a. Plot of energy consumed vs. pump station flow for different tank water levels for demand factor 1.0

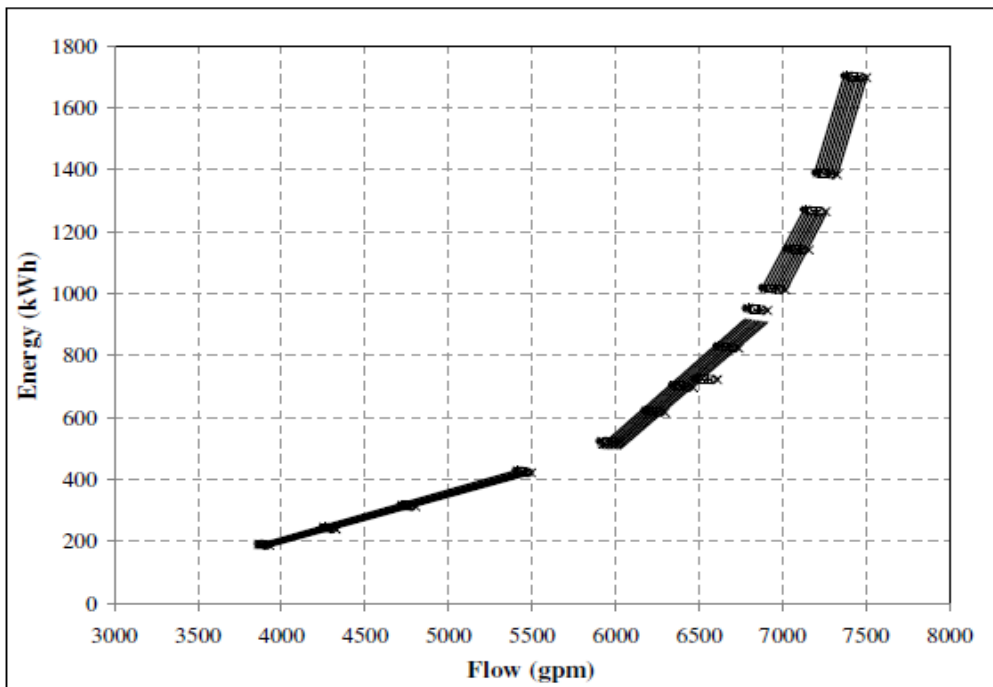


Figure 2b. Plot of energy consumed vs. pump station flow with piecewise linear regression line for different tank levels for demand factor 1.0

Figura 4

(FONTE:"Strategy for real time pump operation for water distribution systems" K. Lansy (2010)

1.1.4 Qualifica del legame tra potenza assorbita dalle pompe e perdite idriche in rete.

Un altro aspetto fortemente influente l'andamento dei consumi energetici in un complesso di distribuzione è la presenza di perdite idriche.

A tal proposito lo studio condotto da O.Giustolisi et al. (2013) prende in esame uno stesso sistema di distribuzione idrica servito da tre diverse pompe (PM1, PM2, PM3). Le condizioni di servizio idrico che la ricerca in parola prende in considerazione sono due:

- Modulazione della pressione in rete con la variazione di domanda idrica nella giornata.

Questo, perchè i consumi idrici variano durante la giornata, potrebbe quindi non avere senso mantenere in rete pressioni sempre elevate che comporterebbero ingenti dissipazioni di carico ma sarebbe più opportuno modularle con la portata, in modo da avere nel periodo notturno pressioni più basse e in quello diurno maggiori. Per tanto, la ricerca propone di spegnere una porzione delle macchine che servono la rete nel periodo che va dall'una di notte alle sei del mattino;

- Erogazione del servizio idrico senza modulazione della pressione.

Questi due casi di erogazione del servizio idropotabile sono stati poi adattati a tre diversi scenari di perdita idrica rispettivamente del 10%, 20% e 40%. In conclusione, dall'analisi a cui ci si riferisce emerge che, non solo al crescere delle fallanze in rete la possibilità di una modulazione del servizio idrico basata sulla pressione diminuiscono, ma in generale, crescono proporzionalmente gli impieghi delle macchine e quindi i consumi energetici a questi inerenti. Tutto ciò viene riportato nelle figure sottostanti

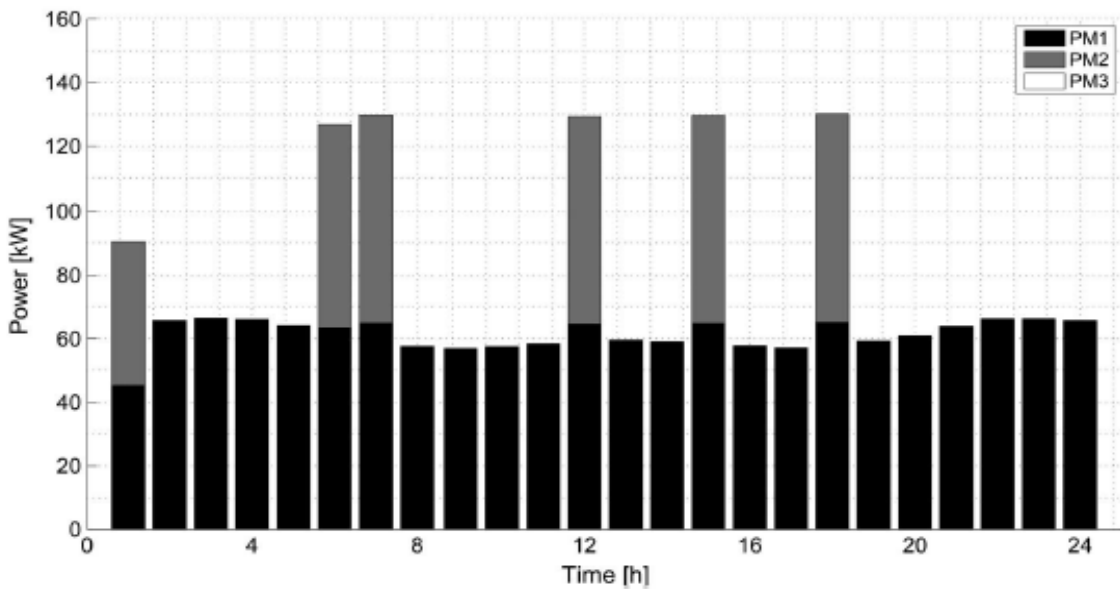
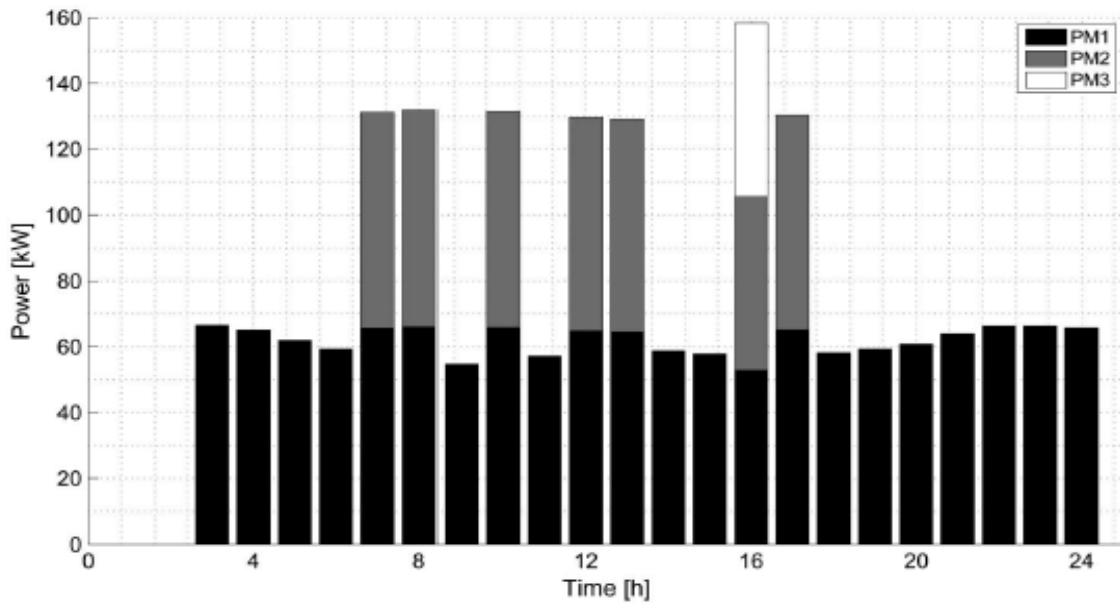


Figura 5: Potenza delle pompe al variare del tempo per uno scenario di perdita idrica del 10%

FONTE: "Operational Optimization: Water Losses versus Energy Costs" di O.Giustoli et al. (2013)

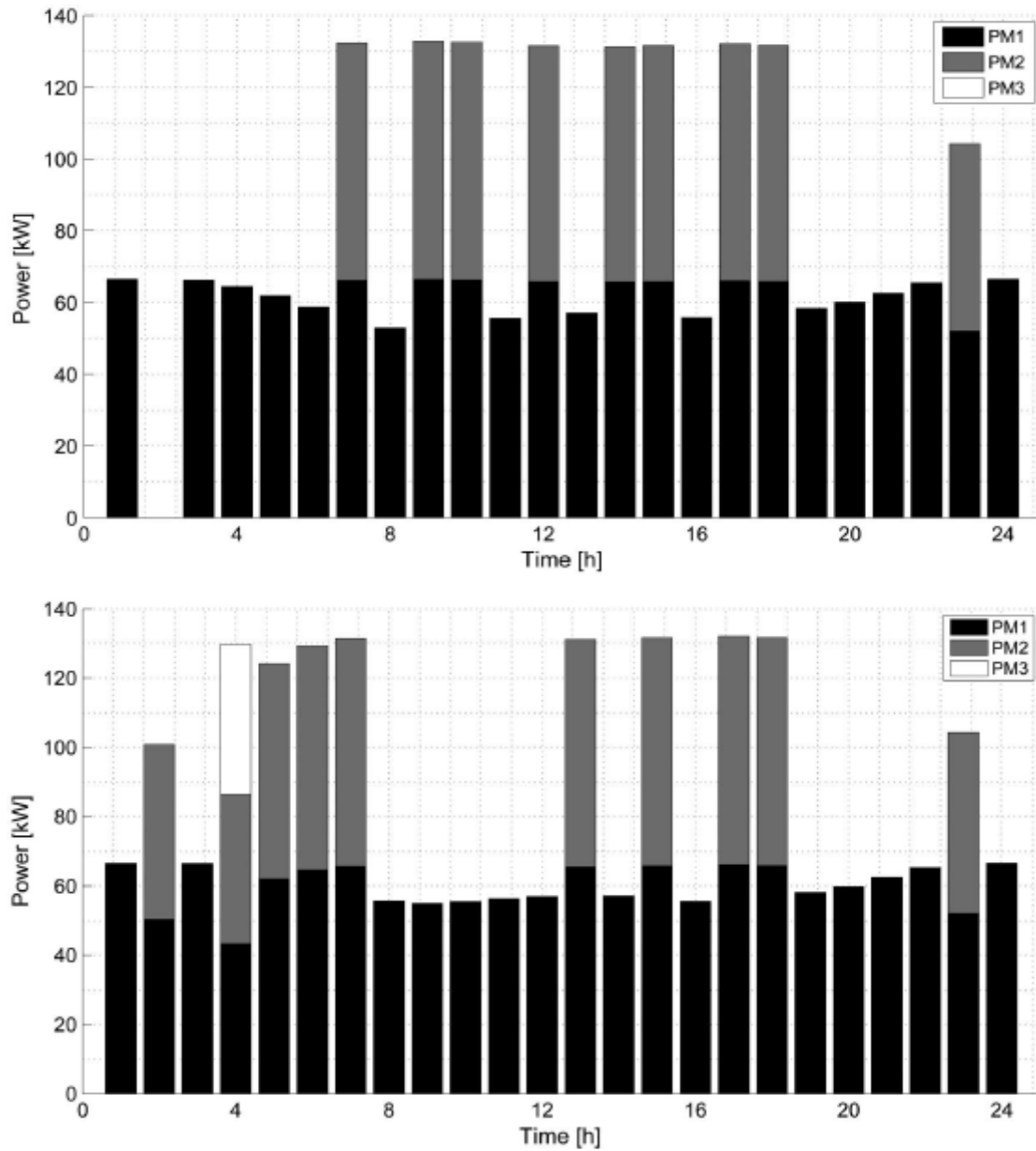


Figura 6: Potenza delle pompe al variare del tempo per uno scenario di perdita idrica del 20%

FONTE: "Operational Optimization: Water Losses versus Energy Costs" di O.Giustoli et al. (2013)

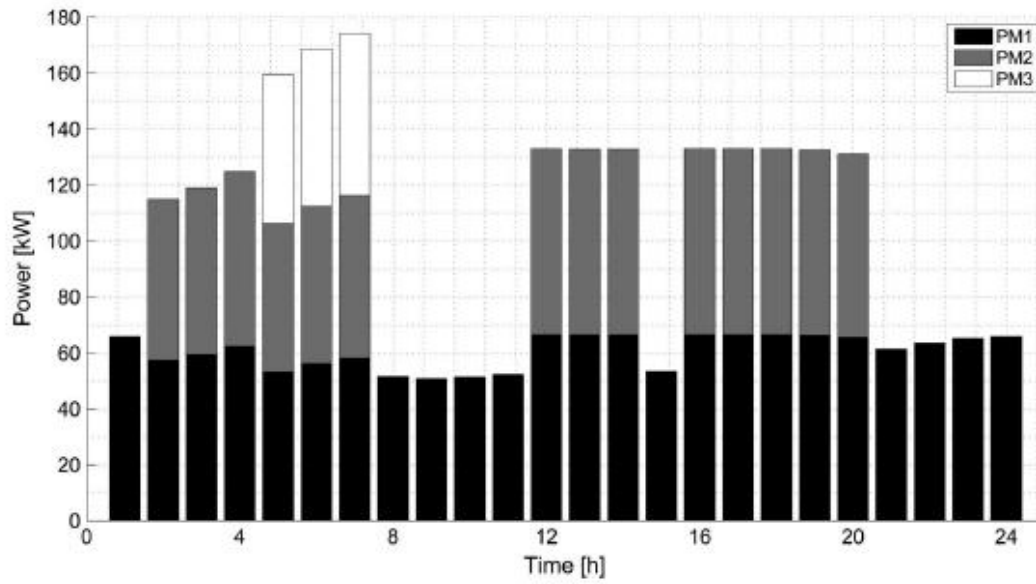
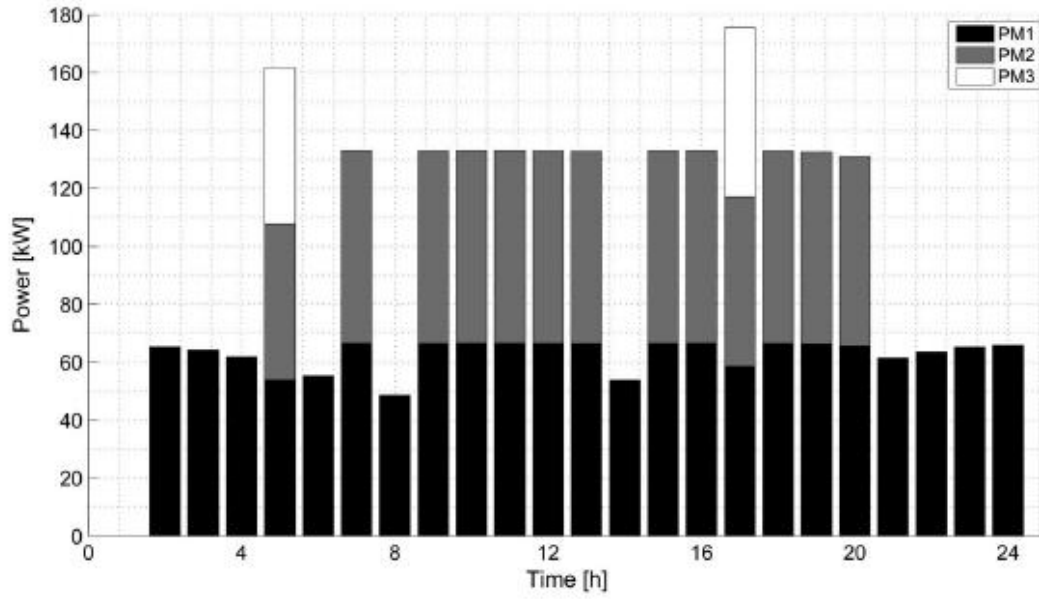


Figura 7: Potenza della pompa al variare del tempo per uno scenario di perdita idrica del 40%

FONTE: "Operational Optimization: Water Losses versus Energy Costs" di O.Giustoli et al. (2013)

1.2 Il bilancio di energia in un sistema di distribuzione idrico: approccio generale.

L'analisi del rendimento energetico di un generico sistema acquedottistico evolve dal suo rigoroso bilancio di energia, come proposto nello studio *Cabrera et al. (2010)*. Innanzitutto, si suggerisce di identificare un volume di controllo che isoli lo spazio occupato dalla distribuzione, come riportato in figura.

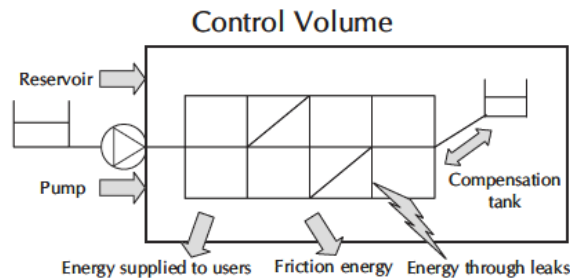


Figura 8:

Volume di controllo

Il volume di controllo distingue gli elementi interni ad esso, come ad esempio il serbatoio di compenso, da quelli esterni, come il serbatoio a carico costante e le pompe. Applicando il bilancio di energia al nostro modello, si ottiene l'Eq. 2:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{cv} e \rho dV + \iint_{cs} e \rho (\vec{v} \cdot d\vec{A}) \quad \text{Eq. 2}$$

In cui :

- $\frac{dE}{dt}$ rappresenta lo scambio di energia attraverso il contorno per unità di tempo, dato dalla somma del calore scambiato più il lavoro svolto;
- e rappresenta l'energia totale per unità di massa;
- ρ è la densità del fluido.

Esplicando i termini che definiscono l'energia totale per unità di massa fluida otteniamo l'Eq. 3:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial W_{shaft}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{cv} (gz + u + \frac{v^2}{2}) \rho dV + \iint_{cs} (gz + u + \frac{v^2}{2}) \rho (\vec{v} \cdot d\vec{A}) \quad \text{Eq. 3}$$

Si apportano a questo punto le seguenti semplificazioni:

- $\rho = \text{costante}$;
- Il flusso di calore attraverso il contorno è nullo;
- si sostituisce alla variazione di lavoro svolto per fornire energia al sistema nell'unità di tempo $\frac{\partial W_{shaft}}{\partial t}$, la potenza $P = \sum_i^{n_p} \gamma Q_{pi} H_{pi}$;
- Si trascura il termine cinetico $\frac{v^2}{2}$;

- In ogni intervallo di calcolo si ammette che l'energia all'interno del volume di controllo sia costante;
- Il flusso si concepisce come uniforme attraverso il confine.

Sotto queste condizioni l'Eq. 3 si semplifica nel modo seguente Eq. 4:

$$\sum_i^{n_p} \gamma Q_{pi} H_{pi} = \rho g \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{cv} z dV + \rho \sum_{Outlets} Q_{oi} \left[gz_{oi} + u_{oi} + \frac{P_{oi}}{\rho} \right] - \rho \sum_{Inlets} Q_{li} \left[gz_{li} + u_{li} + \frac{P_{li}}{\rho} \right] \quad \text{Eq. 4}$$

Si esplicita a questo punto, il contributo all'equazione di bilancio dato dei serbatoi idrici, i quali si differenziano tra quelli a carico costante detti “*reservoir*” e quelli a carico variabile “*tank*”.

In particolare, l'energia che ai *reservoir* compete è di tipo “*naturale*” trattandosi del carico idraulico $H(m)$ posseduto dal fluido ivi. L'energia naturale introdotta, si distingue quindi, da quella “*artificiale*” prodotta dalle pompe impiegando un certo quantitativo di kW.

Si procede a questo punto, alla semplificazione dall'equazione di bilancio.

In questa, per un generico punto di uscita (nodo i) della massa fluida (domanda idrica), l'energia richiesta è $H_{oi} = z_{oi} + \frac{P_{oi}}{\gamma}$.

Si comprende allora, l'importanza di determinare il punto altimetrico di riferimento per l'intero sistema che, secondo Cabrera, è quello per cui $z=0$.

Ciò detto, per un sistema costituito da:

- n_N reservoir;
- n punti di prelievo idrico;
- n_p stazioni di pompaggio;
- n_c serbatoi di compenso (tank);

si ottiene, sfruttando le notazioni introdotte, la sottostante equazione Eq. 5:

$$P_0 = \sum_i^{n_N} \gamma Q_{Ni} H_{Ni} + \sum_i^{n_p} \gamma Q_{pi} H_{pi} = \sum_i^{n_p} \gamma Q_{oi} H_{oi} + \rho \sum_i^n Q_{oi} u_{oi} - \rho \sum_i^n Q_{Ni} u_{Ni} + \sum_{i=1}^{n_c} \gamma \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{VC} z_i dV \quad \text{Eq. 5}$$

L'ultima equazione ottenuta può essere ulteriormente semplificata facendo le seguenti assunzioni:

- P_0 è l'intera potenza fornita al sistema data dai contributi di energia “*naturale*” dei serbatoi ($\sum_i^{n_N} \gamma Q_{Ni} H_{Ni} = P_N$) ed “*artificiale*” delle stazioni di pompaggio ($\sum_i^{n_p} \gamma Q_{pi} H_{pi} = P_p$);
- La potenza “*usata*” ($\sum_i^{n_p} \gamma Q_{oi} H_{oi} = P_U + P_L$) è invece data dalla somma di quella sfruttata per arrecare la portata alle utenze e quella che invece è legata alle perdite idriche;
- La variazione dell'energia interna al passare del tempo è data dal termine $\rho \sum_i^n Q_{oi} u_{oi} - \rho \sum_i^n Q_{Ni} u_{Ni}$, ed escludendo le possibilità di scambio con l'esterno. Questa variazione di energia dell'acqua nel tempo altro non è che la perdita P_F dovuta all'attrito del fluido nell'attraversare le componenti di rete.
- L'ultimo termine dell'equazione di sopra costituisce lo scambio, al passare del tempo, del potenziale di energia dai serbatoi al sistema da servire (P_c).

Si giunge in questo modo alla formulazione semplificata sottostante Eq. 6:

$$P_N + P_P = P_U + P_L + P_F + P_C \quad \text{Eq. 6}$$

Il risultato ottenuto dimostra che la potenza necessaria a servire la rete di distribuzione è uguale alla somma della potenza richiesta per servire l'utenza, quella sprecata a causa delle perdite idriche localizzate e distribuite, più la variazione nel tempo del potenziale di energia inerente ai serbatoi appartenenti al sistema.

L'equazione ottenuta, se integrata nel tempo, consente la conversione dei termini di potenza in termini energetici, una volta che si siano adottate le seguenti notazioni:

Tabella 1

Energia	Notazione
Energia "naturale"	E_N
Energia dovuta alle pompe	E_P
Energia dell'acqua fornita agli utenti	E_U
Energia dissipata per attrito	E_L
Energia associata all'acqua persa	E_F
Energia associata ai serbatoi interni alla rete di distr.	E_C

Si perviene quindi all'Eq. 7:

$$\begin{aligned} E_{Input}(t_p) &= E_N(t_p) + E_P(t_p) = E_U(t_p) + E_L(t_p) + E_F(t_p) + \Delta E_C(t_p) \\ &= E_{Output}(t_p) + E_{Dissipated}(t_p) + \Delta E_{Compensation}(t_p) \quad \text{Eq.7} \end{aligned}$$

Quest'ultimo risultato ci dice che, l'energia in ingresso al volume di controllo è uguale alla somma di quella uscente a causa dei consumi idrici intesi come prelievi e perdite idriche, quella dissipata per attrito più il contributo energetico associato alla capacità di compenso dei *tanks*.

$E_{Input}(t_p)$	$E_N(t_p)$ (natural input energy)	$E_U(t_p)$ (energy delivered to users)	$E_{Output}(t_p)$
	$E_P(t_p)$ (shaft input energy)	$E_L(t_p)$ (outgoing energy through leaks)	
		$E_F(t_p)$ (friction energy)	

Figura 9 Schematizzazione dei contributi al bilancio energetico

Bilancio di energia per una rete di distribuzione idrica nel lungo termine

Si precisa a questo punto che, i sopra menzionati termini di compenso sono rilevanti in caso di breve periodo di simulazione. Bisogna, però, individuare qual è questa soglia temporale $t_{p,E}$ che distingue il breve termine dal lungo termine. Essa è stabilita dalla scelta progettuale circa il massimo valore di energia di compenso, il quale è solamente una piccola percentuale di energia da apportare al sistema in input (E_{input}) come espresso di seguito nel caso di un valore dell'1%.

$$t_{p,T}(days) = \frac{\Delta E_{c,max}}{\frac{1}{100} E_{input}(daily)} \text{ Eq. 8}$$

Perciò se il controllo energetico è effettuato annualmente, il termine di compenso potrebbe essere omissso.

1.3 I diversi contributi al bilancio energetico complessivo del sistema

Si vogliono a questo punto esplicitare i contributi delle diverse componenti di un impianto acquedottistico al bilancio di energia.

1.3.1 Energia scambiata con i sistemi esterni E_{in} e E_{out}

Sul confine del volume di controllo si possono avere scambi di energia con altri sistemi acquedottistici o porzioni dello stesso. In particolare, il quantitativo di energia in ingresso E_{in} può essere stimato come nella seguente espressione Eq. 9:

$$E_{in}(t_p) = \gamma \sum_{i=1}^{n_{in}} \left[\sum_{t_k=t_1}^{t_p} Q_{in_i}(t_k) H_{in_i}(t_k) \Delta t \right] \text{ Eq. 9}$$

dove:

- $Q_{in_i}(tk)$ è la portata che viene immessa in un punto del confine del volume di controllo al tempo tk ,
- $H_{in_i}(tk)$ è il relativo carico idraulico totale associato a quel punto, ed n_{in} è il numero di punti di immissione,
- t è l'intervallo temporale di valutazione delle grandezze, ed in questo caso è supposto costante,
- γ è il peso specifico dell'acqua.

Allo stesso modo l'energia in uscita al volume di controllo è pari ad E_{out} secondo l'Eq. 10:

$$E_{out}(t_p) = \gamma \sum_{i=1}^{n_{out}} \left[\sum_{t_k=t_1}^{t_p} Q_{out_i}(t_k) H_{out_i}(t_k) \Delta t \right] \text{ Eq. 10}$$

dove :

- $Q_{out_i}(tk)$ è la portata uscente da un punto nell'istante tk ;
- $H_{out_i}(tk)$ è il carico idraulico totale associato al punto di uscita di Q_{out_i} ;
- n_{out} è il numero di punti di uscita.

1.3.2 L'energia inerente ai gruppi di pompaggio

Si chiariscono ora, i diversi aspetti che caratterizzano l'apporto delle pompe al bilancio energetico del sistema.

L'energia complessivamente consumata al generico istante dalle i pompe presenti nell'impianto viene indicata come E_{pc} (Eq. 11):

$$E_{pc}(t_p) = \sum_{i=1}^{n_p} (t_p) \text{ Eq. 11}$$

Questa, è in parte consumata per attrito ed in parte ceduta al fluido.

Il quantitativo ceduto all'acqua, dalle n_p pompe costituenti la stazione di pompaggio, è E_p (Eq. 12):

$$E_p(t_p) = \gamma \sum_{i=1}^{n_p} \left[\sum_{t_k=t_1}^{t_p} Q_{p_i}(t_k) H_{p_i}(t_k) \Delta t \right] \text{ Eq. 12}$$

Dove la portata sollevata dall' i -esima pompa e la corrispettiva prevalenza al generico istante di valutazione sono rispettivamente, H_{p_i} e Q_{p_i} .

Mentre, l'energia dissipata dalla pompa è definita, come E_{FP} , Eq. 13:

$$E_{FP}(t_p) = E_{cp}(t_p) - E_p(t_p) \text{ Eq. 13}$$

1.3.3 Energia derivante da serbatoi esterni alla rete di distribuzione EN

Ammettendo di avere all'interno del volume di controllo dei serbatoi che alimentano la rete di distribuzione, l'energia che fornirebbero sarebbe E_N (tp), Eq. 14:

$$E_N(t_p) = \gamma \sum_{i=1}^{n_N} \left[\sum_{t_k=t_1}^{t_p} Q_{N_i}(t_k) H_{N_i}(t_k) \Delta t \right] \text{ Eq. 14}$$

dove $Q_{N_i}(tk)$ è la portata erogata dall' i -esimo serbatoio al tempo t_k e $H_{N_i}(t_k)$ il relativo carico idraulico totale. Mentre, n_N è il numero dei serbatoi.

1.3.4 Energia dell'acqua fornita agli utenti EU

Il quantitativo di energia fornita agli utenti $E_U(t_k)$, è dato, per ogni singolo nodo della rete ed in ogni periodo di valutazione, dal prodotto fra la portata ivi prelevate ed il corrispondente carico idraulico, tutto riferito al peso specifico del fluido secondo l' Eq. 15:

$$E_U(t_p) = \gamma \sum_{i=1}^n \left[\sum_{t_k=t_1}^{t_p} q_{u_i}(t_k) H_i(t_k) \right] \Delta t \text{ Eq.15}$$

dove $q_{u_i}(t_k)$ è la portata erogata nell' i -esimo nodo al tempo t_k e $H_i(t_k)$ il relativo carico idraulico totale (n è il numero di nodi della rete).

1.3.5 Energia dissipata per attrito dalla rete EF

L'energia dissipata per attrito $E_F(t_p)$ nella rete di distribuzione prende in esame le portate che transitano nelle condotte per le corrispondenti perdite di carico, Eq. 16:

$$E_F(t_p) = \gamma \sum_{j=1}^{n_L} \left[\sum_{t_k=t_1}^{t_p} Q_j(t_k) \Delta h_j(t_k) \right] \Delta t \text{ Eq. 16}$$

dove $Q_j(t_k)$ è la portata che transita nel j -esimo ramo al tempo t_k ed $h_j(t_k)$ è la perdita di carico idraulico nel j -esimo ramo. Mentre n_L è il numero di rami della rete.

1.3.6 Energia associata all'acqua persa EL

L'energia sprecata a causa della presenza di perdite idriche $E_L(t_p)$ prevede la moltiplicazione tra i carichi H ai nodi per il quantitativo di portata perso. Queste ultimo, in particolare è calcolato considerandone la dipendenza dalla pressione. Si giunge così alla definizione di questa quota dienergia, per mezzo dell' Eq. 17:

$$E_L(t_p) = \gamma \sum_{i=1}^n \left[\sum_{t_k=t_1}^{t_p} q_{l_i}(t_k) H_i(t_k) \right] \Delta t \text{ Eq.17}$$

dove $q_{l_i}(t_k)$ è la portata persa attribuita all' i -esimo nodo al tempo t_k , $H_i(t_k)$ è il relativo carico idraulico totale ed n è il numero di nodi della rete.

1.3.7 Energia associata ai serbatoi interni alla rete di distribuzione EC

L'energia connessa alla capacità di compenso esercitata dal serbatoio interno $E_C(t_p)$, tiene conto dei livelli idrici ivi, e della sua area di base, secondo la Eq. 18:

$$\Delta E_C(t_p) = \gamma \sum_{j=1}^{n_C} \{ A_j [z_j^2(t_p) - z_j^2(t_1)] / 2 \} \Delta t \text{ Eq. 18}$$

dove $z_j(t_p)$ e $z_j(t_l)$ sono rispettivamente il livello finale ed iniziale nel serbatoio di compenso i -esimo e A_i è l'area del serbatoio stesso supposta costante, mentre n_C è il numero di serbatoi interni al sistema (Cabrera et al., 2010).

In definitiva il bilancio di energia di un sistema di acquedotto, previa individuazione di un suo volume di controllo e relativamente ad un periodo di analisi t_p , assume la seguente connotazione (Eq. 19) :

$$E_{in}(t_p) + E_N(t_p) + E_p(t_p) = E_{out}(t_p) + E_U(t_p) + E_L(t_p) + E_F(t_p) + \Delta E_C(t_p) \quad \text{Eq. 19}$$

questa ci consente di aggiornare lo schema basilare proposto da Cabrera (Fig.3) con quello presentato da Bragalli et al. (2012) sottostante.

$E_{in}(t_p)$	$E_{in}(t_p)$	$E_{Ntot}(t_p)$	$E_{out}(t_p)$	$E_{out}(t_p)$	$E_{output}(t_p)$
$E(t_p)$	$E_N(t_p)$		$E_{input}(t_p)$		
	$E_{PC}(t_p)$	$E_P(t_p)$		$\Delta E_C(t_p)$	$\Delta E_C(t_p)$
				$E_L(t_p)$	$E_{loss}(t_p)$
			$E_F(t_p)$		
		$E_{FP}(t_p)$	$E_{FP}(t_p)$	$E_{FP}(t_p)$	

Figura 10:rappresentazione complete dei contributi al bilancio energetico di una rete di distribuzione idrica

2. L'Algoritmo euristico GHEST

Introduzione

Il principale intento di questo capitolo è l'esplicazione delle caratteristiche dell'algoritmo euristico GHEST come mezzo di ottimizzazione dei sistemi di distribuzione idrica. Per perseguire questo obiettivo si vuole, in via preliminare, chiarire il contesto di ricerca in cui esso si colloca. Seguirà quindi una sintetica presentazione di quali potrebbero essere gli algoritmi finalizzati alla risoluzione di problemi di ottimizzazione, con particolare interesse verso le strategie euristiche.

2.1 Algoritmi euristici

Il problema di *optimal design O-D* per le reti di distribuzione idrica (*WDN*) consiste, nella sua essenza matematica, nella ricerca di un minimo di una funzione non lineare a variabili continue e discrete, vincolato da funzioni lineari e non, a variabili miste.

