# POLITECNICO DI TORINO



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile Anno Accademico 2018/2019

Analisi energetica di una rete idrica di distribuzione

Relatore:

Prof. Fulvio Boano

Candidato:

Gaulthier Malanda Moleka

Ottobre 2019

Dans la vie il faut toujours, insister, persévérer, et ne surtout Jamais abandonner avant d'avoir atteint son objectif!!!

# Ringraziamenti ...

Innanzitutto vorrei ringraziare il Prof. Fulvio Boano, relatore di questa tesi di laurea, per la disponibilità e precisione dimostratemi durante tutto il periodo di analisi e stesura. Senza di lei questo lavoro non avrebbe preso vita!

Un grande ringraziamento a mia madre e mio padre che, con il loro dolce e instancabile sostegno, sia morale che economico, mi hanno permesso di realizzare questo sogno ed arrivare fin qui davanti a voi oggi, contribuendo alla mia formazione professionale.

Tutti i miei amici (e con tutti, intendo proprio tutti!) hanno avuto un peso determinamene nel conseguimento di questo risultato, punto di arrivo e contemporaneamente di partenza della mia vita. Grazie per aver condiviso con me questi anni di studi le esperienze più importanti, vi voglio bene.

# **INDICI**

Introduzione	8
1. Motivazione	10
2. Metodologia	11
2.1. Analisi energetica	12
2.2. Approccio generale del problema	13
2.3. Calcolo delle energie della rete	18
2.4. Bilancio energetico globale	24
2.5. Calcolo degli indicatori	25
2.5.1. Indicatori di efficienza energetica	 25
2.5.2. Indicatori di informazione di contesto	27
3. Caso di studio	29
3.1. Descrizione della rete	29
3.1.1. Grugliasco	29
3.1.2. Rivoli	32
4. Costruzione del modello della rete	34
4.1. EPANET 2.0	34
4.2. Dati input	34
5. Problema generale della rete	37
6. Caratteristiche degli elementi della rete	39
6.1. Generalità	39
6.2. Elementi costituenti della rete	39
7. Risultati	43
7.1. Bilancio energetico	43
7.1.1. Rete attuale di Grugliasco	43
7.1.2. Rete attuale di Rivoli	46
7.2. Indicatori energetici	49

7.2.1. Grugliasco	49
7.2.2. Rivoli	51
8. Confronto di risultati	53
8.1. Confronto energetico	53
8.2. Confronto degli indicatori	54
8.3. Costo delle perdite	55
8.3.1. Calcolo del costo	55
8.4. Soluzioni	57
9. Conclusione	58
Allegati	60
Bibliografia	70

# **Introduzione**

Questa tesi presenta un audit energetico di rete di distribuzione di acqua, esso è realizzato sfruttando l'equazione dell'energia essa stessa ottenuta integrando nel tempo l'equazione della potenza, questo periodo di integrazione può essere esteso in ore, giorni, settimana oppure all'anno. Il bilancio energetico che si ottiene in questo studio può servire a valutare l'efficienza della rete dal punto di vista energetico. Da questo bilancio energetico si possono valutare gli indicatori di efficienza energetica che possono servire a identificare i vari problemi che incidono sul buon funzionamento del sistema ed in seguito adottare le soluzione appropriate per migliorare l'efficienza della rete. Per fare quest'analisi è necessario disporre di un bilancio energetico (dell'acqua che entra e che esce dal sistema) e del modello matematico della rete, entrambi permettono di valutare il flusso energetico che scorre attraverso il sistema.

Questo studio verrà eseguito per due reti idriche situate nella regione di Piemonte sul territorio italiano. Oltre al bilancio energetico e del modello matematico della rete dobbiamo costruire un modello numerico della rete su cui verranno eseguite delle simulazioni mediante un software (Epanet 2.0 e la sua estensione WNG). Queste simulazioni forniscono i dati che una volta estratti ci permettono di analizzare il comportamento idraulico della rete andando a valutare diversi parametri essenziali per il funzionamento del sistema e da essi si identificano i diversi problemi presenti nel sistema che possono incidere sull'efficienza della rete. Quindi evidenziati questi problemi è possibile proporre alcune soluzioni per ottimizzare il funzionamento della rete.

Tra i vari problemi che si possono riscontrare nella rete le **perdite idriche** sono quelle più gravose perché abbattono l'efficienza e l'affidabilità del sistema. Esse sono associate all'attrito all'interno delle tubazioni ed alle perdite concentrate nei nodi. Queste **perdite idriche** in un sistema di distribuzione sono problematici per due ragioni:

- 1. Aumenta il dispendio d'acqua;
- 2. Aumenta il fabbisogno energetico aggiuntivo per pompare acqua per soddisfare la perdita.

Andando ad analizzare i servici idrici del territorio italiano emergono le evidenze che la richiesta idropotabile non è totalmente soddisfatta anche se sulla maggiore parte del territorio lo è. Quest'incoerenza è dovuta da una parte all'aumento della richiesta idrica, conseguenza della crescita demografica (essa stessa legata allo sviluppo economico ed anche della qualità di vita), in parte dalla mancanza di infrastrutture idrauliche, manutenzione di quelle esistenti ed anche della gestione. Questa serie di problemi favoriscono le perdite idriche che, malgrado il fatto che l'Italia sia al primo posto nell'Unione Europea per i prelievi di acqua ad uso potabile (428 litri per abitante al giorno) però poco meno della metà del volume di acqua prelevata alla fonte (47,9%) non raggiunge gli utenti finali a causa delle dispersioni idriche dalle reti di adduzione e di distribuzione secondo la recente pubblicazione dell'ISTAT del 22 marzo 2019.

# 1. Motivazione

Le perdite idriche hanno un impatto negativo sull'efficienza della rete ma anche economico dalla parte del gestore cioè l'acqua che viene immessa nella rete dev'esser prima di tutto prelevata da una sorgente, trattato chimicamente per renderla potabile e poi viene distribuita fino agli utenti. Visto che non tutta l'acqua arriva a destinazione in quanto si disperde, questo comporta una perdita economica per il gestore. Riuscire a riscattare una parte di quest'acqua dispersa consentirebbe di ridurre i costi derivanti dall'adduzione ed al trattamento dell'acqua. Quest'evidenza sensibilizza i gestori alla ricerca delle soluzioni per poter ottimizzare il rendimento delle reti idriche. Per questo motivo si deve analizzare il comportamento idraulico del sistema. Il modo più efficace è di realizzare un modello numerico della rete per poi procedere con le simulazioni in seguito estrare i dati necessari, da essi si fa l'analisi idrica della rete procedendo al calcolo in termini energetici ed i sui indici come indicato nel saggio Energy Audit of Water Network. Una volta eseguita l'analisi ed identificati i problemi allora è possibile adottare le soluzioni adequate per l'ottimizzazione della rete. Non andremmo ad analizzare queste soluzioni in profondità non essendo l'argomento di questa tesi.

# 2. METODOLOGIA

L'analisi energetica della rete viene fatta basandosi sul saggio riportato in allegato, intitolato ENERGY AUDIT OF WATER NETWORK, esso fornisce il metodo per valutare il sistema attraverso il calcolo di una serie di coefficienti. Questi coefficienti si ottengono dall'equazione dell'energia in forma integrale, e la sua integrazione temporale estesa su un determinato periodo che può esser in giorno, settimana, mese o anno. In questo studio abbiamo considerato un intervallo temporale giornaliero cioè di ventiquattro ore. L'analisi consente di tener conto di tutta l'energia presente nel sistema, mostrando che il bilancio energetico è mantenuto. Questo equilibrio può esser utilizzato per ottenere indicatori di prestazioni per valutare il sistema dal punto di vista energetico. Da questi indicatori, è possibile identificare le azioni di miglioramento che renderanno il sistema più efficiente. Questo audit richiede un precedente bilancio idrico ed il modello matematico della rete, entrambi necessari per conoscere l'energia presente nel sistema.

## 2.1. ANALISI ENERGETICA

Questo indagine viene effettuato mediante una valutazione numerica di indicatori nella rete, i quali dipendono dalle energie presenti nel sistema. Quindi prima vanno calcolate le energie presenti nel bilancio.

Un approccio simile al problema è stato fatto da **Pelli e Hitz (2000)**, calcolando due indicatori: alcuni sono riferiti all'infrastruttura ed altri relativi alla qualità. Quest'approccio pratico è interessante visto che esso combina elementi esterni alla rete come l'efficienza delle pompe ma allo stesso tempo ignora l'energia dissipata per attrito all'interno delle condotte (la quale non è funzione solo della portata ma anche delle perdite di carico).

La novità più rilevante del bilancio energetico presentato in questo elaborato è la valutazione degli usi finali dell'energia immessa nella rete, ed in particolare la perdita di energia. Tale perdita è dovuta dall'acqua che fuoriesce dalla rete nei nodi ed anche alle perdite associate all'attrito all'interno delle tubazioni.

Per applicare questo metodo si considera la rete come un volume di controllo.

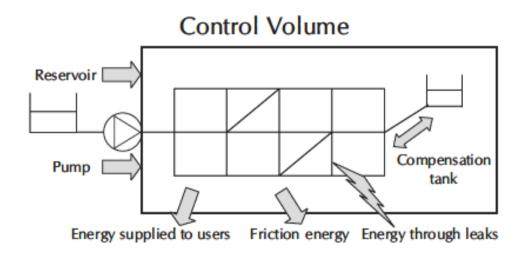


Figura 1. Rete idrca come volume di controllo

# 2.2. Approccio generale del problema

Per calcolare il flusso di energia che attraversa il volume di controllo è necessario applicare il modello matematico seguente:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int \int \int_{CV} e \rho d \, \forall + \int \int_{CS} e \rho (\vec{v} \cdot d\vec{A})$$

Dove:

- $\frac{dE}{dt}$ : rappresenta l'energia scambiata per unità di tempo;
- $\frac{\partial Q}{\partial t}$ : il calore scambiato.
- $\frac{\partial W}{\partial t}$ : rappresenta la potenza scambiata, che nel caso di reti idriche è fornita dalle stazioni di pompaggio
- e : rappresenta l'energia totale per unità di massa;
- $\rho$  : è la densità del fluido.

