



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica

*Studio dell'efficienza energetica di due centrali
di potabilizzazione nel comune di Rovigo*

Relatore:

Prof. Ing. Arturo Lorenzoni

Laureando:

Matteo Rossi

n° matr. 1089904

Anno Accademico 2015/2016

“L’espressione più eccitante da ascoltare
nella scienza, quella che annuncia le più grandi
scoperte, non è “Eureka” ma “Che strano...””

Isaac Asimov

INDICE

Sommario	1
Introduzione	3
Normativa di riferimento	5
Capitolo 1. Descrizione della filiera produttiva.....	7
1.1 Centrale di Castelnovo Bariano	7
1.2 Centrale di Occhiobello	15
1.3 Impianto elettrico.....	19
1.4 Avviamento	22
Capitolo 2. Stato di fatto e criticità	27
2.1 Caratteristiche del sistema di pompaggio idraulico.....	27
2.2 Pompe in parallelo.....	31
2.3 Concetti per la stima dei risparmi energetici in un sistema di pompaggio.....	32
Capitolo 3. Le pompe a regime variabile	51
3.1 Effetti della variazione di velocità	51
3.2 Altre implicazioni nell'usare pompe a regime variabile.....	53
3.3 L'utilizzazione delle elettropompe a velocità variabile negli acquedotti.....	55
3.4 Principi di controllo per pompe a regime variabile	57
Capitolo 4. Lo stato di progetto	59
4.1 Stima dell'energia per lo stato di progetto	59
4.2 Analisi dei consumi.....	63
4.3 Scelta delle pompe	71
4.4 Stima dettagliata dei rendimenti	73
4.5 Risultati finali e confronto tra le due centrali	80
4.6 Ulteriori accorgimenti	82
5. Giustificazioni finanziarie	83
5.1 Parametri economici	84
5.2 Certificati bianchi.....	88
5.3. Valutazione e verifica dei risparmi di energia primaria	89
5.4 Stima dei TEE ottenibili.....	90
Conclusioni	93
Ringraziamenti	95

Bibliografia	97
Appendice A	99
Appendice B	103

Sommario

La sensibilità della società Polesine Acque S.p.a nei riguardi di una maggiore efficienza energetica, possibile nei processi produttivi delle proprie centrali di potabilizzazione dell'acqua, ha consentito la realizzazione di questa tesi, in collaborazione con l'Università degli Studi di Padova.

Lo studio consiste nel valutare lo stato di fatto attuale di due centrali, quella di Castelnovo Bariano e quella di Occhiobello, in modo da individuare le criticità esistenti e poter sviluppare un'analisi sui margini di efficienza disponibili.

Di fondamentale importanza sono stati i database resi accessibili da Polesine Acque, la quale, grazie ad un sistema di telecontrollo, monitora in tempo reale i parametri delle centrali. Dagli archivi sono stati quindi estrapolati i dati di portata e pressione per la durata temporale di quattro anni, ad intervalli di pochi minuti.

Risulta chiaro dunque che la situazione fotografata dallo stato di progetto è molto aderente alla situazione reale, in modo che il confronto con lo stato di progetto simulato possa fornire indici economici ed energetici quanto più attendibili possibile.

Dalla figura seguente si evince che uno dei principali ostacoli all'effettuazione di interventi volti all'efficienza energetica siano tempi lunghi di pay-back per i possibili progetti. Alla fine di questo studio si otterranno indici di pay-back per l'appunto molto vantaggiosi, del valore di 1,4 anni per la centrale di Castelnovo Bariano e di 2 anni per la centrale di Occhiobello.

Questa considerazione, unita ad un risparmio calcolato di energia del 35-50% e a valori di VAN e TIR estremamente convenienti, permetterà di scegliere per una concreta realizzazione dell'intervento [1].

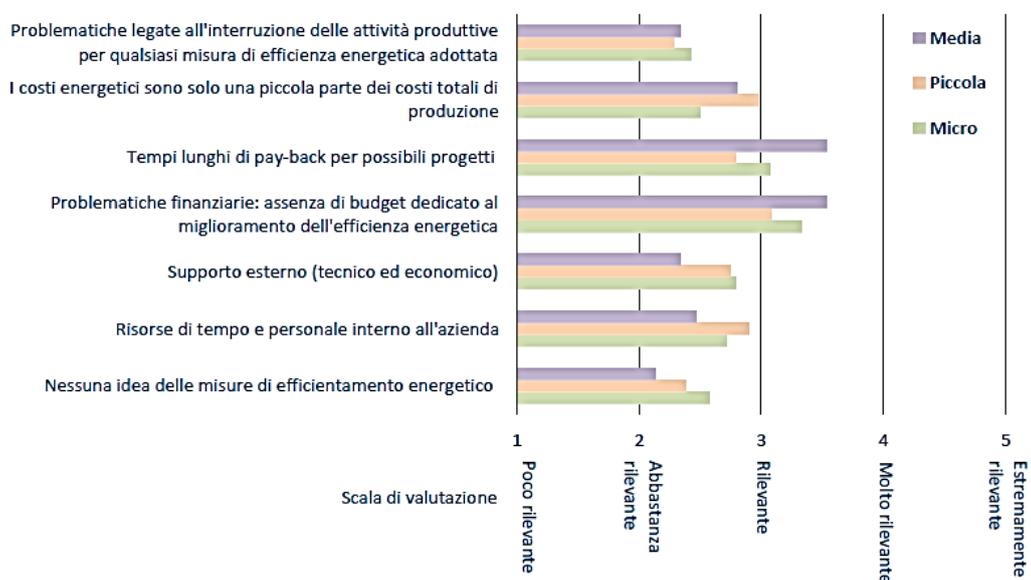


Figura 1. Principali ostacoli alla realizzazione di interventi volti all'efficienza energetica

Introduzione

La politica energetica ricopre un ruolo chiave nella realtà globale. Se da un lato la domanda di “energia primaria” è in continuo aumento (basti pensare ad esempio ai paesi in via di sviluppo che sono e saranno sempre più energivori) dall’altro lato gli evidenti effetti legati ai cambiamenti climatici impongono un utilizzo sostenibile delle risorse, le quali di per sé sono limitate e a volte economicamente sconvenienti.

Sicuramente le fonti rinnovabili o lo sviluppo di nuove tecnologie offrono un contributo sempre più significativo alla copertura della domanda di energia, ma negli ultimi anni si è assodata maggiormente l’idea di efficienza energetica come “first fuel”, ovvero come “primo combustibile”: aumentare il rendimento di una macchina o eliminare inefficienze da un processo permette di utilizzare minori quantitativi di materia prima. Evitare l’uso di combustibili fossili si traduce in minori emissioni di anidride carbonica e quindi un migliore impatto ambientale relativamente all’effetto serra.

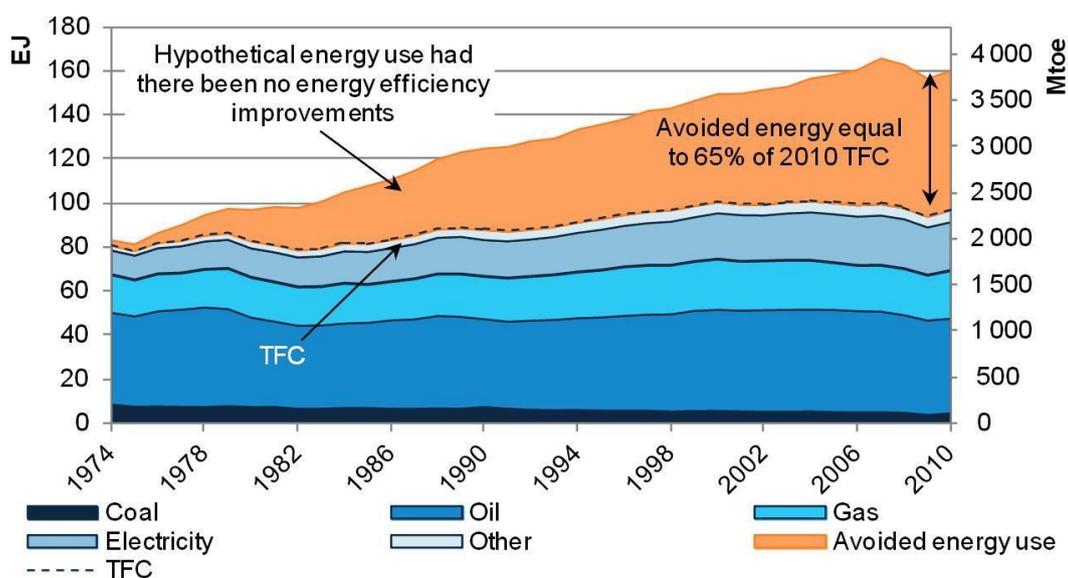


Figura 2. Efficienza energetica come “primo combustibile”

Questa immagine mostra l’uso di energia evitato da 11 paesi (Australia, Danimarca, Finlandia, Francia, Germania, Italia, Giappone, Olanda, Svezia, Regno Unito e USA) grazie alle misure di efficienza energetica attuate dal 1974 al 2010.

Se tali interventi non fossero stati realizzati, i consumatori di questi paesi consumerebbero – e quindi pagherebbero- circa due terzi di energia in più rispetto a quella attualmente in uso (TFC, ovvero Consumo Totale Finale).

Per questi motivi in passato si parlava di efficienza energetica come di un “combustibile nascosto”, ma oramai il suo notevole contributo al risparmio di energia primaria la qualifica addirittura come “primo combustibile”. È stato stimato un

potenziale teorico di riduzione dei consumi energetici industriali da qui al 2020 di 64 TWh [2].