La volontà di superare la complessità intrinseca ai problemi di ottimizzazione ha portato allo sviluppo di un apposito campo di ricerca, l'*Euristica*. Si precisa fin da adesso che in tale campo, si rinuncia ad un approccio "esatto" alla questione, semplificandone così l'ostilità di base, pur garantendo l'attendibilità delle soluzioni grazie a processi statistici. Infatti, gli algoritmi euristici (*Heuristic Optimization-HO*) sono processi iterativi non deterministici che simulano un fenomeno esistente in natura e, per il loro impiego ai fini della risoluzione di un problema di ottimizzazione è necessario calibrare due caratteristiche fondamentali:

- Il grado della ricerca nella regione delle soluzioni, che può essere più o meno elevato a seconda che tale regione si costituisca di elementi più o meno promettenti.
- Il grado di esplorazione, che ci consenta di scegliere soluzioni in regioni distinte per poter confrontare i risultati e indirizzarci su quelli che sembrano migliori.

Il vantaggio maggiore nell'uso di tali procedure è sicuramente rappresentato dal fatto che, sfruttando regole di transizione probabilistica, indirizzano la loro ricerca in regioni dello spazio con probabilità di miglioramento delle soluzioni. Non è da meno però, la semplificazione che essi apportano alla gestione delle variabili discrete, essi infatti lasciano ad un simulatore numerico la risoluzione delle equazioni idrauliche. Gli inconvenienti che invece derivano proprio dall'uso di tali algoritmi risiedono nella loro natura non deterministica, cioè non precisa. Essi infatti potrebbero rimanere intrappolati, in termini di soluzioni, in un minimo locale senza riuscire ad esplorare globalmente la regione ammissibile, cosa che invece avviene per gli algoritmi esatti (*Marchi, 2009*). In ogni caso, se per certi aspetti matematici, l'approccio euristico ha delle carenze, d'altra parte, riesce comunque a fornire al progettista un insieme di alternative più o meno simili tra le quali

scegliere quella che reputa più adatta, secondo criteri che difficilmente possono essere inseriti in una formulazione matematica e che solo la mente umana, istruita dall'esperienza, può cogliere.

2.1.1 *Algoritmi genetici (GA)*

Gli algoritmi genetici GAs sono una classe di algoritmi euristici, e come tali non risolvono direttamente le equazioni del problema di *ottimizzazione* e non trattano direttamente con i vincoli. Un algoritmo del genere non assicura il raggiungimento dell'ottimo assoluto, ma restituisce una popolazione di soluzioni che, con elevata probabilità, ne contiene una di buona qualità, con un contenuto sforzo computazionale; inoltre questi possono gestire spazi di dimensioni molto estesi, con una certa facilità.

In questa categoria di strategie si distinguono due metodi per la soluzione del problema di ottimizzazione che vengono sinteticamente presentati come:

- *Algoritmi genetici mono obiettivo*: nel caso in cui si proponano come unico scopo di individuare la migliore delle soluzioni per un'unica funzione da minimizzare ad esempio, il consumo energetico.
- *Algoritmi genetici multi obiettivo MOGA(Multi-Objective heuristic algorithms)*: in essi si prendono in considerazione più condizioni da ottimizzare che potrebbero essere trattate una per volta o parallelamente, come nel caso dei codici *parallelMOGA*.

In entrambi i casi, la modalità di esplorazione degli elementi della popolazione è basata sull'analogia Darwiniana dell'evoluzione, infatti simulando il principio di sopravvivenza degli individui, associano maggiore probabilità di sopravvivenza a quelle soluzioni che rispondono a certi requisiti. Un algoritmo genetico è per quanto detto fino a questo momento, un processo *adattativo*, cioè che si adatta all'ambiente che lo circonda, e ciò che svolge il ruolo dell'ambiente è la funzione obiettivo, essa infatti suggerisce come devono cambiare le soluzioni in termini di caratteristiche per avere la probabilità di migliorare.

2.1.2 *Strategie Evolutive (ES)*

Le Strategie evolutive sono algoritmi genetici che utilizzano una rappresentazione a numeri reali con un unico operatore: la mutazione. La prima fase analizzata di questi algoritmi è basata su una popolazione di un solo individuo; esso viene sottoposto a mutazione ed il "*figlio*" che si genera viene accettato come nuovo individuo della popolazione, a patto che in termini qualitativi superi le caratteristiche del "*genitore*". In pratica, se la soluzione ultima non fosse realmente più affidabile della prima, l'insieme delle possibili soluzioni rimarrebbe invariato. A dispetto del fatto che la popolazione sia formata da un solo individuo, questa strategia viene chiamata a "due individui", dato che il figlio compete con il genitore e nella fase competitiva gli individui della popolazione sono oggettivamente due (*Michalewicz,1996*). Successive implementazioni hanno portato alla formulazione della "strategia a più individui" che producono un figlio secondo il principio degli algoritmi GA descritti al paragrafo precedente. A questo punto, se nella strategia a due individui il figlio compete con il genitore, ora viene eliminato l'individuo peggiore presente nelle

popolazioni. Dalle strategie evolutive deriva l'algorithmo GHEST, le cui caratteristiche verranno di seguito chiarite.

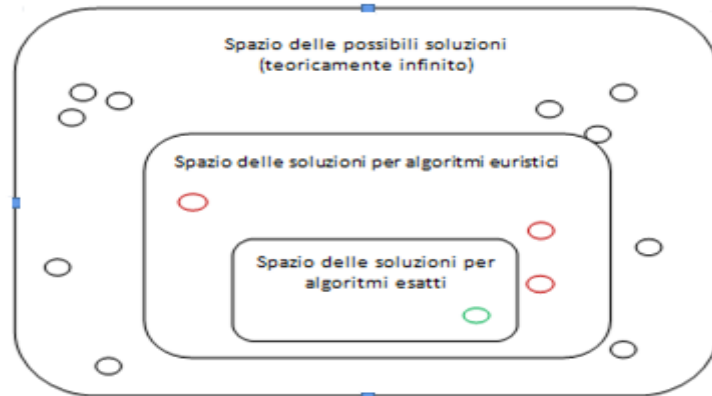


Figura 11: Spazio delle soluzioni

2.2 La funzione obiettivo nelle strategie che si ispirano alle teorie evolutive della specie.

Abbiamo detto che sia gli algoritmi SE, ma soprattutto quelli GA, si ispirano alle teorie Darwiniane sull'evoluzione degli esseri viventi e in quest'ottica, l'habitat naturale delle specie è la funzione obiettivo. Il valore di questa funzione viene chiamato *idoneità* o *fitness*, ed è il parametro che misura il maggiore o minore grado di adattamento di un individuo della popolazione. A questo punto, si vuole accennare a come viene modificata la funzione obiettivo, durante i diversi *steps* computazionali negli algoritmi genetici per poter giungere alla soluzione migliore. Partendo dalla classica formulazione, l'equazione da ottimizzare viene modificata per contemplare i vincoli compresi nella formulazione del problema in trattazione. L'idoneità verrà poi misurata sulla base della nuova funzione $F'(x_1, \dots, x_n)$, composta da due parti:

- l'ex funzione obiettivo;
- la penalità;

secondo la formula, Eq. 20:

$$F'(x_1, \dots, x_L) = [F(x_1, \dots, x_L) + \sum_{i=1}^k \delta_i \theta(i)] \text{ Eq. 20}$$

dove x è la variabile del problema, e quindi nel caso della rete di distribuzione idrica è la dimensione che potrebbero assumere gli L rami della rete, δ è il coefficiente di penalità che misura la svalutazione da associare all'individuo che non risponde all' i -esimo vincolo tra i k presenti. Si faccia presente, però, che questa non è l'unica formulazione possibile, dato che ogni autore definisce la penalità e quindi il fitness a suo modo a seconda del tipo di obiettivo considerato

2.3 GHEST (Genetic Heritage Evolution by Stochastic Transmission)

2.3.1 Il problema matematico di base in una strategia di ottimizzazione di una rete di distribuzione idrica.

Il problema di *optimal design*-OD si pone l'obiettivo di trovare quelle dimensioni e caratteristiche di rete che ottimizzano un aspetto del sistema acquedottistico, quale potrebbe essere ad esempio la riduzione del consumo energetico totale, rispettando dei vincoli imposti. Questo approccio alla gestione dei sistemi di studio ha acquistato rinnovato interesse alla luce di problematiche emergenti come il recupero di affidabilità, il razionale utilizzo della risorsa idrica o la diminuzione dei costi energetici.

La complessità del problema di *optimal design* in *WDN* pur non considerando aspetti legati all'affidabilità, rientra come abbiamo anticipato, nella categoria dei complessi problemi combinatori NP-hard (*Nondeterministic Polynomial-time hard*).

Le tecniche di ottimizzazione applicate in *WDN* sono presenti in letteratura a partire dalla fine degli anni '60; da allora fino ai giorni nostri, emerge che lo sviluppo dei metodi della Ricerca Operativa è caratterizzato dalla fase di superamento della difficoltà matematiche che condizionano l'approccio alla questione. Sintetizzato il problema di ottimizzazione per le reti di distribuzione idrica, segue la sua formulazione classica.

Questa è inerente ai problemi di minimizzazione del costo delle condotte, quindi per la natura dell'intento, la formulazione OD della *funzione obiettivo* da minimizzare, è quella riportata di seguito, Eq. 21:

$$\min C = \sum_{p \in P} c(D_p) L_p \quad \text{Eq. 21}$$

questa è soggetta a:

$$\sum_{(i,j) \in L} Q_{ij} - \sum_{(i,j) \in L} Q_{ji} = q_j \quad j \in N$$

$$H_i - H_j = \alpha \frac{L_{ij}}{c W_{ij}^\beta D_{ij}^\gamma} Q_{ij} |Q_{ij}|^{\beta-1} \quad (i,j) \in L$$

$$D^T \in D$$

$$P_i \geq P_{min} \quad i \in N$$

In cui la seconda e terza equazione descrivono fisicamente quanto accade al fluido, cioè sono rispettivamente l'equazione di continuità al nodo e quella del moto in condotta. Segue poi la variabile di controllo su cui verte l'analisi che indica che il diametro è di tipo discreto e che deve appartenere alla lista indicata di *D* diametri commerciali.

Ed infine troviamo il vincolo di pressione minima ai nodi.

Si capisce bene come rimangano esclusi moltissimi dei vincoli reali di progetto, alcuni dei quali molto importanti nel valutare la soluzione, come ad esempio la velocità nelle condotte.

Si tratta dunque di una situazione altamente complessa dal punto di vista matematico per la cui risoluzione sono stati creati degli algoritmi distinguibili in due classi: algoritmi esatti o euristici a seconda dell'approccio al problema. In particolare segue la presentazione della strategia euristica GHEST sfruttata nel presente lavoro

2.3.2 Presentazione dell'algoritmo GHEST

L'algoritmo GHEST è un particolare tipo di Strategia Evolutiva (ES) e come tale, modifica ciclicamente una *popolazione* di soluzioni impiegando operatori che presentano un'analogia con l'evoluzione darwiniana della specie. Più precisamente, GHEST è una procedura (μ, λ) - ES cioè in esso le μ soluzioni da cui dovrebbe evolvere una nuova popolazione sono scelte in un insieme di λ soluzioni figlie in modo che, ad ogni iterazione, le soluzioni scartate vengano eliminate definitivamente. Questo, coerentemente alla volontà di concentrare la ricerca dove i risultati sembrano incoraggianti.

Lo specifico funzionamento di GHEST nel caso di dimensionamento ottimale di una rete di distribuzione idrica, prevede come prima cosa la creazione di una popolazione costituita da un numero *Pop* di soluzioni casuali Gen^1 .

$$\begin{array}{c}
 \mathbf{Gen}^i = \begin{array}{c} \text{Parents} \\ \left[\begin{array}{c} sol_{Pop} \\ \dots \\ sol_{PS} \\ \dots \\ sol_1 \end{array} \right]^i \end{array} = \begin{array}{c} \left[\begin{array}{cccc} I_{Pop,1} & I_{Pop,2} & \dots & I_{Pop,p} & \dots & I_{Pop,P} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ I_{PS,1} & I_{PS,2} & \dots & I_{PS,p} & \dots & I_{PS,P} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ I_{1,1} & I_{1,2} & \dots & I_{1,p} & \dots & I_{1,P} \end{array} \right]^i \\ \downarrow \\ \mathbf{m}^i = [m_1 \quad m_2 \quad \dots \quad m_p \quad \dots \quad m_p] \\ \mathbf{s}^i = [s_1 \quad s_2 \quad \dots \quad s_p \quad \dots \quad s_p]
 \end{array}
 \end{array}$$

Figura 12: generica generazione di soluzioni in GHEST

Si precisa che la generica soluzione *k* appartenente alla popolazione *Pop* è acquisita come una stringa di indici *I* che denotano la posizione del diametro associato al ramo *P* nella lista dei diametri disponibili.

$$\mathbf{Gen}^1 = [I_{kp}]^1 \quad k = 1, \dots, Pop; \quad p = 1, \dots, P$$

Poi, ciascuna soluzione (*sol*) viene valutata grazie al simulatore idraulico (Epanet2) e memorizzata come un vettore di *P* valori interi.

$$Sol_k = [I_{kp}] \quad p = 1, \dots, P$$

Ognuna di esse è ritenuta ammissibile se garantisce il rispetto della funzione obiettivo e dei vincoli, come ad esempio il vincolo idraulico HD circa il valore minimo di pressione da garantire ai nodi. L'inosservanza di questo, infatti comporterebbe un deficit di carico nel sistema di studio interpretabile come l'inadeguatezza della soluzione trovata, Eq. 22.

$$HD = \sum_{i \in N} \max(H_{i,min} - H_{i,0}) \text{ Eq. 22}$$

Al termine della valutazione di tutte le soluzioni, queste vengono ordinate sulla base di OF (cioè in riferimento alla funzione obiettivo che ci guida verso l'ottimo) e le migliori vengono indicate come insieme di partenza per la successiva iterazione.

$$OF(sol_1) < OF(sol_2) < \dots < OF(sol_k) < \dots < OF(sol_{pop})$$

Gli elementi di quest'ultimo insieme detto "PS" sono definiti da un parametro dell'algorithm *pct* secondo l'equazione successiva, Eq. 23 :

$$PS = \text{int} \left(\frac{pop \cdot pct}{100} \right) \text{ Eq. 23}$$

Le caratteristiche delle PS soluzioni scelte sono poi riassunte nei due vettori dei valori medi *m* e delle deviazioni standard *s* che caratterizzano la distribuzione normale N(m,s) da cui evolve la ricerca.

$$Gen^{i+1} = N(m^i, s^i) \text{ Eq. 24}$$

Dunque l'aggiornamento del genoma è un processo stocastico che porta alla compilazione di due array di *p*-componenti *m* ed *s* ed i cui elementi rappresentano rispettivamente la media e la deviazione standard dei *p*-esimi indici delle PS soluzioni selezionate alla *i*-esima generazione.

$$\begin{cases} m_p = \text{mean} (I_{1,p}, I_{2,p}, \dots, I_{PS,p}) \\ s_p = \text{dev. st} (I_{1,p}, I_{2,p}, \dots, I_{PS,p}) \end{cases} \text{ Eq. 25}$$

La prima condizione garantisce che almeno un indice (cromosoma) abbia ancora una certa possibilità di cambiare (evolvere), la seconda dà una misura del potenziale evolutivo globale dei genitori, e quest'ultima valutazione richiede che la media della componenti dell'arrays_p sia maggiore di una certa soglia.

Se invece fossimo in una situazione di stallo, GHEST eviterebbe, attraverso il processo "shuffle", di rimanere intrappolato in un "vicolo cieco", cioè di incagliarsi in un minimo locale dello spazio delle soluzioni restituendolo come minimo assoluto costringendo quindi a cessare la ricerca.

In tal caso le nuove soluzioni sono create a partire da una distribuzione normale $N(sol_{best}, S_{shuffle})$ in cui *solbest* è la migliore soluzione trovata fino a quel momento e *Sshuffle* è il valore di deviazione standard preventivamente definito dall'utente ed usata nel processo *shuffle*.

$$Gen^{i+1} = N(sol_{best}^i, S_{shuffle}) \text{ Eq. 26}$$

Terminato ogni passo del processo iterativo, GHEST fornirà un valore definito *solbest* come la migliore soluzione trovata e dunque all'ultimo passaggio esso incarnerà la soluzione definitiva. Le variabili della nuova popolazione vengono poi arrotondate agli indici interi cioè "corretti"

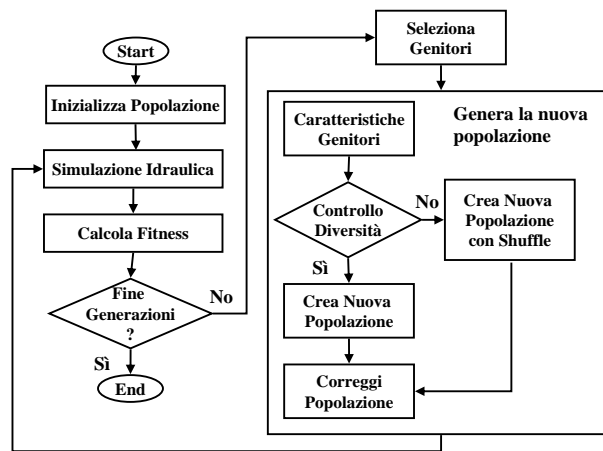


Figura 13: Schema del processo GHEST

Segue una rappresentazione, in cui si evince cosa accade quando l'algorithmo GHEST si immette accidentalmente in un vicolo cieco. In questo caso infatti il processo "shuffle" (rimescolo) orienta la ricerca in una nuova regione dello spazio delle soluzioni ed in particolare, i cerchietti rappresentano la migliore soluzione all'interno della generica generazione, mentre la linea rappresenta la soluzione ottima trovata fino a quel momento. (Bolognesi et al, 2010).

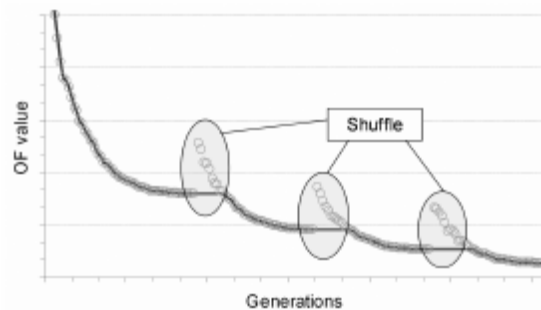


Figura 14: Effetto del processo shuffle

2.4 Il simulatore idraulico Epanet2.

In via propedeutica alla comprensione dei risultati che verranno riportati nei paragrafi successivi si presentano le caratteristiche del simulatore idraulico sfruttato da GHEST e di cui in generale ci si è serviti nella presenta ricerca: Epanet2.

Si tratta di un software pubblico, che consente di implementare un modello che simula il comportamento idraulico e di qualità dell'acqua, all'interno di un sistema di distribuzione idrica civile.

Epanet2 concepisce la rete di distribuzione come un insieme di elementi lineari, collegati nei loro punti finali chiamati nodi, ed ognuno di essi è identificato da un indice. Gli elementi lineari

comprendono condotte, pompe e valvole. I nodi, oltre ad essere il punto di congiunzione fra una o più condotte, possono essere punti di erogazione (nodo di domanda) e punti di immissione (serbatoi a livello costante o variabile, rispettivamente chiamati *reaservoir* o *tanks*). Tale simulatore ha a disposizione le formule più comuni per il calcolo delle perdite di carico nelle condotte quali: la formula di Hazen-Williams, la formula di Darcy-Weisbach e la formula di Chezy-Manning (Becciu & Paoletti, 2004). Per quanto riguarda l'aspetto informatico, invece, Epanet2 è un software *demand-driven* che quindi prende come input la domanda idrica ai singoli nodi detta anche *Base Demand (BD)*.

Per quanto concerne gli aspetti matematici, il modello usato da Epanet2 per effettuare la simulazione risolve, ad ogni passo temporale, le equazioni di continuità Eq. 27 e del moto Eq. 28,:

$$\sum_{(i,j) \in L} Q_{ij} - \sum_{(i,j) \in L} Q_{ji} = q_j \quad j \in N \quad \text{Eq. 27}$$

$$H_i - H_j = \alpha \frac{L_{ij}}{C_{W_{ij}}^\beta D_{ij}^5} Q_{ij} |Q_{ij}|^{\beta-1} \quad (i,j) \in L \quad \text{Eq. 28}$$

insieme con le equazioni riferite ad ogni nodo di accumulo (*reaservoir* o *tanks*) Eq. 29-31:

$$\frac{\delta y_s}{\delta t} = \frac{q_s}{A_s} \quad \text{Eq.29}$$

$$q_s = \sum_i Q_{is} - \sum_j Q_{js} \quad \text{Eq.30}$$

$$H_s = E_s + y_s \quad \text{Eq.31}$$

Dove s è il numero dei nodi di accumulo, A_s è l'area della sezione trasversale del nodo di accumulo s (considerata infinita per i *reservoirs*) ed E_s è la quota (*elevation*) del nodo s , mentre y_s è la quota d'acqua in essi. Epanet2 risolve le equazioni di continuità e del moto fornendo, nel caso ci concentriamo sul solo problema idraulico, tutte le portate Q_{ij} e i carichi H_i e H_j . Il passo temporale δt si può impostare nelle opzioni del programma distinguendo le circostanze di

- Singolo periodo
- Periodo esteso : cioè si considera un periodo lungo di simulazione, ad esempio una giornata, e lo si suddivide in intervalli temporali uguali in ognuno dei quali viene affrontato il problema, come se ci si trovasse in condizioni di moto permanente, creando cioè tante "fotografie" del sistema ed unendole in successione temporale.

Qualora si scegliesse come periodo di simulazione un giorno di esercizio, al programma dovrà essere indicato il *Pattern*, cioè la successione oraria dei coefficienti di ragguaglio c_i (*demand pattern*) che ci consentono di individuare la variazione di domanda idrica della rete nelle diverse ore del giorno.

Alla luce di quanto detto, precisiamo che il quantitativo di portata prelevato dall'utenza, ad ogni singolo nodo q_j , sarà dato dalla somma della domanda idropotabile più le perdite idriche, come di seguito riportato Eq. 32:

$$q_j = c_i \cdot BD + q_{li} \text{ Eq. 32}$$

In particolare le perdite idriche q_{li} riguardanti ogni singolo nodo sono calcolate in funzione della pressione P in esso, Eq. 33 :

$$q_{li} = \alpha_i \cdot P_i^n \text{ Eq.33}$$

Dove α ed n sono dei coefficienti dipendenti dal tipo di materiale dalla condotta e dal tipo di rottura, rispettivamente indicati come *emitter coefficient* e *emitter exponent*.

Per quanto riguarda invece gli aspetti legati alla pompa che alimentano il sistema, il software richiede l'introduzione delle informazioni circa la curva caratteristica e quella di rendimento. Più in particolare, per la prima tipologia l'utente può inserire o un certo numero di coppie di valori di portata Q e carico H, caratterizzante il funzionamento del motore, oppure introdurre un solo punto di lavoro rimandando al simulatore l'estrapolazione dell'intera curva in via automatica.

Per la curva dei rendimenti, invece, manca questa capacità di estrapolazione, dal momento che le curve potrebbero essere anche di forma diversa e quindi si necessita dell'introduzione di coppie di valori di portata e rendimento.

3. La rete di studio

Introduzione

Il problema di ottimizzazione che questa ricerca ha voluto affrontare, ha l'obiettivo di minimizzare il consumo energetico in una rete di distribuzione idrica. In ossequio a questo, si è voluto indagare sull'interazione tra i principali fattori che concorrono al dispendio energetico, sfruttando un preciso caso di studio.

Il caso in parola, è una rivisitazione della rete di distribuzione idropotabile presentata da E.Cabrera e M. A. Pardo in *Cabrera et. al (2010)* , che da qui in avanti verrà indicata come "*Cabrera_network*", e di cui se ne riportano le caratteristiche salienti nei paragrafi sottostanti.

3.1 Caratteristiche della rete "*Cabrera_network*"

Lo schema strutturale, della rete di distribuzione idrica oggetto di studio, è riportato nella figura sottostante (Fig.15); si tratta di uno schema semplice, ma proprio questa sua caratteristica ci consente di apprezzare in modo più nitido e approfondito la risposta alle simulazioni idrauliche a cui è stato sottoposto .

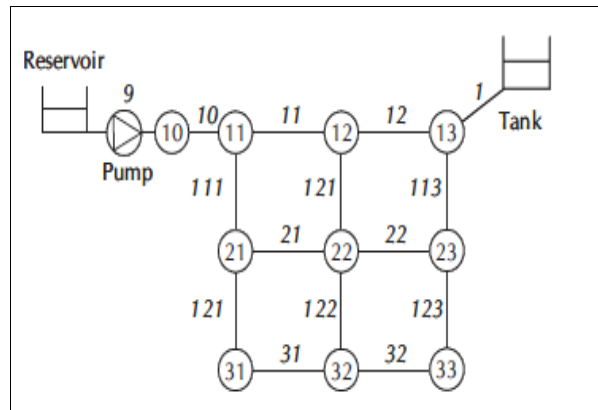


Figura 15: Cabrera_network

Si precisano a questo punto le sue connotazioni idrauliche e strutturali:

- Il serbatoio di compenso è caratterizzato da un'area di base di 20 m^2 e il suo livello idrico è suscettibile di variare tra un valore minimo di 2.5 m, corrispondente al momento iniziale della simulazione, ed un massimo di 7 m;
- La pompa che alimenta la rete è invece contraddistinta da una curva caratteristica che mantiene un valore minimo di pressione ai nodi pari a, Eq. 34:

$$H = 93,33 - 0,003646 Q^2 \quad \text{Eq. 34}$$

Inoltre essa funziona in modalità ON/OFF, cioè rimane in azione fin tanto che il livello idrico nel serbatoio non raggiunge in suo valore massimo, in corrispondenza del quale si arresta rimandando al serbatoio il compito di servire l'utenza. La sua efficienza, invece, è descritta da una curva a campana, i cui punti assumono valori di portata (l/s) e rendimento(%) riportati nella figura16 .

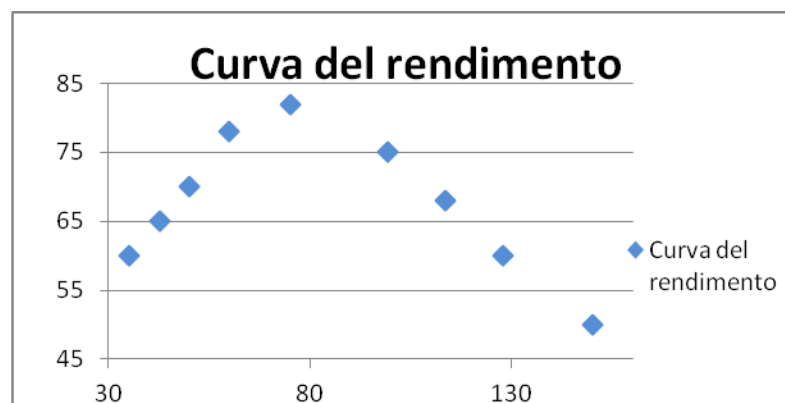


Figura 16: Curva di rendimento

- Per quanto concerne le condotte della rete, esse hanno scabrezza pari a 0,1 mm, mentre per lunghezze, diametri e caratteristiche dei nodi afferenti si rimanda alla tabella 2.

Tabella 2 Caratterizzazione della rete *Cabrera_network*

<i>Line</i>	<i>Length (km)</i>	<i>Original Diameter (mm)</i>	<i>Node</i>	<i>Base demand (l/s)</i>	<i>Elevation (m)</i>	<i>Emitter coefficient (m^{3-a}/s)</i>
10	2	300	Node 10	0	5.8	0.003992878
11	2	250	Node 11	5	5.8	0.015971513
12	2	250	Node 12	5	4	0.015971513
21	2	100	Node 13	3	2	0.015971513
22	2	100	Node 21	4	3	0.019964391
31	2	100	Node 22	8.5	2	0.023957269
111	4	150	Node 23	4	0	0.019964391
112	4	150	Node 31	2	1	0.011978634
113	4	150	Node 32	5	0	0.015971513
121	4	150	Node 33	2	0	0.011978634
122	4	150	Reservoir	-	25	
123	4	150	Tank	-	52	
1	2	300				

Si precisa che, nella tabella 2 l'ultima colonna a destra riporta i valori degli *emitter coefficient*. Questi concorrono alla definizione di una perdita idrica complessiva del 31.12% del quantitativo di acqua immesso in rete e, sono stati dedotti in accordo alla modalità con cui il simulatore idraulico Epanet2 interpreta le fallanze concentrate. In particolare, le stesse sono allocate uniformemente ai nodi secondo la pressione ivi e la lunghezza dei rami afferenti.

In ogni caso gli approfondimenti circa l'individuazione del valore degli *emitter coefficients*, e quindi degli alfa per ogni nodo, sono rimandati al capitolo precedente.

3.2 Risposta della rete alla simulazione idraulica con EPANET.

Lasciando invariate le caratteristiche generali dell'oggetto di studio, ed imponendo un valore minimo di pressione ammissibile ai nodi di 22,92m, si effettua la simulazione idraulica a mezzo di Epanet2. Questa si svolge in un tempo di 24 ore grazie al *pattern* (Tabella 3), o successione temporale di coefficienti di ragguaglio che consentono di valutare come si discosta il valore di portata oraria dalla portata media nella giornata.

Tabella 3 Coefficienti orari per la simulazione della variazione di domanda idrica

Time	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Coefficient	0.6	0.5	0.45	0.45	0.5	0.6	0.7	1.1	1.3	1.2	1.1	1
Time	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Coefficient	1.1	1.45	1.5	1.3	1.2	1.1	1.1	1.25	1.3	1.4	1	0.8

3.2.1 Gli esiti della simulazione in termini energetici:

Tabella 4 Energy Report

% Utilization	Average Efficiency	kW-hr/m ³	Average kW	Peak kW	kW-h/day
72.37	77.47	0.22	72.62	73.7	1261.37

Per poter comprendere l' *Energy Report* della simulazione idraulica, bisogna fare due puntualizzazioni.

Come prima cosa il termine kW-h/day non è proprio del linguaggio di Epanet2 in quanto il simulatore, imposto un costo di Euro/kW, restituisce gli euro al giorno spesi per l'approvvigionamento energetico del sistema. Ma nel presente studio, come anticipato, si è affidato un costo unitario per kW-h impiegato, ottenendo in questo modo una indicazione dei kW-h giornalieri impiegati dal sistema di pompaggio.

In secondo luogo si precisa che la pompa caratterizzante *Cabrera_Network* possiede una curva caratteristica, i cui valori di Q spaziano da 30 l/s a 150 l/s e il carico idraulico H va da 30 m a 90 m. Essa, però, è stata desunta per estrapolazione automatica da un unico punto di lavoro introdotto: portata pari ad 80l/s e carico di 70 m. Per quanto riguarda invece la curva dei rendimenti, si tratta di una funzione definita per punti i cui valori medi si aggirano intorno al 70%, come riportato nella Fig. 16 al precedente paragrafo.

3.2.2 L'alimentazione idrica della rete *Cabrera_Network*

La modalità con cui la rete idrica viene alimentata può essere sintetizzata grazie all'interfaccia grafica di Epanet2 dalla quale sono state desunte le immagini riportate in questo paragrafo.

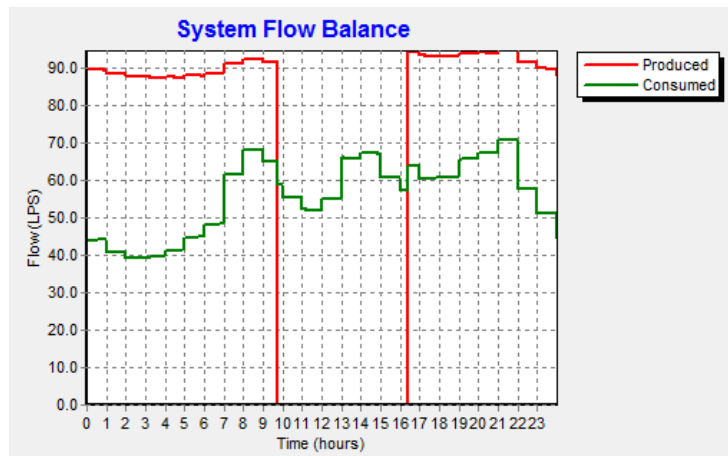


Figura 17 confronto tra portata trasferita dalla pompa e quella consumata nel sistema.

In particolare, la voce dell'interfaccia Epanet2 *System Flow Balance*, ci consente di confrontare i quantitativi di fluido immessi a mezzo della pompa in rete rispetto quelli consumati durante la simulazione. Si osservi come nell'intervallo di tempo compreso tra le 10:00 e le 16:00 la pompa

sospenda il suo funzionamento, rimandando al serbatoio di compenso il servizio idrico. L'interazione delle due parti nel servire la rete è resa più chiara dai due grafici sotto, che ci dimostrano in modo eclatante che la pompa smette di funzionare quando nel serbatoio si è raggiunto un livello di 7 m (Fig.18). In questo caso dal serbatoio, che ricordiamo essere concepito come un punto di prelievo, fuoriesce (si ha infatti un andamento negativo delle portate) un certo quantitativo di acqua che garantisce il soddisfacimento della domanda idrica di rete fino a quando non si riavvia la pompa.

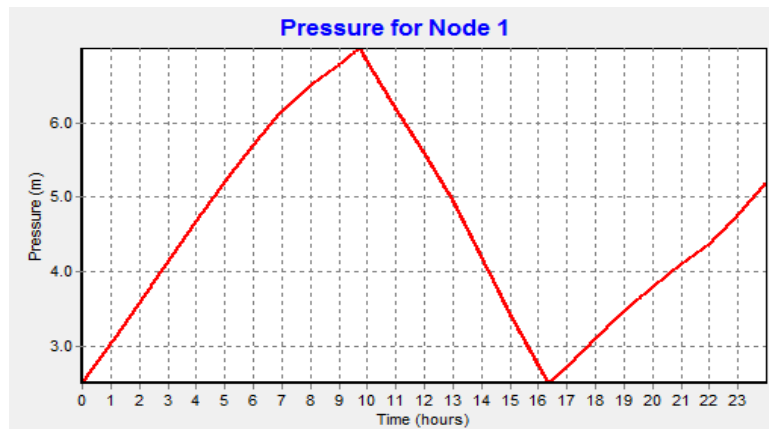


Figura 18 livello idrico nel serbatoio di compenso

Si osservi nei grafici 19, la corrispondenza temporale tra l'interruzione del servizio idrico della pompa (ramo9) ed il raggiungimento della pressione massima nel serbatoio che avvia il prelievo di portata da esso (nodo1).