L'equazione del bilancio può esser riscritta come:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial W_{shaft}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{CV} \left( gz + u + \frac{v^2}{2} \right) \rho d \forall$$
$$+ \iint_{CS} \left( \frac{P}{\rho} + gz + u + \frac{v^2}{2} \right) \rho \left( \overrightarrow{v} \cdot d \overrightarrow{A} \right)$$

Come si può veder l'equazione è un po' complessa quindi andiamo a semplificarla con alcune ipotesi tale che:

- ${\it 1.}$ L'acqua è incompressibile, quindi ho è costante;
- 2. Il flusso di calore attraverso i collegamenti della rete è nullo  $(\partial Q/\partial t=0)$ , un'ipotesi ragionevole per questo studio.
- 3. La potenza delle turbine, Wshaft , è fornita dalle stazioni di pompaggio:

$$\frac{\partial Wshaft}{\partial t} = \sum_{i}^{np} \gamma * Q, pi * Hpi$$

- **4.** Si trascura il termine cinetico,  $\frac{v2}{2}$ , come nella maggior parte delle analisi delle reti.
- 5. In ogni intervallo di calcolo, l'energia nel volume di controllo è costante per quanto riguarda le tubazioni, mentre l'energia immagazzinata dai serbatoi interni può cambiare.
- 6. Il flusso è uniforme nel volume di controllo.

Sotto queste ipotesi l'equazione diventa:

$$\begin{split} \sum_{i}^{n_{P}} \gamma Q_{Pi} H_{Pi} &= \rho g \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{CV} z d \forall \\ &+ \rho \sum_{outlets} Q_{0i} \left[ \frac{P_{0i}}{\rho} + g z_{0i} + u_{0i} \right] - \rho \sum_{inlets} Q_{Li} \left[ \frac{P_{Li}}{\rho} + g z_{Li} + u_{Li} \right] \end{split}$$

I tipici elementi di confine delle reti idriche sono i Reservoirs, i serbatoi (Tanks) e le stazioni di pompaggio. Il contributo energetico dei serbatoi, elementi esterni al sistema sono funzioni del loro carico. Quindi possiamo fare la distinzione tra l'energia naturale (fornita dai pozzi e dai serbatoi) e l'energia artificiale fornita dalle stazioni di

pompaggio. Sono naturali anche i flussi di energia che escono dai nodi, in questo caso l'energia è funzione della quota piezometrica espressa in metro, data dalla formula seguente:

$$Hoi = \frac{Poi}{\gamma} + Zoi$$

I risultati finali che si ricavano dall'analisi sono influenzati dal valore della quota. Quindi è raccomandabile utilizzare come origine del sistema di riferimento, Z=0, corrispondente alla posizione del nodo più basso nella rete, cioè per calcolare i diversi indicatori prima si deve individuare il nodo con la quota più bassa (quindi con energia nulla mentre il nodo con una quota maggiore a quello più basso ha un'energia non nulla), poi prendiamo questa quota ed andiamo a sottrarla alle quote di ogni nodo così il nodo corrispondente a questo livello avrà quota pari a zero, questa quota verrà sottratta anche a le quote dei serbatoi.

Dalle considerazioni precedenti, per un sistema alimentato da  $n_N$  serbatoi (con carico totale costante nel tempo), i quali forniscono in acqua n nodi, con  $n_P$  stazioni di pompaggio che fornisco energia al sistema e con  $n_C$  serbatoi di compenso, l'equazione dell'energia diventa:

$$P_{0} = \sum_{i}^{n_{N}} \gamma Q_{Ni} H_{Ni} + \sum_{i}^{n_{P}} \gamma Q_{Pi} H_{Pi} = \sum_{i}^{n} \gamma Q_{Oi} H_{Oi} + \rho \left[ \sum_{i}^{n} Q_{Oi} u_{Oi} - \sum_{i}^{n_{N}} Q_{Ni} u_{Ni} \right] + \sum_{i=1}^{n_{c}} \gamma \frac{\partial}{\partial t} \int \int \int_{VC} z_{i} dV$$

$$($$

È il bilancio di potenza che si riferisce all'intero sistema, ed è simile all'equazione del bilancio energetico di Bernoulli, dove:

- La potenza naturale fornita dai punti di alimentazione (che poi in EPANET sono rappresentati da serbatoi fitizi): PN= $\sum_i^{nN} \gamma Q_{Ni} H_{NI}$
- La potenza artificiale fornita dalle stazioni di pompaggio:  $P_P = \sum_{i}^{nP} \gamma Q_{Pi} H_{Pi}$ .
- La potenza totale fornita,  $P_o$ , che comprende  $P_N$  e  $P_P$ .
- Il termine  $\sum_{i}^{nN} \gamma Q_{Oi} H_{Oi}$  è la potenza uscente dai nodi della rete, cioè la somma della potenza consegnata alle utenze  $P_U$  e quella associata alle perdite  $P_L$ .
- Il termine  $\rho[\sum_{i}^{n}QoiUoi-\sum_{i}^{nN}Q_{Ni}U_{Ni}]$  è la variazione nel tempo dell'energia. Essa avviene senza scambio di calore, l'incremento dell'energia interna col tempo è pari alle perdite per attrito  $P_{F}$ .
- II termine  $\sum_{i=1}^{nC} \frac{\gamma \partial}{\partial t} \iiint_{CV} ZidV = \sum_{i}^{nC} \pm P_{CI} = \pm P_{CI}$  rappresenta la variazione nel tempo della potenza energetica negli  $n_{C}$  serbatoi di compenso appartenente al sistema.

A questo punto, l'equazione può esser scritta in forma compatta in questo modo:

$$P_N + P_P = P_U + P_L + P_F \pm P_C$$

Quest'equazione afferma che la potenza erogata alla rete è pari a quella consegnata agli utenti più quella associata alle perdite (perdite concentrate nei nodi e quelle dovute all'attrito), ed infine il bilancio è regolato dal termine potenza di compensazione, fornita dai serbatoi di compenso all'interno del sistema. Da notare che questa potenza di compensazione viene trascurata quando il periodo d'integrazione è lungo.

L'equazione può esser integrata nel tempo in un processo analogo a quello seguito per simulare il comportamento idraulico di una rete Idrica nel tempo. L'integrazione converte i termini di potenza in quelli energetici rappresentata nella figura sottostante:

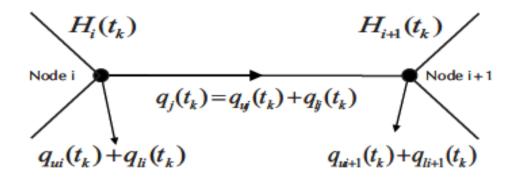


Fig 2. Notazione utilizzata per integrare l'equazione energetica.

- $q_{ui}(t_k)$ ,  $q_{li}(t_k)$  rispettivamente la portata fornita e quella associata alle perdite al nodo i all'istante  $t_k$ .
- $q_{uj}(t_k)$ ,  $q_{lj}(t_k)$  rispettivamente la portata circolante e persa attraverso la condotta j all'istante  $t_k$ ; infine
- $H_i(t_k)$  il carico piezometrico nel nodo i all'istante  $t_k$ .

Le energie che si ricavano dall'integrazione dal bilancio della potenza sono le seguenti:

Energia naturale, fornita dai serbatoi esterni al sistema	$E_N(tp)$
Energia artificiale, fornita dalle stazioni di pompaggio	$E_P(t_P)$
Energia consegnata alle utenze	$E_U(t_P)$
Energia associata alle perdite nei nodi	$E_L(t_P)$
Energia associata alle perdite per attrito	$E_F(t_P)$
Energia di compenso, fornita dai serbatoi di compenso	$E_{C}(t_{P})$

#### Tabella 1. Energie coinvolte nell'analisi.

A questo punto possiamo procedere al calcolo delle varie energie per l'audit della rete.

# 2.3. Calcolo delle energie della rete

- $E_{N}$ , energia naturale esterna, fornita da serbatoi (Reservoir) oppure serbatoi esterni (External Tank) alla rete.
  - $E_N(tp) = \gamma \cdot \sum_{i=1}^{i=nN} \left[ \sum_{tk=t1}^{tk=tp} Q_{Ni}(t_k) \cdot H_{Ni}(t_k) \right] \cdot \Delta t$ Dove:
  - γ è il peso specifico dell'acqua e vale 9800 N/m³;
  - $Q_N(tk)$  è la portata fornita al tempo  $\mathbf{t}_k$ .
  - $H_N(t_k)$  è il carico totale dell'acqua (la somma della quota  $\mathbf{Z}$  e il carico piezometrico  $\mathbf{P}/\gamma$ ) al tempo  $\mathbf{t}_k$ .
  - Δt è l'intervallo di tempo considerato.

N.B. In questo studio, l'analisi della rete è fatto per un periodo esteso di simulazione  $t_P$  pari a 24 ore, con un intervallo di raccolta dati  $t_k$  pari a 15 minuti così avremo novantasei valori per ogni dato. Eseguendo la simulazione del modello della rete con il software EPANET, si estraggono i seguenti dati necessari per il calcolo dell'energia:

- **<u>Demand</u>** in m³, la portata totale immessa nella rete dai serbatoi.
- <u>Head</u>, il carico totale dell'acqua nel serbatoio, espresso in metri.

A questo punto sono noti i dati, si procede con il prodotto portata all' istante  $t_k$  con il carico all'istante  $t_k$ , ottenendo così il termine relativo temporale. Si sommano quindi i valori relativi a ciascun serbatoio e si ottiene così il temine da moltiplicare per il peso specifico dell'acqua.

Si ricava dunque l'energia in joule  $E_N[J]$ , poi si divide per 3600000 per esprimere l'energia in kilowattora  $E_N[KWh]$ .

- ullet  $E_P$ , energia artificiale fornita dalle stazioni di pompaggio.
  - $E_P(tp) = \gamma \cdot \sum_{i=1}^{i=nP} \left[ \sum_{tk=t1}^{tk=tp} Q_{PI}(t_k) \cdot H_{PI}(t_k) \right] \cdot \Delta t$ Dove:
  - $Q_{Pl}(tk)$  è la portata pompata dalle stazioni di pompaggio.
  - $H_{Pl}(t_k)$  è il carico della pompa.