Polesine Acque desidera esaltare questo concetto attraverso lo studio di due delle proprie dieci centrali di potabilizzazione, realizzando investimenti mirati a ridurre i consumi ed ottenere benefici sia dal punto di vista energetico, che dal punto di vista economico.

Le torri piezometriche, il simbolo più visibile e conosciuto degli acquedotti, rappresentano l'emblema della realizzazione che si vuole mettere in atto. In esse l'acqua viene pompata a diversi metri di altezza, in modo da avere l'energia sufficiente per raggiungere tutte le utenze e garantire il servizio idrico. Questo sistema tuttavia, richiede che il pompaggio dell'acqua venga eseguito fino alla sommità del serbatoio pensile, con notevole dispendio energetico, nonostante poi la pressione richiesta a valle non sia sempre la massima resa possibile dal salto idraulico. La maggior parte delle volte l'acqua viene quindi pompata inutilmente.

Il funzionamento delle pompe di rilancio in rete a regime variabile, mediante inverter, permette di eliminare il passaggio forzato dell'acqua attraverso il serbatoio pensile, con notevoli risparmi energetici ed economici. All'acqua viene infatti fornita esattamente l'energia necessaria richiesta dalla rete. Il confronto tra lo stato di fatto attuale e lo stato di progetto, che prevede appunto pompe dotate di inverter, permetterà di valutare la convenienza dell'investimento.

Primo step naturale di questa tesi sarà addentrarsi nella filiera delle due centrali per comprenderne il processo produttivo.

Normativa di riferimento

- Decreto legislativo 18 Aprile 2016, n. 50 Attuazione delle direttive 2014/23/UE, 2014/24/UE e 2014/25/UE sull'aggiudicazione dei contratti di concessione, sugli appalti pubblici e sulle procedure d'appalto degli enti erogatori nei settori dell'acqua, dell'energia, dei trasporti e dei servizi postali, nonché per il riordino della disciplina vigente in materia di contratti pubblici relativi a lavori, servizi e forniture
- D.P.R. 5 ottobre 2010, n. 207 Regolamento di esecuzione ed attuazione del decreto legislativo 12 aprile 2006, n. 163, recante «Codice dei contratti pubblici relativi a lavori, servizi e forniture in attuazione delle direttive 2004/17/CE e 2004/18/CE».
- Decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152 - Norme in materia ambientale.
- DECRETO MINISTERO DEI LAVORI PUBBLICI 12 DICEMBRE 1985 - NORME TECNICHE RELATIVE ALLE TUBAZIONI
- Codice dei beni culturali e del paesaggio di cui al decreto legislativo 22 gennaio 2004, n. 42
- DECRETO LEGISLATIVO 2 FEBBRAIO 2001 N. 31 - Attuazione della direttiva 98/83/CE relativa alla qualità delle acque destinate al consumo umano
- DECRETO 6 aprile 2004, n.174 - Regolamento concernente i materiali e gli oggetti che possono essere utilizzati negli impianti fissi di captazione, trattamento, adduzione e distribuzione delle acque destinate al consumo umano.
- REGIO DECRETO 11 dicembre 1933, n. 1775 G.U.R.I. 8 gennaio 1934, n. 5 Testo unico delle disposizioni di legge sulle acque e sugli impianti elettrici.
- R.D. 8 maggio 1904, n. 368 – Norme di polizia idraulica
- DM 24 novembre 1984 Norme di sicurezza antincendio per il trasporto, la distribuzione, l'accumulo e l'utilizzazione del gas naturale con densità non superiore a 0,8
- D.Min. Infrastrutture Min. Interni e Prot. Civile 14 Gennaio 2008 e allegate "Norme tecniche per le costruzioni".
- DECRETO 22 gennaio 2008, n. 37 - Regolamento concernente l'attuazione dell'articolo 11-quaterdecies, comma 13, lettera a) della legge n. 248 del 2 dicembre 2005, recante riordino delle disposizioni in materia di attività di installazione degli impianti all'interno degli edifici.
- Testo unico per la sicurezza D.lgs 81/08
- -Norme CEI

NORME REGIONE VENETO

- Dgr Veneto n. 842 del 15 maggio 2012 – Piano di tutela delle acque
- Deliberazione della Giunta Regionale n. 1955 del 23 dicembre 2015 - Revisione degli agglomerati, ai sensi della Direttiva 91/271/CEE, D.Lgs. 152/2006 e Piano di Tutela delle Acque.
- Dgr n. 2948 del 6 ottobre 2009 - Valutazione di compatibilità idraulica

Capitolo 1. Descrizione della filiera produttiva

1.1 Centrale di Castelnovo Bariano

La centrale in questione preleva acqua da pozzi golenali del fiume Po in località Castelnovo Bariano (RO) ed alimenta la rete acquedottistica della zona dell'ex Consorzio del "Polesine Superiore", comprendente i comuni di Bergantino, Calto, Castelmasa, Castelnovo Bariano, Ceneselli e Melara.

La filiera di trattamento per la produzione idropotabile prevede le seguenti fasi:

- pescaggio da n° 7 pozzi golenali e adduzione alla centrale in pressione tramite una tubazione in acciaio DN 350 mm;
- ossidazione con aria compressa all'interno di reattore cilindrico di diametro pari a 1,5 m ed altezza fasciame di 3 m;
- deferrizzazione mediante 4 filtri a sabbia in pressione cilindrici di diametro pari a 3,25 m ed altezza fasciame di 3,5 m, di cui 3 in esercizio;
- deammoniazione mediante 4 filtri a sabbia in pressione cilindrici di diametro pari a 3,25 m ed altezza fasciame di 3,35 m, di cui 2 in esercizio;
- dosaggio di ipoclorito di sodio, accumulo e rilancio;
- affinamento su filtri 4 GAC in pressione cilindrici di diametro pari a 3,25 m ed altezza fasciame di 3,5 m, di cui 2 in esercizio;
- disinfezione con biossido di cloro prima dell'accumulo in torre e distribuzione in rete.

Nel dettaglio, l'acqua proveniente dai pozzi di estrazione viene convogliata in un collettore unico che giunge in centrale:



Figura 3. Pozzi golenali sul fiume Po

L'acqua di pozzo viene estratta da sedimenti in cui staziona per molto tempo, perciò si rende necessario l'utilizzo di un ossigenatore, affinché l'acqua torni a livelli di Ossigeno adeguati.



Figura 4. Ossigenatore

A questo punto 4 potabilizzatori (3 funzionanti, in parallelo) rimuovono Ferro e Manganese e altri 4 potabilizzatori (di cui 2 funzionanti in parallelo) depurano dall'ammoniaca, per mezzo di batteri aerobici:



Figura 5. Potabilizzatore Ferro e Manganese

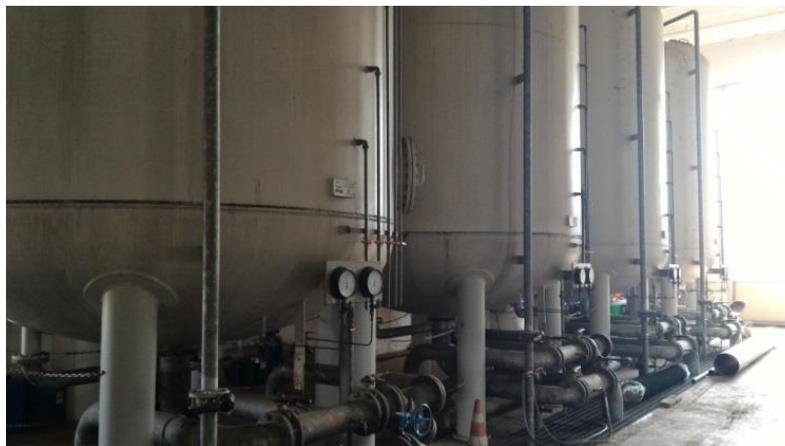


Figura 6. Potabilizzatore Ammoniaca

Ovviamente i filtri dei potabilizzatori devono essere periodicamente ripuliti. Tale operazione si esegue pompando prima aria e poi acqua controcorrente, in modo da eliminare le impurità raccolte durante il processo di filtrazione tramite un flusso contrario rispetto a quello di potabilizzazione.

L'acqua di scarico prodotta viene raccolta come rifiuto in una vasca esterna e poi pressata.

L'acqua trattata viene invece inviata ad una vasca di accumulo profonda 6,5 m. Generalmente negli impianti di potabilizzazione prima della vasca di accumulo è presente un sistema di carboni attivi (GAC ,Granular Activated Carbon), per rimuovere eventuali sostanze organiche. Nel caso specifico di questa centrale, i filtri a carboni attivi sono collocati tra la vasca di accumulo e il sollevamento finale, con lo svantaggio conseguente di dover lavorare in pressione.

Dalla vasca di accumulo l'acqua viene quindi pompata dapprima ai filtri a carboni attivi e, di seguito, ad un serbatoio pensile tramite con un sistema di 3 pompe centrifughe, di cui 2 in funzione in parallelo e la terza di riserva, oggetto di studio di questa tesi.



Figura 7. Elettropompe di rilancio in rete

Al piede del serbatoio pensile è presente un nodo idraulico che consente di by – passare lo stesso serbatoio in caso di necessità.



Figura 8. Nodo idraulico



Figura 9. Serbatoio pensile della centrale di Castelnuovo Bariano

L'acqua di ritorno dal pensile incontra una valvola Clayton che permette una strozzatura fino alle pressione di rete, $p_{rete} = 3,5$ bar.

Prima del trattamento a carboni attivi l'acqua viene addizionata di ipoclorito di sodio per limitare lo sviluppo dei batteri ivi presenti che costituiscono il processo depurativo. In seguito l'acqua deve anche essere disinfettata con biossido di cloro (gas prodotto in loco dalla reazione di acido cloridrico e clorito di sodio, tramite un reattore alimentato da due pompe volumetriche), che abbatta i residui organici.