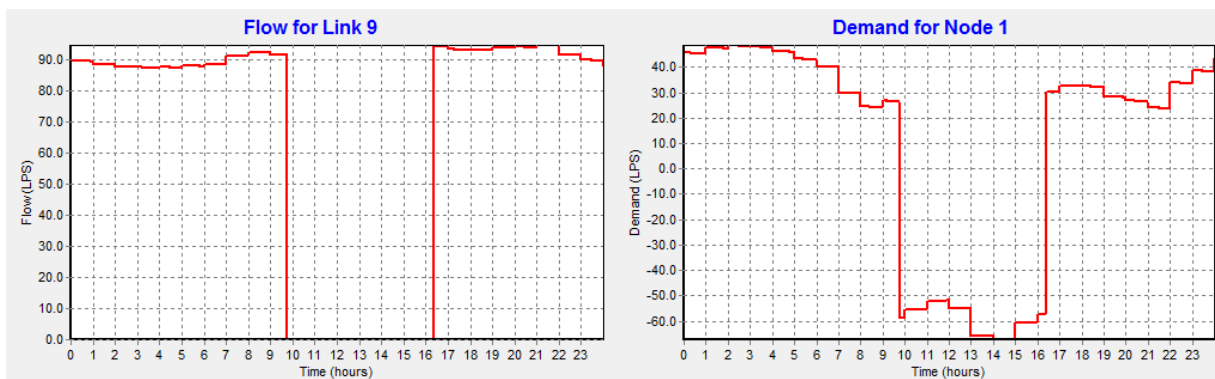


Figura 19 confronto tra la portata sollevata dalla pompa-(ramo 9) e quella in ingresso e uscita al (nodo 1)

L'interazione appena descritta è agevolata, nel caso specifico di rete, dalla configurazione dei diametri dei rami 10 11 12 ed 1, cioè dal diretto collegamento strutturale tra la pompa ed il serbatoio di compenso. Queste condotte, infatti, sono caratterizzate dall'aver dimensioni maggiori rispetto alle altre, costituendo un percorso preferenziale dell'acqua nella sua circolazione in rete, in cui si ha un valore di perdita idrica per attrito non eccessiva.

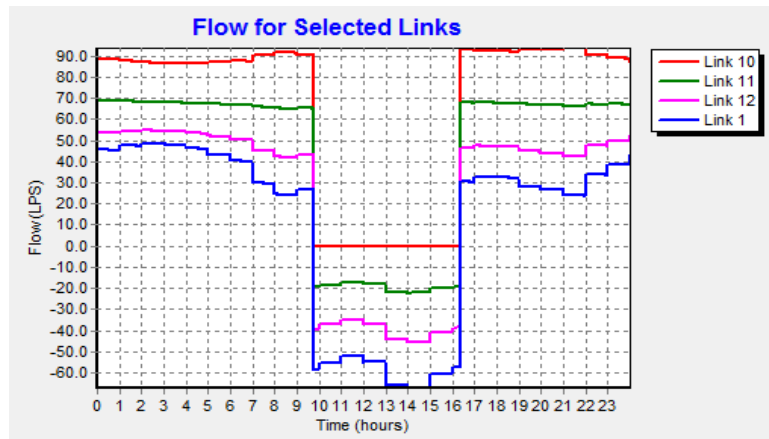


Figura 20 Transito di portata nella dorsale pompa-serbatoio

Dalla Fig.20 è chiaro l'inversione della direzione di propagazione delle portate che tra le 10 e le 16 causata dalla differenziazione dell'erogazione del servizio. Si precisa che tale fenomeno viene rappresentato da Epanet attribuendo segni diversi alle portate.

Vedremo in seguito, come al variare delle dimensioni dei quattro rami menzionati, ed in particolare riducendole, si altera la relazione funzionale comportando un mancato sfruttamento delle potenzialità energetiche del sistema .

3.2.3 Valori medi dei parametri idraulici

Vengono ora riportati i valori dei principali parametri idraulici riferibili alla *Cabrera_network*.

Per l'importanza che ha in questo studio il valore di pressione ai nodi, si è deciso di distinguere gli intervalli di osservazione in quello diurno e quello notturno, ed in ognuno di essi viene riportato rispettivamente il minimo valore ed il picco di pressione nella giornata.

Tabella 5 Caratterizzazione idraulica dei nodi della rete nel momento di massimo valore di pressione

EPANET. Red Ejemplo 1 (Unidades SI)			
Network Table - Nodes at 3:59 Hrs			
	Demand	Head	Pressure
Node ID	LPS	m	m
Junc 10	0.82	90.61	84.81
Junc 11	5.14	81.97	76.17
Junc 12	4.61	68.32	64.32
Junc 13	3.41	59.45	57.45
Junc 21	4.65	65.53	62.53
Junc 22	6.99	60.60	58.60
Junc 23	4.43	58.38	58.38
Junc 31	2.58	62.61	61.61

Junc 32	4.40	59.43	59.43
Junc 33	2.47	58.26	58.26
Resvr 9	-87.21	25.00	0.00
Tank 1	47.68	56.66	4.66

Tabella 6 Caratterizzazione idraulica dei rami della rete

Network Table - Links at 3:59 Hrs			
Link ID	Flow LPS	Velocity m/s	Unit Headloss m/km
Pipe 10	86.38	1.22	4.32
Pipe 11	67.78	1.38	6.82
Pipe 12	54.16	1.1	4.44
Pipe 21	3.48	0.44	2.46
Pipe 22	2.26	0.29	1.11
Pipe 31	2.75	0.35	1.59
Pipe 111	13.46	0.76	4.11
Pipe 112	9.01	0.51	1.93
Pipe 113	3.06	0.17	0.27
Pipe 121	5.33	0.3	0.73
Pipe 122	3.23	0.18	0.29
Pipe 123	0.89	0.05	0.03
Pipe 32	-1.58	0.2	0.58
Pipe 1	47.68	0.67	1.39
Pump 9	87.21	0	-65.61

Tabella 7 Caratterizzazione idraulica dei nodi nel momento di minor valore di pressione

EPANET. Red Ejemplo 1 (Unidades SI)			
Network Table - Nodes at 14:59 Hrs			
Node ID	Demand LPS	Head m	Pressure m
Junc 10	0.30	42.18	36.38
Junc 11	8.69	42.18	36.38
Junc 12	8.83	43.82	39.82
Junc 13	6.17	50.13	48.13
Junc 21	6.88	26.38	23.38
Junc 22	13.80	25.37	23.37
Junc 23	7.11	28.48	28.48

Junc 31	3.51	23.92	22.92
Junc 32	8.19	23.06	23.06
Junc 33	3.57	25.13	25.13
Resvr 9	0.00	25.00	0.00
Tank 1	-67.05	55.45	3.45

Tabella 8 Caratterizzazione dei rami della rete

Network Table - Links at 14:59 Hrs			
Link ID	Flow LPS	Velocity m/s	Unit Headloss m/km
Pipe 10	-0.3	0	0
Pipe 11	-22.18	0.45	0.82
Pipe 12	-45.32	0.92	3.16
Pipe 21	1.46	0.19	0.51
Pipe 22	-2.71	0.35	1.56
Pipe 31	1.34	0.17	0.43
Pipe 111	13.19	0.75	3.95
Pipe 112	14.31	0.81	4.61
Pipe 113	15.57	0.88	5.41
Pipe 121	4.85	0.27	0.61
Pipe 122	4.68	0.27	0.58
Pipe 123	5.74	0.33	0.84
Pipe 32	2.17	0.28	1.03
Pipe 1	-67.05	0.95	2.66
Pump 9	0	0	0

Significativa potrebbe essere la rappresentazione della modalità di propagazione della portata nei rami superiori (Fig.21) da cui si chiarisce l'inversione del flusso causato dalla diversificazione dell'alimentazione idrica. In particolare osserviamo portate positive nel periodo notturno e negative in quello diurno

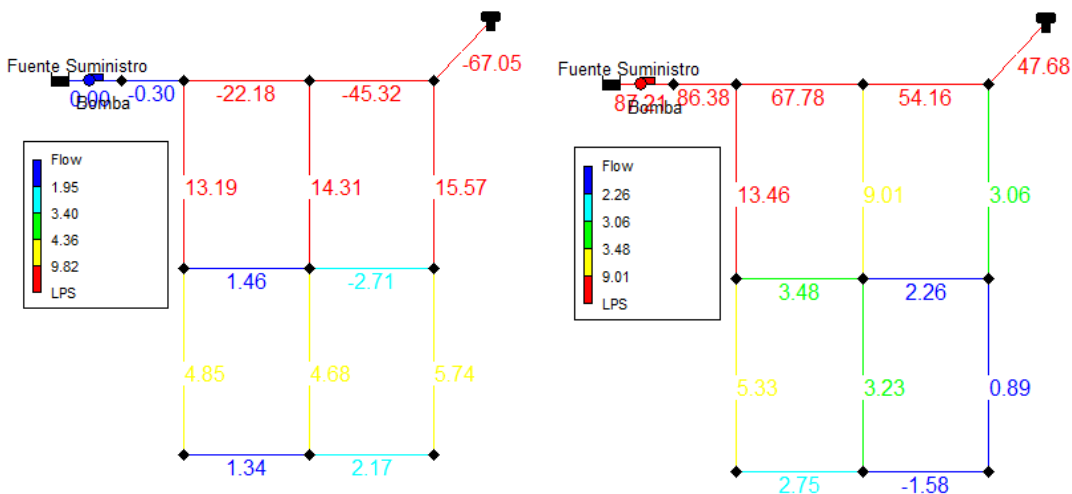


Figura 21 Rappresentazione del flusso di portata nei rami della rete alle 14:59 e alle 03:59

3.3 Considerazioni conclusive

Si conclude il capitolo ammettendo che la rete di studio non presenta eccezionali caratteristiche strutturali, mentre il suo funzionamento idraulico è in pratica caratterizzato dall'alimentazione ON-OFF imposta. La rete nella sua semplicità si pone, esulando da complicazioni strutturali o idrauliche, come un giusto mezzo di analisi per capacitarci dell' l'effetto domino con cui le scelte progettuali circa modalità di alimentazione, dimensioni e perdite idriche concorrono alla definizione dei consumi energetici complessivi di un sistema di distribuzione idropotabile, e di conseguenza all'impiego di materia prima.

Come verrà dimostrato nei capitoli successivi, riusciremo a caratterizzare il legame che ognuno dei fattori citati ha con l'energia sfruttata nel sistema di studio.

4. Gli scenari di valutazione

Introduzione

Presentati nei capitoli precedenti l'oggetto di studio ed il mezzo di analisi, qui si vogliono sintetizzare i risultati che concorrono alla caratterizzazione energetica della rete di distribuzione idrica *Cabrera_network*. In particolare, detto obiettivo si è perseguito agendo sui principali parametri del sistema esaminato quali diametri, perdite idriche e tipologia di pompa. La modalità con cui questi tre fattori influenzano il bilancio idrico complessivo è stata indagata separatamente per mezzo di differenti strategie esecutive che verranno di seguito precisate.

4.1 Approccio generale all'interpretazione dei risultati.

Si vogliono ora chiarire gli aspetti comuni a tutti e tre i tipi di indagine a cui è stata sottoposta la *Cabrera_network* in questa fase di studio.

Gli strumenti di analisi impiegati in tale contesto sono di tipo classico: ci si è serviti infatti del simulatore idraulico Epanet2 e di fogli di calcolo Excel per il confronto e la strutturazione dei risultati. In ognuna delle valutazioni si è imposto un prezzo dell'energia di tipo unitario, cosa che consente di interpretare la voce *cost/day* dell'*energy report* di *output* alla simulazione, come *kW-h* consumati nella giornata.

Bisogna precisare al fine della comprensione degli esiti ottenuti, un aspetto saliente del concepimento dell'uso energetico totale in questo studio: il serbatoio di compenso di *Cabrera_network* al termine del periodo di valutazione, cioè a fine giornata, possiede un certo livello idrico, generalmente maggiore dei 2.5 m, che in buona sostanza si pone come energia non effettivamente usata o *surplus energetico* e che quindi, deve essere sottratta al valore complessivo di consumo.

In questo modo è possibile individuare l'energia realmente impiegata a servizio della rete in una giornata di esercizio idrico, secondo le formule sottostanti, Eq. 35 e Eq. 36:

$$\Delta E = \left[\text{intensità energetica} \left(\pi \frac{D^2}{4} \right) (P_{24} - P_{min}) \right] \quad \text{Eq. 35}$$

$$E_v = kW - h/day - \Delta E \quad \text{Eq. 36}$$

Dove:

- ΔE è il surplus energetico che compete al serbatoio di compenso a fine giornata;
- *intensità energetica* espressa il $kW-h/m^3$ deducibile dal report energetico di Epanet2;
- D è il diametro del serbatoio pari a 20 m;
- P_{24} è il livello che contraddistingue il serbatoio a fine giornata;
- P_{min} è il livello minimo ammesso nel serbatoio cioè 2.5 m;
- E_v rappresenta il reale quantitativo energetico sfruttato dalla rete durante le 24 ore.

In particolare, l'energia vera E_v è stata correlata, in ognuno dei tre ambiti di indagine, agli indicatori dell'impiego energetico nel sistema in output alla simulazione.

Gli indicatori in parola sono:

- *Percent Utilization*: ci informa sulla percentuale di utilizzo delle potenzialità della pompa;
- *Average Efficiency*: ci informa sull'efficienza media della macchina durante il suo esercizio giornaliero;
- $kW-h/m^3$: rappresenta l'intensità energetica dall'attività della pompa;
- *Average kW*: è la potenza media della pompa;
- *Peak kW*: rappresenta il picco massimo di kW sfruttati durante la simulazione.

Infine si sono qualificate altre tre relazioni, quali:

- legame tra energia realmente sfruttata e configurazioni di diametri;
- legame tra energia realmente sfruttata e perdite idriche;
- legame tra energia realmente sfruttata e tipologia di pompa.

4.2 Caratterizzazione del legame tra il consumo energetico ed i diametri delle condotte.

La motivazione di questa analisi risiede nel fatto che spesso ci si trova ad operare su reti di distribuzione i cui diametri sono sottodimensionati rispetto alla portata immessa. Questa circostanza comporta la dissipazione nel sistema di un certo quantitativo di energia a causa dell'attrito che si sviluppa lungo le componenti che il fluido deve attraversare. Un opportuno dimensionamento dei condotti ovvierebbe al problema in parola. Per capacitarsi di come le dimensioni dei diametri siano influenti in tal senso, per le stesse condizioni di domanda idrica, tipologia di alimentazione, scabrezza e struttura di rete, si sono fatte variare le misure dei diametri scegliendo tra un set di dieci possibilità alle quali sono stati associati i rispettivi costi in euro/m (Tabella 9).

Tabella 9

D(mm)	€/m
400	141.9
350	123.1
300	90.7
250	72.9
200	54.4
150	39.4
125	37
100	27.2
80	24.5
60	19.8

Tra tutte le combinazioni di diametri possibili per la stessa struttura di rete e pompa centrifuga, si sono scelte solo quelle che, ad ogni istante della giornata ed in ogni nodo, rispettavano il vincolo di pressione minimo di 22.92 m, arrivando così ad individuare 40 possibili alternative.

Quanto detto è stato eseguito in due precise condizioni di esercizio:

- In presenza di perdite idriche, cioè nella condizione in cui gli *emitter coefficients* in Epanet2 erano gli stessi previsti dall'autore concorrendo ad una perdita idrica del 31.12% del fluido immesso in rete;
- In assenza di perdite idriche, cioè ponendo il valore degli *emitter coefficients* pari a zero.

Il primo caso ci ha consentito di focalizzarci su come il *report* energetico di una simulazione fosse effettivamente influenzato dalla dimensione dei diametri. Il secondo caso invece, è stato utile a comprendere come, a parità di diametro, la questione variasse in una condizione ideale di esercizio.

Detta procedura ha portato ai risultati di seguito sintetizzati, dove con il colore rosa ci si riferisce al caso reale di perdita idrica, con quello rosso al caso ideale.

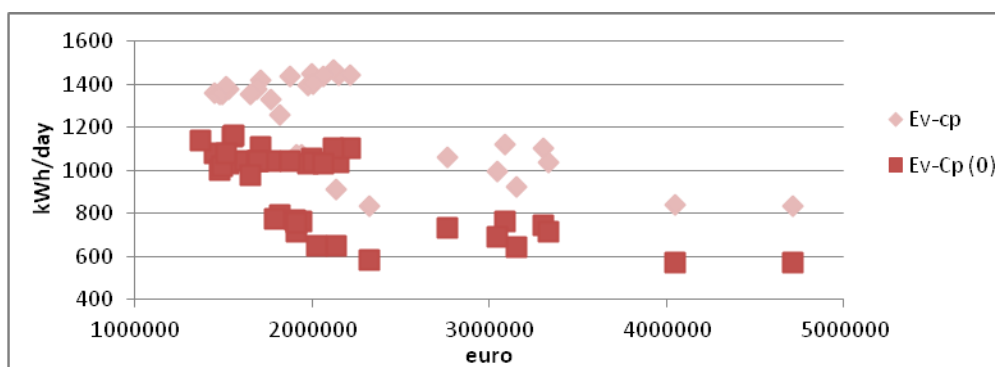


Figura 22 Variazione dei consumi energetici al variare delle dimensioni dei diametri

Si osservi nella figura 22, che correla l' E_v al costo in euro dello scheletro di rete come, in linea di principio, al crescere del costo dei condotti, e quindi dei loro diametri, l'impiego energetico totale si riduce a causa della diminuzione delle dissipazioni per attrito. Più in particolare possiamo notare che per il range di costi di diametri intorno al valore 2000000€, è possibile trovare, sia una serie di soluzioni che comportano simili impieghi energetici, ma anche alcune di esse che li riducono notevolmente. Cioè si potrebbero fare delle scelte progettuali in fase di dimensionamento che sfruttino al meglio le modalità di alimentazione del sistema, e nello specifico caso di studio sfruttare di più la sinergia pompa serbatoio.

Per quanto riguarda invece la distinzione tra le due serie, possiamo osservare come i loro andamenti siano simili, ma nel caso ideale si ha una notevole riduzione dei *kW-h/day* impiegati, che ci conferma il fatto che l'integrità delle condotte accorpate ad un dimensionamento ottimale rimane in qualche modo garanzia di una certa efficienza energetica del sistema.

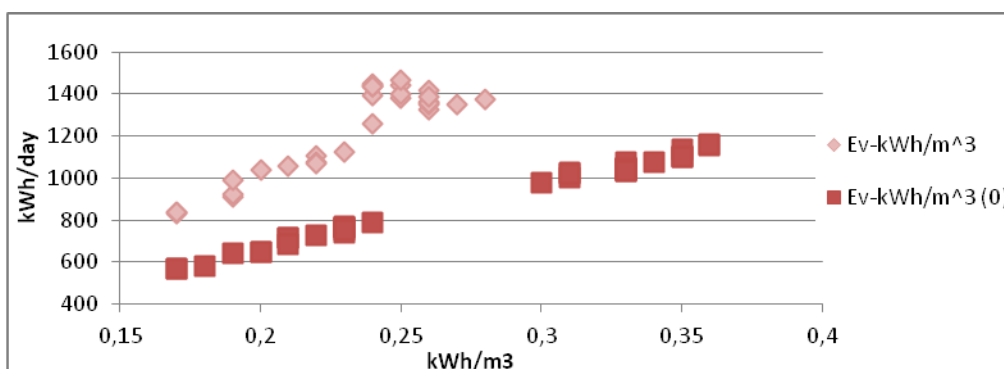


Figura 23 Legame Ev-intensità energetica per diverse configurazioni di diametri

Nella figura 23 è riportata la relazione tra E_v e l'intensità energetica che ci dimostra come al crescere di quest'ultima aumenti il consumo di $kW-h$ nella giornata. Più in dettaglio però possiamo osservare che esistono, a parità di $kW-h/m^3$, configurazioni di diametri che comportano consumi energetici che possono variare. Inoltre, sebbene la linea di tendenza delle due situazioni, con e senza perdite, sia simile, osserviamo che in quest'ultimo caso si hanno due gruppi di valori in termini d'intensità energetica: uno inferiore ai $0.25 \text{ kWh}/m^3$ ed uno superiore ai $0.30 \text{ kWh}/m^3$ per ognuno dei quali però i punti della linea di tendenza sono più omogeneamente distribuiti.

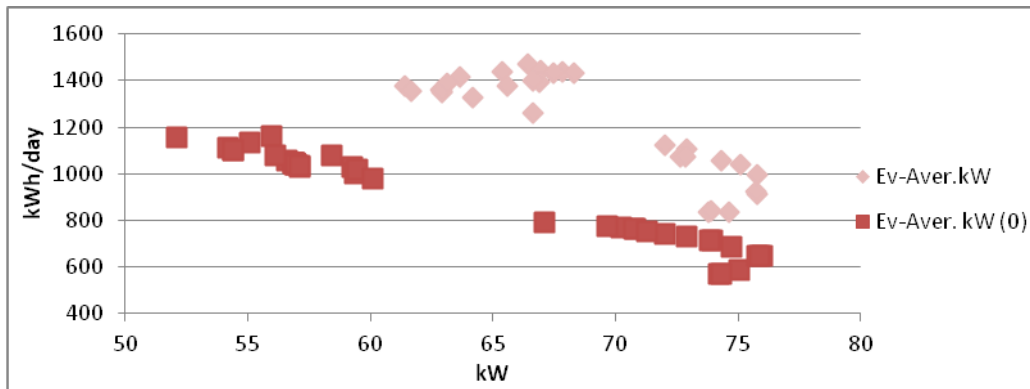


Figura 24 Relazione Ev-potenza media per diverse configurazioni di diametri

Nell'immagine sopra riportata (Fig.24) si esplica la relazione tra E_v e la potenza media in kW. In entrambi i casi, al crescere dell'impiego medio di kW, diminuisce il consumo totale ed è poi possibile trovare configurazioni di diametri che a parità di potenza media ottimizzino i consumi.

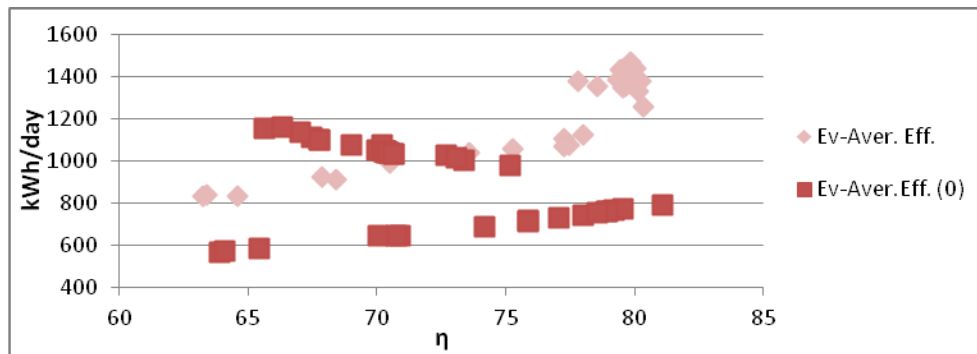


Figura 25 Relazione Ev- efficienza media della macchina per diverse configurazioni di diametri

Nella figura 25, si riporta il legame che intercorre tra l' E_v e l'efficienza media giornaliero della pompa che serve il sistema. Volendo distinguere i casi ideali e reali di rete, possiamo individuare due diversi comportamenti.

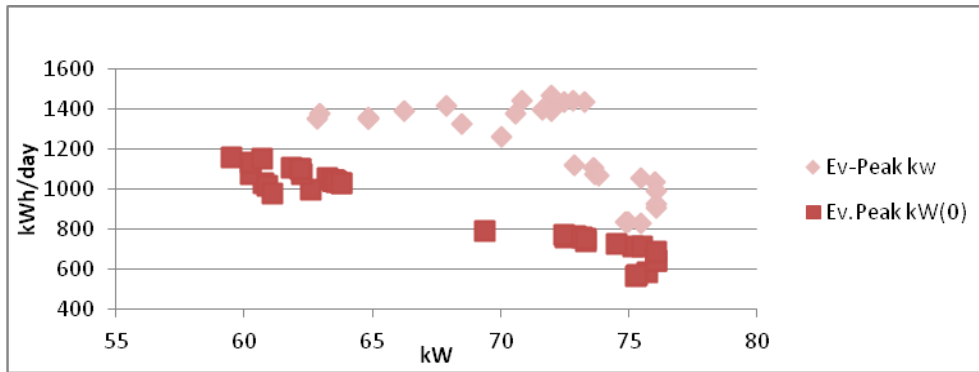


Figura 26 relazione tra E_v ed il picco di kW impiegati per diverse configurazioni di diametri

La figura 26 mostra invece il rapporto tra E_v ed il quantitativo di kW sfruttati nel momento di massimo consumo energetico giornaliero. Si può subito percepire come, nel caso ideale, al diminuire del valore di picco aumenti il consumo energetico. Questo accade perché se nel momento di massimo impiego energetico il valore non è troppo diverso da quello riferito ad altri momenti della giornata, allora la macchina è chiamata a lavorare in condizioni più o meno gravose durante tutte le 24 ore. Inoltre possiamo individuare due gruppi comportamentali: quello caratterizzato da picchi inferiori ai 65 kW e quello per picchi superiori ai 70kW.

Mantenendo la medesima distinzione in gruppi, possiamo dire che nel caso reale di perdite idriche si ha una distribuzione dei valori di impiego totale intorno al 1400 kW-h/day per il primo gruppo ed una diminuzione dell'impiego energetico nel secondo. Si dimostra così il fatto che in generale le circostanze reali sono di più complessa interpretazione.

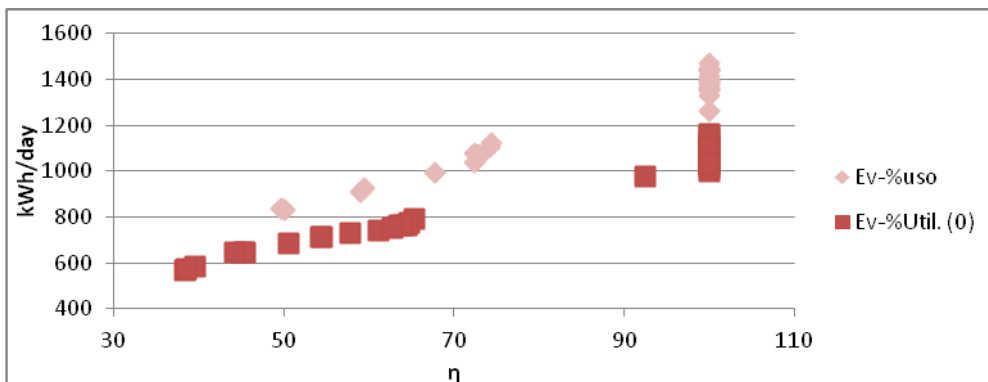


Figura 27 Relazione tra E_v e la percentuale di utilizzo delle potenzialità della macchina per diverse configurazioni di diametri

L'ultimo dei grafici riportati (Fig.27) ci suggerisce due considerazioni.

La prima, più ovvia, sul fatto che la mancanza di perdite idriche fa sicuramente ridurre i consumi energetici, la seconda invece dimostra che, è possibile trovare per lo stesso valore di utilizzo percentuale della macchina configurazioni di diametri che comportano consumi energetici anche molto diversi.

In ogni caso bisogna ribadire che i risultati sopra ottenuti esaminano 40 configurazioni dimensionali per la stessa struttura di rete. Tra queste ve ne sono alcune che sfruttando l'interazione funzionale tra serbatoio e pompa consumano di meno, ed altre invece, per cui il serbatoio di compenso non

raggiunge il suo livelli idrico massimo con facilità e quindi la pompa è chiamata a servire quasi in autonomia il sistema.

Specifichiamo a questo punto quali sono le condizioni dimensionali in cui ciò accade. Prendiamo ad esempio tra le 40 reti individuate il caso della rete numero 1 che presenta le caratteristiche riportate in tabella (Tabella 10) e nell'immagine di sotto.

Tabella 10 Caratterizzazione dimensionale ed energetica della rete 1

Caratteristiche dimensionali														
Pipe ID	10	11	12	21	22	31	111	112	113	121	122	123	32	1
Length	2000	2000	2000	2000	2000	2000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	2000	2000
Diameter	200	200	150	150	100	150	200	150	100	150	100	100	100	200
Energy Report														
	Cp	%Util.	Aver.Eff.	kW-h/day	Aver. kW	Peak kW	kW-h/day	P24(m)	deltaE	Ev				
	$\alpha \neq 0$	1530800	100	72.69	0.31	59.25	60.76	1421.97	6.54	393	1.028			
	$\alpha = 0$	1530800	100	77.8	0.28	61.38	62.93	1473.07	3.59	958	1.377			

Si tratta dunque di una configurazioni di diametri che spaziano in un ridotto range dimensionale. In questo caso, abbiamo infatti tre tipi di misure: 100mm 150mm e 200mm, per cui non si sfrutta il percorso dei rami superiori che collegano direttamente la pompa al serbatoio facilitando il riempimento di esso ma l'acqua, in questo caso, è costretta a transitare in percorsi più lunghi durante i quali dissipa energia per attrito.

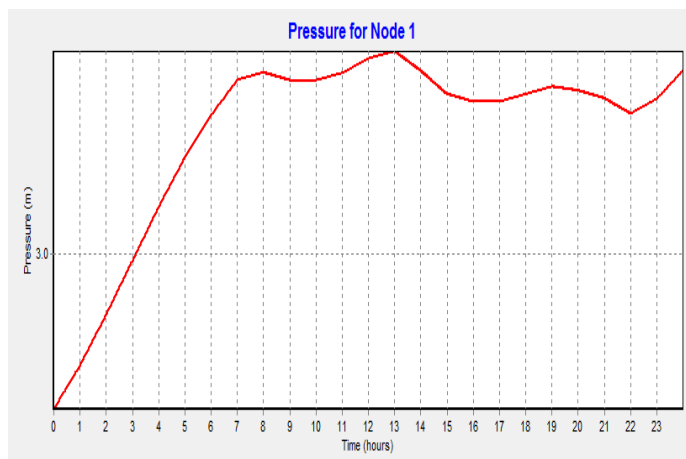


Figura 28 livello idrico nel serbatoio di compenso

Si osservi in figura 28 come il livello idrico di 7m nel serbatoio, per questa particolare configurazione di rete, venga raggiunto solo una volta durante l'intera simulazione idraulica, pur mantenendosi comunque su valori maggiori dei 5m . Questa situazione risulta irrazionale rispetto a come dovrebbe essere esplicitata l'alimentazione idrica, cioè in modalità ON-OFF, in quanto il serbatoio è quasi sempre pieno ma non al punto di far sospendere alla pompa la sua attività. Si spiegano in questo modo i grafici sottostanti.

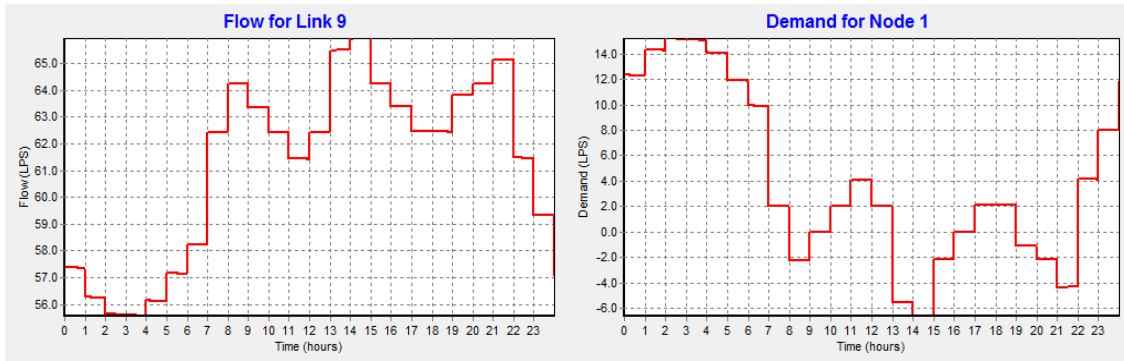


Figura 29 Confronto tra la portata sollevata dalla pompa-(ramo 9) e quella in ingresso e uscita al (nodo 1)

Questo peculiare funzionamento fa sì che nei rami superiori dello scheletro di rete non si abbia la variabilità della direzione di propagazione di portata che avevamo visto per il caso di riferimento come è illustrato nella figura sottostante.

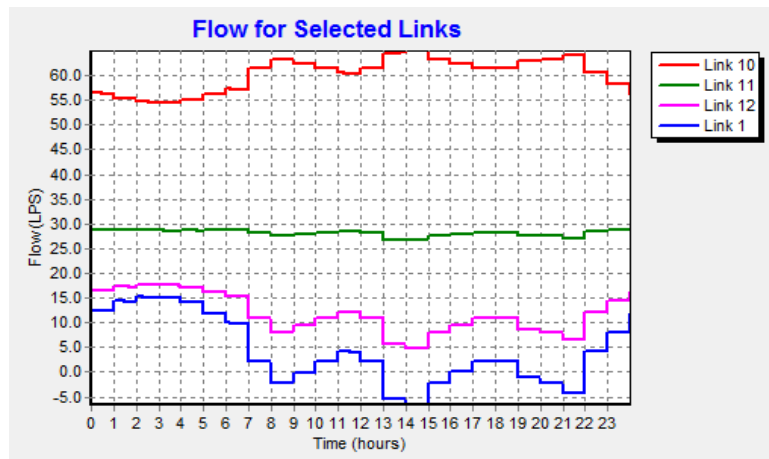


Figura 30 Portata di portata nella dorsale pompa-serbatoio

Si conclude questa fase della ricerca dicendo che tra le quaranta configurazioni diverse di diametri individuate nella ricerca, vi sono dei casi ottimizzati sia dal punto di vista dei costi di realizzazione ma soprattutto per l'impiego energetico. Questo è dimostrato ad esempio, della rete numero 34 (Fig.31) il cui costo è 3.048.600 euro e le cui caratteristiche in termini dimensionale ed energetiche sono riportate nelle Tabelle 11.