L'analisi viene fatta come per il caso precedente, estraendo i seguenti parametri:

- <u>Flow</u>, il flusso d'acqua pompata ed è espresse in litri al secondo, che bisogna convertire in  $m^3$ .
- <u>Headlos</u>s, il carico della pompa espresso in metri.

Da notare che questa grandezza su EPANET viene intesa come una cadente piezometrica (espressa in m/Km), ma nel caso delle pompe essa coincide col carico in metri.

N.B. Gli altri termini sono stati definiti precedentemente e sono costanti e l'energia è espressa come nel caso precedente.

- $\bullet$   $E_{U}$ , energia fornita alle utenze.
  - $E_U(tp) = \gamma \cdot \sum_{i=1}^{i=n} \left[ \sum_{tk=t1}^{tk=tp} q_{UI}(t_k) \cdot H_I(t_k) \right] \cdot \Delta t$ Dove:
  - $q_{UI}(t_k)$ , è la portata consumata al nodi i all'istante  $t_k$
  - $H_{UI}(t_k)$ , è il carico dell'acqua al nodo i all'istante tk.
  - n, è il numero dei nodi presenti nella rete

In questo caso si estraggono i seguenti parametri su WNG:

• **Base Demand,** è la domanda media richiesta dalle utenze in ed è costante, espressa in LPS (litri per secondo). Va moltiplicata per il "time pattern".

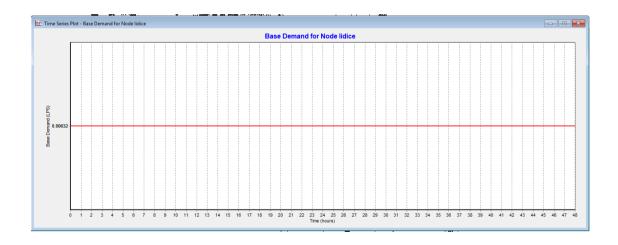


Figura 12. Base Demand durante il tempo di simulazione.

• **Head**, il carico dell'acqua nel nodo i all'istante  $\mathbf{t}_k$ , espresso in metri. Dato dalla somma della quota " $\mathbf{Z}_i$ " s.l.m ed il carico piezometrico " $\mathbf{Pi}/\gamma$ ".

**N.B.** il "time pattern" rappresenta i moltiplicatori utilizzati per modificare la richiesta media di base durante i vari intervalli che costituiscono il tempo di simulazione.

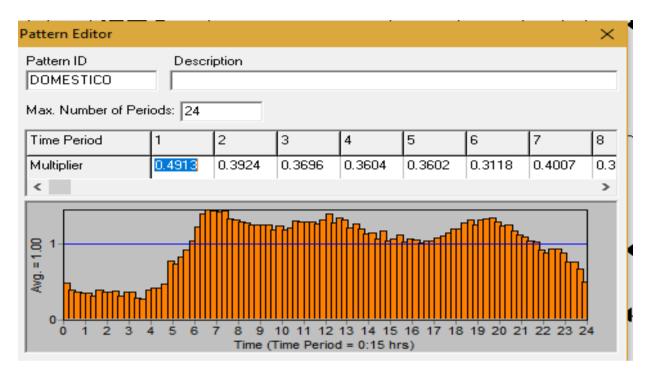


Figura 13. Pattern editor.

ullet  $E_{L}$ , energia uscente nei nodi a causa delle perdite.

Sono perdite, nel modello matematico della rete sono concentrate nodi, quindi nasce un'analogia con l'energia fornita alle utenze con la differenza.

• 
$$E_L(tp) = \gamma \cdot \sum_{i=1}^{i=n} \left[ \sum_{tk=t1}^{tk=tp} q_{II}(t_k) \cdot H_I(t_k) \right] \cdot \Delta t$$

Dove:

- $q_{li}(t_k)$ , portata uscente nel nodo i all'istante tk.
- $H_{UI}(t_k)$ , è il carico dell'acqua al nodo i all'istante tk.

N.B. La portata persa nei nodi non è noto, pero la possiamo ricavare dalla differenza tra la portata totale <u>Demand</u> e la portata media richiesta <u>Base Demand</u> moltiplicata per il suo "time pattern".

Così si estraggono i seguenti parametri su WNG:

- **Demand Q**tot,i, portata totale nel nodo i all'istante t<sub>k</sub>.
- Base Demand  $q_{li}$ , portata media richiesta al nodo i all'istante  $t_k$ .
- **Head**, il carico dell'acqua nel nodo i all'istante  $t_k$ , espresso in metri. Dato dalla somma della quota " $\mathbf{Z}_i$ " s.l.m ed il carico piezometrico " $\mathbf{Pi}/\gamma$ ".
- Portata persa,  $q_{li}(t_k) = Q_{tot,i} q_{Ul}(t_k)$
- ullet  $E_{F,}$  energia persa a causa dell'attrito all'interno delle tubazioni.
  - $E_F(tp) = \gamma \cdot \sum_{j=1}^{j=nL} \left[ \sum_{tk=t1}^{tk=tp} \left[ q_{uj}(t_k) + q_{lj}(t_k) \right] \cdot \Delta h_j(t_k) \right] \cdot \Delta t$ Dove:
  - $n_L$ , è il numero delle tubazione presenti nella rete.
  - $\Delta h_j(t_k)$ , è la perdita di carico distribuita nella condotta j all'istante  $t_k$ , che avviene nella direzione del moto, più la condotta è lunga più cresce il suo valore perché il carico piezometrico diminuisce sempre nel verso di moto.

In questo caso si estraggono da **EPANET** i seguenti dati:

- **<u>Lenght</u>**, rappresenta la lunghezza delle condotte della rete, in metri.
- <u>Unit Headloss</u>, rappresenta la cadente piezometrica della condotta che, moltiplicata per la relativa lunghezza j-esima, fornisce la perdita di carico  $\Delta h_i$  al tempo  $t_k$ .
- <u>Flow</u>, è la portata che circola nella condotta j-esima al tempo t<sub>κ</sub>.

• Ec, energia di compensazione del serbatoio a valle. Fornita dai Tank che hanno la funzione di accumulare l'acqua durante il periodo di basso consumo e di rilasciarla nelle ore di alto consumo.

- $\Delta E_C(t_k) = \sum_{i}^{nC} \{ A_i \cdot [Z_i^2(t_P) Z_i^2(t_R)]/2 \}$ Dove:
- A<sub>i</sub>, è l'area del serbatoio i
- $Z_i^2(t_P) \& Z_i^2(tk)$ , rappresentano rispettivamente il livello del pelo libero all'istante finale  $t_P$  della simulazione ed all'istante iniziale  $t_k$ .

#### Da **EPANET** si estraggono i parametri seguenti:

- <u>Pressure</u>, che rappresenta il carico piezometrico dell'acqua nel serbatoio, espresso in metri.
- <u>Diameter</u>, che rappresenta il diametro del serbatoio i-esima, con esso si ricava il raggio, necessario per il calcolo della sezione del serbatoio.

## 2.4. Bilancio Energetico Globale

Tutte le energie precedentemente descritte rientrano nel bilancio energetico ottenuto dall'integrazione dell'equazione della potenza nel tempo descritta nel **paragrafo precedente**.

$$E_{IN(tp)} = E_{N(tp)} + E_{P(tp)} = E_{U(tp)} + E_{L(tp)} + E_{F(tp)} + \Delta E_{C(tp)} = E_{OUT(tp)} + E_{Dissapata(tp)} + \Delta E_{Compensata(tp)}$$

Riscrivendo i termini si ottiene:

$$\gamma \cdot \sum_{i=1}^{i=nN} \left[ \sum_{tk=t1}^{tk=tp} Q_{NI}(t_k) \cdot H_{NI}(t_k) \right] \cdot \Delta t +$$

$$\gamma \cdot \sum_{i=1}^{i=nP} \left[ \sum_{tk=t1}^{tk=tp} Q_{Pl}(t_k) \cdot H_{Pl}(t_k) \right] \cdot \Delta t$$

$$\gamma \cdot \sum_{i=1}^{i=n} \left[ \sum_{t_k=t_1}^{t_k=t_p} q_{ll}(t_k) \cdot H_l(t_k) \right] \cdot \Delta t +$$

$$\gamma \cdot \sum_{j=1}^{j=nL} \left[ \sum_{tk=t1}^{tk=tp} \left[ q_{uj}(t_k) + q_{lj}(t_k) \right] \cdot \Delta h_j(t_k) \right] \cdot \Delta t +$$

$$\sum_{i}^{nC} \{ A_{i} \cdot [Z_{i}^{2}(t_{P}) - Z_{i}^{2}(tk)]/2 \}$$

## 2.5. Calcolo degli indicatori energetici

# 2.5.1. Indicatori di efficienza energetica

Come definito dal saggio **Alegre, H., et Al. (2006)**. le informazione di contesto date dagli indicatori  $C_1$  &  $C_2$  sono utile solo per caratterizzare il sistema. Tuttavia, non possono esser cambiati dalle decisioni del gestore, quindi, non dovrebbero esser utilizzati per misurare quanto bene il sistema è gestito. Al fine di eseguire le analisi condotte su questo studio, vengono proposti cinque indicatori di prestazione del sistema.