Figura 10. Serbatoio Ipoclorito di Sodio



Figura 11. Pompe volumetriche di alimento del reattore di biossido di Cloro

Infine ci sono i controlli del quadro elettrico, con protezioni magnetotermiche, fusibili e differenziali.

Il sistema di telecontrollo inserito non è visualizzabile in loco, ma invia i propri dati alla centrale di Boara Polesine, dalla quale sono stati ricavati i dati necessari allo studio, sia per questo impianto sia per la seguente centrale di Occhiobello.

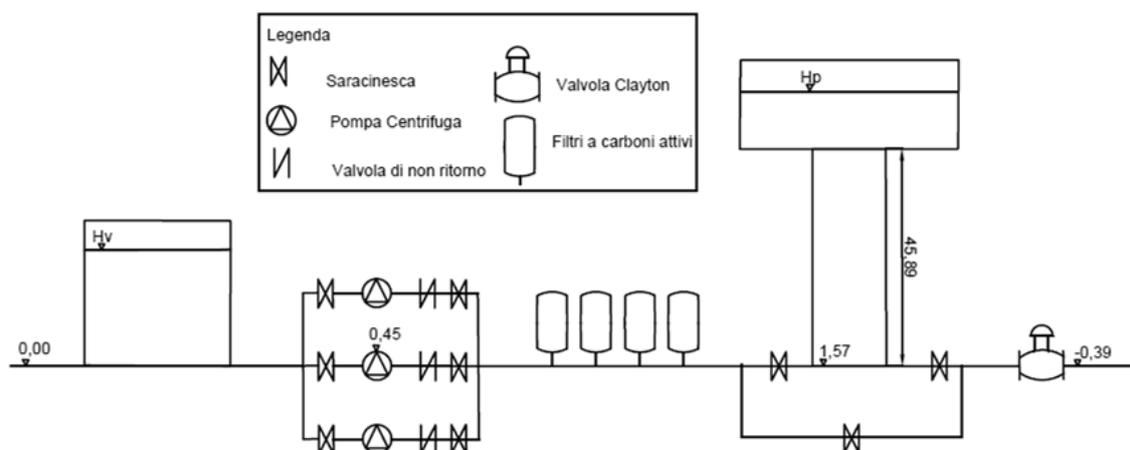


Figura 12. Schema semplificato della centrale di Castelnuovo Bariano

La figura 12 riporta uno schema semplificato della centrale di Castelnovo Bariano, nel quale è stato definito come livello zero il piano della vasca di accumulo. Riferendosi ad esso, le giranti delle pompe si trovano ad un'altezza di 0,45 m, il serbatoio pensile risulta sopraelevato di 1,57 m mentre la valvola Clayton è interrata 39 cm nel sottosuolo.

Oltre a questi valori costanti, vi sono delle quote variabili con l'orario e il giorno dell'anno e disponibili grazie al sistema di telecontrollo:

- Il livello della vasca di accumulo H_v ;
- Il livello del serbatoio pensile H_p , per il quale si considera uno spessore di 25 cm tra il fusto (45, 89 m) e la vasca. L'area del serbatoio pensile è di $254 m^2$.
- La pressione di rete p ;
- La portata in ingresso Q .

1.2 Centrale di Occhiobello

La centrale in questione preleva acqua da pozzi prelevanti da falda acquifera in sinistra arginale del fiume Po ad Occhiobello (RO) ed alimenta la rete acquedottistica della zona dell'ex Consorzio dell'Acquedotto di Fiesso Umbertino, comprendente i comuni di Fiesso Umbertino, Frassinelle, Canaro, Occhiobello, Pincara e Stienta.

La filiera di trattamento per la produzione idropotabile prevede le seguenti fasi:

- pescaggio da n° 7 pozzi e adduzione alla centrale in pressione tramite una tubazione in acciaio DN 300 mm;
- pre - ossidazione all'interno di una vasca seminterrata di dimensioni utili pari a 6,0 m X 5,0 m X 5,0 m (H), suddivisa all'interno in due setti, tramite un muro di sfioro; l'ossigenazione è fornita tramite una soffiante a lobi rotanti e un sistema di diffusione costituito da tubazioni forate in acciaio;
- prima ossidazione tramite ozono;
- filtrazione biologica eseguita su n° 4 filtri in pressione in acciaio di diametro pari a 3,0 metri ed altezza fasciame pari a 3,0 metri;
- seconda ossidazione tramite ozono;
- filtrazione a carboni attiva eseguita su n°2 filtri in pressione di diametro pari a 2,80 metri ed altezza fasciame di 3,5 metri;
- disinfezione con biossido di cloro;
- accumulo in vasca seminterrata;
- sollevamento al serbatoio pensile e distribuzione in rete.

In particolare dopo la raccolta dai 7 pozzi , stanti le caratteristiche dell'acqua grezza prelevata, è necessaria anche la fase fortemente ossidativa ottenuta tramite l'aggiunta di ozono, mediante la seguente apparecchiatura:



Figura 13. Apparecchiatura per l'aggiunta di Ozono

L'ozono è uno dei migliori ossidanti. Tra le altre cose arricchisce l'acqua in ossigeno, distrugge molecole organiche, innalza il potenziale di ossidoriduzione dell'acqua (un aspetto positivo, così è meno attaccabile da impurità), creando le condizioni per la precipitazione di alcuni metalli disciolti nell'acqua.

L'ozono viene aggiunto sia prima che l'acqua venga raccolta in una vasca "grezza" in cui viene decantata, sia tra il trattamento dei filtri a sabbia e i carboni attivi (BAC, Biological Active Carbon). Il pompaggio ai filtri prevede l'uso di 3 pompe. In seguito al trattamento BAC viene aggiunto ipoclorito di sodio (NaClO) e l'acqua giunge ad una vasca di accumulo dell'acqua potabile, da cui viene pompata al serbatoio pensile con l'ausilio delle 3 pompe oggetto dello studio:



Figura 14. Elettropompe di rilancio in rete



Figura 15. Serbatoio pensile della centrale di Occhiobello

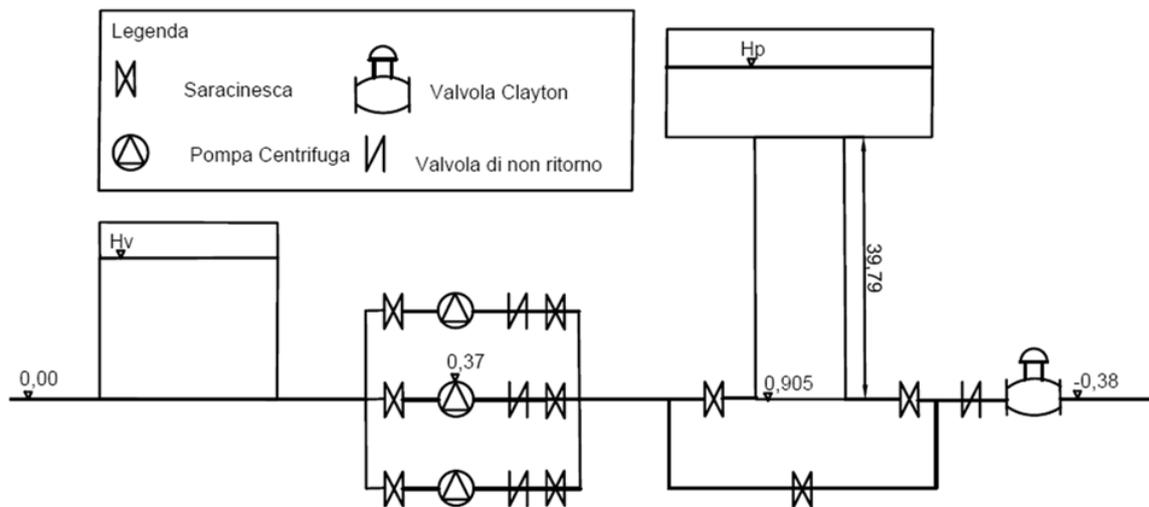


Figura 16. Schema semplificato della centrale di Occhiobello

Dallo schema semplificato in figura 16 si può notare la differenza sostanziale tra le due centrali descritte in questo capitolo: nella centrale di Occhiobello non sono presenti i filtri a carboni attivi tra la vasca di accumulo, il cui piano è sempre assunto come zero di riferimento, e il serbatoio pensile. Ciò semplifica notevolmente il calcolo delle perdite di carico, che sarebbero risultate maggiori se i GAC fossero stati in pressione come nella centrale di Castelnuovo Bariano.

Dal sistema di telecontrollo sono disponibili anche in questo caso il valore della portata Q e della pressione p di immissione in rete, il livello della vasca di accumulo H_v e il livello del serbatoio pensile H_p , il quale è comprensivo anche dell'altezza del fusto.

L'area del serbatoio pensile è pari a 94 m^2 .

1.3 Impianto elettrico

L'alimentazione elettrica di entrambe le centrali è garantita tramite una fornitura in media tensione a 20.000 V all'interno di una sezione di ricezione posta nell'area del potabilizzatore, dotata delle protezioni richieste dalla normativa CEI 0 - 16.

A valle di ciascun comparto la linea alimenta le cabine di trasformazione di potenzialità pari a 630 kVA per quanto riguarda la centrale di Castelnovo Bariano e di 400 kVA per la centrale di Occhiobello.