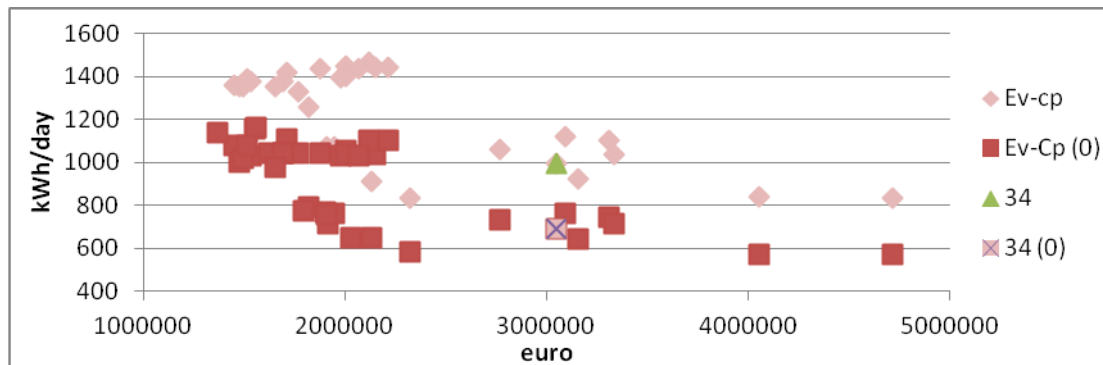


Figura 31 Collocazione della rete 34 nello spazio Ev- Cp delle possibili configurazioni

Tabella 11 Caratterizzazione dimensionale ed energetica della rete 34

Caratteristiche dimensionali														
Pipe ID	10	11	12	21	22	31	111	112	113	121	122	123	32	1
Length	2000	2000	2000	2000	2000	2000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	2000	2000
Diameter	400	300	250	300	300	250	300	300	250	250	125	200	200	250
Energy Repot														
	%Util.	Aver.Eff.	kW-h/m3	Aver. kW	Peak kW	kW-h/day	H(m)	P24(m)	deltaE	Ev				
α	67,72	70,52	0,19	75,78	76,06	1231,59	58,5	6,5	238,64	992,95				
$\alpha=0$	50,62	74,17	0,21	74,73	76,06	907,9	57,85	5,85	220,899	687,001				

La dimensione dei diametri attribuiti ai rami della rete 34 implica il funzionamento riportato nelle figure sottostanti.

Nello specifico caso, infatti, dato il raggiungimento del livello massimo di pressione di 7m nel nodo di accumulo in due momenti della giornata (Figura 32). emerge una efficiente scambievolezza tra pompa e serbatoio nell'alimentare il sistema di distribuzione

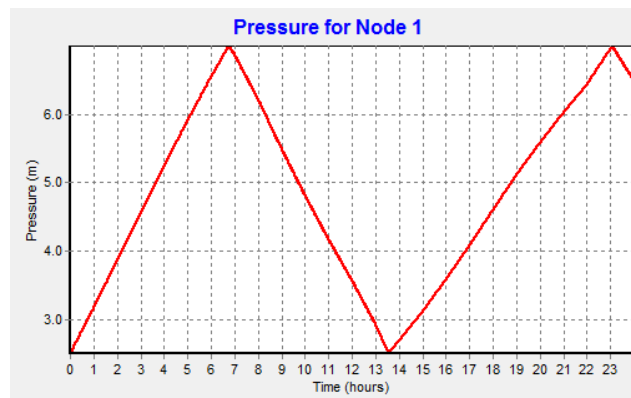


Figura 32 livello idrico nel serbatoio di compenso

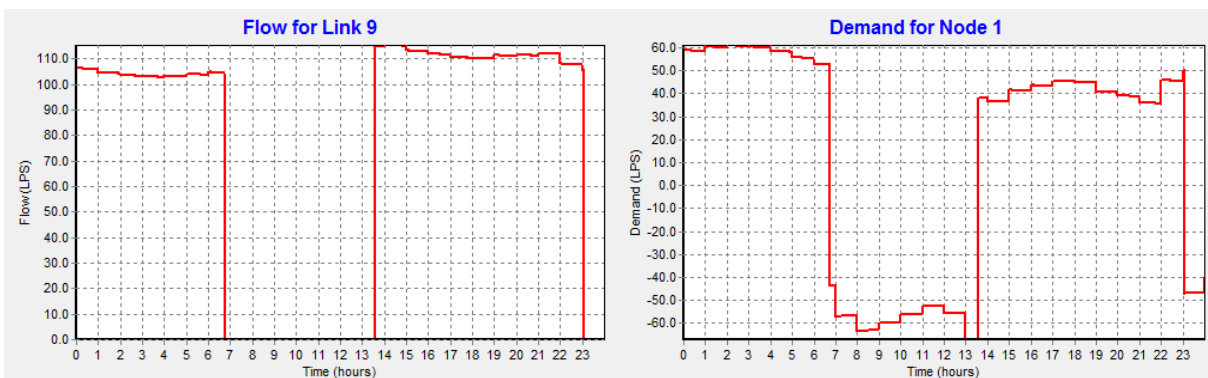


Figura 33 Portata sollevata dalla pompa (ramo9) e portata in ingresso/uscita dal nodo1

Si distinguono periodi anche piuttosto lunghi in cui agisce o solo la pompa o solo il serbatoio che determinano l'alternarsi delle direzioni di propagazione delle portate in rete nei rami della dorsale superiore.

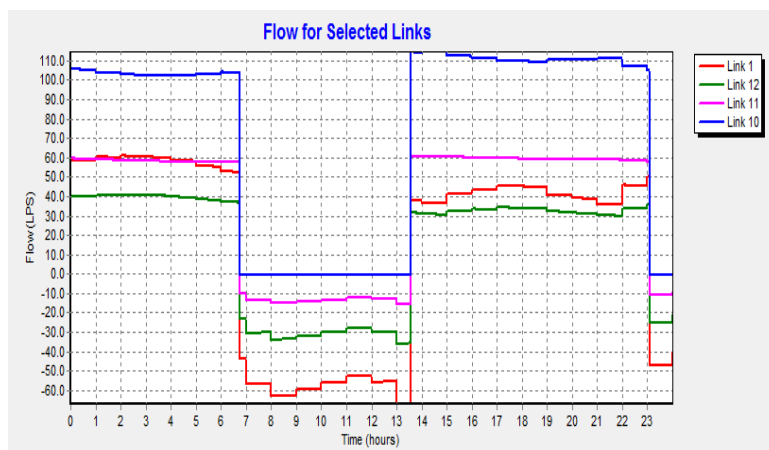


Figura 34 andamento Transito di portata nella dorsale pompa-serbatoio della rete 34

Ciò consente di ridurre i periodi di sfruttamento delle pompe diminuendo il quantitativo di energia veramente consumata E_v , durante l'esercizio idraulico, soprattutto nel caso ideale di funzionamento (vedi Tabella 11)

4.3 Caratterizzazione del legame tra consumo energetico e perdita idrica

Già nel precedente paragrafo è stata evidenziata l'influenza delle perdite sul bilancio energetico di una rete di distribuzione. In questa sezione, invece, si vuole indagare circa l'interazione, per la sola *Cabrera_network*, tra la loro variazione percentuale ed i consumi di energia complessivi ammettendo sempre il rispetto del valore minimo di pressione ai nodi (22.92m).

Dal punto di vista operativo l'analisi ha previsto due sotto gruppi di elaborazioni.

4.3.1 Primo gruppo di elaborazioni

Nel primo gruppo le perdite percentuali, variabili dal 10% a massimo il 50%, sono state allocate ai nodi proporzionalmente alla lunghezza dei rami afferenti e alla pressione media ivi. In pratica, si assume una frazione di perdita idrica $p\%$ ed in accordo alla modalità con cui Epanet2 concepisce le perdite, cioè come prelievi ai nodi, si è proceduto indicando con TBD (*total base demand*) la domanda idrica totale, data dalla somma dei prelievi agli N nodi che è pari a 38.5 l/s, Eq. 37:

$$TBD = \sum_{i=1}^N BD_i \quad \text{Eq. 37}$$

Moltiplicando TBD per la frazione di perdita idrica imposta, si ottiene la portata persa q_l [l/s] in tutta la rete, Eq. 38:

$$q_l = p * TBD \quad \text{Eq. 38}$$

A questo punto, si immagina di suddividere l'ultimo risultato, per i vari nodi. Dal momento che q_l dipende molto dalla lunghezza del ramo, non basta semplicemente distribuirla in parti uguali nei

vari nodi della rete, ma occorre suddividerla pesandola sulle lunghezze dei rami afferenti a ciascun nodo. Per fare ciò si individua L , la lunghezza totale dei rami di tutta la rete, somma delle lunghezze l_{ij} dei singoli rami, Eq. 39:

$$L = \sum l_{ij} \text{ Eq.39}$$

e la portata persa al nodo i è individuata secondo la formula sottostante Eq. 40:

$$ql_i = q^l / L * \sum_{i=1}^N l_{ij} / 2 \text{ Eq. 40}$$

Dove:

- ql_i rappresenta la perdita per unità di lunghezza;
- $\frac{l_{ij}}{2}$ rappresenta la lunghezza [m] attribuita a un certo nodo i , cioè la semisomma dei rami afferenti a quel nodo.

A questo punto il reale quantitativo di fluido che dovrebbe essere immesso in rete perché, anche con le perdite idriche, l'utenza possa essere soddisfatta sarebbe, Eq. 41:

$$BD_{\text{complessiva}} = \sum_{i=1}^N BD_i + ql_i \text{ Eq. 41}$$

ma operativamente per EPANET l'introduzione delle perdite idriche avviene secondo l'equazione sottostante in cui α è l'unica incognita, Eq. 42.

$$ql_i = \alpha_i p_i^n \text{ Eq. 42}$$

Dove per l' i -esimo nodo:

- “ p ” rappresenta la pressione
- “ α ” è l' *emitter coefficient*, incognita del problema;
- “ n ” è l' *emitter exponent* pari a 1.2 che rappresenta le caratteristiche chimiche del materiale.

Dunque risolvendo la questione sotto, cioè dando senso agli *emitter coefficient*, abbiamo imposto le perdite idriche, Eq. 43.

$$\alpha_i = ql_i / p_i^n \text{ Eq. 43}$$

4.3.2 Secondo gruppo di elaborazioni

Nel secondo gruppo, invece, le perdite idriche sono state pensate per un valore massimo del 40% come concentrate in un certo numero di nodi, mentre negli altri si è imposto un valore di *emitter coefficient* nullo. In particolare, si sono individuate in modo arbitrario diverse configurazioni di fallanza secondo lo schema riportato a titolo di esempio nella tabella sotto (Tabella 12), che sintetizza l'imposizione di una perdita del 20% concentrata nei due nodi 32 e 22, in cui il termine in rosso è la reale perdita idrica stimata che ovviamente differisce da quella imposta.

Tabella 12

20%32_22							
	Pireali	pi^n	atot	airandom	qltot*	qli*	%*
N32	49.2	107.24033	0.0362761	0.012092	7.7	1.2967519	0.2
N22	48.35	105.02091		0.024184		2.5398294	0.0996515
		212.26123		0.0362761		3.8365814	

Individuati così i diversi scenari di perdita ottemperanti il vincolo di pressione, dato quindi senso nelle differenti circostanze agli *emitter coefficient* per la rete *Cabrera_network*., si è proceduto alla valutazione della effettiva percentuale di perdita idrica WL% che queste situazioni comportavano in fase di simulazione.

Si puntualizza che WL%, per ogni scenario, è stata stimata secondo la formula sottostante, Eq. 44.

$$WL\% = \frac{A-B}{A} \text{ Eq. 44}$$

Dove:

- B è il volume idrico di cui necessita l'utenza nelle 24ore cioè 38.5 l/s per 86400s.
- A rappresenta la portata totalmente consumata (cioè fuoriuscita dai nodi, e quindi anche quella persa) durante la giornata dedotta dal *System Flow Balance* di Epanet2.

Trovato WL%, si è cercata una relazione tra esso e Ev, sfruttando i dati riportati nella Tabella 13.

Tabella 13 Esiti delle simulazioni dei diversi scenari di perdita idrica

%	Aver.	Kwhr	Aver.	Peak	kW				WL%	Delta E	Ev		
Utiliz.	Eff.	/m3	kW	kW	/day	P24	B	A					
66.67	78.59	0.23	71.2	73.42	1139.31	6.7	3326400	3683299.05	9.6896571	303.324	835.986	10%	Omog.
68.83	78.26	0.23	71.65	73.62	1183.67	6.37	3326400	4019539.48	17.244251	279.4914	904.1786	20%	
70.47	77.96	0.22	72.04	73.44	1218.43	5.97	3326400	4334029.35	23.249251	239.7076	978.7224	30%	
71.58	77.68	0.22	72.39	73.62	1243.59	5.5	3326400	4628704.58	28.135401	207.24	1036.35	40%	
65.4	78.69	0.23	71.07	73.38	1115.47	6.85	3326400	3522395.56	5.5642689	314.157	801.313	10%di20	11_12_13
66.08	78.56	0.23	71.25	73.47	1129.96	6.79	3326400	3619838.08	8.106387	309.8238	820.1362	10%di30	
66.74	78.42	0.23	71.43	73.56	1144.14	6.72	3326400	3717441.9	10.519113	304.7684	839.3716	10%di40	
67.38	78.3	0.23	71.6	73.64	1157.76	6.65	3326400	3812827.84	12.757666	299.713	858.047	20%di50	
65.8	78.76	0.23	70.98	73.3	1120.93	6.8	3326400	3557018.4	6.483475	310.546	810.384	10%di20	31_22_13
66.64	78.66	0.23	71.11	73.35	1137.33	6.71	3326400	3666895.27	5.5713934	304.0462	833.2838	10%di30	
67.44	78.58	0.23	71.23	73.39	1152.88	6.61	3326400	3773206.11	11.841551	296.8242	856.0558	10%di40	
68.12	78.5	0.23	71.34	73.44	1166.35	6.5	3326400	3876285.93	14.185897	288.88	877.47	20%di50	
65.8	78.74	0.23	71	73.32	1121.24	6.79	3326400	3561730.87	6.6072053	309.8238	811.4162	10%di20	31_32_33
66.62	78.65	0.23	71.13	73.37	1137.37	6.71	3326400	3670790.73	9.3819222	304.0462	833.3238	10%di30	
67.39	78.56	0.23	71.25	73.42	1152.42	6.61	3326400	3774429.44	11.870123	296.8242	855.5958	10%di40	
67.99	78.48	0.23	71.37	73.47	1164.57	6.5	3326400	3871743.73	14.085223	288.88	875.69	20%di50	
65.26	78.75	0.23	70.99	73.3	1111.79	6.85	3326400	3500530.08	4.9743918	314.157	797.633	10%di10	31_21
66.39	78.58	0.23	71.23	73.4	1134.95	6.73	3326400	3657193.98	9.0450215	305.4906	829.4594	10%di20	
67.41	78.43	0.23	71.43	73.48	1155.63	6.61	3326400	3800645.15	12.478017	296.8242	858.8058	10%di30	

68.22	78.31	0.23	71.6	73.55	1172.23	6.46	3326400	3934186.32	15.448844	285.9912	886.2388	20%di40	
72.37	77.47	0.22	72.62	73.7	1261.37	5.2	3326400	4829680.78	31.125883	186.516	1074.854		original
65.37	78.81	0.23	70.91	73.27	1112.42	6.84	3326400	3503100.02	5.0441042	313.4348	798.9852	10%di10	32_22
66.61	78.67	0.23	71.1	73.35	1136.76	6.69	3326400	3667511.59	9.3009001	302.6018	834.1582	10%di20	
67.7	78.55	0.23	71.27	73.42	1157.96	6.54	3326400	3821002.25	12.944307	291.7688	866.1912	10%di30	
68.57	78.44	0.23	71.43	73.48	1175.49	6.36	3326400	3964756.14	16.100767	278.7692	896.7208	20%di40	
69.31	78.34	0.23	71.56	73.14	1190.33	6.18	3326400	4098129.38	18.83126	265.7696	924.5604	20%di50	

Siamo così arrivati all'aspetto conclusivo di questa fase della ricerca, che ci dimostra come al crescere della percentuale di acqua persa a causa di fallanze in rete, il sistema richiede un maggiore consumo energetico secondo il chiaro andamento della linea di tendenza riportata nella Fig 35.

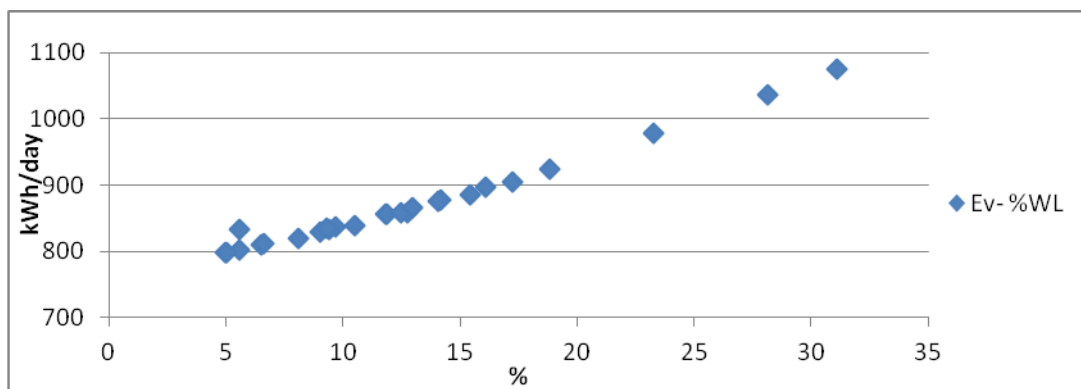


Figura 35 Relazione Ev-% di perdita idrica per la Cabrera_network

4.4 Caratterizzazione del legame tra consumo energetico e tipologia di pompa a servizio della rete .

L'obiettivo di questa fase di valutazione è stato quello di pervenire ad un nesso tra tipologia di macchina utilizzata per l'alimentazione del sistema ed i consumi energetici che ne conseguono. Il protocollo osservato per ottenere i risultati ha previsto due fasi.

4.4.1 Prima fase della ricerca

La prima fase ha previsto l'individuazione di un certo numero di pompe che, sebbene avessero curve caratteristiche e dei rendimenti diverse da quelle previste nella versione originale di sistema di studio, dovevano consentire il soddisfacimento della domanda idropotabile nel rispetto del vincolo di pressione minima per la *Cabrera_network*.. Il campionario di modelli a cui ci si è riferiti, è stato quello offerto dalla CAPRARI S.p.A. per le pompe centrifughe ad asse orizzontale che trovassero il loro impiego in ambito acquedottistico.

Della vasta gamma di modelli che la Caprari propone, ne sono stati individuati 19 di cui si riportano le curve caratterizzanti.