• Il primo indicatore, l1, è il rapporto tra l'energia entrante nella rete ed l'energia minima utile. Quindi rappresenta l'eccesso di energia fornita.

$$I1 = Einput / Y*\sum_{i=1}^{n} Vu, i(tp) * hmin, i$$

Con:

**Vu,i(tp)**: il volume totale nel nodo i-esimo durante il tempo di simulazione tp.

**hmin,i**: Il minimo carico piezometrico "**P/Y**" richiesto nel nodo i pari a 20 metri in questo caso necessario per coprire tutti i piani del palazzo, ad esso viene sommato la quota del nodo s.l.m.

$$h_{min,i} = Z_i + P/Y$$

• Il secondo indicatore, l2, dato dal rapporto tra l'energia fornita alle utenze e quello entrante nel sistema. È una misura dell'efficienza dell'uso dell'energia iniettata nel sistema

#### I2 = Eu(tp) / Einput(tp)

• Il terzo, l3, viene dato dal rapporto tra l'energia persa per attrito all'interno della condotta e quella entrante nel sistema. Rappresenta la capacità idraulica del sistema, e maggiore è il suo valore minore sarà l'efficienza del sistema.

$$I_3 = E_f(tp) / E_{inp}(tp)$$

• Il quarto, l4, esso misura le perdite dovute alle diverse perdite, risulta dalla somma delle perdite concentrate nei nodi El(tp) e l'energia aggiuntiva necessaria per superare l'attrito con l'aumenta della portata necessaria per superare le perdite {differenza tra l'attuale persa per attrito Ef(tp) ed il valore della stessa energia riferita ad una rete ideale cioè senza perdite ottenuta azzerando le perdite nel software, Ef'(tp) }

$$I4 = {EI(tp) + Ef(tp) - Ef'(tp)}/Einp(tp)$$

• Infine, 15, rappresenta il livello di una rete cioè l'indicatore che calcola la media delle condizioni generali del sistema ma potrebbe lasciare inosservata le prestazioni di un settore della rete. È il rapporto tra l'energia consegnata alle utenze e quella minima richiesta.

$$I_5 = E_u(tp) / Y^* \sum_{i=1}^n Vu, i(tp) * hmin, i$$

Con esso ci sono due casi che possono esser interpretati come segue:

**15** < **1**, vuole dire che i livelli medi di pressione sono insufficienti e sotto gli standard.

**l5 > 1**, è il caso più comune. La pressione è mantenuta sopra il standard di servizio.

## 2.5.2. Indicatori di informazione di contesto

Ogni sistema è, da punto di vista energetico, diverso. La rete può esser piatta oppure collineare o non può richiedere l'intermediare stazioni di pompaggio. È ovvio che un sistema fornito da una fonte situata in un punto più alto rappresenta una situazione ideale, in quanto non ha bisogno di stazione di pompaggio. Il caso opposto è un sistema fornito da acque sotterranee dove ogni metro cubo dell'acqua richiede una certa quantità di energia prima di arrivare agli utenti. La differenza nel contesto tra queste due situazioni è coperto da due indicatori:

**C<sub>1</sub>: Indicatore di contesto**. Formalmente, non può esser considerato tale, secondo il saggio **Alegre et Al. (2006)**, **che lo definisce non come una costante perché può variare leggermente a seconda della perdita o attrito**, ma nel nostro studio, è un valore abbastanza costante e fornisce un valore contestuale che rappresenta il rapporto fra l'energia naturale e quella totale iniettata nella rete.

 $C_2$ : Indicatore di contesto. Spiega quanto sia impegnativo da un punto di vista energetico la rete. È dato dal rapporto tra l'energia minima utile  $E_{min,utile}$  e l'energia minima teorica richiesta  $E_{min,flat}$  (Calcolata per una rete ideale cioè rete piatta con tutti i nodi sullo stesso livello, senza perdite e senza attrito). Il miglior valore possibile di questo indicatore è uno. Pero non lo calcoliamo essendo un indicatore teorico.

N.B: Gli indicatori delle informazione di contesto C1 & C2 non sono funzioni dello stato della rete.

# 3. Caso di studio: Grugliasco & Rivoli

#### 3.1. Descrizione della rete

### 3.1.1. Grugliasco

Grugliasco è un comune Italiano di 37 676 abitanti della città metropolitana di Torino, in Piemonte. La sua rete acquedottistica si sviluppa su un'area di circa 13.13 Km² con una conformazione morfologica pressoché pianeggiante, troviamo infatti un intervallo di quote ridotto tra la massima quota 315m s.l.m e la minima quota 262m s.l.m. La richiesta idrica, è soddisfatta in modo regolare, corrispondente ad una domanda annua di circa 3.200,000 m³ suddivisi in 3839 utenze, mentre la domanda media, di circa 101 l/s, corrisponde a circa 231 l/giorno/abitante. Il territorio, che comprende una zona centrale che raccoglie il centro storico e quindi la maggior parte delle abitazioni residenziali e una zona a sud-est prevalentemente dedicata all'agricoltura e a zone industriali. La rete di distribuzione è formata da circa 92,812 Km di condotte, comprese tra i diametri 22mm e 1000mm.

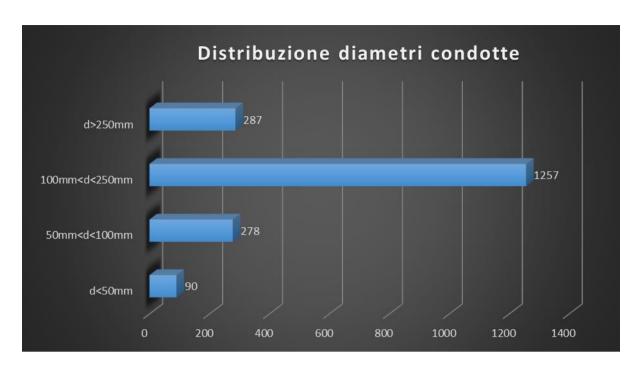


Figura 2: distribuzione delle condotte nelle classi di diametro

Nella rete sono presenti una serie di impianti e sotto impianti che forniscono l'acqua potabile alla rete di distribuzione. Una parte del fabbisogno è garantito da una produzione locale mediante dei pozzi situati all'interno del territorio, mentre l'altra parte dell'acqua potabile immessa nella rete proviene da altri impianti confinanti.

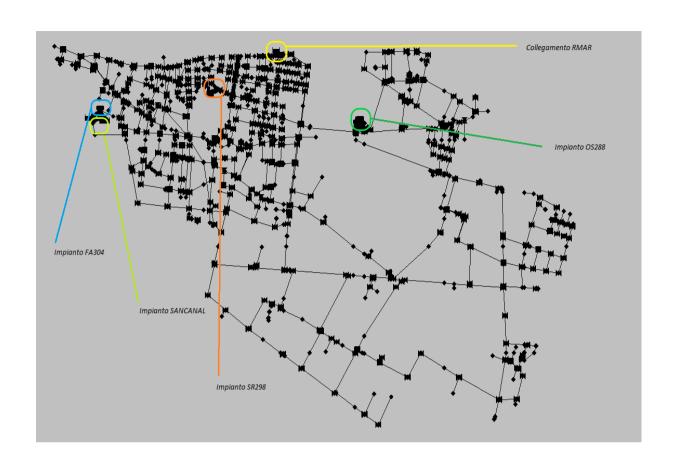


Figura 3: Posizione planimetrica delle zone di produzione

#### 3.1.2. Rivoli

Rivoli è un comune Italiano di 48 687 abitanti della città di Torino, in Piemonte. La sua rete acquedottistica si sviluppa su un'area di circa 29.5 Km² con una conformazione morfologica collinare rispetto al comune di Grugliasco, infatti si trova ad una quota pari a 390m s.l.m. come si vede è più alta rispetto alla città di Grugliasco. La domanda media, di circa 218l/s corrispondente a 376l/giorno per abitante. Nella rete sono presenti 8 zone con diversi funzioni tale: produzione, stoccaggio e pompaggio dell'acqua prelevata dai pozzi.

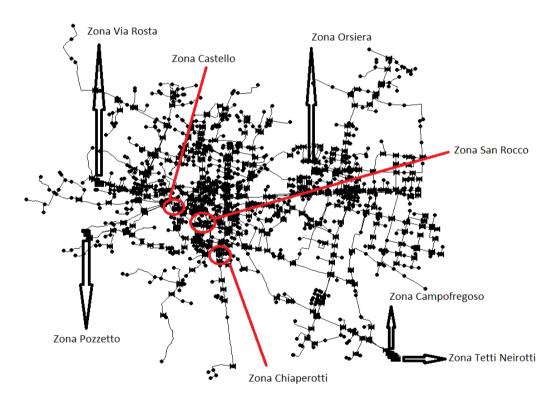


Figura 4: Posizione planimetrica delle zone di produzione

Il territorio comprende una zona centrale storica, una periferia residenziale ed una zona industriale situata nella zona orientale. La rete è formata da circa 165.955 Km di condotte, con diametri compresi tra 11mm e 999mm.

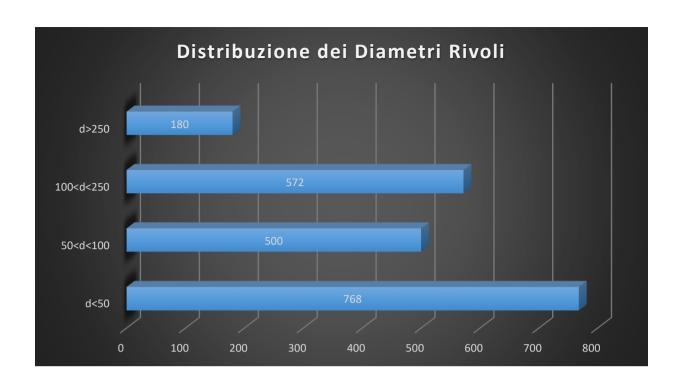


Figura 5: distribuzione delle condotte nelle classi di diametro

# 4. Costruzione del modello numerico della rete

## 4.1. **Epanet 2.0**

Per la realizzazione del modello numerico della rete in cui andremo ad analizzare, si è scelto di avvelarsi del software Epanet, con esso è possibile costruire il modello dei sistemi di distribuzione dell'acqua potabile, eseguire la simulazione a lungo termine del comportamento idraulico e della qualità dell'acqua all'interno di reti di tubazioni pressurizzate, costituite da tubi, nodi, valvole, pompe, serbatoi di stoccaggio e serbatoi. Può esser utilizzato per tracciare il flusso di acqua in ciascun tubo, la pressione in ciascun nodo, livello dell'acqua in ciascun serbatoio...

L'Epanet può anch'esser utilizzato per molti diversi applicazioni nell'analisi dei sistemi di distribuzione. Oggi gli ingegneri lo usano per progettare e dimensionare nuove infrastrutture idriche, ristrutturare l'infrastruttura obsoleta esistente, ottimizzare le operazioni di serbatoi e pompe, analizzare e ridurre il consumo di energia.