La potenza contrattualmente impegnata con L'ENEL è pari a 225 kW per l'impianto di Castelnovo Bariano, mentre per la centrale di Occhiobello è pari a 308 kW. I consumi degli ultimi 4 anni, sia in termini di energia utilizzata [kWh] sia di metri cubi sollevati [m^3], sono riassunti nella seguente tabella per entrambe le centrali:

	Castelnovo Bariano			Occhiobello		
	kWh	m ³	kWh/m ³	kWh	m ³	kWh/m ³
2012	847.896,00	1.424.089,00	0,60	1.342.538,00	1.808.310,00	0,74
2013	850.948,00	1.409.580,00	0,60	1.808.310,00	1.985.900,00	0,91
2014	761.407,00	1.400.971,00	0,54	1.422.668,00	1.992.000,00	0,71
2015	781.551,00	1.353.622,00	0,58	1.417.667,00	1.936.000,00	0,73

I dati riassunti in tabella vengono esposti nei seguenti grafici:

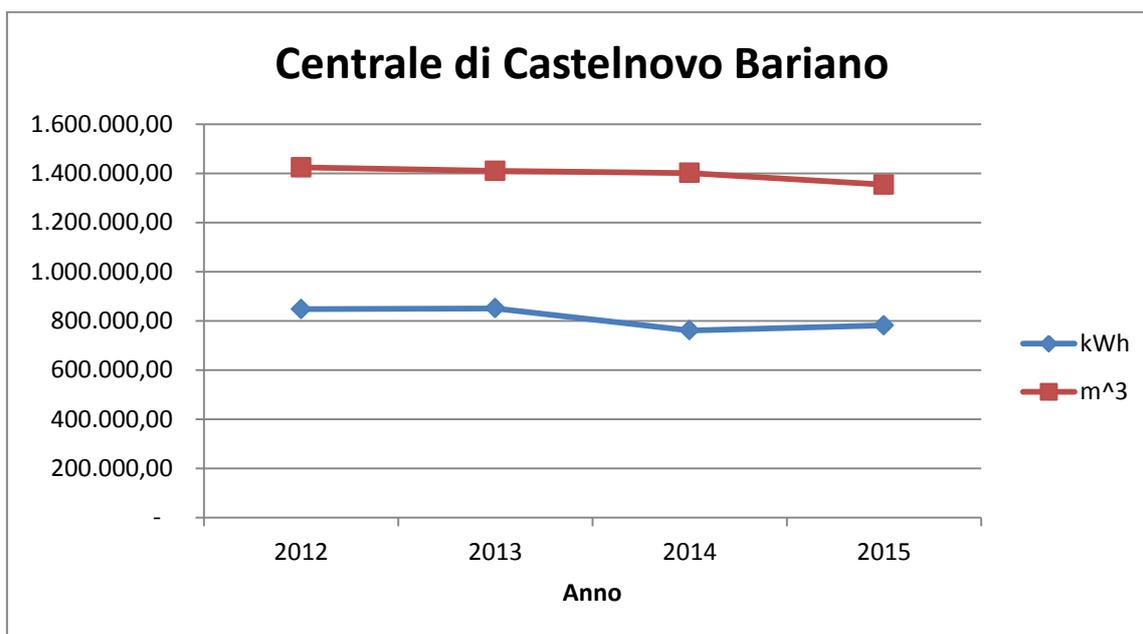


Figura 17. Consumo elettrico e metri cubi sollevati della centrale di Castelnuovo Bariano

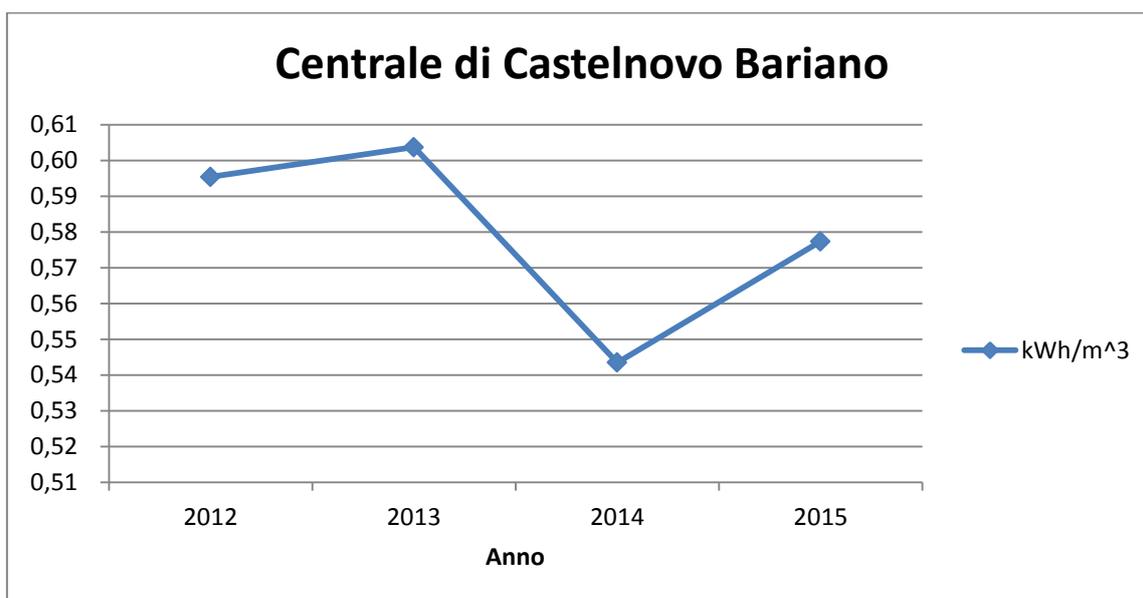


Figura 18. Chilowattora per metro cubo sollevato per la centrale di Castelnuovo Bariano

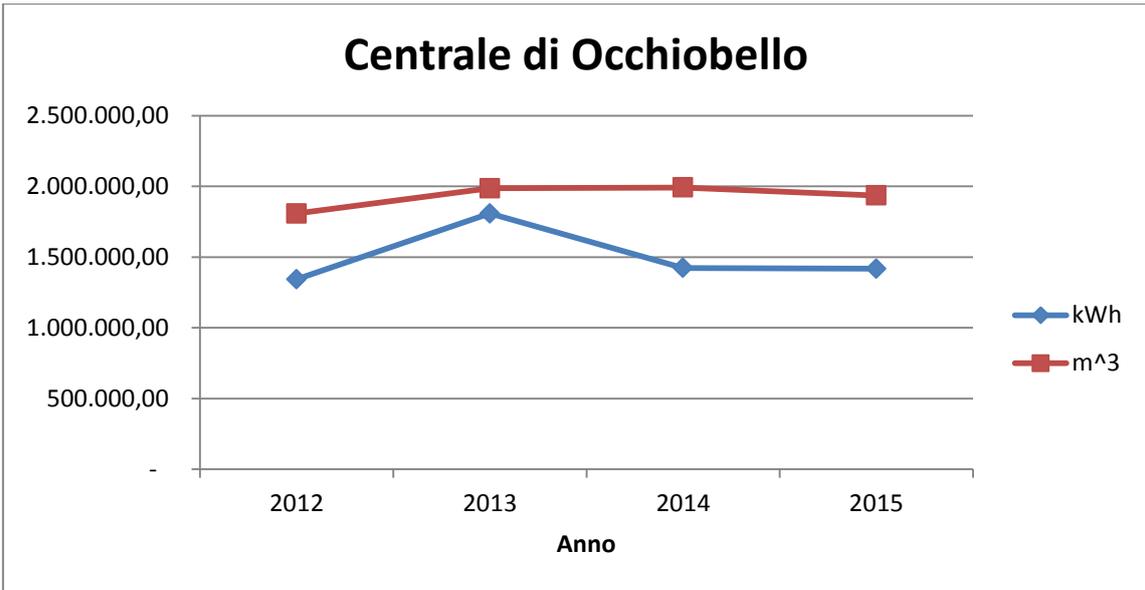


Figura 19. Consumo elettrico e metri cubi sollevati della centrale di Occhiobello

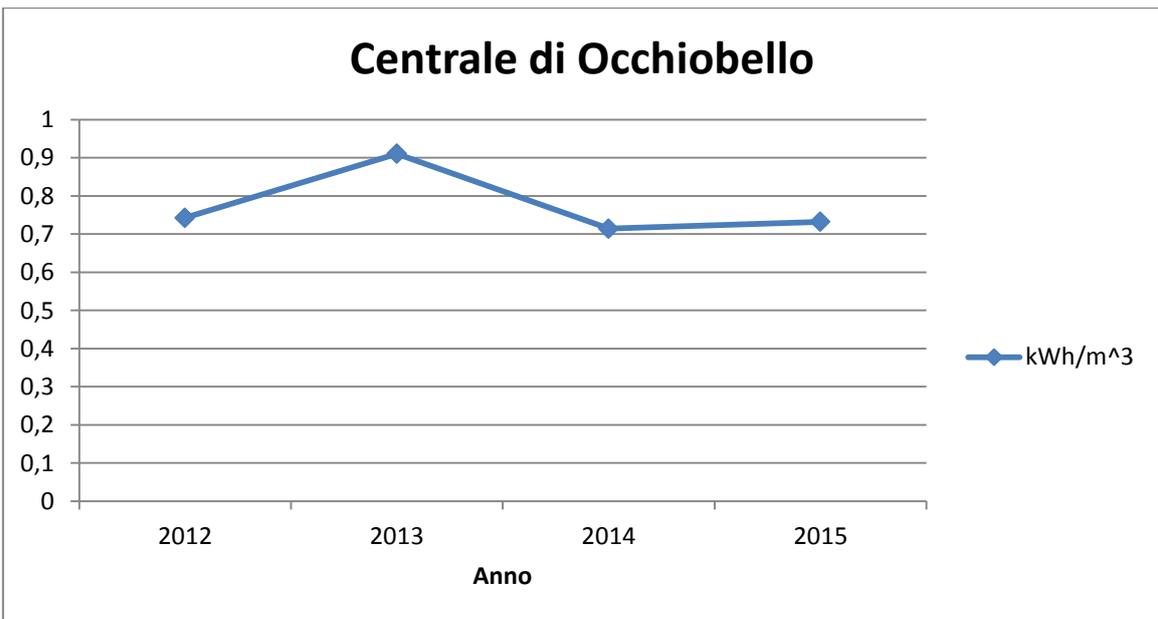


Figura 20. Chilowattora per metro cubo sollevato per la centrale di Occhiobello

1.4 Avviamento

A seconda delle caratteristiche di un motore e di un carico vengono utilizzati diversi metodi di avviamento, la cui scelta sarà dettata non solo da esigenze elettriche, ma anche meccaniche ed economiche [14].