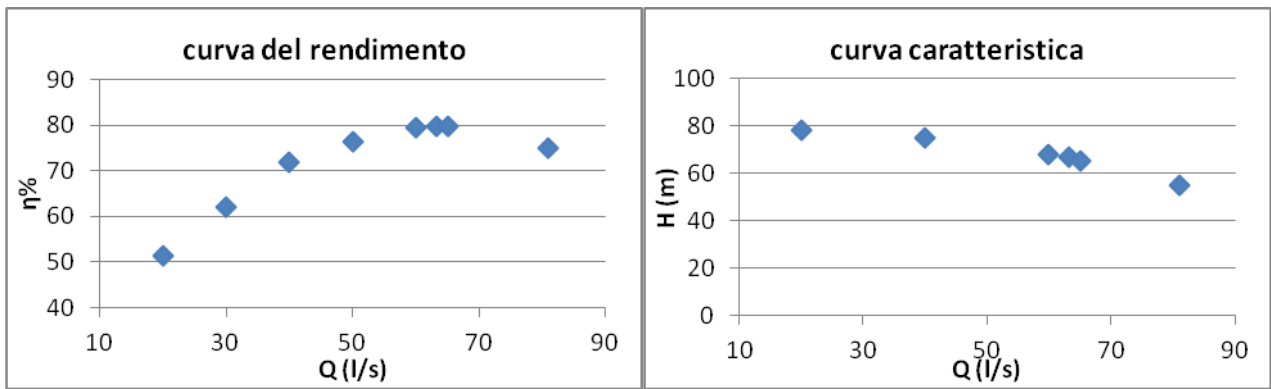


Figura 36 Curve caratterizzanti la pompa MEC MR 3/100

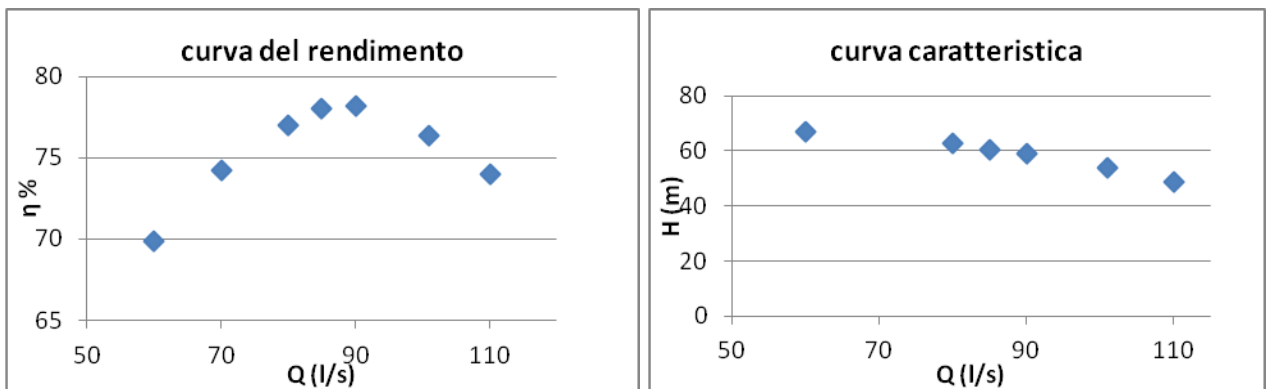


Figura 37 Curve caratterizzanti la pompa MEC AZRBH

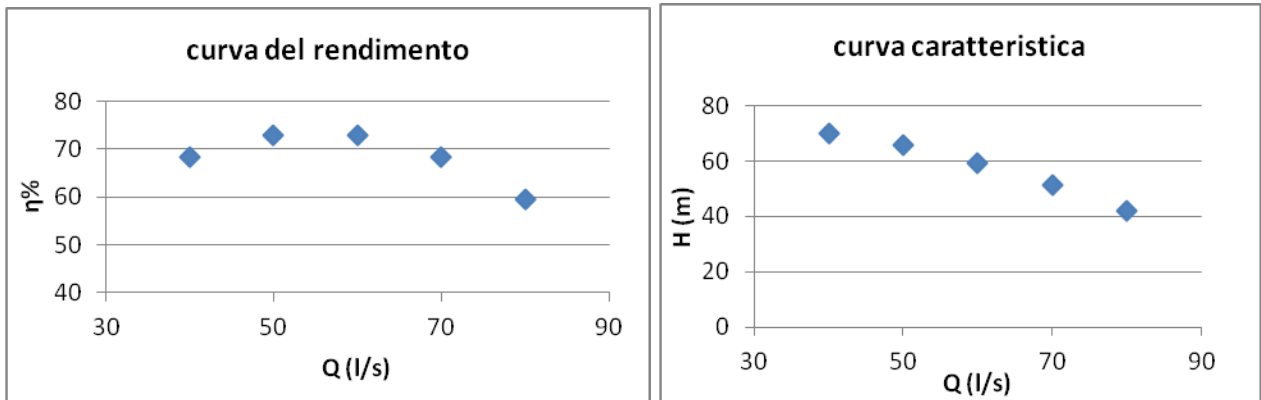


Figura 38 Curve caratterizzanti la pompa MEC MR 125/2F

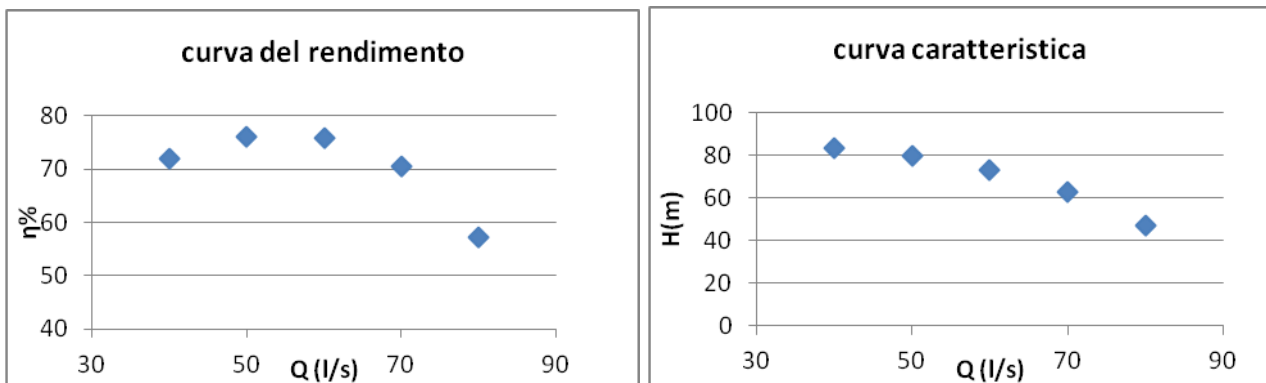


Figura 39 Curve caratterizzanti la pompa NC 100/250/255

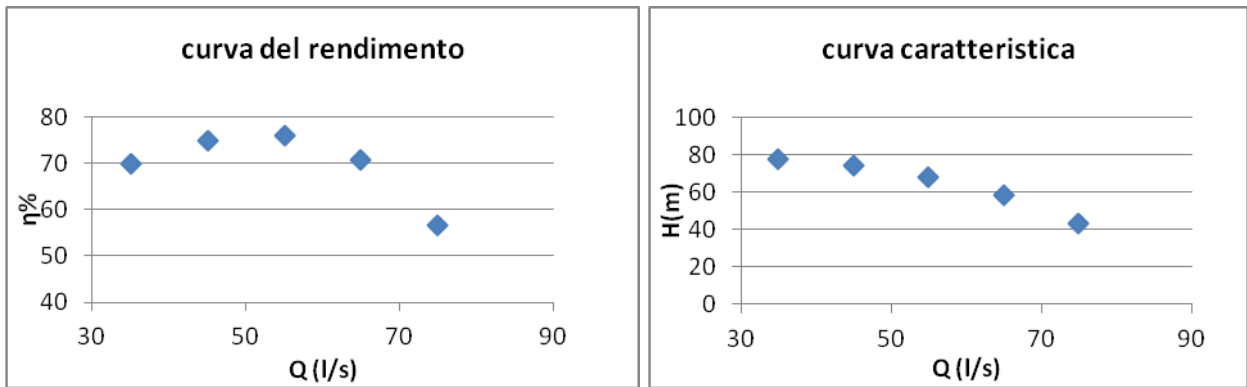


Figura 40 Curve caratterizzanti la pompa NC 80/250/245

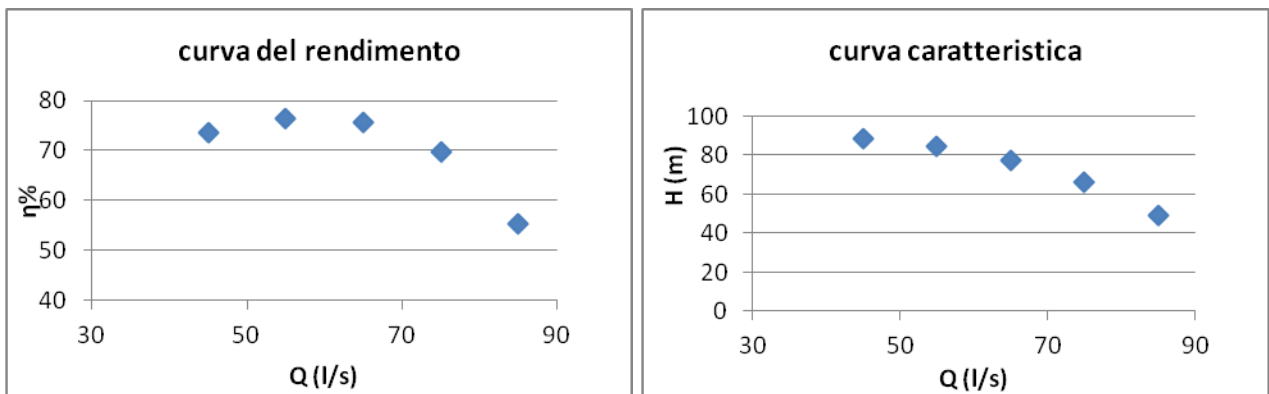


Figura 41 Curve caratterizzanti la pompa NC 80/250/264

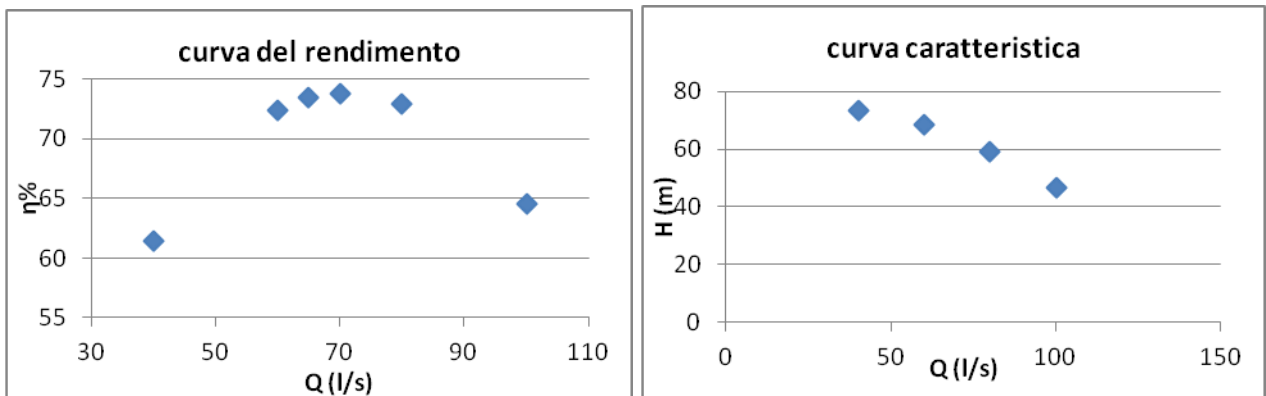


Figura 42 Curve caratterizzanti la pompa NC100/250/235

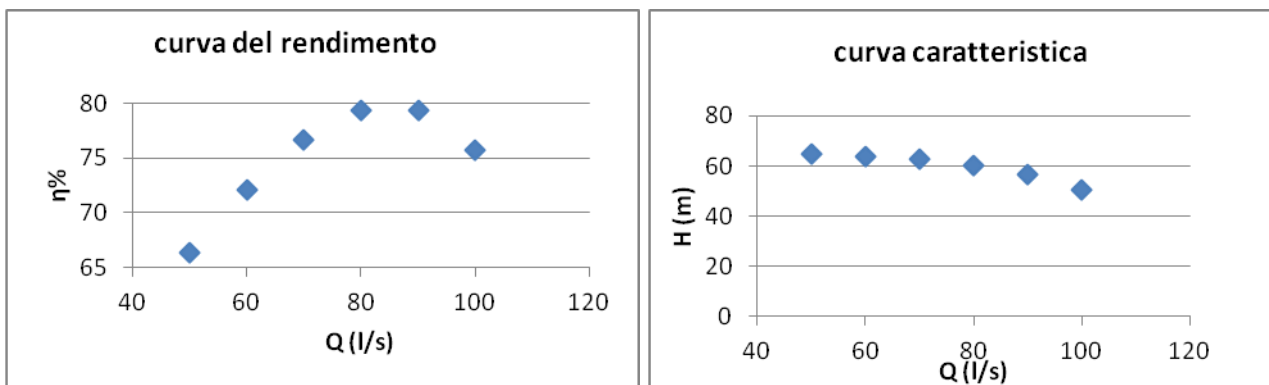


Figura 43 Curve caratterizzanti la pompa PM 150/2A

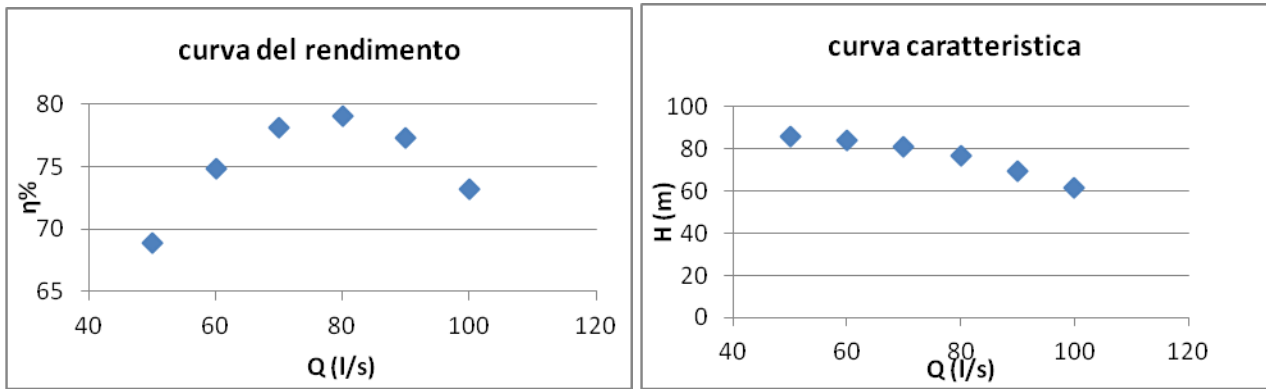


Figura 44 Curve caratterizzanti la pompa PM 150/3C

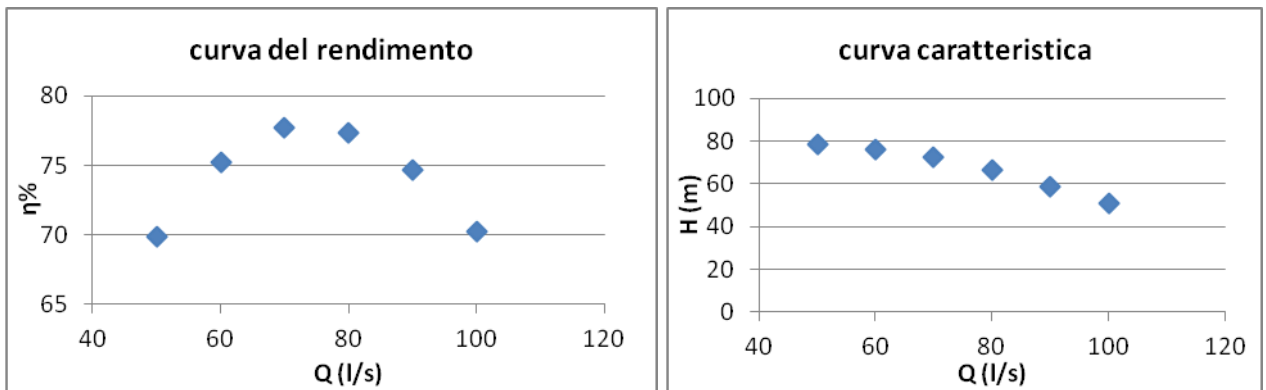


Figura 45 Curve caratterizzanti la pompa PM 150/4C

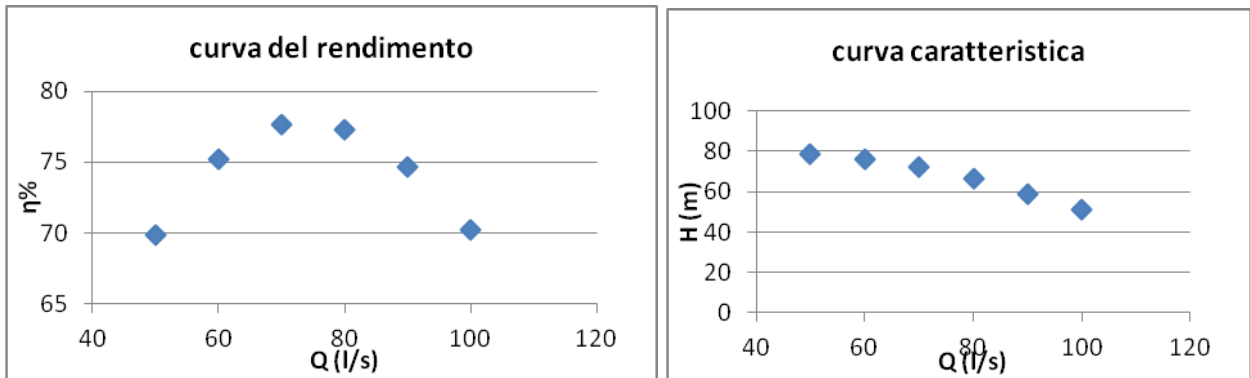


Figura 46 Curve caratterizzanti la pompa PM 150/4B

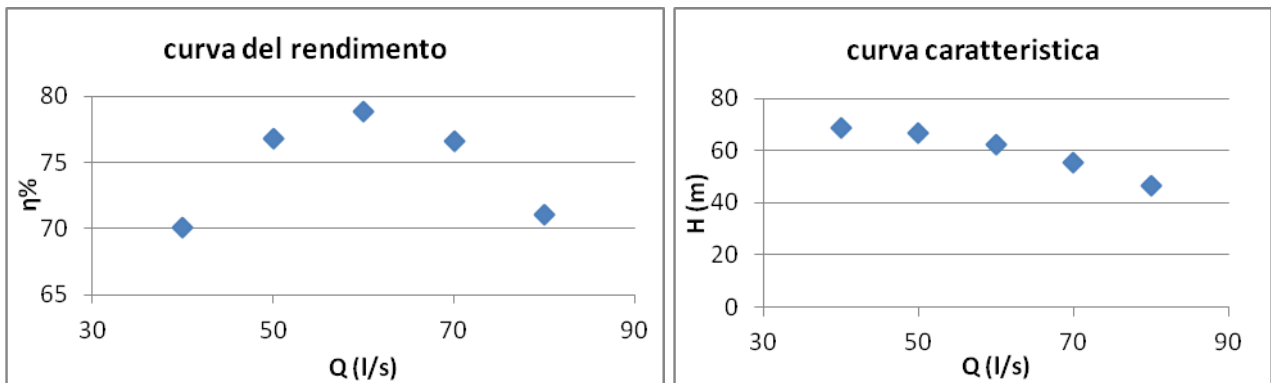


Figura 47 Curve caratterizzanti la pompa PM 150/4C

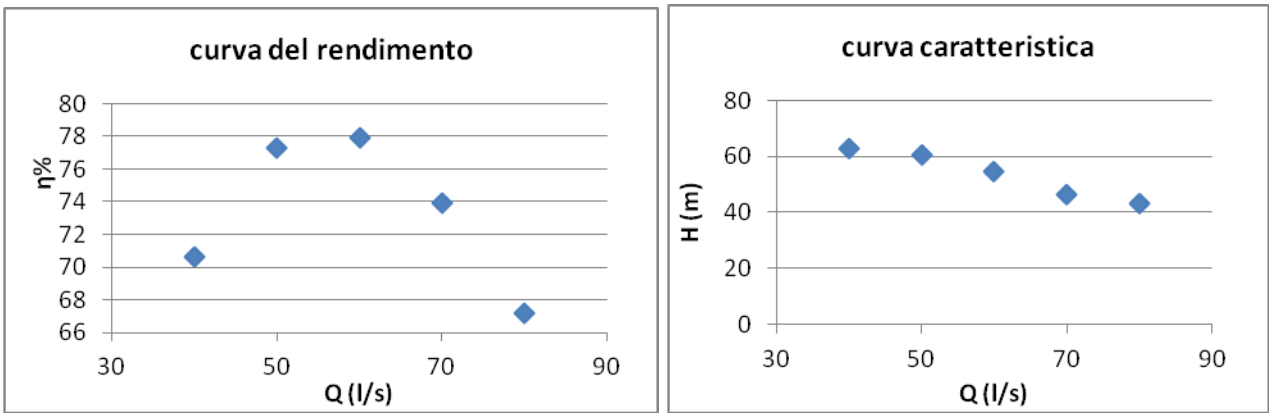


Figura 48 Curve caratterizzanti la pompa PM 150/4D

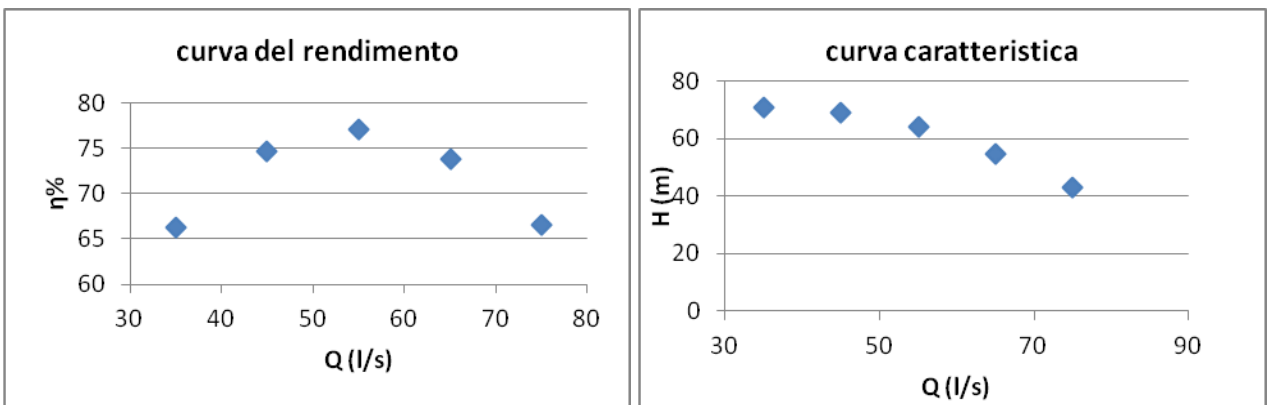


Figura 49 Curve caratterizzanti la pompa PM 150/5E

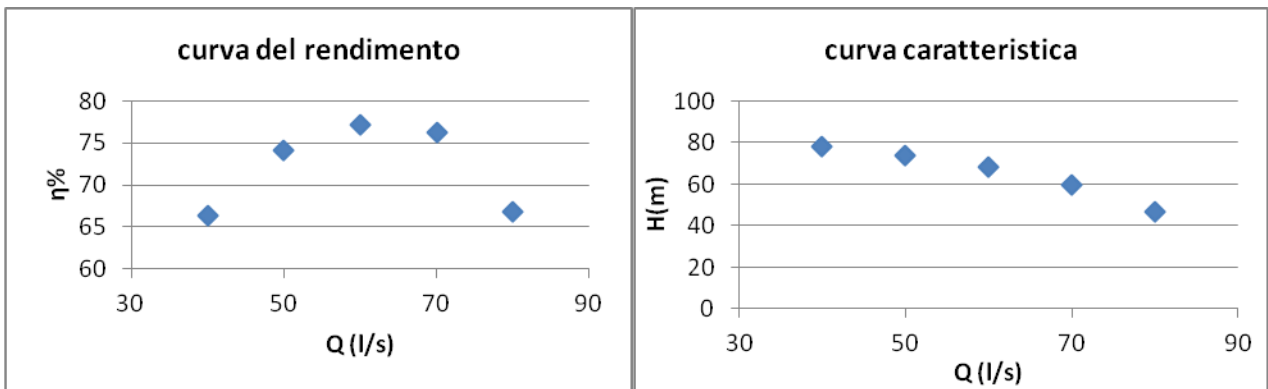


Figura 50 Curve caratterizzanti la pompa PML 150/3B

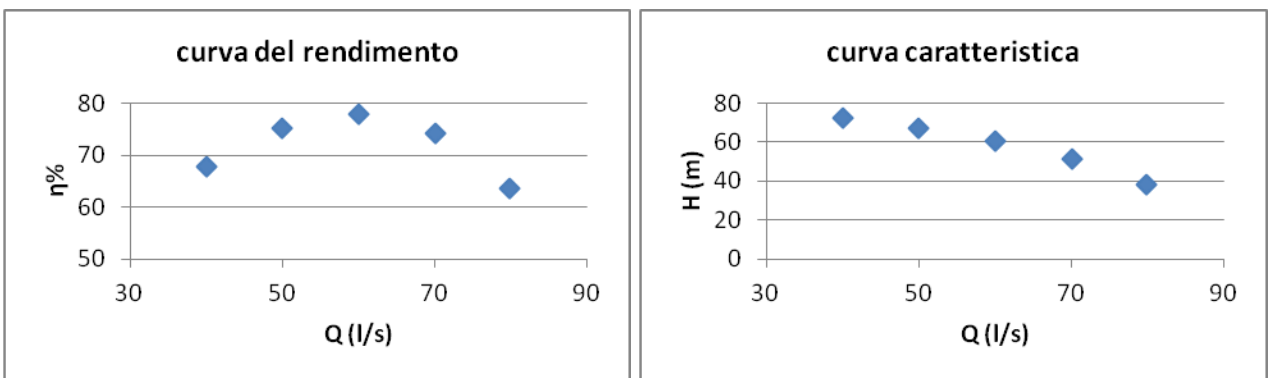


Figura 51 Curve caratterizzanti la pompa PML 150/3C

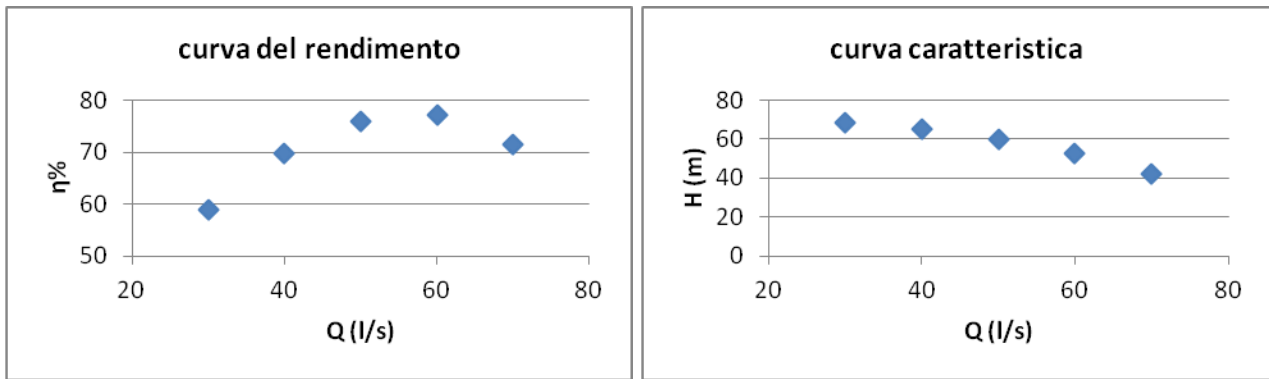


Figura 52 Curve caratterizzanti la pompa PML 150/3D

La modalità con cui questo gruppo di pompe è stato identificato, ha previsto l'introduzione di una circostanza desiderata di funzionamento per la macchina in termini di portata Q (l/s) e carico idraulico H (m) nell'interfaccia di comunicazione dalla sezione IPUMP del sito www.caprari.it. Per ognuna delle richieste, è stata fornita un'alternativa più o meno ampia di modelli, le cui curve caratterizzanti avessero un punto appartenente ad esse molto simile (Q_{eff} , H_{eff}) a quello inserito e per le quali era dato conoscere con continuità tutti i valori. Scelto quindi, un idoneo modello, i valori dei punti costituenti le due curve di funzionamento della macchina sono stati implementati su Epanet2 e sottoposti a simulazione idraulica.

Si puntualizza che, mentre per le macchine ricercate sussiste una reale connessione tra i punti della curva caratteristica e quella del rendimento, data la modalità di individuazione di cui sopra, per la macchina introdotta dall'autore nella *Cabrera-network* la curva caratteristica è stata dedotta per estrapolazione automatica da Epanet2 dall'unico punto di lavoro inserito corrispondente a $Q=80$ l/s ed $H=70$ m.

Chiarito ciò, riportiamo l'attenzione a quanto è stato fatto nel presente studio dove, per quanto riguarda le portate Q (l/s) si è spaziato in un range di 40-85 l/s che fosse sufficiente quindi all'ossequio dei prelievi idrici ed il funzionamento ordinario del sistema. In termini di carico idrico H (m) sono stati sperimentati invece, valori di 60-65 e 70 m. di cui il valore minimo di 60 m. è stato considerato sufficiente alla macchina dovendo servire la rete fin quando nel serbatoio di compenso si raggiunge un carico di 59m. La caratterizzazione energetica delle simulazioni ottemperanti il vincolo di pressione nelle due condizioni di presenza ed assenza di perdite idriche è stata riportata nella tabella seguente (Tabella 14-15).

Tabella 14 Report energetico per i diversi modelli di pompa nel caso reale della *Cabrera_network*

perdite originali	Q H	Q_{eff}	Heff.	%Util.	Aver.Eff.	kWh/m³	Aver.kW	PeakkW	kW-h/day	P24	DELTAE	EV
PM150/4D	50 60	50.2	60.4	100	74.22	0.17	43.27	44.52	1038.5	6.22	198.5736	839.9164
PM 150/5E	40 70	40.1	70.3	100	69.92	0.19	47.67	47.7	1144.2	6.52	239.8332	904.3368
PM 150 /3c	80 70	82.8	75	72.29	75.54	0.24	80.99	81.96	1405.2	5.78	247.1808	1158.009
PM 150/4c	50 65	50.6	66.5	87.48	74.11	0.19	50.56	50.98	1061.5	5.14	157.5024	903.9676
NC 100-250/235	60 65	61.4	68	72.68	71.97	0.22	64.63	66.09	1127.3	3.89	96.0212	1031.299
NC 80-250/255	70 65	69.4	63.9	75.82	62.03	0.23	63.76	64.18	1160.3	3.26	54.8872	1105.383
PM 150/3D	80 65	80.6	66	72.45	75.29	0.22	69.17	69.92	1202.8	4.66	149.2128	1053.617
NC 80-250/264	80 65	78.1	61.9	72.66	61.03	0.25	72.68	73.53	1267.3	3.52	80.07	1187.26
PM 150/4B	70 60	71.6	62.8	72.25	73.68	0.2	58.41	58.77	1012.9	3.18	42.704	970.226
PM 150/2 A	80 60	80.3	60.5	72.64	79.3	0.2	61.24	62.74	1067.6	4.19	106.132	961.458
NC 80-250/245	50 70	50.1	71.3	100	62.16	0.21	54.76	55.19	1314.3	6.7	276.948	1037.342
MEC MR 125/2F (73.6%)	60 60	59.8	59.6	100	66.49	0.2	52.6	53.35	1262.3	6.93	278.204	984.126
MEC AZRBH (78.2%)	85 60	85.5	60.7	72.48	77.93	0.21	65.35	67.03	1136.9	4.51	132.5394	1004.371
PML 150/3D	50 60	49.9	59.8	100	73.44	0.17	40.7	40.72	976.78	5.62	166.5456	810.2344
PML 150/3C	60 60	60.3	60.6	100	72.58	0.18	47.59	47.77	1142.3	6.82	244.1664	898.0836
PML 150/3B	70 60	69.9	59.9	78.41	70.77	0.2	54.94	55.13	1033.9	3.65	72.22	961.69

perdite nulle	Q H	Q_{eff}	Heff.	%Util.	Aver.Eff.	kWh/m³	Aver.kW	PeakkW	kW-h/day	P24	DELTAE	EV
PM150/4D	50 60	50.2	60.4	65.57	75.75	0.18	42.5	43.46	668.9	3.7	67.824	601.076
PM 150/5E	40 70	40.1	70.3	64.96	71.97	0.2	47.44	47.7	739.67	3.97	92.316	647.354
PM 150 /3c	80 70	82.8	75	60.45	77.12	0.25	79.5	81.42	1153.4	6.78	335.98	817.37
PM 150/4c	50 65	50.6	66.5	65.22	75.81	0.19	49.72	50.73	778.28	4.65	128.269	650.011
NC 100-250/235	60 65	61.4	68	65.53	72.91	0.22	62.73	64.82	986.47	5.97	239.7076	746.7624
NC 80-250/255	70 65	69.4	63.9	65.78	65.22	0.24	62.93	63.88	993.37	5.3	211.008	782.362
PM 150/3D	80 65	80.6	66	64.52	76.49	0.23	68.11	69.22	1054.8	6.63	298.2686	756.4914
NC 80-250/264	80 65	78.1	61.9	65.27	64.66	0.25	71.61	72.84	1121.8	6	274.75	847.09
PM 150/4B	70 60	71.6	62.8	65.67	75.46	0.21	57.73	58.54	909.82	5.67	209.0298	700.7902
PM 150/2 A	80 60	80.3	60.5	65.51	78.62	0.21	59.29	61.39	932.12	6.09	236.7246	695.3954
NC 80-250/245	50 70	50.1	71.3	64.96	65.51	0.22	53.93	54.98	840.75	4.19	116.7452	724.0048
MEC MR 125/2F (73.6%)	60 60	59.8	59.6	64.96	68.59	0.21	51.41	52.97	801.6	4.18	110.7792	690.8208
MEC AZRBH (78.2%)	85 60	85.5	60.7	65.27	76.85	0.22	63.8	65.29	999.37	6.38	268.0304	731.3396
PML 150/3D	50 60	49.9	59.8	66.21	75.26	0.18	40.58	40.71	644.82	3.46	54.2592	590.5608
PML 150/3C	60 60	60.3	60.6	64.96	74.46	0.19	47.32	47.7	737.82	4.17	99.6322	638.1878
PML 150/3B	70 60	69.9	59.9	65.64	73.33	0.21	54.45	55.02	857.77	5.1	171.444	686.326
PML 150/3A	70 70	69.3	69.7	65.54	71.24	0.22	61.88	62.14	973.42	5.73	223.1284	750.2916
MEC A3/100 (79.7%)	65 65	65.2	65.4	65.75	76.49	0.21	56.54	58.08	892.1	5.64	207.0516	685.0484
MEC AZRBH (79.5%)	75 70	76.3	72.4	61.46	78.61	0.24	75.73	79.14	1117.1	6.82	325.5552	791.5148

Tabella 15 Report energetico per i diversi modelli di pompa nel caso ideale della *Cabrera_network*

4.4.2 La seconda fase della ricerca

Le stesse tipologie di macchina individuate prima sono state, in questo contesto, sperimentate su tre diverse tipologie di rete tra le 40 individuate all'atto dell'indagine sul legame E_p -D. Questo, per comprendere l'interazione diametri-pompa nel consumo complessivo di $kW-h/day$.

Le reti in parola sono la numero 39, 36 e 26 rispettivamente scelte per essere molto simili dimensionalmente alla *Cabrera_Network*, avere diametri di misure più omogenee e per avere diametri più grandi di quella di riferimento (vedi Tabella 16). In ogni caso, si sono considerate tutte e sole quelle circostanze per cui si è rispettato il vincolo di pressione minima ai nodi, sia in presenza che in assenza di perdite idriche

Tabella 16 set di diametri

pipe	10	11	12	21	22	31	111	112	113	121	122	123	32	1
Cabrera_network	300	250	250	100	100	100	150	150	150	150	150	150	100	300
set-39	300	250	250	100	100	80	150	150	150	150	150	150	80	400
set-36	200	200	200	125	125	150	200	150	125	150	125	100	100	200
set-26	300	300	300	250	300	250	300	250	300	300	200	250	400	250

Volendo esaltare la differente risposta delle reti presentate, potremmo dire che: in ognuno dei casi si manifesta la riduzione dei modelli possibili da adottare rispetto al campione originale che ne prevedeva 19 questo, accade per un duplice motivo. Prima di tutto, incide il fatto che si impone un adattamento ad altre reti di macchine ricercate ad hoc per la *Cabrera_network*, e inoltre la variazione di diametro dei condotti si ripercuote con un effetto domino sul rendimento complessivo del sistema. Quest'ultimo aspetto è evidenziato nel caso della rete 39 che, sebbene simile dimensionalmente a quella di riferimento, riporta delle variazioni in termini di risposta energetica pur impiegando le stesse macchine.

Con la rete 36 si vuole, invece, fare capire come a parità di macchina e domanda idrica il funzionamento del sistema possa essere molto differente se i diametri sono più piccoli rispetto alla condizione di riferimento. Infatti, in questo caso si verifica la corrispondenza delle risposte energetiche nelle due circostanze di simulazione con e senza perdite idriche. Ciò accade per gli stessi motivi che sono stati spiegati nel precedente paragrafo e cioè a causa della mancata interazione tra pompa e serbatoio nel servire la rete, motivata dalla dimensione dei condotti che non consentono una comunicazione diretta tra questi due punti. Infine, la rete 26 mostra come, a causa delle dimensioni più ampie dei diametri, non solo il numero di macchine adatte si riduce notevolmente, ma tra queste la maggior parte sono in grado di funzionare a regime solo in assenza di perdite idrica.

Si sintetizza dunque il confronto appena fatto in termini di percentuali di utilizzo delle pompe (Tabella 17) dove gli spazi vuoti corrispondono a quelle circostanze in cui la simulazione idraulica non ha portato a risultati soddisfacenti o perché proprio non è riuscita a concludersi o perché le pressioni riportate ai nodi violavano il vincolo dei 22.92 m imposto.

Tabella 17 Confronto tra le % di utilizzo delle potenzialità dei modelli di pompe centrifughe

	Cabrera_network		Rete 39		Rete 36		Rete 26	
	α	$\alpha =0$	α	$\alpha =0$	α	$\alpha =0$	α	$\alpha =0$
MEC A3/100		65.75	72.97	64.75	100	100		
MEC AZRBH (78.2%)	72.48	65.27		59.73				
MEC AZRBH (79.5%)		61.46	100	65.01			72.79	57.01
MEC MR 125/2F	100	64.96	73.2	65.31	100	100	81.05	65.77
NC 100-250/235	72.68	65.53	73.29	65.09	100	100	73.3	61.99
NC 80-250/245	100	64.96	74.29	65.75	100	100		
NC 80-250/255	75.82	65.78	100	65.04	100	100		
NC 80-250/264	72.66	65.27	72.67	59.2	100	86.78		
PM 150 /3c	72.29	60.45	73.05	65.26				
PM 150/2 A	72.64	65.51	84.43	65.36				59.47
PM 150/3D	72.45	64.52	100	65.34				57.74
PM 150/4B	72.25	65.67	100	64.96	100	100		64.43
PM 150/4c	87.48	65.22	72.93	64.13	100	100		
PM 150/5E	100	64.96	100	65.5	100	100		
PM150/4D	100	65.57						65.31
PML 150/3A		65.54	76.76	65.74	100	99.96		

PML 150/3B	78.41	65.64	100	65.02	100	100		
PML 150/3C	100	64.96	100	66.03	100	100	95.31	65.71
PML 150/3D	100	66.21	72.97	64.75		100		

A questo punto della trattazione presentiamo i risultati ottenuti per le 4 reti di studio, per la cui interpretazione diamo delle indicazioni pratiche:

- I risultati per la Cabrera_Network sono rappresentati nei toni del rosso;
 - I risultati per la rete39 sono rappresentati nei toni del blu;
 - I risultati per la rete 26 sono rappresentati nei toni del verde;
 - I risultati per la rete 36 sono rappresentati nei toni dell'arancio.
- *Valutazione del legame E_v - Q*

Nota:

Seguono i grafici circa la caratterizzazione del legame tra E_v (kW-h/day) ed il valore di portata Q (l/s) del unto di lavoro da cui è stata definita la curva caratteristica della pompa, rispettivamente riportati in ordinata ed in ascissa per le quattro reti nelle condizioni reali ed ideali di esercizio.

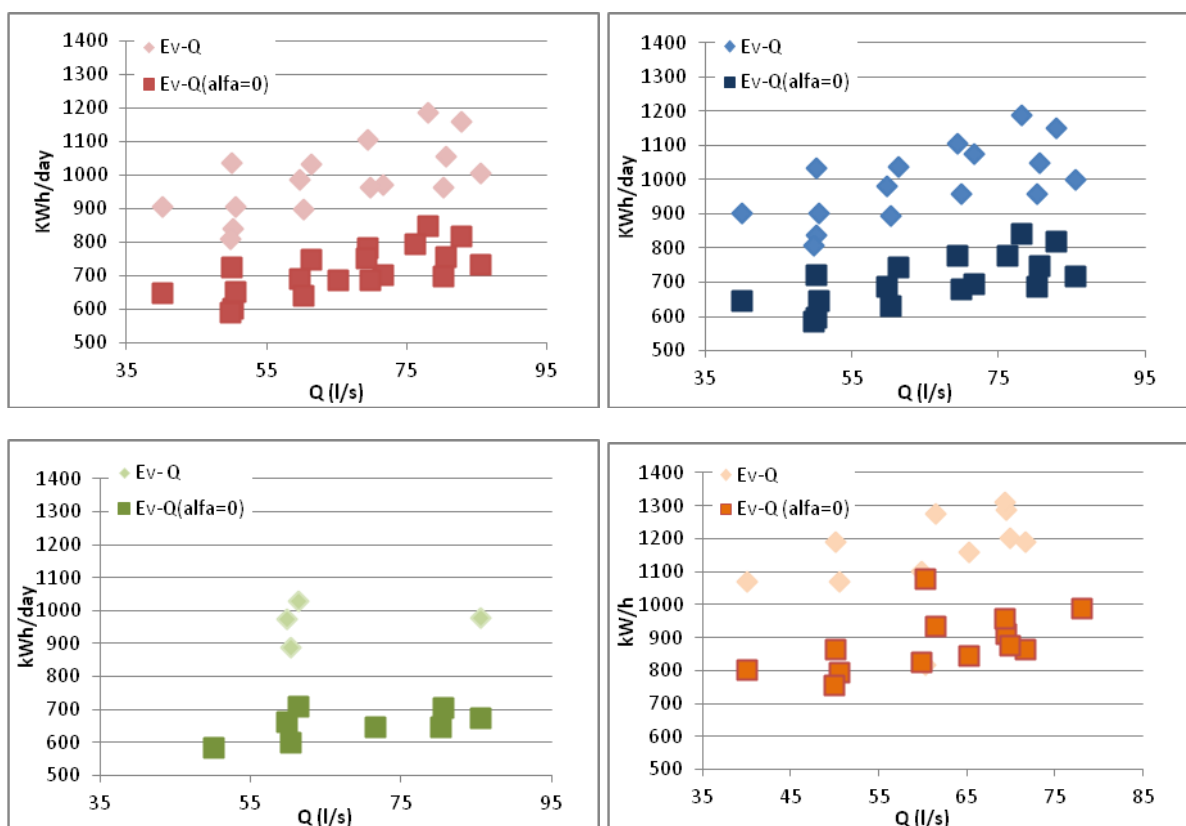


Figura 53 (gruppo) Relazione E_v (ordinata)- Q (ascissa) per la rete Cabrera-network, 39, 26, 36

Si osservi come in tutte le situazioni riportate, il consumo energetico giornaliero del caso ideale è sempre inferiore rispetto a quello reale in cui vi sono le perdite idriche e questo è un aspetto che

verrà riconfermato in tutti i grafici riportati. Per quanto riguarda la specificazione del nesso $Q-E_v$ si evince in linea di principio che all'aumentare del valore di portata che la macchina è capace di trasferire si necessita di quantitativi energetici crescenti ed inoltre là dove in entrambi gli scenari di perdita idrica vi è la possibilità di utilizzare la stessa macchina sussiste un legame proporzionale dei risultati.

- Valutazione del legame E_v-H

Nota

Seguono i grafici circa la caratterizzazione del legame tra E_v (kW-h/day) ed il valore di carico idraulico H (m) del punto di lavoro da cui è stata definita la curva caratteristica della pompa, rispettivamente riportati in ordinata ed in ascissa per le quattro reti nelle condizioni reali ed ideali di esercizio.

A tal proposito possiamo osservare l'eterogeneità dei legami tra impiego energetico e prevalenza della pompa. Nello specifico accade che per valori di H non alti, che si raggruppano intorno al valore di 60 m potremmo individuare tra le diverse alternative di modelli quella più efficiente, mentre per prevalenze variabili nell'intorno di 65m, accade che E_v rimane confinata in un preciso range. Solo per valori alti maggiori dei 70 m si ha una crescita quasi proporzionale dei due indicatori. Tutto ciò coerentemente alla definizione di potenza di una pompa e quindi di energia impiegata da questa nella sua attività.

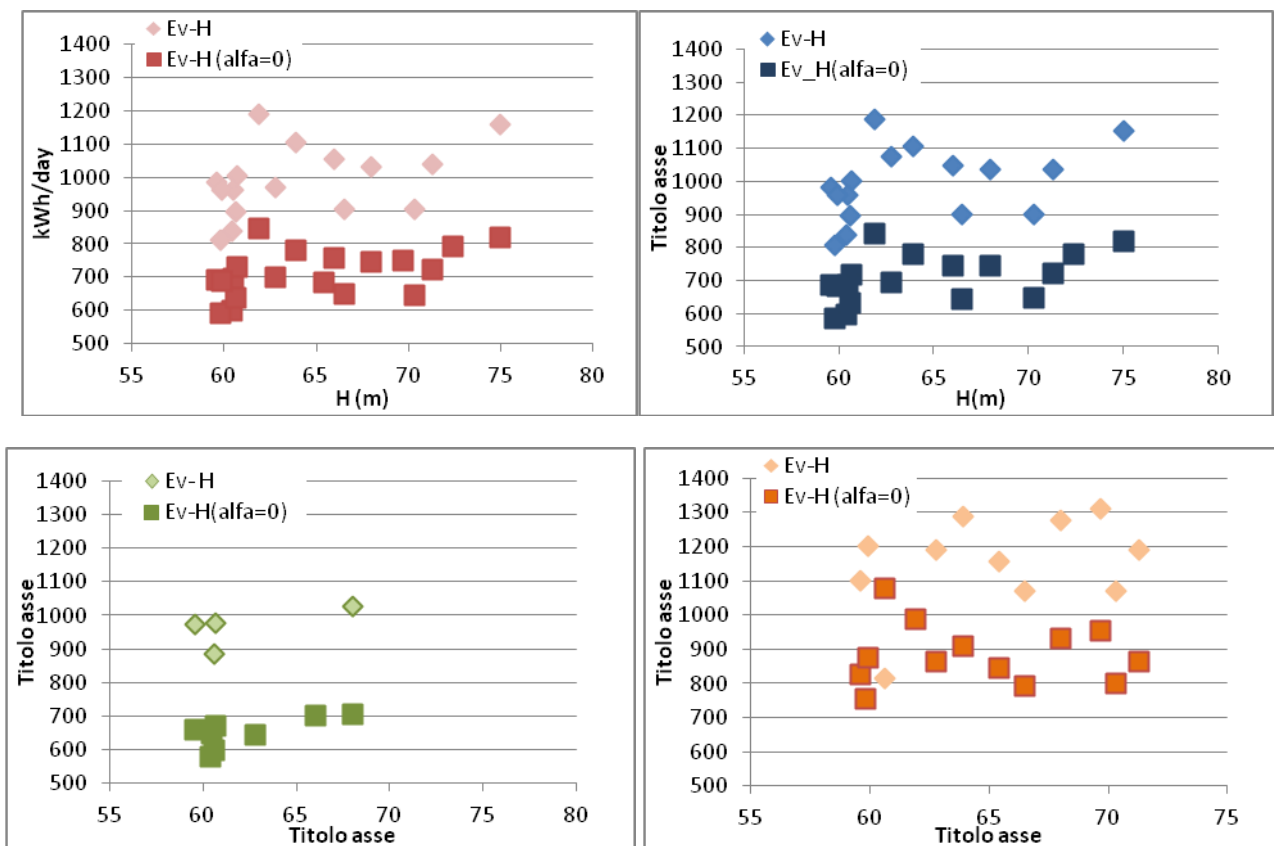


Figura 54 (Gruppo) Relazione E_v (ordinata)- H (ascissa) per la rete Cabrera-network, 39, 26, 36

- Valutazio del legame E_v -%Util.

Nota

Seguono i grafici circa la caratterizzazione del legame tra E_v (kW-h/day) ed la percentuale di utilizzo delle potenzialità delle pompe rispettivamente riportati in ordinata ed in ascissa per le quattro reti nelle condizioni reali ed ideali di esercizio.

Questo gruppo di risultati ci offre l'occasione di affermare che è possibile trovare per una stessa percentuale di utilizzo macchine che hanno impieghi energetici anche molto diversi, alla luce dei quali sarebbe opportuno orientare la ricerca della scelta del sistema di pompaggio al fine dell'ottimizzazione.