# 4.2. Dati input

Per la creazione del modello della rete possiamo definire quattro diverse categorie di dati necessarie per costruire il modello numerico di una rete acquedottistica:

- Geometria: definisce la forma della rete, individuando la posizione spaziale (in un sistema di riferimento) e le proprietà fondamentali come il diametro delle condotte, le dimensioni dei serbatoi e qualsiasi altra caratteristica degli elementi costituenti la rete.
- **Telemisure**: rappresenta l'insieme delle serie temporali relative alle misure del livello idrico dei serbatoi, alla portata che attraversa i sensori presenti nella rete e della pressione nei nodi rilevata dai manometri.
- Curve e regole di funzionamento: descrivono le informazioni di funzionamento delle pompe tramite le curve caratteristiche delle pompe Q-H, il rendimento e le regole di controllo di esse.
- **Consumi**: distribuzione della portata consegnata alle utenze a partire dai volumi fatturati.

Una volta definiti questi elementi allora possiamo costruire il nostro modello per poi eseguire la simulazione per un tempo " $T_p$ " che può essere esteso in giorni, settimane, mesi oppure l'anno, nel nostro caso l'abbiamo fissato a ventiquattro ore con intervallo di tempo della simulazione di stato stazionario (intervallo di raccolta dati) " $T_k$ " pari a un quarto d'ora.

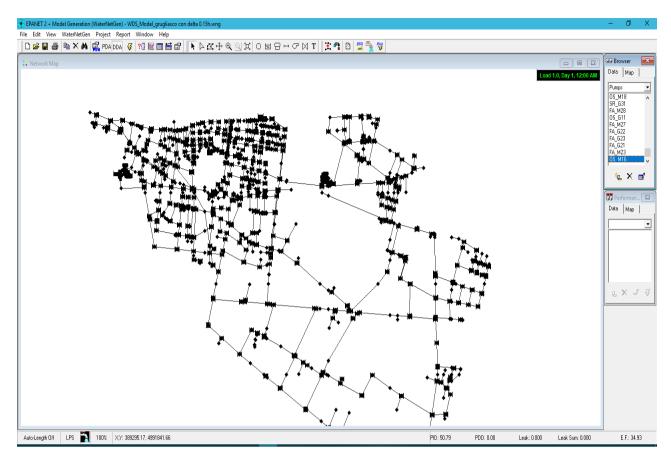


Figura 6. Schermata di Epanet+WNG

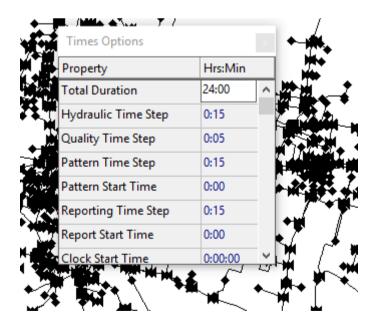


Figura 7. Schermata Tempi  $T_p$  e  $T_k$ 

### 5. Problema generale di una rete Idrica

In ogni rete acquedottistica ci sono sempre le perdite idriche che costituiscono un problema caratteristico di ogni rete ed è sempre trattato nel settore delle acque. Queste perdite principalmente causate dall'attrito all'intero delle condotte e quelle localizzate ai nodi dovuti alla pressione. Fino a poco tempo fa, i risparmi energetici nel settore idrico erano problemi operativi, cioè una questione di efficienza della pompa, un miglioramento del processo, o semplicemente un obbiettivo di efficienza gestionale. Tuttavia, a causa dell'attuale crisi energetica e della necessità di ridurre le emissioni di gas di serra, quindi vi è una crescita di motivazione a minimizzare i requisiti energetici nell'uso sostenibile dell'acqua.

Nella presente tesi viene fatto un audit energetico di reti situate nella regione di Piemonte, elencheremo alcune soluzioni per migliorare le prestazioni del sistema senza pero analizzare in profondità quest'ultime non essendo l'obbiettivo di questo studio.

- Quest'analisi viene fatta basandosi sul saggio intitolato **Energetico Audit of Water Network**, l'audit energetico viene fatto analiticamente calcolando alcuni coefficienti che dipendono di energie di varia natura.
- Come accennato prima dobbiamo costruire i modello numerico della rete tramite il software **Epanet 2.0.**

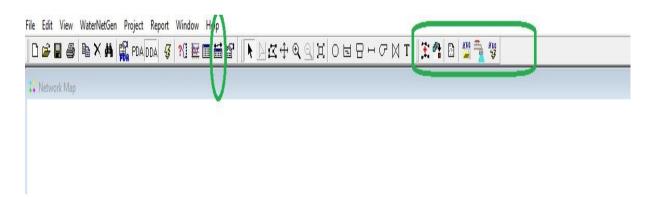
Una volta costruito il modello numerico della rete con tutti gli elementi che la compongono possiamo passare alla simulazione di una durata fissata in questo caso il tempo di simulazione Tp è di ventiquattro ore. Dopodiché bisogna estrare dei dati necessari per l'analisi della rete, visto che stiamo lavorando su un territorio con un numero elevato di abitanti allora abbiamo utilizzato un'estensione di **EPANET** (**WaterNetGen**), che ci permette di estrarre più velocemente i dati rispetto ad **"Epanet 2.0"** cioè invece di estrare per ogni singolo

elemento alla volta che sarebbe scomodo visto il numero elevato di utenti nella rete, con **WNG** è possibile estrarre il dato desiderato (il carico totale per esempio) in un solo passaggio per ogni elemento componente della rete al variare del tempo.

#### Qui sotto evidenziamo la differenza tra Epanet 2.0 e WNG



#### Immagine X1. Interfaccia di Epanet.



#### Immagine 8. Interfaccia WNG

Come si può notare nell'immagine **8** relativo a **WNG** ci sono più icone rispetto all'**Epanet 2.0**, quindi più opzioni.

### 6. Caratteristiche di elementi della rete

#### 6.1. Generalità

L'acqua costituisce un elemento fondamentale per l'esistenza e lo sviluppo di qualsiasi forma della vita sulla terra, per noi esser umani, ci aiuta a digerire ed assorbire il cibo, regola la temperatura corporea e svolge diversi altre funzioni importanti. Quindi la destinazione principale dell'acqua è il consumo umano, da qui nasce la necessità di realizzare le opere con funzione di prelevare, trasportare, stoccare e distribuire l'acqua potabile.

#### 6.2. Elementi costituenti della rete

• <u>Condotte</u>: fanno parte delle opere di distribuzione ed hanno la caratteristica di esser in un numero elevato questo implica un numero elevato delle valvole (che hanno la funzione di regolare il flusso dell'acqua all'interno delle condotte interrompendolo oppure consentendolo in un senso) e raccordi (vengono utilizzati per collegare diverse tubazioni) ed insieme hanno la funzione di consegnare l'acqua alle utenze private, le aziende ed i vari servizi pubblici. Per quanto riguarda i materiali invece, la maggior parte delle condotte è in acciaio e ghisa grigia e sferoidale. Sono presenti anche tratti in; eternit, PVC, ferro, PEAD e cemento armato.

- <u>Pompe</u>: Rappresentano un elemento ch'è presente in qualsiasi sistema di approvvigionamento idrico. Costituiscono l'impianto di sollevamento ed hanno la funzione di incrementare l'energia posseduta da una corrente. Sono caratterizzate da:
- **Portata Q** ovvero il volume di fluido spostata nell'unità di tempo, espresso generalmente in m³/s;
- **Velocità di pompaggio** (ovvero volume di sostanza spostata in funzione del tempo);
- **Prevalenza H** ovvero il dislivello massimo di sollevamento, espressa normalmente in metri.
- Curva caratteristica, esprime la variazione, a numero di giri costante, della prevalenza H(Q) tra le sezioni d'ingresso e d'uscita della pompa in funzione del cambiamento della portata erogata Q.



Figura 9. Curva caratteristica di una pompa su Epanet.

N.B: Per la simulazione del modello numerico si va ad impostare il loro funzionamento temporale in funzione della variazione del livello dell'acqua nei serbatoi.

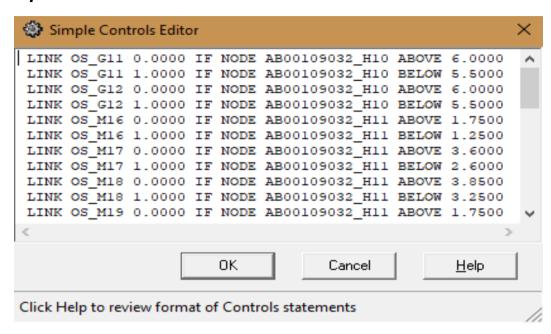


Figura 10: impostazioni per il funzionamento delle pompe

- <u>Pozzi</u>, da essi viene estratta l'acqua (che può provenire da falde che possono essere freatiche oppure artesiane, a seconda che il flusso dell'acqua che le permea sia a "pelo libero" oppure "in pressione") per alimentare la rete idrica. Essendo in profondità allora vengono installate le pompe vicine a loro per estrare l'acqua e mandarla nella rete.
- <u>Serbatoi</u>: Sono manufatti importanti molto importanti per le retti acquedottistiche perché assolvono le funzioni tali:
  - **Di Compenso**, in questo caso esso accumula le acque che arrivano dalla condotta di adduzione durante le ore di minore consumo, e particolarmente durante la notte per poi restituirle durante le ore di consumo superiori alla media, in modo che

Sommandosi con quelle che non cessano di arrivare dalla condotta di adduzione si riesca a fronteggiare le richieste delle ore di punta.

- **Di Riserva idrica**, è una funzione molto importante perché essa permette di garantire la disponibilità dell'acqua per le utenze nelle situazioni straordinarie quali incendi, guasti oppure interventi di manutenzione delle adduttrici.
- **Misuratori:** sono installati generalmente in prossimità di una centrale di produzione per verificare le condizioni operative.

### 7.RISULTATI

Le analisi effettuate hanno permesso di ottenere i risultati riportati di seguito. Esse sono state fatte su un periodo di simulazione giornaliera cioè corrispondente ad una durata di ventiquattrore quindi possono esser considerate come analisi a breve termine perché si potrebbe fare anche un'analisi a lungo termine dove il periodo tp potrebbe andare anche a più di 16 giorni. Avendo scelto un'analisi a breve termine è consigliabile usare una fase temporale idraulica tk non oltre un minuto per aver una maggiore precisione nella raccolta dati. Abbiamo assunto questo tempo tk pari ad un quarto d'ora quindi 0.25ore. Di seguito vengono riportati i risultati relativi alle due reti trattate con l'unico caso analizzato cioè la rete attuale senza alcuna modifica.