Ad esempio l'impiego di motori ad avviamento diretto non è consentito al di sopra di una certa potenza, in quanto uno spunto di corrente sulla rete troppo elevato provocherebbe una caduta di tensione capace di condizionare il funzionamento dei carichi.

Il tipo di avviamento diretto è il metodo più semplice, nel quale lo statore viene direttamente collegato alla rete e il motore si avvia sulle sue caratteristiche naturali.

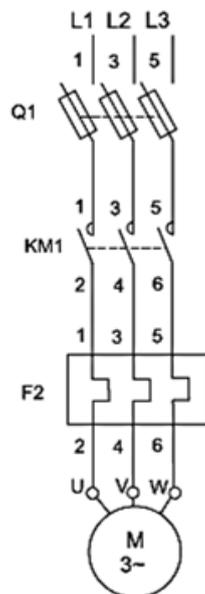


Figura 21. Avviamento diretto

Quando viene messo sotto tensione il motore si comporta come un trasformatore nel quale il secondario è cortocircuitato. All'elevata corrente indotta nel rotore corrisponde un picco di corrente sulla rete. Infatti la corrente di avviamento risulta essere dalle cinque alle otto volte maggiore di quella nominale. Anche la coppia all'avviamento è elevata, aspetto che si somma agli evidenti vantaggi dell'avviamento rapido, della semplicità dell'apparecchiatura e del prezzo accessibile. Tuttavia l'avviamento diretto conviene solamente se:

- La potenza del motore non è troppo elevata nei confronti della potenza della rete, per evitare disturbi dovuti allo spunto di corrente;
- L'avviamento della macchina azionata non è troppo brusco;
- L'elevata coppia iniziale non incide sul carico o sul funzionamento della macchina.

Inserendo alcune resistenze in serie con gli avvolgimenti è possibile avviare il motore a tensione ridotta. Questo principio prende il nome di avviamento statorico a resistenza e prevede l'uso di un temporizzatore, perché quando la velocità si stabilizza, si scollegano le resistenze e il motore è direttamente collegato sulla rete.

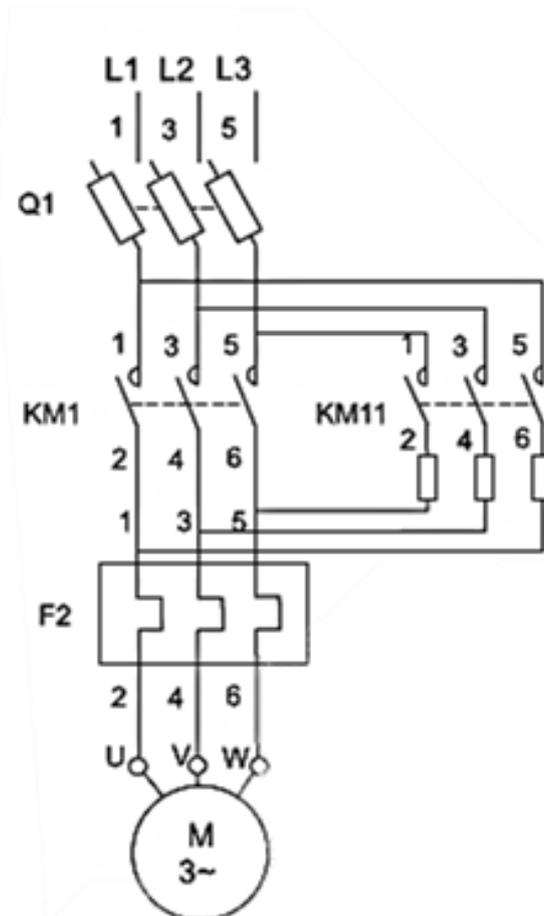


Figura 22. Avviamento statorico a resistenza

Esistono dei valori convenzionali di corrente $I_d = 4.5 * I_n$ e di coppia all'avviamento $C_d = 0.75 * C_n$, molto importanti per calcolare il valore della resistenza in modo tale da non superare il picco di corrente desiderato o il valore minimo della coppia di avviamento necessario.

Durante la fase di accelerazione con le resistenze, la tensione applicata ai morsetti del motore non è costante, ma è pari alla tensione della rete meno la caduta di tensione nella resistenza di avviamento. A sua volta la caduta di tensione è proporzionale alla corrente assorbita dal motore. Ne segue che, mentre il motore accelera, la corrente diminuisce, così come la caduta di tensione sulla resistenza. La tensione applicata ai morsetti del motore è dunque minima all'avviamento, per poi aumentare progressivamente.

Questa tipologia di avviamento è particolarmente adatta per macchine con coppia resistente crescente con la velocità, poiché la coppia aumenta più rapidamente rispetto ad un avviamento stella-triangolo, nel quale durante l'accoppiamento a stella la tensione resta fissa.

Tuttavia presenta lo svantaggio di un picco di corrente relativamente elevato in avviamento, il quale potrebbe essere ridotto con una resistenza maggiore se ciò non comportasse un'inevitabile diminuzione della coppia di avviamento.

L'eliminazione della resistenza a fine avviamento avviene però senza l'interruzione dell'alimentazione del motore, perciò non insorgono fastidiosi transitori.

La tipologia di avviamento appena descritta non richiede di modificare il collegamento degli avvolgimenti del motore, come invece si rende necessario per il tipo di avviamento stella-triangolo che caratterizza le due centrali in oggetto di questa tesi. Quest'ultimo può essere utilizzato solamente con un motore avente le estremità di ciascuno dei tre avvolgimenti dello statore sulla morsettiera e deve essere realizzato in modo che la tensione di triangolo corrisponda a quella della rete. Nel nostro caso per la rete trifase a 380 V, il motore deve essere bobinato a 380 V triangolo e 660 V stella.

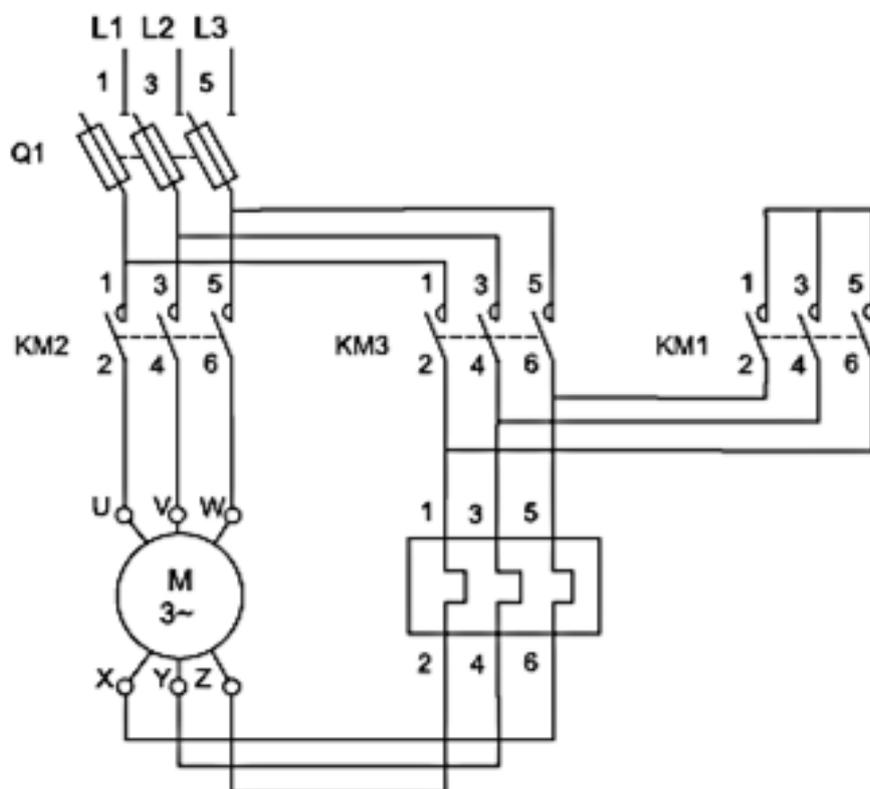


Figura 23. Avvolgimento stella-triangolo

Il principio consiste nell'avviare il motore collegando gli avvolgimenti a stella alla tensione di rete, cioè dividendo la tensione nominale del motore a stella per $\sqrt{3}$, in modo che la corrente di picco all'avviamento risulti divisa per tre. Infatti un motore 380 V / 660 V accoppiato a stella alla sua tensione nominale 660 V assorbe una corrente $\sqrt{3}$ volte inferiore del collegamento a triangolo 380 V. Poi la corrente viene divisa nuovamente per $\sqrt{3}$ perché il collegamento a stella viene effettuato a 380 V.

Anche la coppia all'avviamento viene divisa per tre, perché è proporzionale al quadrato della tensione di alimentazione.