Inoltre si invita ad osservare il grafico inerente la rete 36 in cui, la mancanza di interazione tra serbatoio e pompa fa sì che quest'ultima lavori in entrambe le circostanze di studio in modo intenso. Quanto detto accade per i motivi dimensionali di rete specificati nei capitoli precedenti

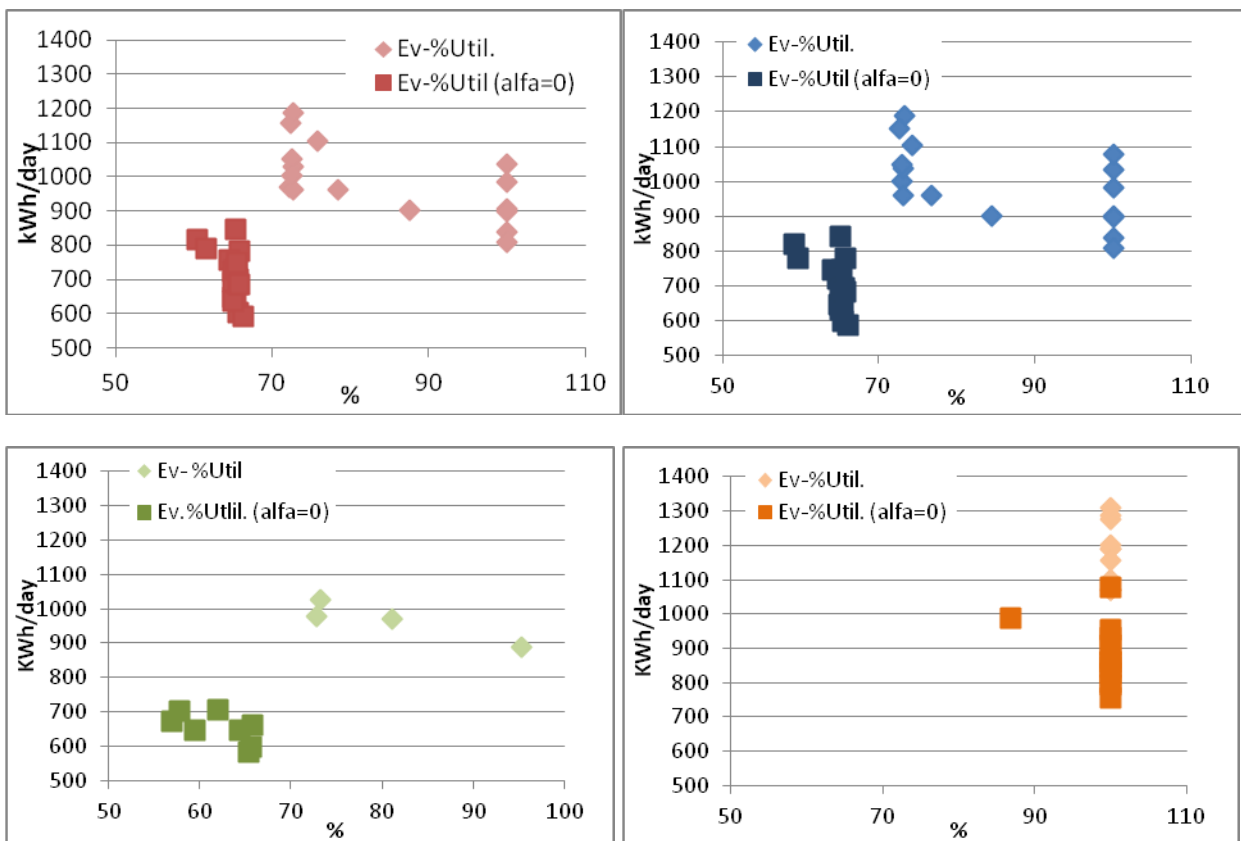


Figura 55 (Gruppo) Relazione E_v (ordinata)-%Util(ascissa) per la rete Cabrera-network, 39, 26, 36

- Valutazione del legame E_v -Aver.Eff.

Nota:

Seguono i grafici Caratterizzazione del legame tra E_v (kW-h/day) ed il rendimento medio della pompe rispettivamente riportati in ordinata ed in ascissa per le quattro reti nelle condizioni reali ed ideali di esercizio.

In questo caso, oltre ad osservare un consumo energetico differente per le due circostanze di perdite idriche ed una corrispondenza proporzionale tra i valori dei due gruppi, si evince come la natura dimensionale dei condotti di rete influenzino il rendimento medio dell'impianto di pompaggio. Infatti le reti *Cabrera_Network* e 39, in alto, hanno comportamenti simili data la somiglianza dimensionale delle due. L'analisi condotta per la rete 26 (in verde) ci dice che, i modelli di macchine adattabili ad una rete a diametri più ampi sono pochi, e che questi hanno rendimenti medi distribuiti intorno al valore di 100 kWh/day. Invece, per quanto concerne la rete numero 36, coerentemente a quanto visto per le percentuali di utilizzo delle potenzialità delle pompe, i valori medi di rendimento si concentrano in un piccolo intervallo di valori.

Infine un aspetto che caratterizza tutte e 4 le reti in ossequio a quanto visto nel gruppo 3 è possibile avere per uguali valori di rendimento macchine che consumano meno.

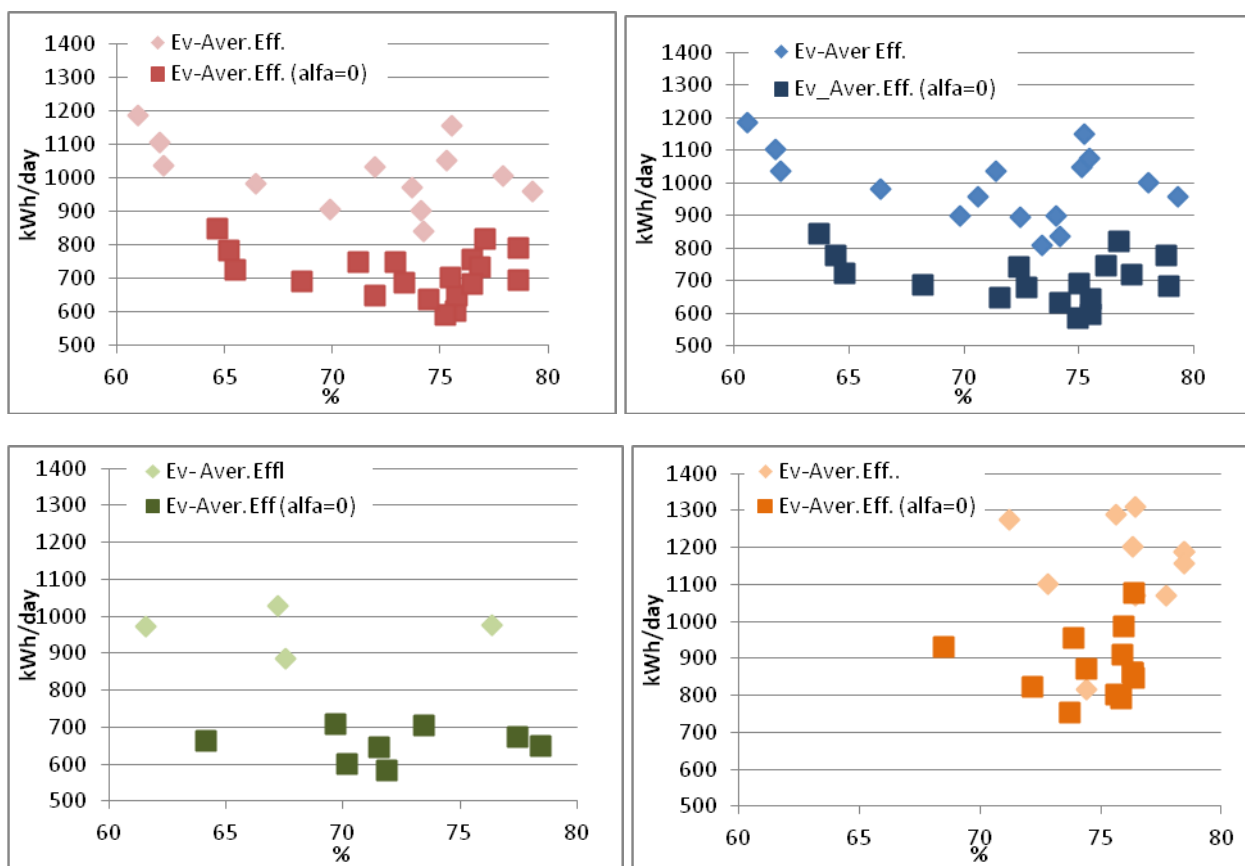


Figura 56(Gruppo) Relazione E_v (ordinata)-Aver. Eff.(ascissa) per la rete Cabrera-network, 39, 26, 36

- Valutazione del legame tra E_v -kW-h/ m^3

Nota:

Seguono i grafici circa la caratterizzazione del legame tra E_v (kW-h/day) e l'intensità energetica sviluppata (kW-h/m³) dalla pompa, rispettivamente riportati in ordinata ed in ascissa per le quattro reti nelle condizioni reali ed ideali di esercizio.

La tendenza dei risultati ottenuti è chiara, ed esprime il fatto che, al crescere dell'intensità energetica della pompa cresce il consumo di energia giornaliero.

In particolare, data la semplicità dei grafici, è più facilmente percepibile come, per reti con diametri simili, cioè per la *Cabrera-Network* e la rete 39 si abbiano consumi energetici veramente molto affini, si spazia infatti, in entrambi i casi da circa 800 kW-h/day a circa 1200kW-h/day nel caso reale di perdite idriche.

I valori medi di impiego energetico si fanno più alti in caso di diametri minori, a causa sia delle dissipazioni per attrito a cui si deve compensare sia, nello specifico caso della rete numero 36, all'inefficiente sfruttamento del serbatoio di compenso.

Nel caso in cui si avessero dei diametri più grandi, anche se non troppo differenti da quelli della *Cabrera_network*, i consumi energetici sono in media più bassi come dimostra la serie di valori in verde (rete 36).

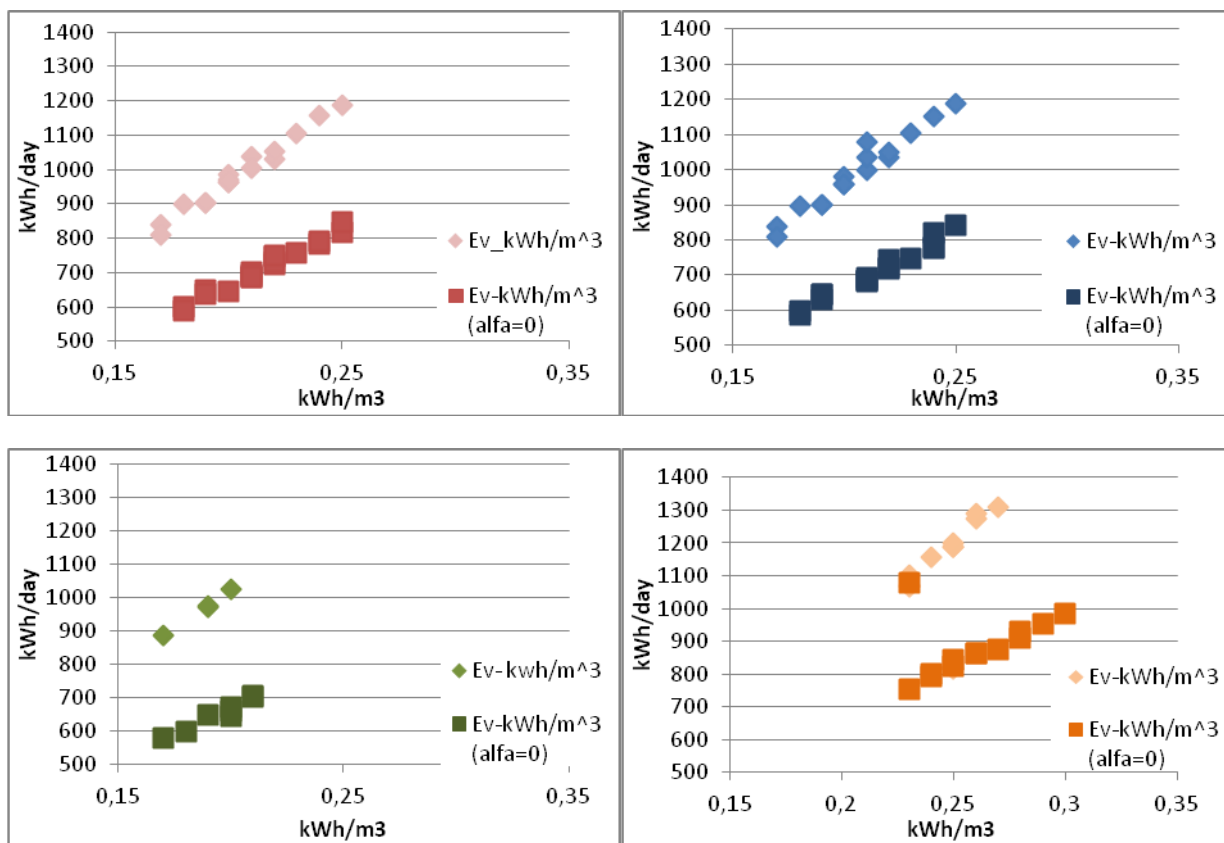


Figura 57 (Gruppo) Relazione E_v (ordinata)-Intensità energetica (ascissa) per la rete Cabrera-network, 39, 26, 36

- Valutazione del legame tra E_v -Aver.kW

Nota:

Seguono i grafici circa la caratterizzazione del legame tra E_v (kW-h/day) ed il consumo medio di kW, rispettivamente riportati in ordinata ed in ascissa per le quattro reti nelle condizioni reali ed ideali di esercizio.

Dai grafici emerge che al crescere del valore medio di potenza assorbita dalla macchina cresce E_v , derivando l'ultima dall'integrazione nel tempo della prima. Si osservi però, che questa tendenza è più o meno accentuata a seconda della tipologia di rete che le stesse pompe sono chiamate a servire. Infatti, la variazione dimensionale delle condotte comporta una diversificazione dei percorsi effettuati dal fluido coinvolgendo l'aspetto di perdita idrica per attrito. Si ha dunque una maggiore difficoltà, da parte della pompa, a far arrivare il fluido in un punto di prelievo. Per queste ragioni, l'andamento delle quattro serie, graficate al crescere delle dimensioni dei tubi in rete, si fanno meno ripide. In buona sostanza, si esalta il differente comportamento di una stessa macchina al variare del contesto di impiego.

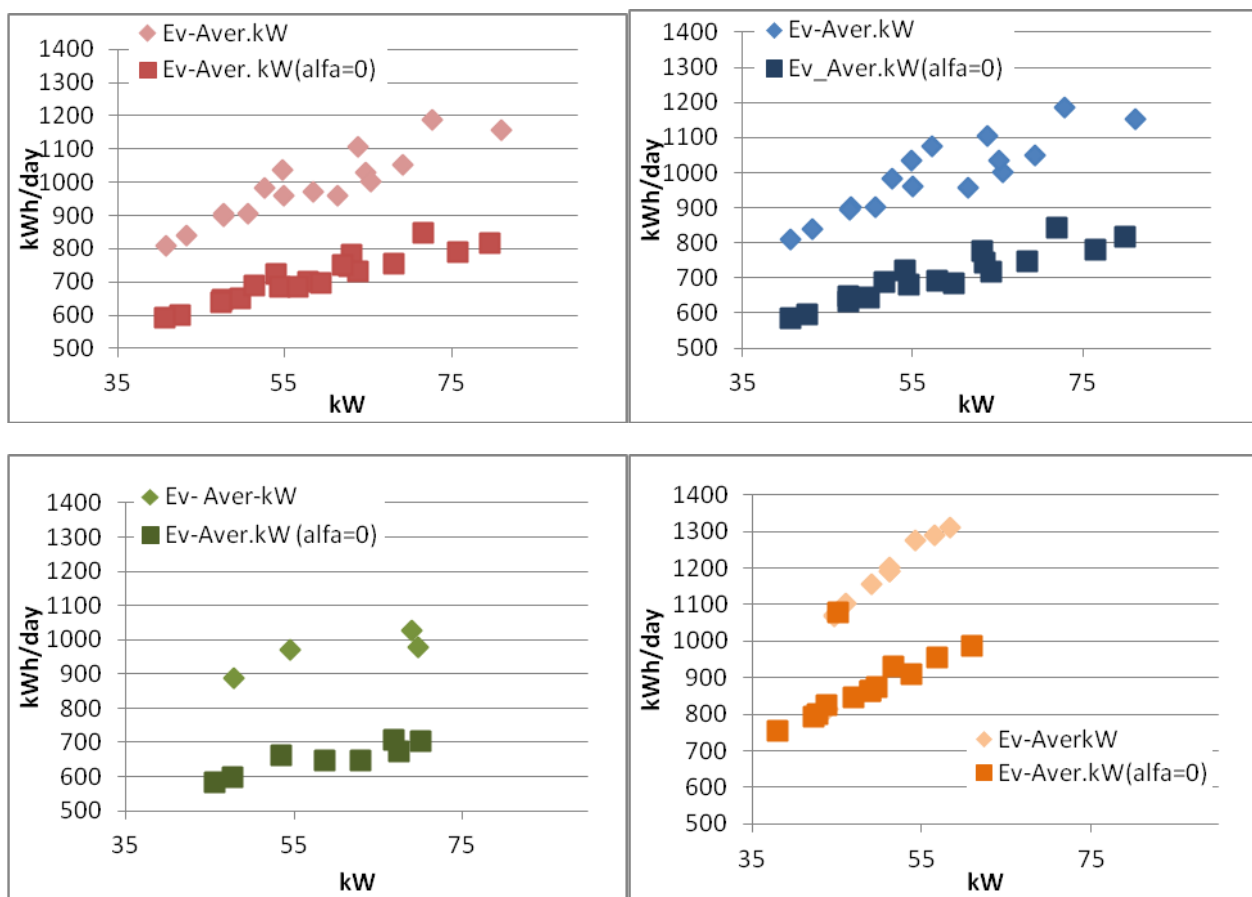


Figura 58 (Gruppo) Relazione E_v (ordinata)-Aver. kW (ascissa) per la rete Cabrera-network, 39, 26, 36

- Valutazione E_v -Peak kW

Seguono i grafici circa la caratterizzazione del legame tra E_v (kW-h/day) ed il valore massimo di kW consumati dalla pompa nelle 24ore, rispettivamente riportati in ordinata ed in ascissa per le quattro reti nelle condizioni reali ed ideali di esercizio

Quanto detto nel caso della potenza media assorbita della pompa, si ripropone nel caso del picco massimo di sfruttamento che si ha nelle 24 ore. come riportato nell'ultimo gruppo di analisi.

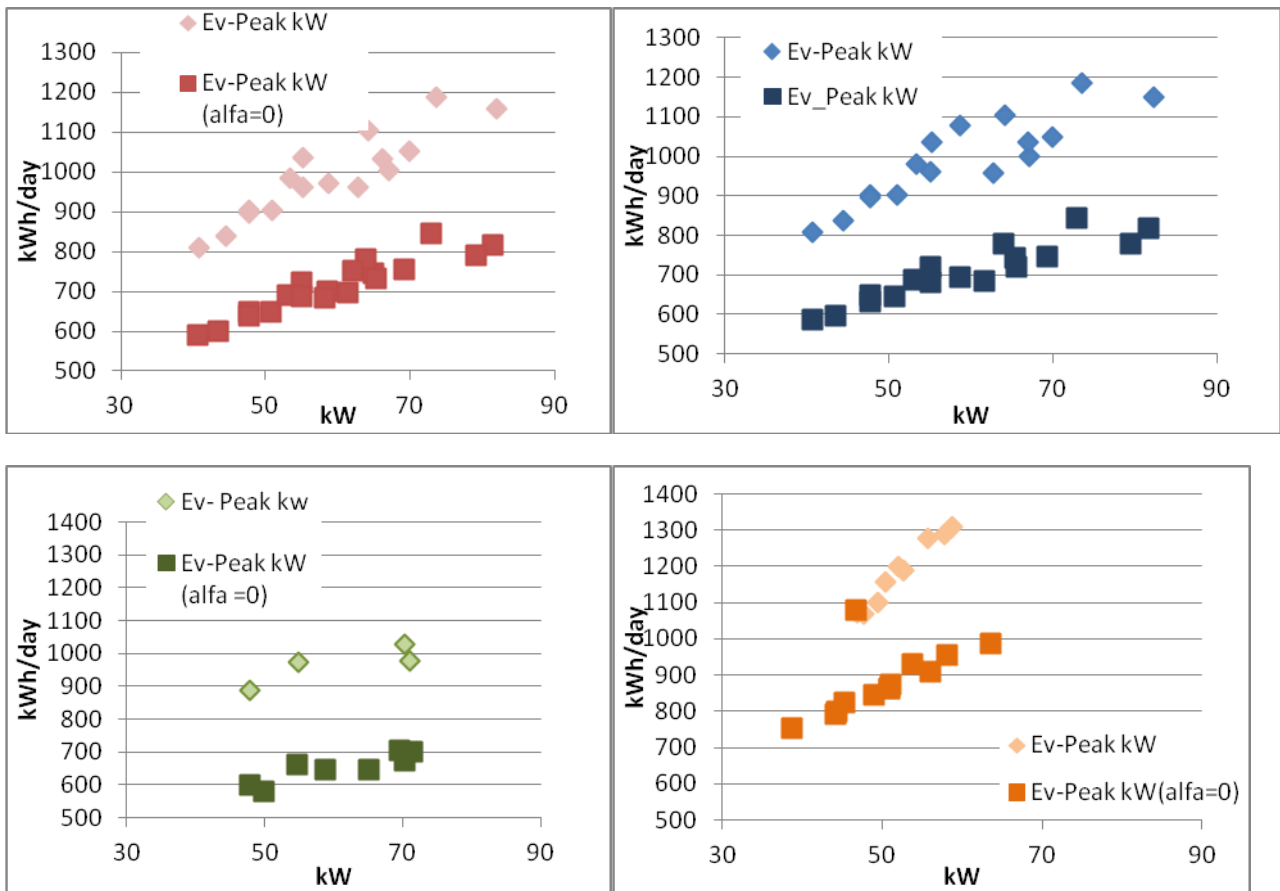


Figura 59 (Gruppo) Relazione Ev(ordinata)- Peak. kW (ascissa) per la rete Cabrera-network, 39, 26, 36

Approfondimento

A questo punto della trattazione, per fare chiarezza sul legame che intercorre tra il funzionamento di un certo modello di pompa centrifuga, che in questo caso è la MEC MR 125/2F, e la rete di distribuzione che è chiamata a servire, approfondiamo il caso del sistema numero 36 le cui caratteristiche dimensionali vengono riportate in tabella (Tabella 18).

Tabella 18 Caratterizzazione dimensionale della rete 36

ID.Pipe	10	11	12	21	22	31	111	112	113	121	122	123	32	1
D(mm)	200	200	200	125	125	150	200	150	125	150	125	100	100	200

Questa specifica configurazione di diametri comporta un mancato sfruttamento della capacità di compenso del serbatoio, dal momento che viene ostacolata il transito diretto delle masse fluide nei rami della dorsale superiore della rete, che collegano il serbatoio e la pompa.

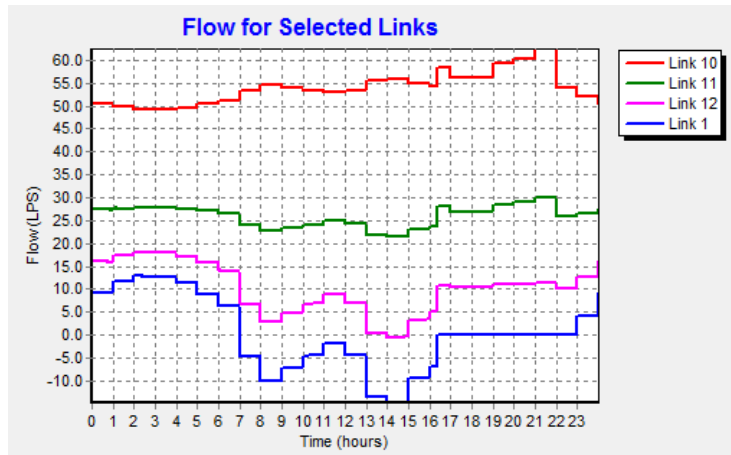


Figura 60 Transito di portata nella dorsale pompa-serbatoio

In particolare, nel serbatoio non viene mai raggiunto il valore di 7m di pressione (vedi figura 61). Ciò implica un gravoso sfruttamento delle potenzialità della pompa, la quale si pone come unico elemento di alimentazione idrica della rete come dimostrato dall'andamento dei flussi di portata nella stessa.

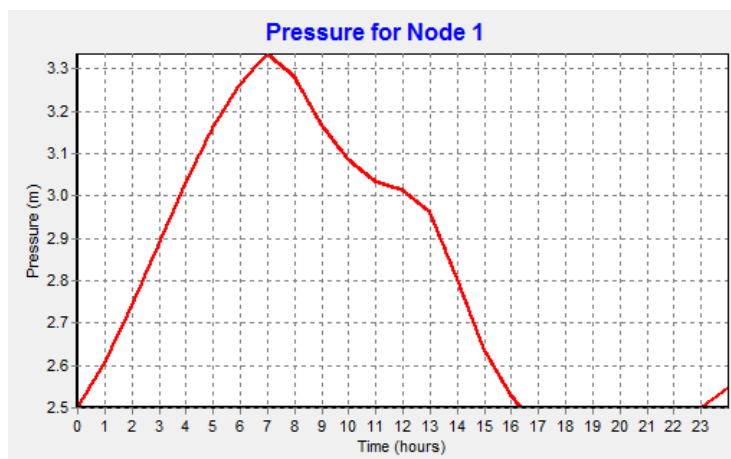


Figura 61 livello idrico nel serbatoio di compenso nella rete 36

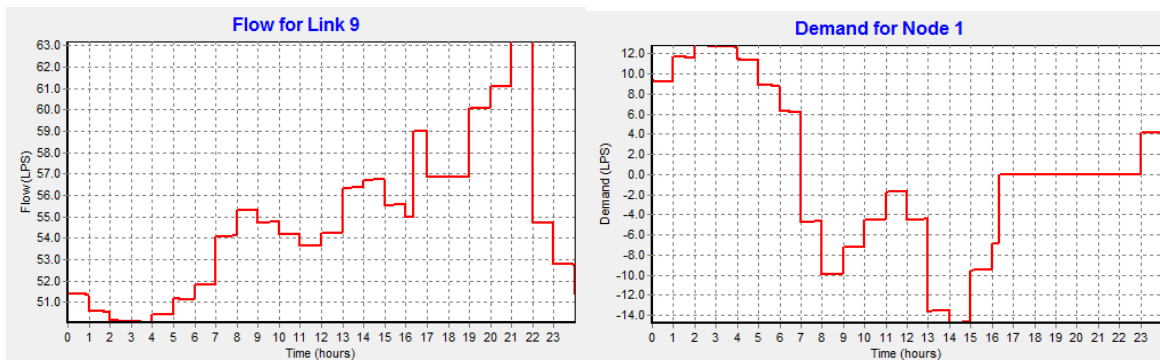


Figura 62 confronto tra la portata sollevata dalla pompa MEC MR125/2F-(ramo 9) e quella in ingresso e uscita al (nodo 1)

Si osservi nel gruppo di grafici sopra come la pompa non cessi mai di sollevare acqua mentre nel serbatoio l'andamento nel tempo delle portate in ingresso ed uscita denota uno scarso contributo alla distribuzione idrica nell'intervallo di tempo che va dalle 07:00 alle 16:00.

In ragione di quanto chiarito si perviene a consumi energetici molto alti come visto nei paragrafi precedenti.

4.5 Considerazioni conclusive

Questa fase della ricerca ha qualificato l'interazione che sussiste, in una rete di distribuzione idrica, tra i consumi energetici e alcune variabili del sistema quali le perdite idriche, i diametri e le pompe di alimentazione.

Volendo dare dei suggerimenti metodologici, basati sugli esiti presentati, a quanti sono chiamati alla progettazione o gestione dei sistemi di acquedotto, potremmo trattare due situazioni distinte:

La prima è quella di una nuova realizzazione di rete. In questo caso ci viene dimostrato che ai fini dell'ottimizzazione energetica della rete, non è sufficiente un buon dimensionamento idraulico delle condotte ma, devono essere opportunamente selezionati anche i materiali per limitare le probabilità di fallanze, e la pompa di alimentazione. Infatti, solo bilanciando, in fase di simulazione, l'influenza di questi aspetti sul servizio idrico, si può ambire alla progettazione di un efficiente sistema di rete, sia in termini di impiego di risorsa idrica che di investimenti economici finalizzati alla sua realizzazione ed esercizio.

Qualora invece, il progettista fosse chiamato ad operare sul ripristino dell'efficienza di una rete esistente, al fine di sgravare di inutili costi energetici il gestore del servizio idrico che gli affida il compito, potremmo suggerire, data l'immediatezza ed il basso investimento economico che l'intervento richiederebbe, di operare come prima alla sostituzione della pompa esistente con una meno impattante sui consumi energetici. Ciò fatto, sarebbe ulteriormente vantaggioso se, il recupero economico ottenuto, fosse reinvestito in una campagna perdite che farebbe ulteriormente calare i consumi energetici.

5. Caratterizzazione energetica di una rete di distribuzione idrica tramite l'impiego dell' algoritmo GHEST.

Introduzione

Nei paragrafi seguenti vengono esibite le soluzioni dell'algoritmo GHEST al problema di *ottimizzazione dei consumi energetici* della rete di distribuzione idrica *Cabrera-network*. Ciò è stato possibile grazie all'implementazione dello stesso in ambiente MATLAB^R. Verranno quindi chiariti gli aspetti salienti del codice *m sfruttato ed i risultati a cui questo è pervenuto.

5.1 Risoluzione del problema di ottimizzazione energetica di un sistema di distribuzione idrica tramite l'impiego dell' algoritmo GHEST.

Nel capitolo 2 abbiamo presentato gli aspetti più importanti dell'interpretazione di un problema di *Optimal Design-OD* in WDN, per una strategia evolutiva quale GHEST. Dobbiamo però ricordare che la presente ricerca è volta alla caratterizzazione energetica di una rete di distribuzione idrica ed in ragione di ciò, all'algoritmo GHEST si è fatto perseguire l'obiettivo della minimizzazione dei costi energetici in WDN, risolvendo così un problema *NP-hard*, la cui connotazione matematica viene riportata di seguito (Eq. 45-48).

$$\min E = \sum_{p \in P} e(D_p) L_p \quad \text{Eq.45}$$

$$\sum_{(i,j) \in L} Q_{ij} - \sum_{(i,j) \in L} Q_{ji} = q_j \quad j \in N \text{ Eq. 46}$$

$$H_i - H_j = \alpha \frac{L_{ij}}{cW_{ij}^\beta D_{ij}^\gamma} Q_{ij} |Q_{ij}|^{\beta-1} \quad (i,j) \in L \text{ Eq. 47}$$

$$D^T \in D$$

$$P_i \geq P_{min} \quad i \in N \text{ Eq. 48}$$

La prima equazione (Eq. 45) è la *funzione obiettivo* OF da minimizzare, che in buona sostanza si propone di trovare quella configurazione di diametri D per i P rami della rete, che riduca i consumi energetici. La seconda e terza equazione sono, rispettivamente, l'equazione di continuità al nodo e quella del moto in condotta. Segue poi la variabile di controllo su cui verte l'analisi, che indica che il diametro da associare ai rami è di tipo discreto e che deve appartenere alla lista di D diametri commerciali. Infine troviamo il vincolo di pressione minima ai nodi.

Comunque vari l'oggetto del processo di ottimizzazione, GHEST rimane una procedura (μ, λ) -ES. Per cui, le μ soluzioni dalle quali dovrebbe evolvere una nuova popolazione, sono scelte in un insieme di λ soluzioni figlie, in modo che ad ogni iterazione le soluzioni scartate vengano eliminate definitivamente. Questo, coerentemente con la volontà di concentrare la ricerca dove i risultati appaiano incoraggianti.

Ciò ribadito, GHEST provvede, come prima cosa, alla creazione di una popolazione costituita da un numero Pop di soluzioni casuali Gen^1 .

$$\begin{array}{l}
 \text{Parents} \\
 \text{Gen}^i = \begin{bmatrix} sol_{Pop} \\ \dots \\ sol_{PS} \\ \dots \\ sol_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{Pop,1} & I_{Pop,2} & \dots & I_{Pop,p} & \dots & I_{Pop,P} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ I_{PS,1} & I_{PS,2} & \dots & I_{PS,p} & \dots & I_{PS,P} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ I_{1,1} & I_{1,2} & \dots & I_{1,p} & \dots & I_{1,P} \end{bmatrix} \\
 \mathbf{m}^i = [m_1 \quad m_2 \quad \dots \quad m_p \quad \dots \quad m_P] \\
 \mathbf{s}^i = [s_1 \quad s_2 \quad \dots \quad s_p \quad \dots \quad s_P]
 \end{array}$$

Rappresentazione matriciale del funzionamento di GHEST

Ogni riga della matrice Gen^1 si costituisce degli indici di un vettore in cui sono contenute le dimensioni dei diametri che, i P rami della rete, possono assumere. In particolare, tra le possibili combinazioni di diametri a cui si potrebbe pervenire per la stessa struttura di rete, sono ivi considerati Pop casi, la cui simulazione idraulica in Epanet2 ha verificato il rispetto del vincolo di pressione. Quindi, la matrice da cui evolve la ricerca ha tante righe quante sono le Pop reti *feasible* e tante colonne quanti sono i P rami della rete.