### 7.1. Bilancio energetico

#### 7.1.1. Rete di Grugliasco

I valori energetici ottenuti per ogni tipo di energia definite sopra sono i seguenti.

Energie	[KWh/	giorno]		
Energia naturale	EN	2553,322	(75%)	Ein
Energia fornita dalle pompe	EP	866,4932	(25%)	
Energia fornita alle Utenze	Ευ	2368,112	(71%)	
Energia associata alle perdite	$E_L$	789,2673	(24%)	<b>E</b> out
Energia persa per attrito	<b>E</b> <sub>F</sub>	134,2114	(4%)	0.00
Energia di compensazione	Ec	25,72668	( 1%)	

Tabella 2. Energie coinvolte nell'analisi.

Di seguito riportiamo i diagrammi a torta per evidenziare al meglio quanto ciascuna energia influisce sull'energia totale.

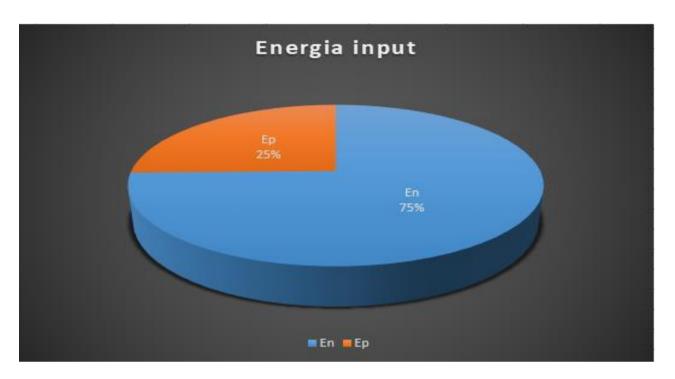


Figura 14, Influenza delle varie energie.

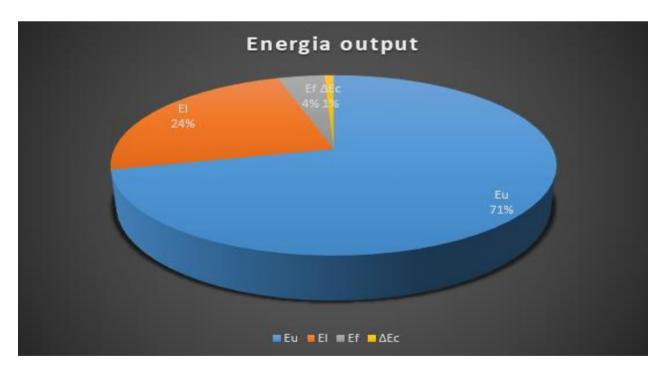


Figura 15, Influenza delle varie energie.

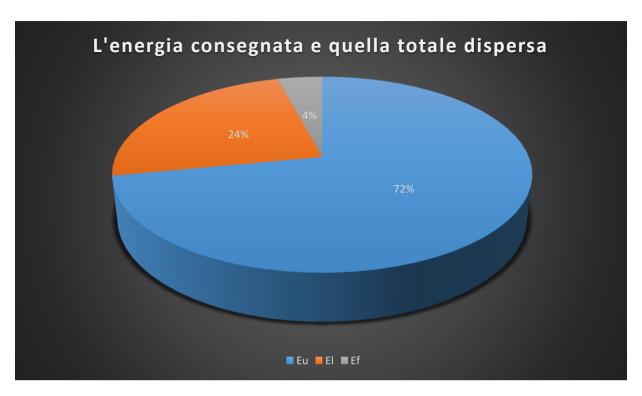


Figura 16 Le voci delle energie uscenti dalla rete.

Dai risultati ottenuti si vede come nella **Fig.15** che la maggior parte di energia è ricavata naturalmente cioè dai Pozzi (**Reservoirs**) però c'è da sottolineare che uno dei Reservoirs rappresenta un collegamento con un comune confinante. Quindi la potenza in questione non è relativa a un pozzo; in realtà non sappiamo come è stata fornita l'acqua. Mentre la restante è ottenuta dalle stazioni di pompaggio (**Pumps**). Il 71% dell'energia iniettata al sistema è fornita alle utenze, che evidenzia un buon funzionamento del sistema. In termini energetici, le perdite comportano un dispendio di energia maggiore delle perdite in rete (da esse si intendono quelle concentrate nei nodi).

### 7.1.2. Rete attuale di Rivoli

I valori energetici ottenuti per ogni tipo di energia definite sopra sono i seguenti.

Energie		[KWh/	giorno]	
Energia naturale	EN	585,3251	(10%)	Ein
Energia fornita dalle pompe	<b>E</b> <sub>P</sub>	5358,513	(90%)	
Energia fornita alle Utenze	Ευ	3793,909	(66%)	
Energia associata alle perdite	$E_L$	1237,906	(22%)	<b>E</b> out
Energia persa per attrito	<b>E</b> <sub>F</sub>	573,2849	(10%)	
Energia di compensazione	Ec	100,3961	(2%)	

Tabella 3. Energie coinvolte nell'analisi.

Di seguito riportiamo i diagrammi a torta per evidenziare meglio quanto ciascuna energia influisce sull'energia totale.

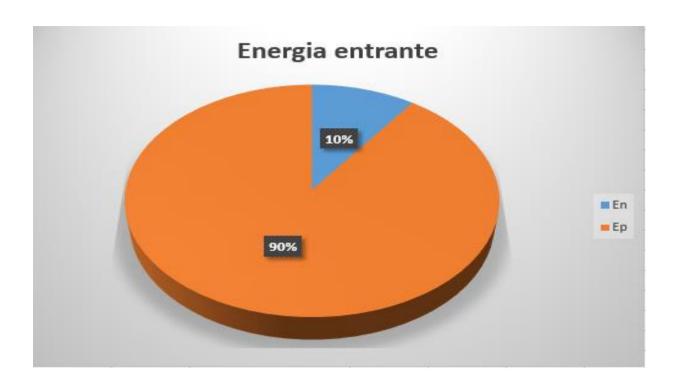


Figura 17, Influenza delle varie energie.

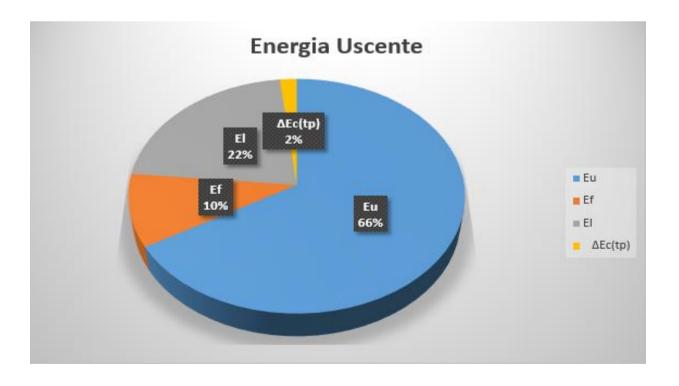


Figura 18, Influenza delle varie energie.

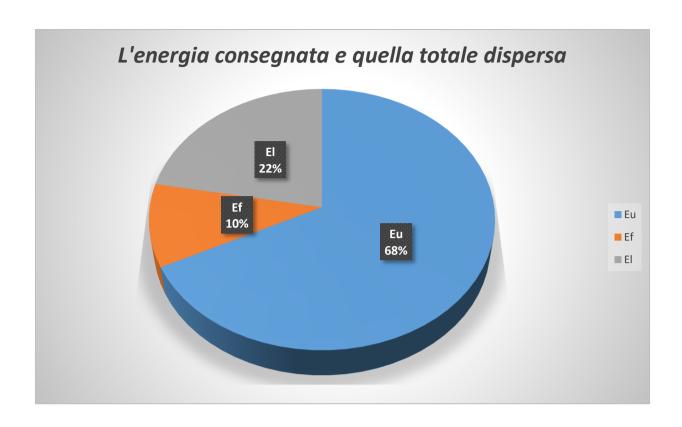


Figura 19. Le voci delle energie uscenti dalla rete.

Dai risultati ottenuti si vede come nella **Fig.17** che la maggior parte di energia è ricavata artificialmente cioè dalle stazioni di pompaggio (**Pumps**), questo perché la città è collinare quindi il dislivello tra i pozzi e la rete è significativa allora per alzare l'acqua fino al livello della rete di distribuzione vengono utilizzate delle pompe, mentre la restante è ottenuta naturalmente cioè dai pozzi (**Reservoirs**). Il 66% dell'energia iniettata al sistema è fornita alle utenze, che evidenzia un buon funzionamento del sistema. La parte rimanente è persa maggiormente dalle perdite d'acqua in rete (perdite concentrate nei nodi) e l'altra parte per attrito all'interno delle condotte.

### 7.2. Indicatori energetici

Questi indicatori possono aiutare a valutare, confrontare e migliorare l'efficienza energetica delle diverse reti. Possono esser calcolati con i risultati di entrambi a breve e lungo termine, sebbene crearsi una piccola distorsione nei valori di indicatori con analisi a breve termine. I risultati vengono riportati di seguito.

### 7.2.1. Grugliasco

Indicatori	Descrizione	Simbolo	Valori
	Eccesso di energia fornita	<b>I</b> <sub>1</sub>	1.268
	Efficienza energetica della rete	<b>I</b> <sub>2</sub>	0.692
Efficienza	Energia persa per attrito	<i>I</i> <sub>3</sub>	0.039
	Perdita di energia	14	0.251
	Condizione generale della rete	<b>I</b> <sub>5</sub>	0.878
Contesto Natura energetica		<b>C</b> <sub>1</sub>	0.747

#### Tabella 4. Indicatori di efficienza energetica e di contesto.

Dall'indicatore  $l_1$ , si vede che l'energia entrante nel sistema è pari a circa 1.3 volte l'energia minima utile alle utenze, quindi c'è un eccesso.

**L'indicatore**  $I_2$ , ci fa vedere che circa il 70% dell'energia iniettata al sistema viene consegnata alle utenze, quindi si può concludere che il sistema funziona bene.

**L'indicatore l**<sub>3</sub>, con esso si vede che meno di 1% dell'energia totale fornita viene persa per attrito all'interno delle tubazione della rete. Essendo così piccolo quindi è buon valore.

**L'indicatore**  $I_4$ , ci indica che solo il 25% dell'energia totale viene dissipata a cause delle varie perdite idriche all'interno del sistema.