Quando la velocità del motore si stabilizza, solitamente tra il 75 e l'85 % della velocità nominale, il passaggio dal collegamento stella al collegamento triangolo è già avvenuto e il motore raggiunge le sue naturali caratteristiche. Il passaggio stella-triangolo, comandato da un temporizzatore, è caratterizzato da un picco transitorio di corrente molto breve, ma di elevata intensità, dovuto alla forza controelettrica del motore. L'impiego di accorgimenti mirati a contenere il picco di corrente comporta l'installazione di componenti aggiuntivi che possono far lievitare sensibilmente il costo dell'impianto.

Le tre tipologie finora illustrate (avviamento diretto, statorico a resistenza e stella-triangolo) prevedono l'avviamento alla frequenza fissa di 50 Hz.

L'avviamento/rallentamento con soft starter, sistema relativamente recente rispetto ai sistemi di avviamento tradizionali, risulta graduale grazie alla variazione progressiva della frequenza.

Sono possibili due tipi di controllo: il controllo a limitazione di corrente permette di fissare una corrente massima in avviamento a scapito delle prestazioni di coppia (sistema adatto a pompe centrifughe e ventilatori), mentre il controllo a regolazione di coppia consente di ottimizzare le prestazioni in avviamento della coppia, anziché lo spunto di corrente sulla rete.

I soft starter, una volta terminato l'avviamento, alimentano il motore alla frequenza fissa di 50 Hz o vengono addirittura bypassati. I convertitori di frequenza invece sono componenti in grado di variare appunto la frequenza non solo nelle fasi di avvio-arresto, ma anche durante tutto il tempo di funzionamento del motore.

Questa soluzione, applicabile a tutti i tipi di macchina, viene contestualmente utilizzata sia per la regolazione della velocità sia per l'avviamento.

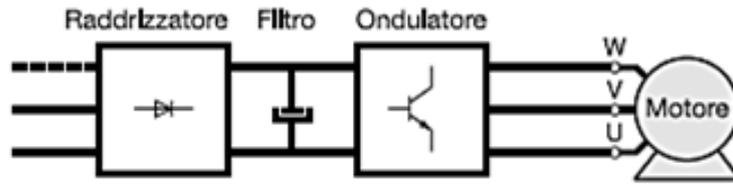


Figura 24. Schema di principio di un convertitore di frequenza

Munire le elettropompe di inverter non risulta quindi solamente la modalità con cui regolare la velocità delle macchine stesse, ma consente, fra l'altro i seguenti vantaggi [15]:

- Velocità e portata delle pompe possono essere regolate (generalmente vi è comunque un limite sotto i 30 Hz) permettendo una scelta più ampia di soluzioni progettuali;
- Con avvii ed arresti graduali i componenti meccanici, idraulici ed elettrici sono meno sollecitati;
- I risparmi energetici risultano significativi in primo luogo perché la pompa soddisfa le effettive richieste del sistema. Inoltre il $\cos\phi$ del sistema si assesta attorno al valore di 0,98 rendendo superflui i condensatori di rifasamento;
- Le protezioni elettroniche presenti nei convertitori consentono una efficace e completa protezione della pompa;
- Gli spunti di avviamento non costituiscono più un problema. È quindi possibile evitare il sovradimensionamento dei componenti elettrici ed eventuali gruppi elettrogeni di soccorso.

Per contro gli inverter sono apparecchiature molto più costose rispetto ad esempio ai soft starter, nonostante il prezzo sia calato rispetto al passato. Ai problemi di compatibilità elettromagnetica si somma il fatto che sono componenti delicati, nel senso che l'elettronica di potenza è sensibile alle caratteristiche ambientali, come polvere ed umidità. Infine richiedono che l'installazione sia eseguita correttamente ed in prossimità del motore.

Capitolo 2. Stato di fatto e criticità

2.1 Caratteristiche del sistema di pompaggio idraulico

Nelle due centrali oggetto di questo studio, l'obiettivo attuale del sistema idraulico è quello di trasferire l'acqua trattata dalla vasca di accumulo al serbatoio pensile, in modo che essa abbia l'energia necessaria per soddisfare le richieste delle utenze. Per mantenere l'acqua in circolazione è necessario fornire al fluido una determinata pressione, per mezzo di elettropompe. Essa oltre a sopperire alla differenza geodetica tra il livello della vasca e il livello del pensile, dovrà anche vincere le inevitabili perdite lungo le condotte.

La differenza di altezza, detta prevalenza statica, è indipendente dalla portata, mentre le perdite dinamiche, sono proporzionali al quadrato della portata. Esse si dividono in perdite distribuite e concentrate, come si vedrà in seguito.

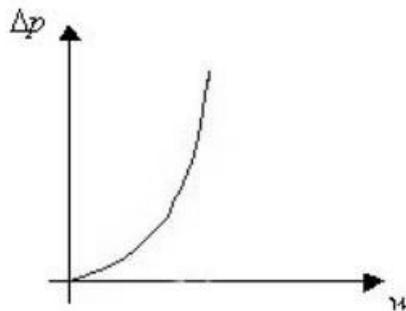


Figura 25. Curva di un impianto con sole perdite dinamiche

La figura 25 mostra come le perdite di carico, rappresentate nell'asse delle ordinate, aumentino al crescere della portata, crescente lungo l'asse x.

La maggior parte dei sistemi è data da una combinazione di prevalenza statica e dinamica. Nel caso delle centrali di Castelnovo Bariano e Occhiobello si tratta di sistemi che attualmente presentano un'elevata prevalenza statica, in quanto l'acqua deve essere pompata fino alla sommità del serbatoio pensile prima di essere inviata alle utenze. Una volta eseguiti gli interventi di efficientamento però, grazie agli inverter, le pompe a regime variabile forniranno la pressione richiesta dalla rete senza dover vincere la prevalenza statica della torre piezometrica, rendendo rilevante la prevalenza dinamica del sistema. Allo stato attuale quindi le perdite di carico del sistema saranno rappresentate come nelle figura 26 di sinistra, mentre una volta inseriti gli inverter la curva di sistema assumerà una forma molto più simile alla figura 26 di destra:

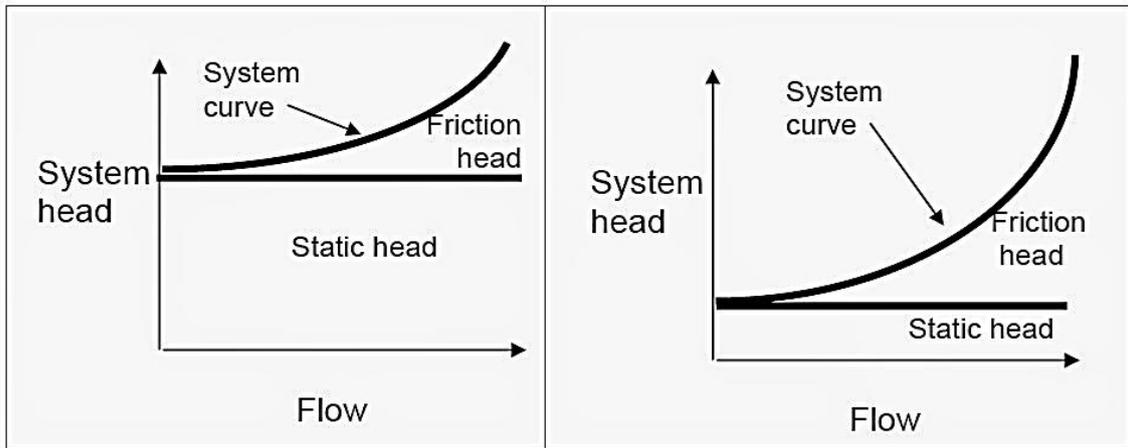


Figura 26. Confronto tra prevalenza statica e dinamica

Anche le prestazioni di una pompa centrifuga possono essere rappresentate in un grafico prevalenza-portata:

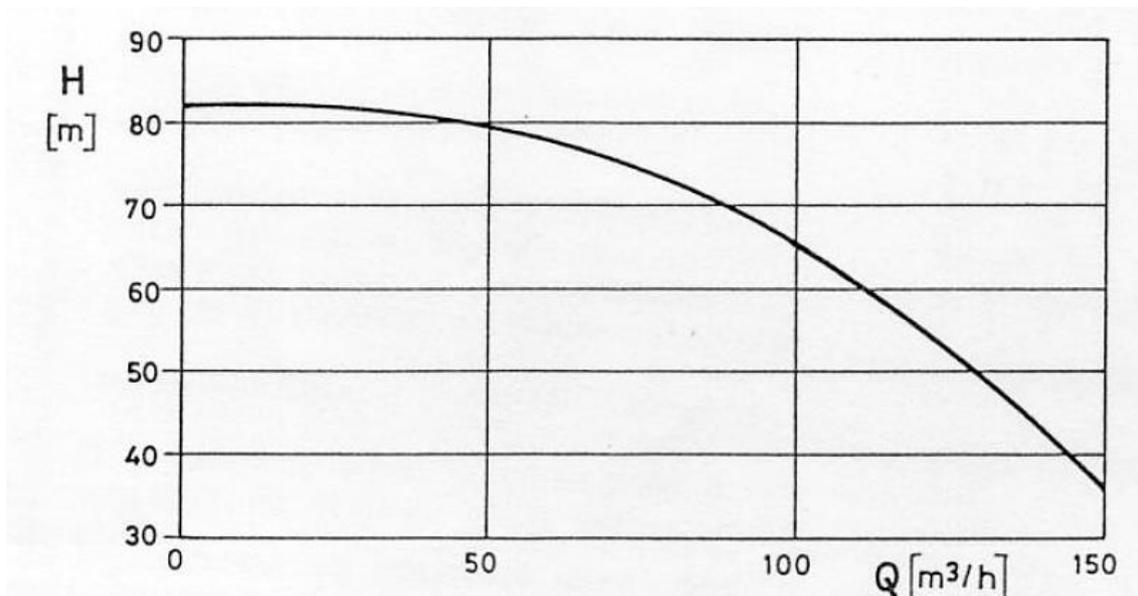


Figura 27. Curva caratteristica di una pompa

Il punto operativo è il punto nel quale le due curve si intersecano:

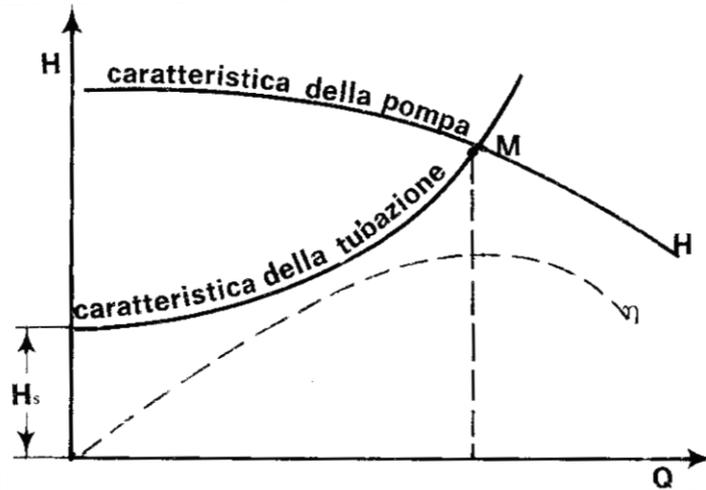


Figura 28. Punto operativo

Se la curva del sistema reale differisce da quella che è stata calcolata, la pompa opera a portata e prevalenza diverse da quelle attese. Per questo motivo è molto importante eseguire una stima quanto più esatta possibile delle perdite di carico del sistema. La pompa infatti va scelta in modo che il punto operativo sia nella zona di massimo rendimento.

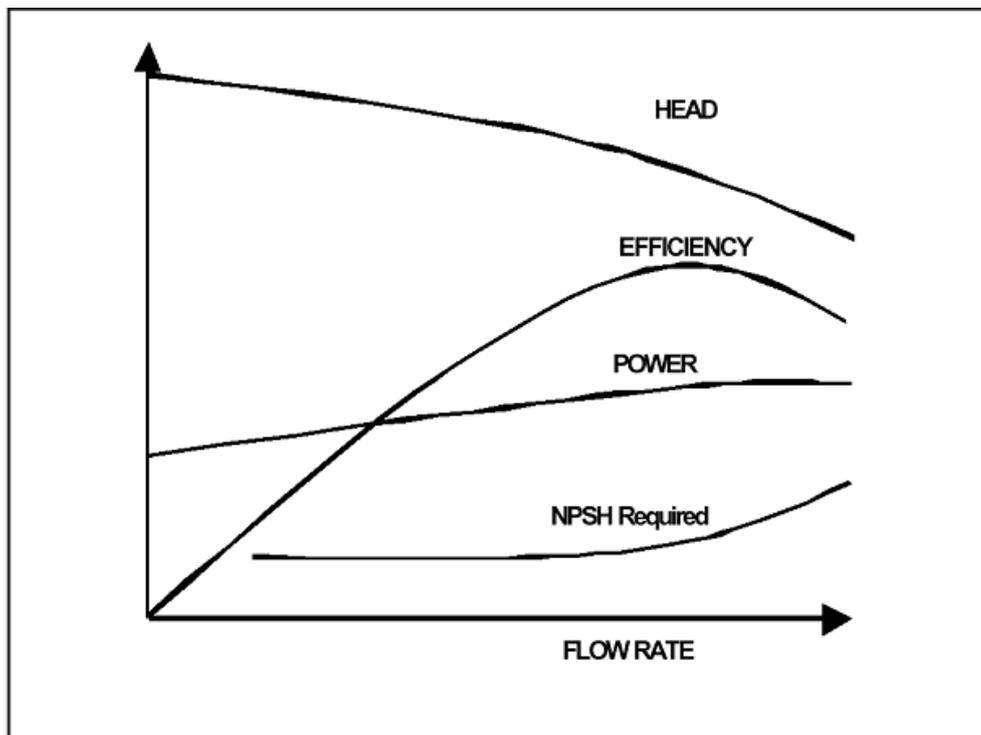


Figura 29. Esempio di curve delle prestazioni di una pompa.

Nel progetto di un sistema di pompaggio i requisiti di portata e pressione devono essere ben definiti, poiché questi valori indirizzano la scelta della pompa e il modo in cui essa viene controllata.

L'utilizzo di pompe a regime variabile non è motivato solamente dall'esigenza di regolare la pressione in uscita alla rete, ma anche dall'opportunità di ottenere benefici economici, principalmente legati a risparmi energetici e di manutenzione. Comporta inoltre un aumento dell'affidabilità del sistema, la riduzione di transitori idraulici, un migliore controllo delle operazioni di pompaggio e, come riportato nel capitolo 1, un fase di avviamento meno critica.

Tuttavia, nei sistemi in cui domina la prevalenza statica l'efficienza delle pompe varia con la velocità, per cui non è detto che si riesca a perseguire un risparmio energetico e vi sono alcuni potenziali problemi da non ignorare, nei confronti dei quali anzi è bene cautelarsi. Essi verranno esposti in seguito.

In un sistema di pompaggio i costi operativi vanno quindi stimati correttamente e i potenziali risparmi energetici vanno identificati considerando che tutti i componenti siano interdipendenti.

Non sempre l'installazione di pompe a regime variabile raggiunge l'obiettivo di minimo costo del ciclo di vita. In particolare per sistemi in cui la prevalenza statica è dominante rispetto a quella dinamica risulta vantaggioso l'utilizzo di sistemi on-off. Nel caso preso in esame tuttavia, una volta che le pompe saranno munite di inverter, l'acqua non verrà più pompata al pensile. Questo fa sì che nel sistema abbia un peso relativo maggiore la prevalenza dinamica, rendendo certamente proficuo l'intervento stabilito. In ogni caso i sistemi citati sono da preferire all'impiego di valvole di strozzamento, presenti sia a Castelnovo Bariano che ad Occhiobello.

2.2 Pompe in parallelo

Un altro metodo efficiente di controllo, particolarmente usato laddove la prevalenza statica è in grande proporzione rispetto al totale, consiste nell'installare due o più pompe in parallelo. La portata richiesta si soddisfa così accendendo o spegnendo le pompe, secondo necessità.

La curva totale, ottenuta sommando le portate ad una specifica prevalenza, è una combinazione delle singole curve come mostrato nella figura seguente:

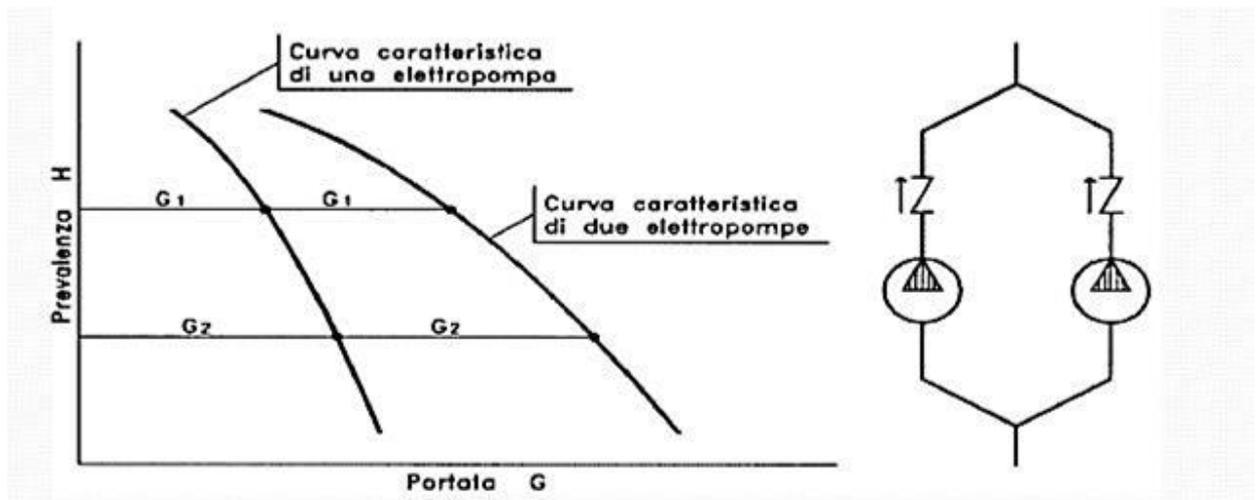


Figura 30. Tipica curva di due pompe in parallelo.

Nel caso in cui le pompe in parallelo siano più di due (in questo studio a volte sono tre) la curva tipica sarà sempre data dalla somma delle singole curve. Tutte le pompe funzionano alla pressione che corrisponde al punto di intersezione tra la curva combinata e la curva del sistema.

Il sistema di controllo in uso nelle centrali di Castelnuovo Bariano e Occhiobello prevede che il flusso sia regolato accendendo o spegnendo le pompe. Il serbatoio pensile provvede a rendere il flusso costante, mentre a valle del pensile una idrovalvola (Clayton) riduce la pressione fino al valore desiderato.

2.3 Concetti per la stima dei risparmi energetici in un sistema di pompaggio

Per calcolare i costi di pompaggio attuali risulta comodo utilizzare l'energia specifica E_s , espressa in $\frac{kWh}{m^3}$, ovvero i kilowattora per metro cubo sollevato. Questo parametro è utile per confrontare differenti soluzioni o diversi sistemi.