Queste *Pop* soluzioni vengono ordinate sulla base di OF, cioè in riferimento alla funzione obiettivo che ci guida verso l'ottimo.

$$OF(sol_1) < OF(sol_2) < \dots < OF(sol_k) < \dots < OF(sol_{pop})$$

Una volta ordinate secondo questo criterio, GHEST ne seleziona una certa percentuale *pct*, connotata dall'essere più vicina all'obiettivo da raggiungere, costituendo così, un sotto gruppo *PS* di soluzioni promettenti (Eq. 49).

$$PS = \text{int} \left(\frac{Pop \cdot pct}{100} \right) \quad \text{Eq.49}$$

Le caratteristiche delle *PS* soluzioni scelte vengono sintetizzate nei due vettori (Eq. 50) dei valori medi *m* e delle deviazioni standard *s* che caratterizzano la distribuzione normale $N(m,s)$ (Eq. 51) da cui evolve la ricerca.

$$\begin{cases} m_p = \text{mean} (I_{1,p}, I_{2,p}, \dots, I_{PS,p}) \\ s_p = \text{dev. st} (I_{1,p}, I_{2,p}, \dots, I_{PS,p}) \end{cases} \quad \text{Eq. 50}$$

$$Gen^{i+1} = N(m^i, s^i) \quad \text{Eq. 51}$$

Potrebbe però accadere, per questioni di somiglianza delle soluzioni, che la deviazione standard di esse sia nulla. Ciò potrebbe non essere sintomatico del raggiungimento dell'ottimo assoluto, ma semplicemente dell'individuazione nello spazio delle soluzioni di un minimo relativo della funzione obiettivo che farebbe cessare la ricerca.

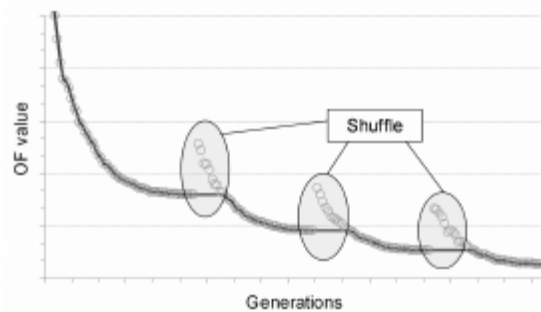


Figura 63: rappresentazione del processo shuffle

Per ovviare a questa circostanza, le nuove soluzioni sono create a partire da una distribuzione normale $N(sol_{best}, S_{shuffle})$ in cui *solbest* è la migliore soluzione trovata fino a quel momento e *Sshuffle* è il valore di deviazione standard preventivamente definito dall'utente ed usato nel processo *shuffle* (Eq. 52).

$$Gen^{i+1} = N(sol_{best}^i, S_{shuffle}) \quad \text{Eq. 52}$$

Terminato ogni passo del processo iterativo, GHEST fornirà un valore *solbest* come la migliore soluzione trovata.

5.2 Implementazione in ambiente MATLAB^R del problema di ottimizzazione dei consumi energetici di una rete di distribuzione idrica.

La concreta applicazione dell'algoritmo GHEST ad un caso di studio, ha richiesto la sua implementazione in ambiente MATLAB^R. Infatti, è stato sfruttato in questa ricerca il codice di calcolo *EMG_Energy.m* (*.m è l'estensione tipica dei file di MATLAB^R) a mezzo del quale si sono individuate 17 configurazioni di diametri che per 17 modelli di pompa alimentanti la rete *Cabrera_network* (Tabella 19) minimizzassero i consumi energetici.

Tabella 19

MODELLI DI POMPA			
1	PML 150/3D	9	MEC MR 125/2F
2	PM150/4D	10	MEC AZRBH
3	PML 150/3C	11	NC 100-250/235
4	<i>PM 150/4c</i>	12	<i>NC 80-250/245</i>
5	PM 150/5E	13	PM 150/3D
6	PM 150/2 A	14	<i>Original</i>
7	PML 150/3B	15	NC 80-250/255
8	PM 150/4B	16	PM 150 /3c
		17	NC 80-250/264

Il codice di calcolo usato, per esplicitare tutti i passaggi che caratterizzano la modalità con cui GHEST perviene all'ottimo del problema, necessita della strutturazione di diverse categorie di dati.

5.2.1 Dati sfruttati nel codice *EMG_Energy.m*

Vengono in questo paragrafo presentate le informazioni impiegate da *EMG_Energy.m* per poter individuare le soluzioni dimensionali di rete energeticamente migliori, al variare del modello di pompa.

*Categoria *.data*

Tramite questa tipologia di dati vengono memorizzate in strutture algebriche informazioni generali, quali:

- *SetD*: sintetizza la dimensione dei diametri associabili ai rami di rete ed i corrispettivi costi per metro di ramo, in particolare si è potuto spaziare tra le possibilità commerciali di

diametri da valori di 60mm a valori di 400mm per un costo variabile tra 19.8euro/m e 141.9euro/m;

- *RamiIdx*: è il vettore costituito degli indici caratterizzanti i rami della rete di analisi;
- *RamiL*: riporta la lunghezza in metri dei rami ordinati secondo *RamiIdx*
- *LimitD*: impone il vincolo sulla dimensione dei diametri affermando che nessuno di essi può assumere dimensioni minori o maggiori rispettivamente del più piccolo o del più grande dei diametri contenuti in *SetD*;
- *RangeP*: viene definito il range di pressioni che possono caratterizzare i nodi della rete per reputare accettabili le configurazioni di rami generate, che nel caso di studio è variato tra i 23m ed i 120m
- *nomeRete*: individua la rete da sottoporre al processo di ottimizzazione.

In particolare, grazie alla voce *nomeRete* viene richiamato il file di testo *.inp di Epanet2 in cui sono annotate tutte le caratteristiche strutturali e di funzionamento idraulico della *Cabrera_network* per i 17 casi di studio.

Categoria . *dll e *.h

Questi particolari files servono per assumere gli esiti delle simulazioni idrauliche sulla cui base individuare le soluzioni ottemperanti il vincolo di pressione, consentendo di caricare le librerie esterne di Epanet2 in MATLAB, e per potere utilizzare queste librerie è necessario sfruttare le disposizioni sottostanti:

- *loadlibrary Epanet2 Epanet2.h* carica la libreria
- *unloadlibrary epanet2* la scarica dal programma
- *[a,P] =callib('Epanet2', 'ENgetnodevalue', i, 11,P)* assegna alla variabile P il valore di pressione del nodi i.

In questo modo si trasportano sulla piattaforma informatica MATLAB^R tutte le possibili funzioni e costanti predefinite previste da Epanet2.

Oltre alle indicazioni appena descritte, il codice *EMG_Energy.m*, per poter giungere ad una soluzione utile, necessita di altri due tipi di indicazioni:

- Indicazioni circa la caratterizzazione del processo GHEST, cioè tipo di modello di pompa analizzato, ampiezza delle popolazioni da ottimizzare (*Pop*), percentuali di queste che possono essere impiegate nella trattazione statistica (*pct*), numero di volte che si vuole eseguire l'individuazione di una soluzione ottimale per ogni popolazione generata (*Niter*), ed infine la deviazione standard (*Sshuffle*) da attribuire al processo *Shuffle*.
- Definizione di una funzione obiettivo *OF*.

In questo caso la funzione obiettivo OF è volta alla minimizzazione dell'energia E, che in questo studio è stata intesa come "*Energia Vera*" E_v . Si tratta, dunque, di un valore assoluto del consumo giornaliero dato dalla sottrazione del surplus energetico del serbatoio alle 24:00 al quantitativo di *kW-h/day* impiegati dalla pompa per servire la rete (Eq. 53).

$$OFE = \min(Epc - Ecomp) \text{ Eq.53}$$

L'output del processo non è il valore effettivo assunto da *OFE*, ma è dato dal prodotto tra *OFE* e un fattore di penalizzazione della soluzione. In particolare, la penalizzazione imposta tiene conto di quanto la simulazione idraulica comporti valori di pressione diversi rispetto al vincolo minimo (Eq. 54).

$$output = OFE * (1 + 1000 * OFP^2) \text{ Eq.54}$$

5.3 Soluzioni ottenute dall'impiego di GHEST

Per la definizione della modalità di esplorazione dello spazio delle soluzioni da parte di GHEST, nel codice *EMG_Energy.m*, abbiamo inserito i seguenti valori:

- *Pop* =30
Abbiamo imposto cioè, il numero delle righe della matrice *Genⁱ* all'i-esima generazione.
- *pct* =20;
Abbiamo, dunque, imposto la trattazione statistica del 20% delle soluzioni generate che avessero caratteristiche più affini all'obiettivo da perseguire.
- Numero iterazioni=100;
Gli abbiamo imposto di eseguire la genesi e l'analisi di nuovi gruppi di soluzioni per 100 volte.
- *Sshuffle* =1;
Abbiamo attribuito una deviazione standard pari ad uno, nel caso in cui GHEST incorresse in un vicolo cieco durante l'esplorazione.

Si sono generate, in ossequio a queste imposizioni, per ogni modello di macchina analizzato, 100 soluzioni ottimali per le 100 fasi di valutazione. Dunque per i 17 gruppi di soluzioni ottimizzate le rispettive *solbest* vengono di seguito riportate (tabella 20).

Tabella 20

MODELLO POMPA	DIAMETRI IN mm DEI RAMI														Ev kW-h/day
	10	11	12	21	22	31	111	112	113	121	122	123	32	1	
<i>original</i>	400	400	400	250	125	250	200	60	60	125	250	150	200	400	776
NC100/250/235	400	400	400	200	150	125	200	100	60	200	150	125	250	400	772
PML 150/3B	400	400	400	250	125	250	200	100	60	80	300	150	150	400	663
PML 150/3C	400	400	400	200	150	125	200	100	60	200	150	125	250	400	680
PML 150/3D	400	400	400	125	200	350	80	200	60	60	80	350	250	400	608
MEC MR 125/2F	400	400	400	150	125	100	100	200	60	250	150	200	250	400	749
NC 80/250/264	400	400	400	400	400	80	400	400	400	100	100	80	150	400	837
PM 150/2A	400	400	400	250	125	100	200	60	60	150	200	60	300	400	648
NC 100/250/255	400	400	400	150	150	200	250	60	60	150	100	250	125	400	773
PM 150/3C	400	400	400	250	150	60	200	60	60	125	200	200	150	400	691
PM 150/3D	400	400	400	250	125	200	200	60	60	60	300	150	150	400	691
PM 150/4B	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	671
MEC AZRBH	400	400	400	400	400	125	400	350	400	60	125	60	100	400	700
PM 150/4D	400	400	400	200	125	150	200	100	60	200	125	60	200	400	685

PM 150/5E	400	400	400	200	100	200	100	200	60	250	60	125	400	400	659
NC 80/250/245	400	400	400	300	400	400	200	60	80	100	300	80	200	400	757
PM 150/4C	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	670

Si osservi come, perseguendo il solo obiettivo dell'ottimizzazione dei consumi, a discapito quindi dei costi di realizzazione di queste reti, la *conditio sine qua non* per ridurre gli impieghi di E_v è quella di favorire il diretto collegamento tra la pompa ed il serbatoio (vedi fig. 64) di compenso in modo che questo possa più facilmente raggiungere quel valore massimo di pressione pari a 7m a cui compete lo spegnimento della pompa.

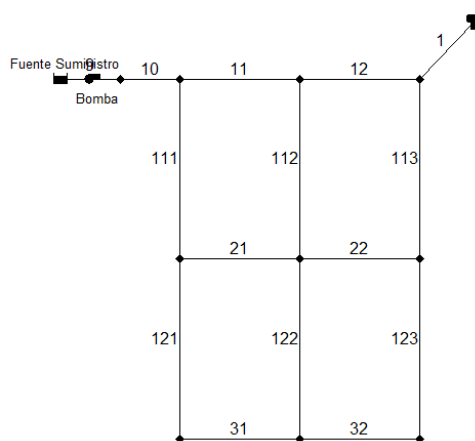


Figura 64 Struttura di rete soggetta ad ottimizzazione energetic

Dunque, anche con una procedura automatica siamo riusciti a riconfermare questo aspetto inconfutabile del legame tra E_v e modalità di alimentazione della rete. Bisogna però puntualizzare che le 17 solbest sono nei restanti 10 rami anche molto diverse tra loro, a seconda del modello di pompa valutato. Tra queste, se ne sono scelte tre, reputate significative ai fini dell'interpretazione dei risultati:

- *solbest* per la pompa originale (*Original*) prevista dal caso di studi, che in qualche modo si pone come riferimento per le successive valutazioni;
- *solbest* per la pompa che in assoluto fa consumare meno *kW-h/day* cioè la PML 150/3D;
- *solbest* per la pompa che in assoluto fa consumare più *kW-h/day* cioè la NC 80/250/264;

Si precisa che i modelli PML150/3D ed NC 80/250/264 sono quelli che applicati alla *Cabrera_network* hanno manifestato le stesse tendenze di consumo, vedi Tabella sotto.

Tabella 21

Modello pompa	<i>Cabrera_network</i>	<i>solbest</i>
NC 80-250/264	1187	837
<i>Original</i>	1075	776
PML 150/3D	810	608

Selezionate le tre *solbest*, sulla base di questo criterio, vogliamo ora analizzare due aspetti:

- La modalità con cui GHEST genera le soluzioni ottime alle N iterazioni; ciò verrà fatto correlando E_v delle 100 iterazioni al numero di rami le cui dimensioni variano rispetto l'ottima di quel gruppo. Quanto detto ci aiuterà a comprendere la varietà dimensionale delle soluzioni.

Si puntualizza a proposito, che in tutti e tre i grafici sotto, sono riportati in ascissa i $kW-h/day$ caratterizzanti le 100 soluzioni, e in ordinata il numero di cambiamenti in termini di diametro, da apportare in riferimento ad un caso nullo corrispondente all'ottimo assoluto.

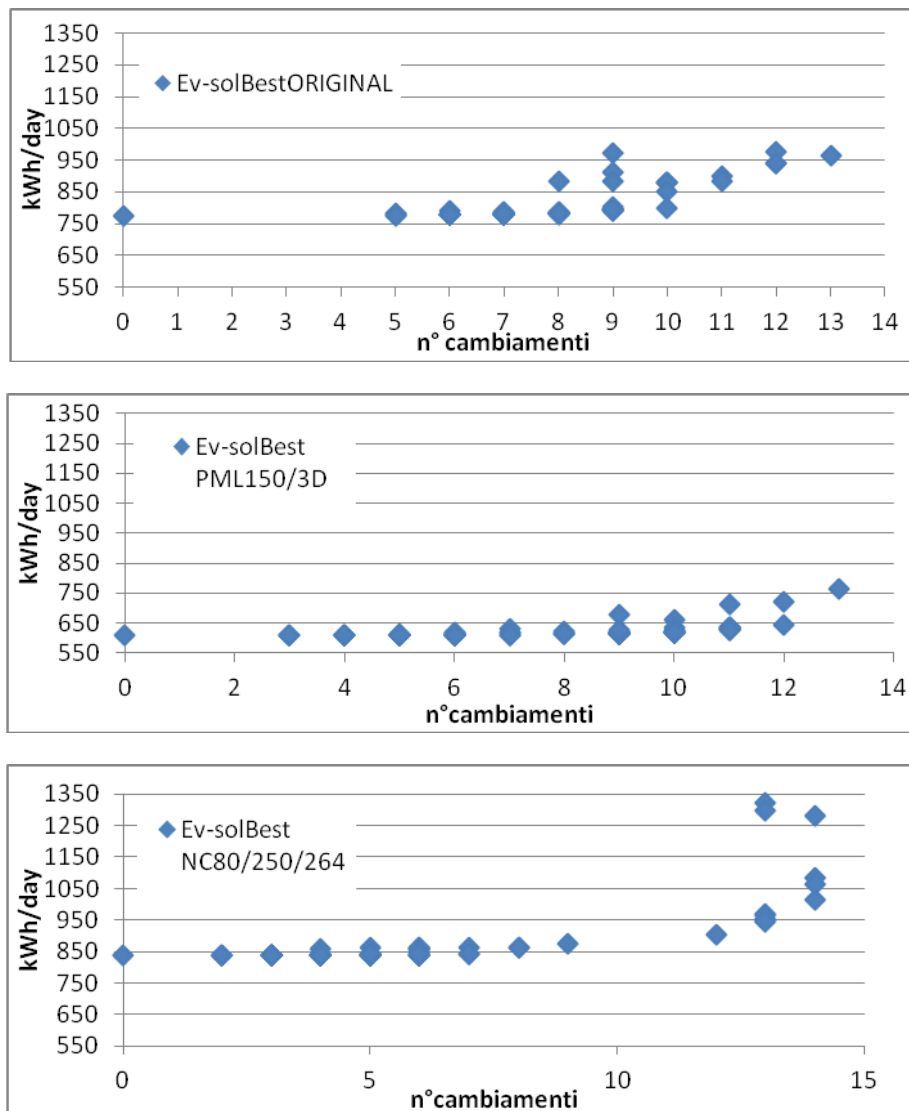


Figura 65: relazione tra E_v e numero di variazione dimensionale dei rami rispetto l'ottimo assoluto

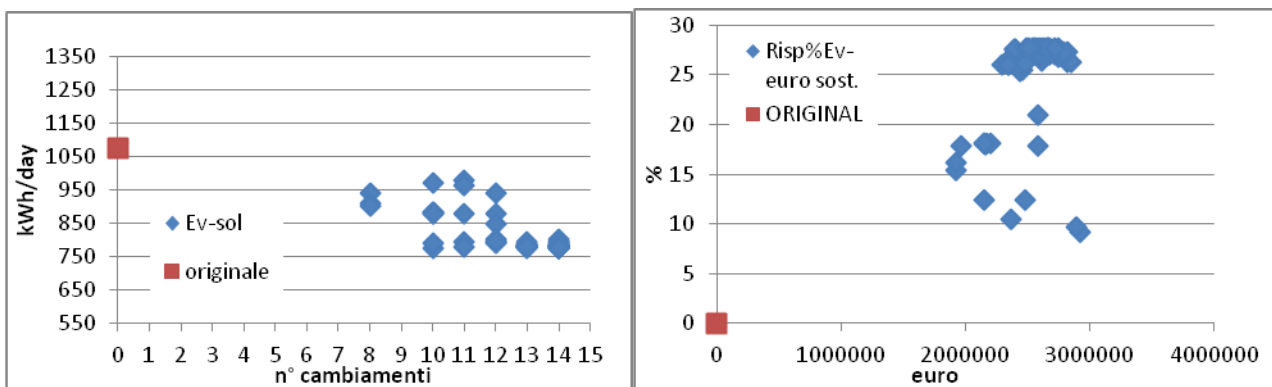
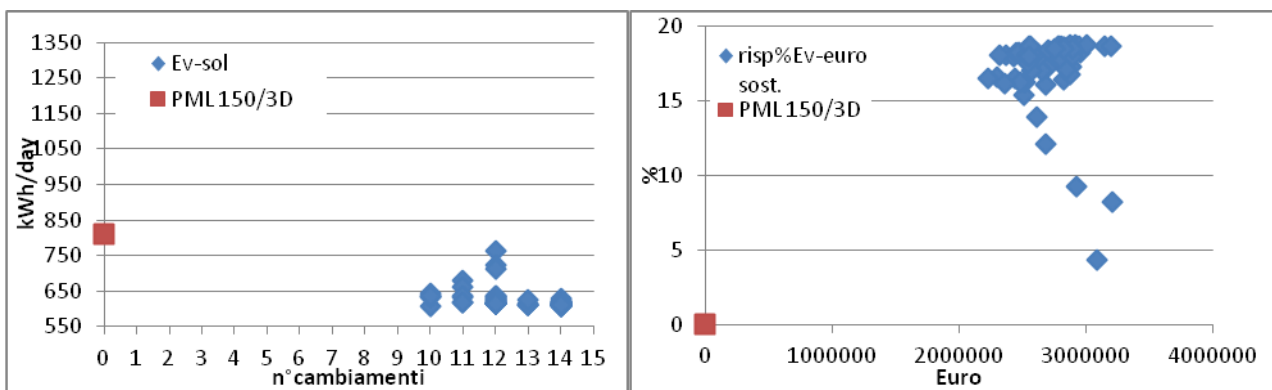
Da queste figure si può osservare la modalità in cui GHEST raffina le sue soluzioni durante la ricerca, passando da valori di molto alti, generalmente elaborati alle prime iterazioni, a valori ottimizzati verso la fine del processo. Interessante è capacitarci della diversificazione delle solbest, infatti potrebbe capitare che per lo stesso numero di cambiamenti dimensionali ai rami si possano avere impieghi energetici anche molto diversi

Viene ribadita, quindi, la grande interazione tra dimensioni delle condotte e $kW-h/day$ consumati a parità di architettura di rete, aspetto da cui in nessuno modo il progettista dovrebbe prescindere.

Nella seconda categoria di grafici che presentiamo si propone una duplice chiave interpretativa dei risultati, che esula in qualche modo dalle indagini circa l'intima connotazione energetica delle reti, ma che ci aiuta a comprendere quanto strutturalmente le diverse soluzioni ottimizzate siano costose.

In particolare:

- I grafici di sinistra riportano il numero di rami da sostituire in riferimento alle dimensioni ed E_v della *Cabrera_network* per i diversi modelli. In questi troveremo, quindi, in ordinata il valore di E_v delle soluzioni, ed in ascissa il numero di rami per cui queste soluzioni si differenziano dimensionalmente dalla *Cabrera_network*.
- I grafici di destra, invece, ci dicono quanto costano in euro i rami da sostituire per poter pervenire ad un certo risparmio percentuale di energia. In questi si ha, in ordinata, il risparmio percentuale di energia vera, ed in ascissa il costo in euro dei cambiamenti dimensionali di cui sopra, tutto rapportato ad un valore nullo che rappresenta la configurazione *Cabrera_network* nei casi delle diverse pompe centrifughe montate.



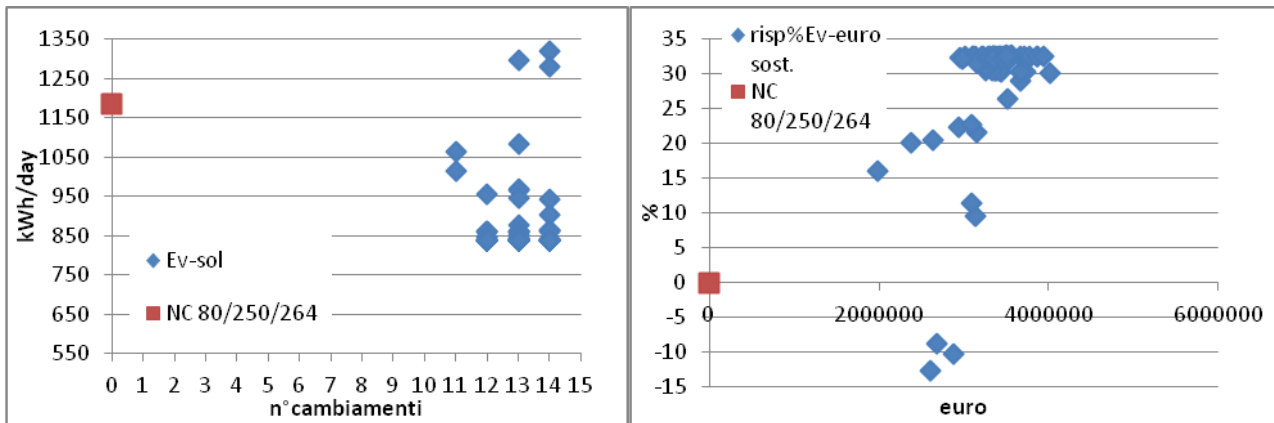


Figura 66 (gruppo)

Le considerazioni che possiamo fare date queste tipologie di risultati sono le seguenti:

-Grafici di sinistra: per ogni tipologia di macchina, tra le 100 configurazioni di diametri, è possibile trovare, a parità di numero di cambiamenti, soluzioni che fanno variare molto i consumi energetici.

- Grafici di destra: interpretando la questione dal punto di vista degli euro da impiegare per effettuare questi cambiamenti, è possibile trovare molte soluzioni, comunque buone, i cui costi variano di quasi un milione di euro.

In ragione di ciò, si può concludere che avvalendosi di uno strumento di calcolo sofisticato come GHEST è possibile scegliere con più consapevolezza soluzioni idraulicamente sensate che porterebbero al duplice guadagno energetico e di realizzazione dell'opera civile.

5.4 Caratterizzazione energetica delle reti ottimizzate (*solbest*)

Per completezza si vogliono in questo paragrafo caratterizzare energeticamente le *solbest* proposte dall'applicazione di GHEST in due distinti scenari di perdita idrica (Tabella 22)

Tabella 22

Modello pompa	Caso con perdite idriche pari al 30%									Caso con perdite idriche nulle								
	%	Aver.	kW-h	Aver.	Peak	kW	P	delta		%	Aver.	kW-h	Aver.	Peak	kW	P	delta	
	Util	Eff.	/m3	kW	kW	/day	24	E	Ev	Util	Eff.	/m3	kW	kW	/day	24	E	Ev
ORIGINAL	47.3	64.1	0.17	74.3	75.4	844.2	3.8	67.8	776.4	39.2	65.0	0.17	74.8	75.7	704.6	4.7	119.6	585.0
NC80/250/264	73.5	55.3	0.17	58.3	61.3	1028.8	6.0	186.8	841.9	58.2	55.3	0.18	59.5	62.8	831.1	6.7	237.4	593.7
PM 150/2A	49.4	75.7	0.14	60.6	62.3	718.9	4.1	68.6	650.3	40.9	75.7	0.15	61.4	63.2	603.1	4.9	113.0	490.1
MEC AZRBH	45.6	74.0	0.15	66.2	67.9	724.6	3.0	25.4	699.1	36.8	74.0	0.15	66.8	68.7	590.8	4.5	94.7	496.1
PM 150/4D	69.9	67.2	0.15	53.0	53.2	888.5	6.8	203.5	685.0	55.0	67.2	0.15	52.8	53.2	697.1	6.4	181.8	515.3
PML 150/3B	72.6	66.8	0.15	46.5	48.4	809.9	5.7	152.1	657.8	62.1	66.8	0.15	47.5	49.9	707.0	6.9	209.1	497.9
PML 150/3C	72.8	63.5	0.15	44.4	46.1	776.2	4.6	96.6	679.7	64.2	63.5	0.15	45.2	47.4	697.5	6.4	182.3	515.2
PML 150/3D	72.6	71.5	0.13	37.0	38.0	644.8	3.4	35.5	609.3	65.5	71.5	0.14	37.2	38.6	583.9	5.6	137.6	446.3

PM 150/5E	72.9	66.5	0.15	42.5	44.0	742.9	4.3	86.7	656.2	64.5	66.5	0.15	43.1	44.9	666.3	6.2	175.7	490.6
MEC MR125/2F	73.1	59.6	0.16	50.9	52.3	893.4	5.1	130.6	762.7	63.5	59.6	0.17	51.6	53.5	785.9	6.8	227.4	558.5
NC80/250/255	72.9	57.2	0.17	52.8	55.2	924.2	5.4	152.7	771.5	63.1	57.2	0.17	54.2	57.3	819.8	6.9	237.0	582.8
NC100/250/235	55.7	64.5	0.16	65.5	67.3	874.8	4.5	102.5	772.3	42.8	64.5	0.16	66.1	68.1	679.5	5.1	131.6	547.8
NC80/250/245	72.9	56.5	0.17	48.2	50.3	843.3	4.1	87.5	755.7	64.7	56.5	0.17	49.1	51.7	762.3	6.1	192.2	570.2
PM 150/4C	74.6	71.1	0.14	45.3	46.8	810.9	5.8	145.1	665.8	58.5	71.1	0.14	46.0	47.6	644.7	6.7	185.1	459.7
PM 150/3C	44.8	73.2	0.15	68.5	71.4	736.9	3.5	44.7	692.2	37.5	73.2	0.16	69.9	73.2	628.6	4.6	103.5	525.1
PM 150/3D	51.5	70.2	0.15	63.3	65.7	781.3	4.4	88.5	692.7	42.1	70.2	0.16	64.4	67.0	650.5	5.0	127.1	523.4
PM 150/4B	74.6	71.1	0.14	45.3	46.8	810.9	5.8	145.1	665.8	58.5	71.1	0.14	46.0	47.6	644.7	6.7	185.1	459.7
Valori medi	64.5	66.4	0.2	54.3	56.0	815.0	4.7	107.0	707.9	53.9	66.4	0.2	55.0	57.1	688.1	5.9	167.1	521.0

Come prima cosa troviamo conferma al fatto che la riduzione delle perdite idriche è sempre sintomatica di un risparmio energetico. Quindi, provvedere alla manutenzione o concepire una progettazione iniziale che preveda aspetti volti alla loro riduzione è sempre un buon proposito. In questo particolare sistema accade che i volumi di acqua che si perderebbero a causa di fallanze di rete, in una situazione ideale, invece, comporterebbero un più facile raggiungimento del valore massimo di pressione di 7m nel nodo di accumulo. Quindi, si rimanderebbe a questo più frequentemente l'alimentazione della rete. Si spiegano così i valori più bassi di E_v . Bisogna però contestualizzare questi risultati alla connotazione dimensionale che le *solbest* hanno, e che è stata chiarita al paragrafo precedente.

Per quanto concerne il confronto tra soluzioni non ottimizzate, cioè i dati a cui eravamo pervenuti valutando cosa accadeva nella *Cabrera_network* al variare della pompa (vedi capitolo 4) emerge che il risparmio energetico caratterizzante le *solbest* sia notevole e, a seconda del modello di macchina, varia tra il 20% ed il 40%. Questo significa che senz'altro il giusto dimensionamento della rete in ossequio alla modalità con cui questa si vuole alimentare è una condizione essenziale della progettazione, ma non dobbiamo dimenticare che anche la scelta di una pompa centrifuga idonea concorre intensamente al risparmio energetico. Ed in particolare la scelta di quest'ultima, ed eventualmente la sua messa in opera, richiedono costi di realizzazioni irrisori rispetto alla riorganizzazione dimensionale delle condotte del sistema.

Ciò detto, ai fini dell'individuazione di tutti i legami che intercorrono tra i consumi energetici e le possibili scelte progettuali che su un sistema di acquedotto si possono fare, esaminiamo quanto varia l'impiego di *kW-h/day* al variare del livello al serbatoio a cui corrisponde lo spegnimento della pompa. Caricate in Epanet2 le *solbest*, per esse si è fatto variare il livello idrico massimo da 8m a 4m, e per tutte le 17 opzioni di rete di cui si disponeva il legame si è manifestato come nei grafici seguenti che si riferiscono agli stessi casi di *solbest* analizzati nel paragrafo precedente nelle due circostanze di perdite idriche al 30% o nulle.

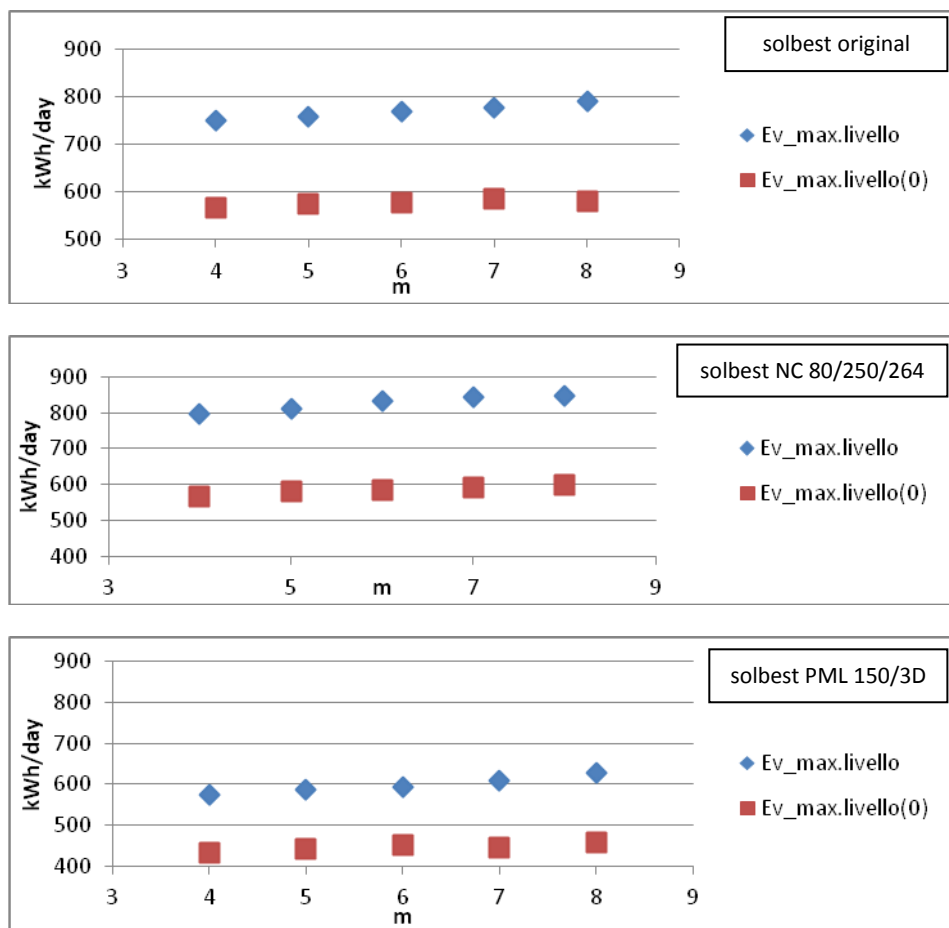


Figura 67 (gruppo): Ev -livello massimo al serbatoio

Possiamo dire, almeno in questo specifico caso di studio, che il contributo del livello idrico ai consumi totali energetici sia veramente minimo; infatti si tratta di risparmi che nel migliore dei casi sono del 5.6%. Bisogna comunque ammettere che, quale sia la percentuale in gioco, la regolazione del livello idrico al serbatoio è un scelta che non comporta nessun tipo di onere applicativo o economico.

Si presenta infine il confronto delle soluzioni ottimizzate nei due scenari di perdita idrica di cui sopra, nei termini di E_v , e potenza media, ricordando che in buona sostanza si tratta di diverse strutture di rete, ma il grafico si vuole porre come una considerazione complessiva di quanto detto in questo paragrafo.

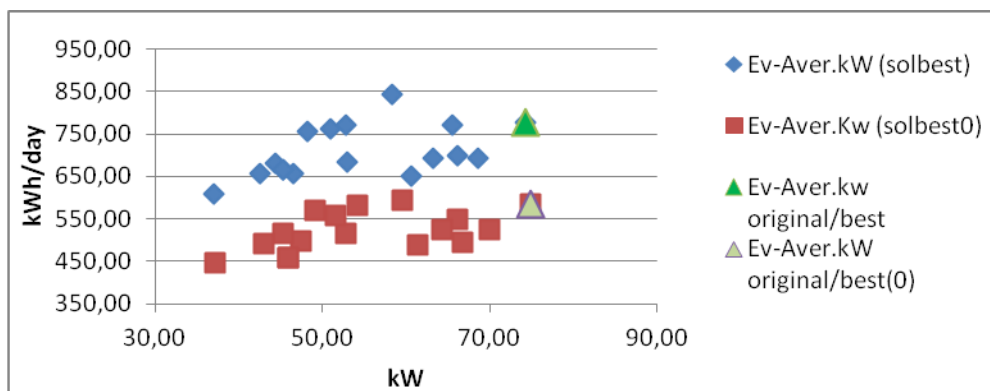


Figura 68

Rimane confermato il fatto che, per reti dimensionalmente molto simili, l'impiego di una pompa scelta secondo criteri di ottimizzazione comporta risparmi energetici veramente significativi.