L'indicatore I<sub>5</sub>, mostra che la quantità di energia fornita alle utenze è 0.878 volte di quella minima utile, questo vuole dire che i livelli medi di pressione sono insufficienti e sotto gli standard, in altre parole l'acqua che viene consegnata agli utenti per mezzo di serbatoi sotterranei. Questo vuole dire che in caso del guasto bisogna intervenire visto che non c'è un eccesso di energia nella rete, mentre I<sub>5</sub>>1 è il caso più comune, e vuol dire che nel caso di guasto l'acqua potrà arrivare fino alle utenze anche primo dell'intervento visto che l'energia fornita è al di sopra di quella minima utile.

L'indicatore C<sub>1</sub> (rappresenta la natura energetica che entra nel sistema), indica che il 75% dell'energia immessa in rete non è dovuta alle stazioni di pompaggio della rete, una parte circa il 48% proviene dai pozzi appartenenti alla rete mentre il 52% è fornita dal collegamento con la rete vicina e quindi non si può chiaramente dire ch'è naturale oppure artificiale visto che non si sa come quest'energia è stata prodotta. Il valore massimo si raggiunge quando tutta l'energia fornita è gravitazionale cioè che la fonte dell'acqua sia alta rispetto al livello della rete.

### 7.2.2. <u>Rivoli</u>

Indicatori	Descrizione	Simbolo	Valori
	Eccesso di energia fornita	<b>I</b> <sub>1</sub>	1.965
-cc· ·	Efficienza energetica della rete	<i>I</i> <sub>2</sub>	0.638
Efficienza	Energia persa per attrito	<i>I</i> <sub>3</sub>	0.096
	Perdita di energia	14	0.223
	Condizione generale della rete	<b>I</b> <sub>5</sub>	1.254
Contesto	Natura energetica	<b>C</b> <sub>1</sub>	0.098

Tabella 5. Indicatori di efficienza energetica e di contesto.

**L'indicatore l**<sub>1</sub>, si vede che l'energia entrante nel sistema è pari a circa 2.0 volte l'energia minima utile alle utenze.

**L'indicatore l<sub>2</sub>**, indica che circa il 64% dell'energia iniettata al sistema viene consegnata alle utenze, quindi si può concludere che il sistema funziona bene.

**L'indicatore l**<sub>3</sub>, con esso si vede che circa l'1% dell'energia totale fornita viene persa per attrito all'interno delle tubazione della rete. Essendo così piccolo quindi è buon valore.

**L'indicatore l**<sub>4</sub>, ci indica che solo il 22% dell'energia totale viene dissipata a cause delle varie perdite all'interno del sistema.

**L'indicatore l**<sub>5</sub>, mostra che la quantità di energia fornita alle utenze è 1.25 volte di quella minima utile, quindi è la situazione ideale perché garantisce la continuità della fornitura dell'energia alle utenze anche

in caso di guasto nella rete. Questo vuole dire che la pressione è mantenuta al di sopra dello standard di servizio.

**L'indicatore C<sub>1</sub>,** indica che circa il 10% dell'energia immessa in rete è naturale quindi non fornita dalle stazioni di pompaggio. Il valore massimo di questo indice si raggiunge quando tutta l'energia fornita è gravitazionale cioè che la fonte dell'acqua sia alta rispetto al livello della rete.

### 8. Confronto dei risultati

#### 8.1. Confronto energetico

Di seguito riportiamo i risultati delle due reti su una stessa tabella per evidenziare il confronto delle varie voci.

Voce	Reti			
7000	Grugliasco	Rivoli		
Energia naturale EN	2553,322	585,3251		
Energia fornita dalle pompe EP	866,4932	5358,513		
Energia fornita agli utenti EU	2368,112	3793,909		
Energia associata alle perdite EL	789,2673	1237,906		
Energia persa per attrito EF	134,2114	573,2849		
Energia di compenso EC	25,72668	100,3961		

Tabella 6. Confronto energetico delle reti.

Dalla **tabella 6**, si può notare come la rete di **Grugliasco** è alimentata a circa 75% dai pozzi quindi l'energia fornita è maggiormente naturale essendo pianeggiante quindi non richiede troppo l'utilizzo delle pompe, invece quella di **Rivoli** è alimentata a circa 90% dalle stazioni di pompaggio questo perché la rete è topograficamente collinare quindi richiede maggiore energia per fare arrivare l'acqua fino al livello del sistema per poi esser distribuita nella rete.

#### 8.2. Confronto degli indicatori

Dall'analisi del confronto energetico è possibile risalire a quella degli indici di efficienza e di contesto rappresentata dal diagramma d'istogramma seguente.

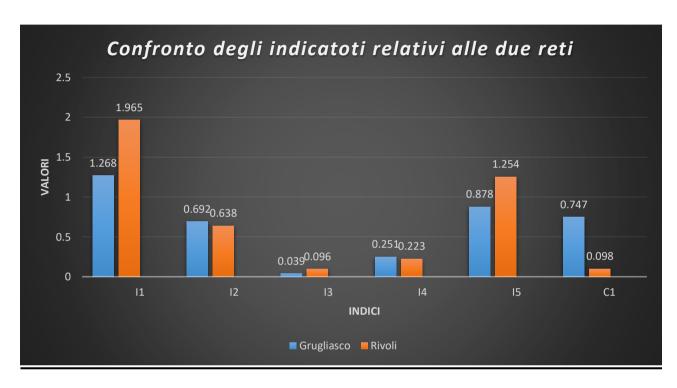


Diagramma 17. Confronto indici energetici e di contesto delle reti

Dal diagramma 17, si può notare come l'eccesso dell'energia fornita è maggiore per la rete di **Rivoli**, l'efficienza energetica è maggiore per quella di **Grugliasco**. L'energia persa per attrito è maggiore per **Rivoli** mentre quella associate alla dispersione dell'acqua è maggiore per **Grugliasco**, invece la condizione generale della rete è ottimale per rivoli e l'indice di contesto (natura dell'energia) è maggiore per **Grugliasco**.

### 8.3. Costo delle perdite

#### 8.3.1. Calcolo del costo

Dai risultati illustrati nel capitolo precedente, abbiamo visto come non tutta l'energia immessa in rete viene consegnata agli utenti perché una parte viene dissipata o per attrito all'interno delle tubazioni oppure nelle perdite concentrate nei raccordi dove l'acqua fuoriesce a cause delle fessure oppure rotture locali. Questa quantità di energia persa ha un costo che non approfitta all'ente incaricato per la produzione e la distribuzione dell'acqua nella rete. Possiamo quantificare queste perdite come definito dal saggio **J.Sousa et al. (2014).** Il costo delle perdite viene calcolato con il volume perso durante il tempo di simulazione  $\mathbf{t}_p$  (24 ore cioè un giorno) moltiplicato per il numero dei giorni all'anno pari a 365 ed  $\mathbf{C}$  il costo fisso che vale:

C= 0.2 €/m3, costo marginale azienda.

C=EP (environmental penalty) pari a 2 €/m³.

$$C_{leakage} = C*365*\sum_{t=1}^{NTS} \Delta Tt*\sum_{j=1}^{NPj} \forall u(tp)$$

Con:

•  $\forall u(tp)$ : Volume perso durante il periodo di simulazione. Calcolato moltiplicando la portata uscente  $q_i(tp)$  {data dalla differenza tra la portata totale entrante nella e quella che viene consegnata alle utenze}, per il tempo.

I dati necessari per il calcolo del costo sono tutti noti quindi si può procedere al calcolo del costo come riportato dalle tabelle sottostante.

Rete	EP(€/m³)	Num.Giorni	Costo all'anno
Grugliasco	0.2	265	1353,084
Rivoli	0,2	<i>365</i>	1919,484

Tabella 7. Costi associati alle perdite idriche relativo al margine dell'azienda.

Rete	EP(€/m³)	Num.Giorni	Costo all'anno	
Grugliasco	2	265	13530,84	
Rivoli		<i>365</i>	19194,84	

Tabella 8. Costi associati alle perdite idriche relativo all'impatto ambientale.

#### 8.4. Soluzioni

Il saggio **J.Sousa et al. (2014)** presenta alcune procedure da eseguire per risolvere i problemi presenti nelle reti di distribuzione d'acqua. L'obbiettivo è di progettare una metodologia per ridurre quelle che sono le perdite d'acqua ed applicarla ad un vero sistema di distribuzione dell'acqua.

Le soluzioni possono includere nuove tubazioni (sostituire oppure collocare nuovi tubi in parallelo a quelli esistenti), nuovi serbatoi (adiacenti a quelli esistenti), nuove valvole e pompe al fine di controllare le pressioni e ridurre le perdite idriche.

### 9. Conclusioni

Negli ultimi decenni la popolazione mondiale è cresciuta molto con conseguenza la crescita della richiesta elettrica e soprattutto idrica per il consumo essendo l'acqua un elemento essenziale per la vita visto che essa interviene in tutti i processi della vita (cucina, produzione delle bevande, agricoltura per l'irrigazione, ...). Questa prospettiva trasforma le fasi della produzione e della distribuzione dell'acqua fino alla sua destinazione finale ed ha anche portato l'attenzione non solo su quanta energia è consumata ma anche quanta è persa.

La presente tesi ha avuto come obbiettivo di fare un'analisi energetica di due reti idriche di distribuzione andando a fare la valutazione delle diverse energie presenti nel sistema e mettere in evidenza quanta energia viene consumata e quanta viene sprecata sulla totale immessa nella rete.

È importante sapere la quantità di energia che viene persa perché essa ha un impatto negativo sull'efficienza del sistema nonché quello economico, quindi uno degli obbiettivi principale di questo studio è stato di quantificare l'energia dissipata. Tale dispersione è dovuta alle perdite che risultano esser significative quanto maggiore è la quantità di energia immessa nel sistema, un'altra parte è dovuta all'attrito all'interno delle tubazioni.

Per fare quest'analisi è stato necessario disporre di un modello numerico della rete (a volte bisogna costruirlo quando non esiste) ed analizzare il comportamento idraulico della rete facendo le simulazioni a lungo oppure a breve termine mediante il software EPANET 2.0 (e la sua estensione WNG per la rapidità all'estrazione dei dati necessari per la valutazione dei diversi parametri).