6. Il bilancio energetico di una rete di distribuzione idrica

Introduzione

A questo punto della trattazione presentiamo l'applicazione del bilancio energetico di un sistema di acquedotto secondo l'approccio indicato nel capitolo 1.

In particolare saranno sottoposti a quest'analisi tre casi di studio:

- Cabrera-network corredata dalla macchina *Original*;
- *solbest* creata per la pompa PML 150/3D;
- Rete 36 corredata dalla pompa MEC MR 125/2F;

6.1 Strategia seguita nel calcolo dei bilanci energetici idrici.

La metodologia seguita nella stima dei bilanci energetici nei tre casi di studio è quella proposta da Cabrera in *Cabrera et al. (2010)* che si fonda sull'individuazione di un volume di controllo, rispetto al quale eseguire il bilancio che tracci il confine tra quanto è *rete di distribuzione* e quanto non lo è.

Data la stessa architettura di rete per i tre casi proposti, il volume di controllo sarà idealmente definito dalla linea rossa in figura.

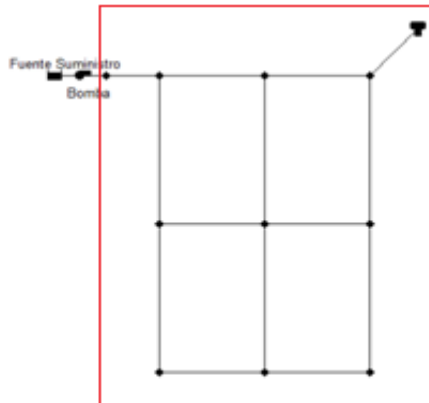


Figura 69 volume di controllo.

Rispetto a questo possiamo individuare, come specificato nel capitolo 1, diverse tipologie di energia correlate alle componenti di impianto e all'esercizio idraulico, quali:

- E_N : Energia naturale, cioè il carico idraulico $H(m)$ posseduto dal fluido nel *reservoir*.
- E_p : Energia dovuta alle pompe;
- E_U : Energia dell'acqua fornita agli utenti;
- E_l : Energia dissipata per attrito;
- E_F : Energia associata all'acqua persa;
- E_C : Energia associata ai serbatoi interni alla rete di distribuzione.

Queste concorrono alla definizione dell'equazione sottostante (Eq. 55.)

$$\begin{aligned}
 E_{Input}(t_p) &= E_N(t_p) + E_p(t_p) = E_U(t_p) + E_l(t_p) + E_F(t_p) + \Delta E_c(t_p) \\
 &= E_{Output}(t_p) + E_{Dissipated}(t_p) + \Delta E_{Compensation}(t_p) \quad \text{Eq. 55}
 \end{aligned}$$

Secondo la quale, l'energia in ingresso al volume di controllo è uguale alla somma di quella uscente, che si costituisce di consumi idrici intesi come prelievi e perdite idriche, dissipazioni per attrito, più il contributo energetico associato alla capacità di compenso dei *tanks*. Dunque gli autori suggeriscono di distinguere i valori di energia associati ai serbatoi da quelli complessivi, superando quindi, la definizione di E_v sfruttata fino a questo momento. Questo perché ci si capaci maggiormente dei contributi positivi e negativi al bilancio energetico complessivo nel sistema di analisi.

6.2 Bilancio energetico per una rete ad alimentazione ON_OFF

Per poter comprendere l'esito di questa trattazione presentiamo le caratteristiche strutturali ed energetiche salienti della *Cabrera_network* (Tabella 23).

Tabella 23

Caratteristiche dimensionali <i>Cabrera_network</i>														
Pipe ID	10	11	12	21	22	31	111	112	113	121	122	123	32	1
L(m)	2000	2000	2000	2000	2000	2000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	2000	2000
D(mm)	300	250	250	100	100	100	150	150	150	150	150	150	100	300
Energy Report														
			%Util.	Aver.Eff.	kW-h/day	Aver. kW	Peak kW	kW-h/day	P24(m)	deltaE	Ev			
P.max 7 m	$\alpha \neq 0$		72.37	77.47	0.22	72.62	73.7	1261.37	5.2	186.52	1075			
Pmax 7 m	$\alpha = 0$		63.99	78.96	0.23	70.67	72.68	1085.3	6.97	323.85	761			

Per non perdere di vista il contesto di studio, e quindi connotare i valori sopra riportati, urge ricordare che si tratta di una rete di distribuzione la cui modalità di alimentazione è di tipo ON-OFF, in particolare dato il serbatoio di compenso il cui livello può variare tra un valore minimo di 2.5 m e uno massimo di 7m, la macchina rimane in azione fin tanto che il livello idrico nel serbatoio non raggiunge il suo valore massimo, in corrispondenza del quale si arresta, affidando a questo il compito di servire l'utenza, come illustrato nelle figure sottostanti.

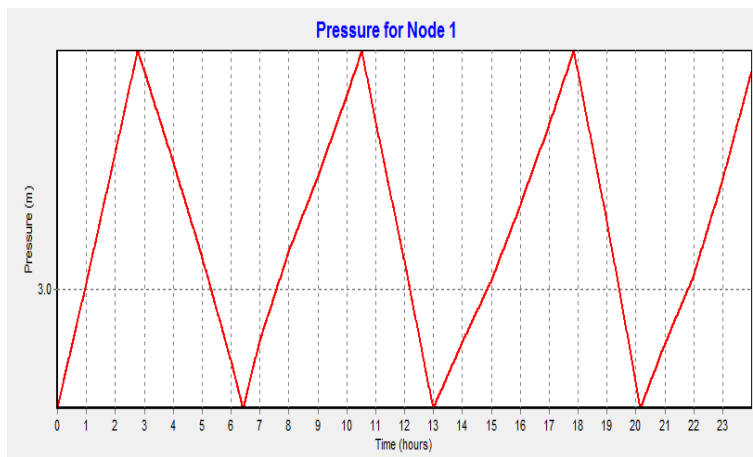


Figura 70 livello idrico nel serbatoio di compenso

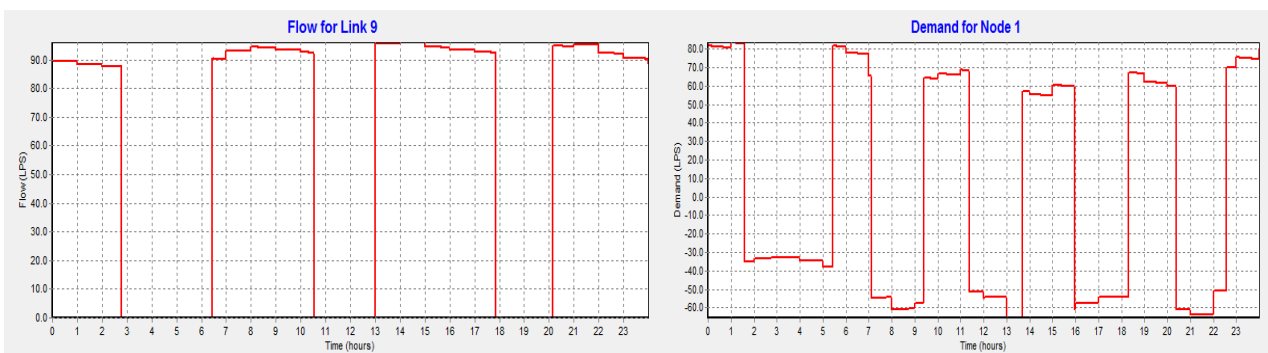


Figura 71 Confronto tra la portata sollevata dalla pompa-(ramo 9) e quella in ingresso e uscita al (nodo 1)

Per i motivi di scambievolezza funzionale tra pompa e serbatoio i flussi nei rami superiori della rete *Cabrera_network* alimentata dalla pompa *Original* assumono le direzioni di propagazione della figura 72.

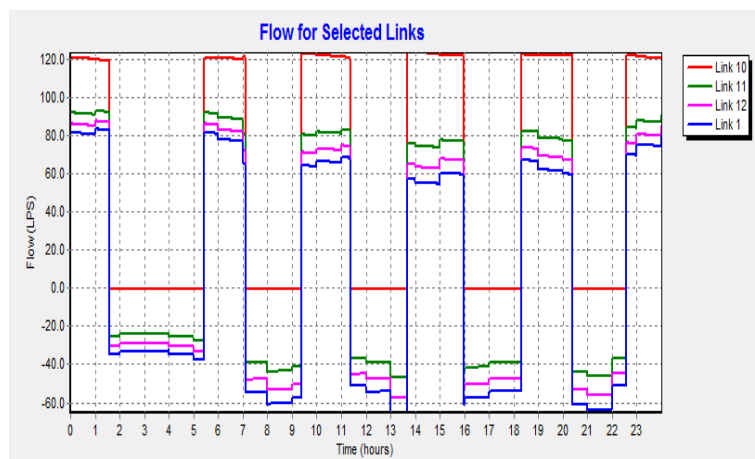


Figura 72 Transito di portata nella dorsale pompa-serbatoio della Cabrera-network

Dato questo particolare funzionamento del sistema, otteniamo per la rete *Cabrera_network*, in due scenari di perdita idrica del 31.12% (in nero) e nulla(in rosso), la sottostante schematizzazione del bilancio energetico.

Tabella 24 Sintesi del bilancio energetico per la Cabrera_network

Einput	En=369.65 <i>En=321.9</i>	Eu=452.86 <i>Eu=501.2</i>	Eoutput
		EI=22.51 <i>EI=0</i>	
	Ep=886.24 <i>Ep=856.36</i>	Ec=128.65 <i>EC=216.67</i>	Ec
		Ef=549.36 <i>Ef=460.38</i>	Edissipated

Si osservi come, a parità di condizioni strutturali e delle possibilità di alimentazione, la mancanza di perdite idriche consente una importante riduzione degli sprechi energetici per attrito. Questo è spiegato dal fatto che le perdite idriche vengono concepite in Epanet2 come prelievi idrici ai nodi che si sommano alla reale esigenza idropotabile dell'utenza. Dunque, ammettere un'assenza di queste consente di introdurre in rete quantitativi di portata inferiori che si propagano senza dissipare troppa energia lungo il loro percorso.

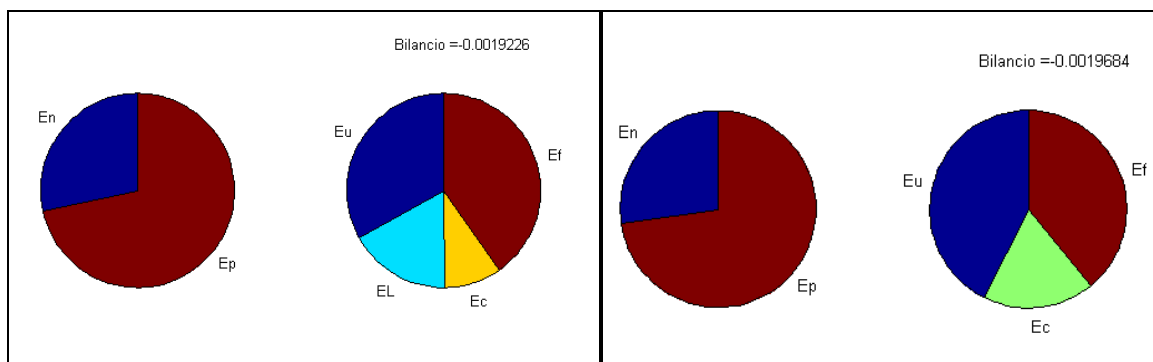


Figura 73 Rappresentazione del bilancio idrico per la Cabrera_network con e senza perdite idriche

Bisogna osservare che, data la relazione funzionale intercorrente tra la pompa ed il serbatoio, l'energia dovuta all'annullamento del termine E_t si presenta sia come un surplus da mettere a disposizione dell'utenza che come un quantitativo energetico recuperato dal serbatoio.

A titolo di confronto, presentiamo i risultati inerenti un altro sistema a funzionamento ON_OFF. Si tratta della configurazione di diametri ottimizzata energeticamente rispetto ad un preciso modello di pompa centrifuga, quale la PML 150/3D. In pratica, si è sottoposta a bilancio idrico la rete che nel capitolo 5 è stata definita "solbest PML 150/3D", le cui caratteristiche dimensionali ed energetiche sono riportate di seguito (Tabella25) mentre la connotazione idraulica è, nella sua essenza, simile al caso di cui sopra.

Tabella 25

Caratteristiche dimensionali solbest PML 150/3D														
Pipe ID	10	11	12	21	22	31	111	112	113	121	122	123	32	1
L(m)	2000	2000	2000	2000	2000	2000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	2000	2000
D(mm)	400	400	400	125	200	350	80	200	60	60	80	350	250	400
Energy Report														
				%Util.	Aver.Eff.	kW-h/day	Aver. kW	Peak kW	kW-h/day	P24(m)	deltaE			
P.max 7 m		$\alpha \neq 0$		72.6	71.5	0.13	37	38.0	644.8	3.4	35.5			
Pmax 7 m		$\alpha = 0$		65.5	71.5	0.14	37.2	38.6	583.9	5.6	137.6			

Ribadiamo che il caso di studio in esame è quello dedotto dall'algoritmo GHEST. Questo comporta il minore dispendio energetico che per la struttura di rete di riferimento sia stata individuata al variare del modello di pompa. In particolare la soluzione ottimizzata, grazie all'ampiezza dei diametri che collegano la pompa al serbatoio, comporta un minore spreco di energia per attrito rispetto al caso di cui sopra.

Tabella 26 Sintesi del bilancio energetico per la solbest PML 150/3D

Einput		Eu=386.55 <i>Eu=427.13</i>	Eoutput
	En=326.83 <i>En=293.62</i>	El=153.75 <i>El=0</i>	
	Ep=461.37 <i>Ep=417.78</i>	Ec=41.35 <i>EC=105.67</i>	Ec
		Ef=206.54 <i>Ef=133.59</i>	Edissipated

Un'altra considerazione che possiamo fare è che la *solbest*, proprio perché concepita in funzione dell'obiettivo di minimizzare i consumi di energia, dedica al serbatoio di compenso un ruolo preminente. Infatti in esso il facile raggiungimento del livello massimo di pressione consente la più frequente sospensione dell'attività della pompa.

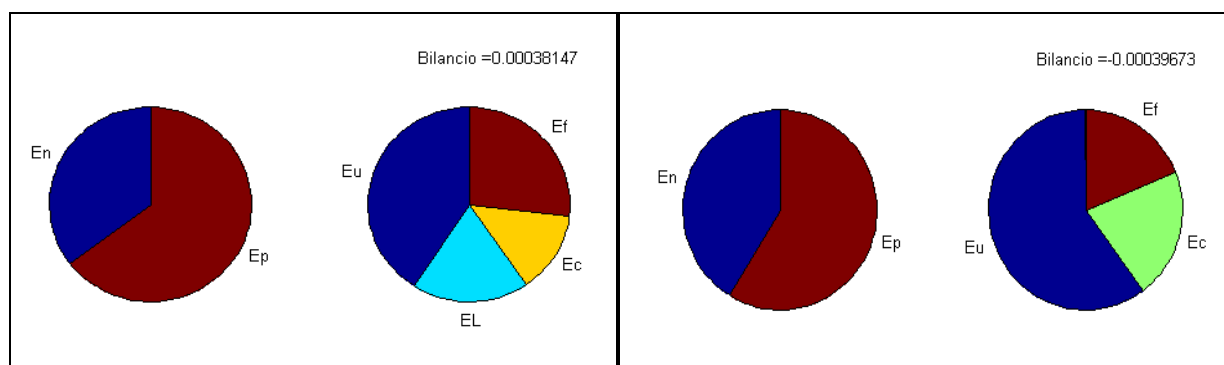


Figura 74 Rappresentazione del bilancio idrico per la solbest-PML 150/3D con e senza perdite idriche

6.3 Bilancio energetico per una rete ad alimentazione diretta

Si presenta a questo punto il bilancio energetico nel caso di una rete ad alimentazione diretta, cioè per la quale la distribuzione idrica dipende dall'attività della pompa. Per pervenire a questo tipo di funzionamento si è scelto il set di diametri che contraddistingue, tra le quaranta reti impiegate nelle valutazioni al capitolo 4, la rete 36 (Tabella 27).

Tabella 27

Caratteristiche dimensionali rete 36														
Pipe ID	10	11	12	21	22	31	111	112	113	121	122	123	32	1
L(m)	2000	2000	2000	2000	2000	2000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	2000	2000
D(mm)	200	200	200	125	125	150	200	150	125	150	125	100	100	200
Energy Report														
				%Util.	Aver.Eff.	kW-h/day	Aver. kW	Peak kW	kW-h/day	P24(m)	deltaE			
P.max 2.6m	$\alpha \neq 0$			93.04	72.55	0.23	46.87	50.22	1046.7	2.55	3.6			
Pmax 2.6m	$\alpha = 0$			76.36	72.53	0.24	44.46	47.24	814.9	2.56	4.52			

In tale circostanza, i diametri hanno dimensioni più piccole rispetto i casi di cui sopra. Ciò comporta un mancato sfruttamento della capacità di compenso del serbatoio, dal momento che viene inibito il transito diretto delle masse fluide nei rami della dorsale superiore della rete. Inoltre, per poter avvicinarci il più possibile ad una alimentazione diretta, abbiamo scelto di regolare il livello massimo del serbatoio a 2.6m implicando un gravoso sfruttamento della pompa la quale, in pratica, è il elemento di alimentazione idrica della rete, come dimostrato dai grafici che seguono.

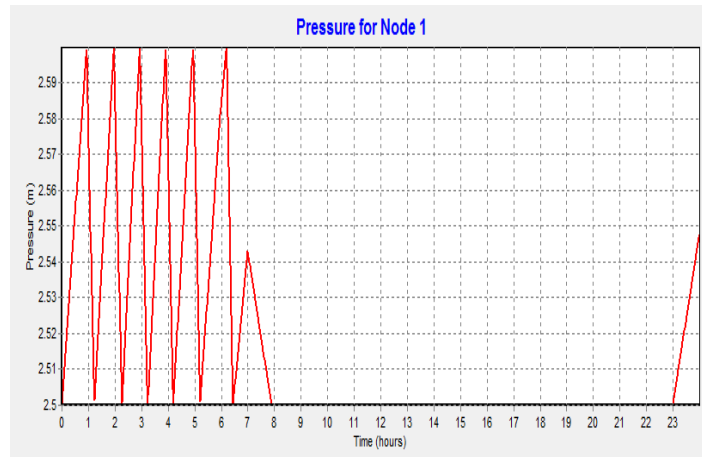


Figura 75 variazione livello idrico nel serbatoio di compenso

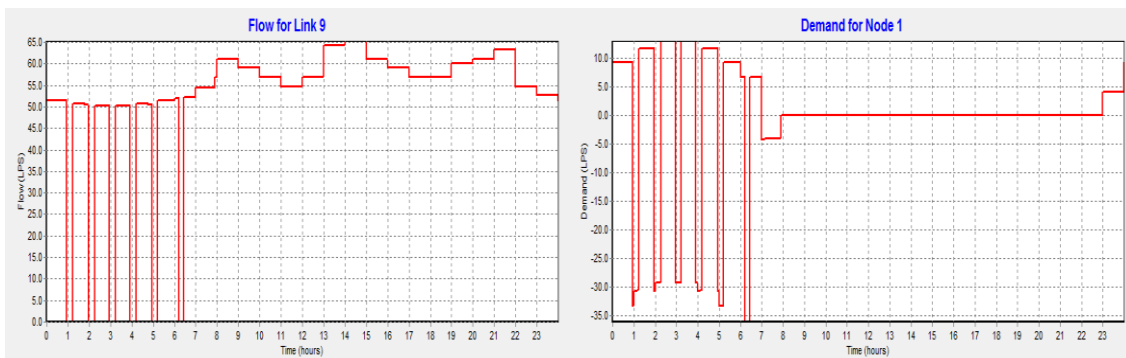


Figura 76 confronto tra la portata sollevata dalla pompa-(ramo 9) e quella in ingresso e uscita al (nodo 1)

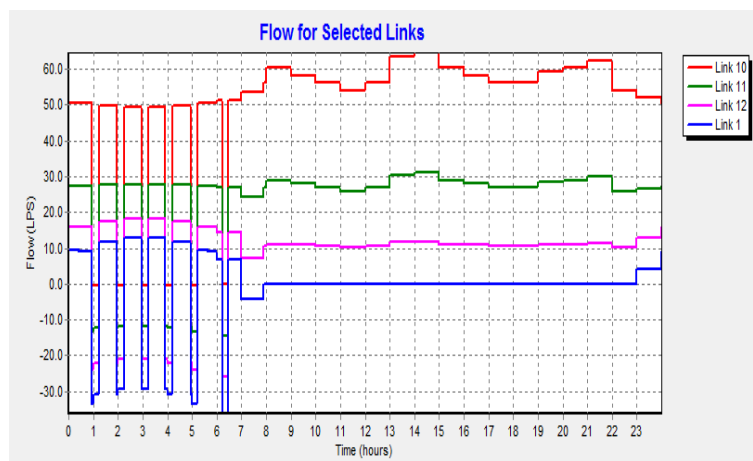


Figura 77 Transito di portata nella dorsale pompa-serbatoio della rete 36

Le interazioni funzionali tra le parti del sistema viste sopra giustificano i valori a cui si perviene nel bilancio energetico del caso di studio :

Tabella 28 Sintesi del bilancio energetico per la rete 36

Einput		Eu=378.01 <i>Eu=471.13</i>	Eoutput
	En=311.27 <i>En=229.28</i>	El=164.82 <i>El=0</i>	
		Ec=20.613 <i>EC=62.115</i>	Ec
	Ep=759.55 <i>Ep=595.81</i>	Ef=524.94 <i>Ef=347.75</i>	Edissipated

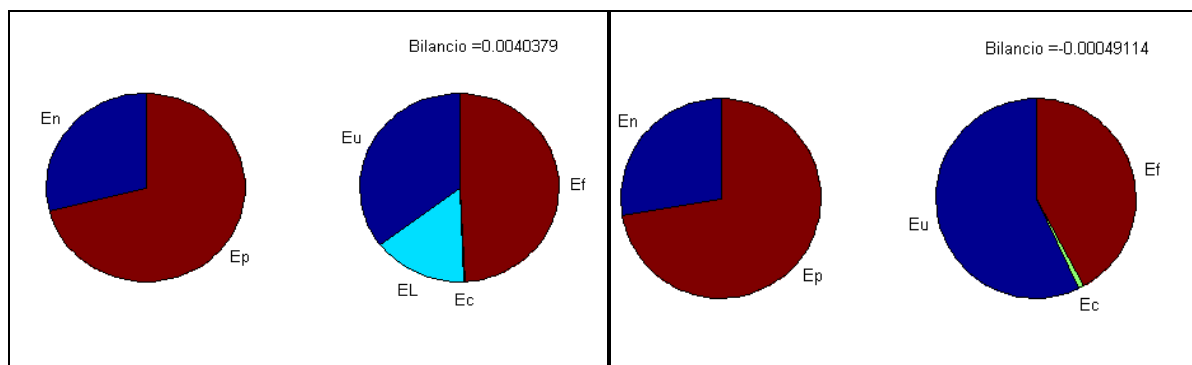


Figura 78 Rappresentazione del bilancio idrico per la rete 36 con e senza perdite idriche

Si osservi come l'esclusione del serbatoio di compenso dall'attività di alimentazione idrica comporti un maggiore impiego di energia da parte della fonte pompa, ma d'altro canto, soprattutto in assenza di perdite idriche, disponiamo di un grande quantitativo di energia da poter razionalizzare nel miglioramento del servizio idrico.

Concludendo, possiamo dire che i bilanci idrici proposti per le due modalità di funzionamento delle pompe alimentanti un sistema di distribuzione fanno chiarezza sull'entità percentuale dei contributi energetici delle diverse parti di impianto, alla luce dei quali pianificare i possibili interventi di miglioramento del servizio idropotabile.

In particolare, il recupero in termini di quantità di energia da attribuire all'acqua destinata agli utenti potrebbe essere sfruttato in un duplice modo:

- Nel caso di una rete in cui le pressioni ai nodi non fossero congrue con la percezione di un buon servizio idrico, il surplus energetico potrebbe essere impiegato nel miglioramento di questo aspetto;
- Ammettendo invece di avere una rete i cui valori di pressione ai nodi fossero alti o comunque sufficienti, si potrebbe pensare di dotare la pompa di un inverter regolando così le pressioni del fluido in rete e dunque riducendo ulteriormente i consumi.

Conclusioni

Un sistema di distribuzione idropotabile (*Water Distribution Network -WDN*), data la sua complessità strutturale e funzionale, per il suo consueto esercizio idraulico richiede elevati quantitativi di energia, che variano in accordo ad aspetti legati alle caratteristiche dell'area servita, ma anche alle scelte progettuali e gestionali che si operano in merito. In particolare, per quanto concerne la progettazione e gestione di detti sistemi, in ambito internazionale e comunitario si osserva un crescente interesse nei confronti del risparmio di energia legato all'uso della risorsa idrica. Infatti, il recupero energetico negli acquedotti, oltre che per la riduzione dei costi di funzionamento, implica soprattutto un uso più consapevole della risorsa acqua.

Il presente lavoro ha seguito questo trend scientifico/culturale, proponendosi l'obiettivo di una completa caratterizzazione energetica di una rete di distribuzione idrica quale la *Cabrera_network*. Per questa rete ad alimentazione *ON-OFF*, infatti, si sono analizzati i legami intercorrenti tra i consumi energetici ed aspetti quali il dimensionamento della rete, le perdite idriche, la pompa centrifuga sfruttata ed il livello idrico massimo del serbatoio di compenso.

Tutto ciò si è svolto in due fasi di analisi. In un primo momento, alla luce di indicazioni bibliografiche circa i singoli legami di cui sopra, si è proceduto alla loro connotazione prevedendo l'impiego di strumenti informatici classici, quali il simulatore idraulico *Epanet2* e i fogli di calcolo *Excel*. La seconda, invece, ha mirato ad affrontare la tematica in parola impiegando l'algoritmo *ES-GHEST*. L'uso di questa sofisticata strategia, impostata sul solo obiettivo della minimizzazione dei consumi energetici, ha consentito l'individuazione di configurazioni di diametri che, rispetto ai risultati visti nella fase precedente, portano ad un eclatante risparmio, una volta che si sia stabilito il modello di pompa centrifuga alimentante la rete ed in oltre. Inoltre ha consentito la conferma alla qualificazione dei legami di cui sopra.

Bisogna precisare, al fine di comprendere gli esiti della ricerca, che il valore di energia considerato e che in qualche modo ha connotato la stessa, è l'energia vera E_v . Questa, rappresenta l'effettivo

quantitativo di *kW-h* sfruttato dalla rete durante le 24 ore, depurato cioè da possibili accumuli energetici nel serbatoio durante le simulazioni idrauliche.

Il susseguirsi dei risultati nelle diverse fasi di analisi ha portato alle tabelle conclusive sottostanti , per la cui comprensione si danno queste indicazioni:

- Configurazioni dimensionali: è possibile trovarsi in tre diversi casi di rete, quali la *Cabrera-network* (C_N), una rete i cui diametri hanno assunto dimensioni diverse dal riferimento (D diversi) ed una rete ottimizzata in finzione della pompa che la correda (solbest)
- Variazione del modello di pompa: in entrambe le fasi si confronta il responso energetico per il modello originale di macchina (*Original*) previsto per l'oggetto di studio, con il modello PML 150/3D.
- Scenari di perdita idrica: si confronta la circostanza di perdita del 31.12% con quella ideale
- Variazione del livello idrico al serbatoio: si riportano i recuperi energetici dovuti alla variazione del livello massimo nel serbatoio da 4m a 7m nei casi di perdita idrica imposta al 31.12% e perdita nulla.

Tabella 29 Sintesi della prima fase della ricerca

PRIMA FASE									
	Riferimento	Relazione Ev-D		Relazione: Ev-Pompa		Relazione: Ev-perdite idriche		Relazione: Ev-livello serbatoio	
macchina	Original	Original		Original	PML150/3D	Original	PML150/3D	Original	PML150/3D
set D	C_N	C_N	D diversi	C_N		C_N		C_N	
%WL	31.12	31.12		31.12		31.12	0	31.12	
liv.serb.(m)								7	4
Ev	1075	1075	800	1075	810	1075	762	1075	1043
						810	590	810	783
risp%Ev		26		25		29		3	
						27		3	

Tabella 30 Sintesi della seconda fase della ricerca

SECONDA FASE									
	Riferimento	Relazione: Ev-D		Relazione: Ev-Pompa		Relazione: Ev-perdite idriche		Relazione: Ev-livello serbatoio	
macchina	Original	Original		Original	PML150/3D	Original	PML150/3D	Original	PML150/3D
set D	C_N	C_N	solbest	solbest	solbest	solbest	solbest	solbest	solbest
%WL	31.12	31.12		31.12		31.12	0	31.12	
liv.serb.(m)								7	4
Ev	1075	1075	776	776	608	776	584	776	750
						608	446.3	608	575
risp%Ev		28		22		25		3	
						27		5	

I risultati ottenuti mostrano che su una rete ad alimentazione ON-OFF, in cui cioè l'interazione funzionale tra serbatoio di compenso e pompa è preminente nella connotazione energetica del sistema, l'influenza delle variabili analizzate ai consumi energetici è la seguente:

- Dimensionamento dei condotti: il dimensionamento dei condotti, coerente con la volontà di razionalizzare i consumi energetici consente, soprattutto se nella progettazione si impiega un algoritmo ES, di ottenere grandi risparmi di energia.
- Scelta della pompa alimentante: tra tutti gli aspetti su cui si è fatta chiarezza significativo è il caso della diversificazione dei risultati al variare della pompa. Infatti, in entrambe le fasi di studio un'opportuna scelta della macchina ha comportato interessanti risparmi energetici.
- Riduzione delle perdite idriche: l'integrità della rete rimane senza alcuna ombra di dubbio una garanzia nella riduzione dei consumi energetici, ma non dobbiamo dimenticare che la circostanza di esercizio per cui la perdite sono nulle, e che in questa sintesi è stata presa come riferimento, è del tutti ideale.
- Variazione del livello idrico nel serbatoio: il contributo della variazione del livello idrico ai consumi totali energetici è minimo in questo studio. Bisogna comunque ammettere che, quale sia il risparmio ottenuto, la regolazione del livello idrico è un scelta che non comporta nessun tipo di onere applicativo o economico al gestore del sistema.

Si capisce come l'ottimizzazione energetica di un sistema di acquedotto debba riguardare i contributi di tutte le sue componenti. In ogni caso, si possono individuare dei fattori che maggiormente influenzano l'esito dell'analisi, la cui organizzazione però comporta impegni gestionali ed economici ben diversi. Senza soffermarci troppo su aspetti teorici, poniamoci in due casi in cui il progettista di un potrebbe trovarsi, offrendo un nuovo approccio metodologico:.

Caso di una nuova progettazione: in questa circostanza, sarebbe opportuno concepire l'opera ponderando tutti gli aspetti gestionali e progettuali di cui sopra che contribuiscono nelle diverse proporzioni alla riduzione degli impieghi energetici .

Caso di rivalutazione e ottimizzazione gestionale di un sistema esistente: in questo situazione, chiariti gli apporti delle componenti di impianto ai consumi energetici , la cosa più sensata da fare , dato il basso onere applicativo ed economico che richiede, è la sostituzione della pompa con una i cui consumi energetici impattano meno sul bilancio totale. Il recupero economico che segue questa scelta potrebbe essere ulteriormente investito in attività che mirano alla riduzione delle perdite idriche. Infatti è stato dimostrato nell'elaborato che dall'integrazione di questi due aspetti emergerebbe un consistente abbattimento dei costi d'esercizio dell'impianto ma soprattutto la riduzione di sprechi di risorsa idrica.

BIBLIOGRAFIA

- Becciu & Paoletti, 2004 Becciu G. & Paoletti A.(2004) “*Esercitazioni di costruzioni idrauliche*”, CEDAM.
- Bolognesi et al., (2010) “*Genetic Heritage Evolution by Stochastic Transmission in the optimal design of water distribution networks*”, Journal homepage: www.elsevier.com.
- Bolognesi et al., (2013) “*Energy Efficiency Optimization in Water Distribution Systems*”, 12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, CCW2013.
- Bragalli et al. (2012) “*Analisi energetica dei sistemi acquedottistici*”, XXXIII Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche.
- Cabrera et al.(2010) “*Energy Audit of Water Networks*”, Journal of Water Resources planning and management © ASCE / NOVEMBER/DECEMBER 2010 .
- Cabrera et al. (2013) “*Energy Assessment of Water Network, a Case Study*”. WDSA2010, Tucson, AZ, USA, Sept. 12-15, 2010.
- Colombo et al. (2002), “*Energy and costs of leaky pipes:Toward Comprehensive Picture*”, Journal of Water Resources planning and management © ASCE / NOVEMBER/DECEMBER 2002 .
- Colombo et al. (2009) “*Leaks and Water Use Representation in Water Distribution System Models: Finding a Working Equivalence*” Journal of Hydraulic engineering © ASCE / MARCH 2009
- O.Giustolisi et al. (2013) “*Operational Optimization: Water Losses versus Energy Costs*” Journal of Hydraulic engineering © ASCE / APRIL 2013
- K. Lansey (2010), “*Strategy for real time pump operation for water distribution systems*” Water Distribution System Analysis 2010 – WDSA2010, Tucson, AZ, USA, Sept. 12-15, 2010
- Marchi A.(2009). “*Ottimizzazione delle reti di distribuzione idrica tramite algoritmi genetici multi-obiettivo*”, Tesi di dottorato di ricerca in Ingegneria Idraulica, Università di Bologna.
- Michalewicz, (1996). Michalewicz Z.(1996). “*Genetic Algorithms + Data Structures: Evolution Programs*”, Springer Editor.