L'audit presentato in questo studio è basato sulle indicazioni presente sul saggio **Enrique Cabrera (2010)** e può essere un supporto per identificare gli usi finali dell'energia totale che entra nel sistema e da essa definire un sistema di valutazione dell'informazione del contesto ed anche la prestazione energetica attraverso gli indici di efficienza energetica. In questo studio il periodo di simulazione è di ventiquattro ore però per la valutazione dei costi associati alle perdite energetiche abbiamo esteso questo periodo in un anno andando a moltiplicare il dato giornaliero per il numero dei giorni all'anno per ottenere un valore significativo e da esso si può adottare la soluzione ottimale tra le varie soluzioni possibili.

## <u>Allegati</u>

## 1. Rete di Grugliasco

## 1.1. Energia naturale

	Reservoir	ΣQ*Η	Δt		ΣQ*H*Δt*3600		EN singoli pozzi
	Campofregoso	795.8392	0.15	3600000	429753.168		1169.883624
	G31	39.0716			21098.664		57.435252
	G11	0		9800	0		0
	G12	0			0		0
	G22	0			0		0
	G23	0			0		0
	G21	0		3600	0		0
Collegamento	PGR	902.04283			487103.1298		1326.002965
					937954.9618		
				En (Kwh)	2553.3	Kwh	

## 1.2. Energia artificiale

Stazione di Pompaggio	ΣQ*Η		Δt	ΣQ*H*Δt*3600	
FA M26	82.9280824	3600000	0.15	44781.1645	
FA M21	149.051033	3600		80487.55787	
OS G12	81.490246	9800		44004.73295	
OS M19	0.0000			0	
FA M22	35.2715808			19046.65363	
OS M17	1.50348			811.8792	
OS M18	29.6999358			16037.96533	
SR G31	128.015267			69128.24418	
M 28	0			0	
OS G11	81.4915161			44005.41869	
FA M27	0			0	
FA G22	0			0	
FA G23	0			0	
FA G21	0			0	
FA M23	0			0	
OS M16	0			0	
				318303.6164	
			Ep(tp)	866.49	Kwh

### 1.3. Energia fornita agli utenti

ΣQ*H	Δt	Y N/m3	ΣQ*H*Δt*3600			
0	0.15	9800	0			
0.017186486			9.280702277			
0	3600		0	ΣQ*H*Δt*3600	869918.5918	
0			0			
0.429841117	3600000		232.114203			
0			0			
0			0	Eu(tp)	2368.1	Kwh
0			0			
0			0			
0.275049865			148.5269268			
0			0			
2.493748208			1346.624032			
0			0			

<u>N.B.</u> ci sono più di 3000 righe che corrispondono al numero di nodi nella rete, quindi per brevità si riporta solo la parte iniziale della tabella. Lo stesso approccio è adottato le tabelle seguenti.

## 1.4. Energia associata alle perdite

ΣQ*Η	Δt	ΣQ*H*Δt*3600	ΣQ*H*Δt*360(	289964.1	
0.004373	0.15	2.361279519			
0.062682		33.84803855			
0.006186	3600000	3.340274204			
0.005582		3.01435736	El (Tp)	789	Kwh
0.010256	3600	5.538254028			
0.107525		58.06375384			
0.000774	9800	0.4178304			
0.005133		2.771732336			
0.004712		2.544605917			
0.219354		118.4512522			
0.016089		8.688276265			
0.094063		50.79388026			
0.00862		4.654913551			
0.354933		191.6640745			
0.005355		2.891733971			

### 1.5. Energia associata all'attrito

ΣQ*L*ΔΗ	Δt	ΣQ*L*ΔH*Δt*3600				
0	0.15	0				
0		0	Somma	49302.15		
0	3600000	0				
0		0				
0.0005788	3600	0.312571333	Ef (Tp)	134	Kwh	
0.0001234		0.066638785				
4.465E-07	9800	0.000241101				
1.7477397		943.7794149				
0.1957665		105.7139052				
0.0459976		24.83868293				
0.1273123		68.74866219				
0.0228957		12.36366582				
0.0802859		43.35440376				

## 1.6. Energia di compenso

Tanks	Diametro	Pi	gamma	Raggio	(Pf^2-Zi^2)/2	Ai*(P^2-Zi^2)/2	
H21	7.44	3.14	9800	3.72	4.86724992	211.4945471	
H20	19			9.5	15.680028	4443.484735	
H10	19			9.5	15.679972	4443.468865	
H11	8.81			4.405	5.780051	352.1706379	
						9450.618785	
					ΔΕς (Τρ)	25.7267	Kwh

## 1.7. Energia minima utile

Elevation m	Pmin/Y	Zmin	hmin,i	Q(tp) m3	hmin,i*Q	Υ	Δt	
128	20	167	148	0	0	9800	0.15	
137	20		157	0.00062	0.09734		3600	
126	20		146	0	0		3600000	
109	20		129	0	0			
136	20		156	0.00255	0.3978			
103	20		123	0.00097	0.11931			
135	20		155	0	0	ΣQ*hmi,i	1835.336	
112	20		132	0	0			
115	20		135	0	0			
130	20		150	0.00283	0.4245	Emin,use	2698	Kwh

## 2. Rete di Rivoli

## 2.1. Energia naturale

Reservoir	ΣQ*Η	ΣQ*H*Δt*3600		3600000	9800	Δt ore	3600
				3.6		0.15	
G53	70.7227	38190.258					
G61	54.47917	29418.7518					
G11	34.1445	18438.03					
G12	3.5613	1923.102					
G15	0	0					
G52	36.6369	19783.926					
G62	46.1596	24926.184					
G14	8.2679	4464.666					
G13	26.23764	14168.3256					
G51	117.97062	63704.13696					
	ΣQ*H*Δt*36	215017.3804					
	En(tp)	585.33	Kwh				

## 2.2. Energia artificiale

Pompe	ΣQ*H				Δt	ΣQ*H*Δt	
		3600000	3600	9800	0.15		
G51	358.0312					53.70468	
M32	108.8632					16.32949	
G13	349.7803					52.46705	
M19	0					0	
M21	0					0	
M18	273.6179					41.04268	
M41	55.58016					8.337023	
G52	207.04					31.056	
G12	558.3047					83.74571	
G11	377.884					56.6826	
G61	243.2242					36.48363	
M31	314.4537					47.16806	
G62	187.0493					28.0574	
G53	235.6045					35.34068	
M16	76.54795					11.48219	
M17	0					0	
G15	176.2045					26.43067	
G14	123.061					18.45916	
M42	0					0	
					ΣQ*H*Δt	546.787	
					Ep(tp)	<i>5359</i>	Kwh

### 2.3. Energia fornita agli utenti

∑Q* Htot	Δt		Y (N/m3)	∑Q*Htot*Δt*3600			
0	0.15	3600	9800	0			
0.487384		3600000		263.1875137		∑(Q* Htot*)	
0				0		1393680.93	
0.970763				524.211957			
2.52936				1365.85447	Eu(tp)	<i>3793.9</i>	Kwh
0.410156				221.4841797			
0				0			
10.63478				5742.779597			
5.548226				2996.041778			
0.206769				111.6552615			
0				0			
0				0			
0				0			
0				0			
0.926748				500.4441876			

## 2.4. Energia associata alle perdite idriche

∑qI*Htot	Δt	Y N/m3	Σql*Htot*Δt*3600	∑(ql*Htot*)		
0.042863	0.15	9800	23.14600712	454740.825		
0.2157055			116.4809527			
0.0038413		3600	2.074277792			
0.2262031		3600000	122.1496758			
0.2109284			113.9013335			
0.1883368			101.7018918	El(tp)	1238	Kwh
0.1218639			65.80650946			
0.388404			209.7381608			
1.4527842			784.503474			
0.0220429			11.90316752			
0.0047064			2.541482644			
0.201857			109.0027932			
0.1622303			87.60438626			
0.0052515			2.835797283			

### 2.5. Energia associata all'attrito

$\Sigma Qj(tk)*\Delta Hj(tk)$	Δt		gamma			
0.06689728	0.15	3600	9800	3600000		
0.00045004						
0				Somma pipes	389.98971	
0						
0						
0.002650991				Ef(tp)	<i>573.3</i>	Kwh
0.000106373						
0						
2.05983E-05						
0						
1.13313E-05						
0						
0						
3.647E-07						
0.000012603						

## 2.6. Energia di compenso

	Diam	Raggio	peso spec	Pi	R^2	Area	P^2			Area*P^2/2	
H41	5.1	2.55	9800	3.14	6.5025	20.41785	7.29	0	3.645	74.42306325	
H40	43.8	21.9			479.61	1505.975	44.6224	0	22.3112	33600.11834	
H20	14.28	7.14			50.9796	160.0759	13.9129	0	6.95645	1113.560301	
H10	21.41	10.705			114.597	359.8347	11.6281	0	5.81405	2092.096696	
										36880.1984	
										361425944.4	
									ΔEc(tp)	100.4	Kwh

## 2.7. Energia minima utile

	Qtot nodi m3	Pmin/Y m	Elevation	Y (N/m3)	hmin,i	Q*hmin,i			
			m						
0.001	0	20	121	9800	141	0		5.602097872	
	0.003421201		100		120	0.410544			
Z min	0		98	0.15	118	0			
228	0.005186953		129		149	0.772856	Emin,usef	3025.1	Kwh
	0.013574408		124		144	1.954715			
	0.002207236		125		145	0.320049			
	0		123		143	0			
	0.072727896		71		91	6.618239			
	0.021189287		182		202	4.280236			
	0.001103568		125		145	0.160017			
	0		129		149	0			

# **BIBLIOGRAFIA**

- Alegre, H., et Al. (2006). Performance indicators for waters supply service, IWA Publishing, London.
- Colombo, A. F., and Kagney, B. W. (2005). "Impact of Leaks on energy consumption in pumped systems with storage."
- Enrique Cabrera, M.ASCE; Miguel A.Pardo; Ricardo Cobacho; Enrique Cabrera Jr., "Energy Audit of Water Networks".
- J.Muranho, J., A. Ferreira, J. Sousa, A. Gomes, A. Sa Marques, WaterNetGen-an EPANET Extension for Automatic Water Distribution.
- J.Sousa et al. (2014) /Procedia Engineering 89(2014) 103-110