Per prima cosa, l'energia specifica deve essere calcolata in funzione della portata. Infatti:

$$E_s = \frac{\text{Energia Usata}}{\text{Volume Pompato}}$$

$$E_s = \frac{P_{in} * T}{V} = \frac{P_{in}}{Q}$$

in cui P_{in} è la Potenza assorbita dalla pompa.

Per ricavare l'energia annua, si utilizza la formula:

$$E_a = \rho * g * Q * \Delta H * T / \eta$$

In cui:

- $\Delta H = \frac{1}{\rho * g} (p_1 - p_0)$ indica la prevalenza sollevata in totale dalle pompe in funzione;
- T è il tempo di funzionamento annuale delle pompe, ricavabile dallo stato delle pompe ;
- ρ è la densità dell'acqua, assunta pari a $1000 \frac{Kg}{m^3}$;
- g è l'accelerazione di gravità, pari a $9,81 \frac{m}{s^2}$;
- Q è la portata, espressa in $\frac{m^3}{s}$;
- il rendimento delle pompe η è considerato costante e pari a 0,52.

Grazie al sistema di telecontrollo sono disponibili:

- Il valore della portata Q [l/s];
- Il valore della pressione della rete p_r [bar];
- Il livello dell'acqua nel serbatoio pensile, h_p [m];
- Il livello dell'acqua nella vasca di accumulo, h_v [m].

I valori vengono acquisiti direttamente dagli strumenti di misura posti in campo e vengono registrati nelle memorie fisse dei PC presenti sull'impianto.

In particolare per il presente studio sono stati utilizzati i dati di portata e di pressione riscontrati sulle tre linee in uscita dal nodo della centrale e rilevati dai tre misuratori elettromagnetici e dai tre trasduttori di pressione ivi installati. I valori sono stati rilevati ad intervalli di un secondo e registrati con il valore medio calcolato ogni minuto.

Il periodo di osservazione va dal 6 luglio 2012 al 6 luglio 2016. Si tratta quindi di un volume di dati notevole, i cui tabulati non sono allegati alla presente relazione ma sono disponibili presso i PC della centrale e il server aziendale.

Un estratto di tali dati viene presentato nelle seguenti tabelle, riportando sempre lo stesso intervallo di 3 ore (dalle 09:35 alle 12:35 del 6 luglio 2012).

Timestamp	Data	Ora	Hv [m]	Hp [m]	Q [l/s]	p [bar]
1341567300	06/07/2012	09:35	5,86	2,55	63,98	3.42
1341567600	06/07/2012	09:40	5,83	2,56	63,98	3.43
1341567900	06/07/2012	09:45	5,79	2,58	63,9	3.38
1341568200	06/07/2012	09:50	5,76	2,59	63,73	3.30
1341568500	06/07/2012	09:55	5,73	2,6	63,69	3.41
1341568800	06/07/2012	10:00	5,7	2,62	63,69	3.30
1341569100	06/07/2012	10:05	5,67	2,64	63,6	3.36
1341569400	06/07/2012	10:10	5,64	2,65	63,56	3.34
1341569700	06/07/2012	10:15	5,61	2,66	63,47	3.37
1341570000	06/07/2012	10:20	5,58	2,68	63,39	3.39
1341570300	06/07/2012	10:25	5,55	2,69	63,31	3.41
1341570600	06/07/2012	10:30	5,52	2,71	63,26	3.32
1341570900	06/07/2012	10:35	5,49	2,73	63,18	3.36
1341571200	06/07/2012	10:40	5,46	2,75	63,14	3.32
1341571500	06/07/2012	10:45	5,43	2,76	63,05	3.34
1341571800	06/07/2012	10:50	5,41	2,78	63,01	3.39
1341572100	06/07/2012	10:55	5,38	2,79	63,01	3.29
1341572400	06/07/2012	11:00	5,56	2,76	63,01	3.44
1341572700	06/07/2012	11:05	5,89	2,69	63,01	3.39
1341573000	06/07/2012	11:10	6,22	2,63	63,01	3.42
1341573300	06/07/2012	11:15	6,54	2,56	62,24	3.33
1341573600	06/07/2012	11:20	6,68	2,51	64,88	3.36
1341573900	06/07/2012	11:25	6,49	2,51	64,83	3.32
1341574200	06/07/2012	11:30	6,23	2,53	64,45	3.30
1341574500	06/07/2012	11:35	6	2,55	64,11	3.34
1341574800	06/07/2012	11:40	5,9	2,56	63,98	3.37
1341575100	06/07/2012	11:45	5,86	2,58	63,98	3.35
1341575400	06/07/2012	11:50	5,83	2,6	63,9	3.37
1341575700	06/07/2012	11:55	5,8	2,61	63,9	3.34
1341576000	06/07/2012	12:00	5,77	2,62	63,86	3.33
1341576300	06/07/2012	12:05	5,74	2,64	63,86	3.46
1341576600	06/07/2012	12:10	5,71	2,65	63,73	3.34
1341576900	06/07/2012	12:15	5,68	2,67	63,73	3.42
1341577200	06/07/2012	12:20	5,65	2,69	63,64	3.33
1341577500	06/07/2012	12:25	5,62	2,71	63,6	3.35
1341577800	06/07/2012	12:30	5,59	2,72	63,56	3.35
1341578100	06/07/2012	12:35	5,56	2,74	63,39	3.36

Tabella dati 1. Valori monitorati con il sistema di telecontrollo, Castelnuovo Bariano

Timestamp	Data	Ora	Hv [m]	Hp [m]	Q [l/s]	p [bar]
1341567300	06/07/2012	09:35	3,22	41,34	69,51	2,52
1341567600	06/07/2012	09:40	3,16	41,36	68,59	2,51
1341567900	06/07/2012	09:45	3,19	41,39	65,43	2,52
1341568200	06/07/2012	09:50	3,23	41,39	68,36	2,51
1341568500	06/07/2012	09:55	3,26	41,42	65,93	2,53
1341568800	06/07/2012	10:00	3,3	41,45	65,25	2,52
1341569100	06/07/2012	10:05	3,34	41,47	65,11	2,53
1341569400	06/07/2012	10:10	3,37	41,49	64,15	2,53
1341569700	06/07/2012	10:15	3,41	41,52	64,06	2,53
1341570000	06/07/2012	10:20	3,44	41,53	65,66	2,53
1341570300	06/07/2012	10:25	3,48	41,55	65,29	2,53
1341570600	06/07/2012	10:30	3,51	41,57	65,06	2,53
1341570900	06/07/2012	10:35	3,55	41,6	64,56	2,53
1341571200	06/07/2012	10:40	3,58	41,63	64,24	2,54
1341571500	06/07/2012	10:45	3,58	41,65	65,11	2,54
1341571800	06/07/2012	10:50	3,46	41,67	64,84	2,54
1341572100	06/07/2012	10:55	3,32	41,71	63	2,54
1341572400	06/07/2012	11:00	3,18	41,72	64,7	2,54
1341572700	06/07/2012	11:05	3,17	41,75	63,42	2,54
1341573000	06/07/2012	11:10	3,21	41,75	65,66	2,53
1341573300	06/07/2012	11:15	3,25	41,77	66,35	2,53
1341573600	06/07/2012	11:20	3,29	41,78	66,16	2,53
1341573900	06/07/2012	11:25	3,33	41,81	66,12	2,53
1341574200	06/07/2012	11:30	3,37	41,84	64,7	2,54
1341574500	06/07/2012	11:35	3,41	41,88	62,82	2,55
1341574800	06/07/2012	11:40	3,45	41,9	63,51	2,55
1341575100	06/07/2012	11:45	3,49	41,92	64,06	2,54
1341575400	06/07/2012	11:50	3,53	41,92	65,93	2,53
1341575700	06/07/2012	11:55	3,57	41,95	65,06	2,54
1341576000	06/07/2012	12:00	3,6	41,98	64,15	2,54
1341576300	06/07/2012	12:05	3,49	41,99	65,52	2,53
1341576600	06/07/2012	12:10	3,4	41,93	64,84	2,55
1341576900	06/07/2012	12:15	3,34	41,83	65,48	2,53
1341577200	06/07/2012	12:20	3,27	41,73	65,8	2,53
1341577500	06/07/2012	12:25	3,21	41,64	64,24	2,53
1341577800	06/07/2012	12:30	3,24	41,55	63,46	2,53
1341578100	06/07/2012	12:35	3,35	41,46	63,69	2,54

Tabella dati 2. Valori monitorati con il sistema di telecontrollo, Occhiobello

I valori di p_1 e p_0 , ovvero le pressioni rispettivamente a valle e a monte delle elettropompe di rilancio in rete, non sono direttamente disponibili e vanno perciò ricavati. In particolare la prevalenza h_0 a monte delle pompe si ottiene sottraendo al livello dell'acqua nella vasca di accumulo le perdite di carico che inevitabilmente incorrono nel percorso vasca-pompa.

Sempre eseguendo il calcolo delle perdite di carico, ma in questo secondo caso sommandole alla prevalenza dell'acqua nel serbatoio pensile, si ottiene il valore della pressione p_1 a valle delle pompe. Le perdite di carico totali delle condotte si dividono in distribuite e concentrate. Per il calcolo delle perdite di carico distribuite si utilizza la legge sperimentale di Gauckler- Strickler, ipotizzando che in ogni condotta prevalga il regime turbolento [16].

Per tutti i tratti di tubazioni, privi di singolarità, si calcola la cadente J secondo la formula appunto di Gauckler- Strickler:

$$J = \frac{10,3}{c^2} \frac{Q^2}{D^{5,33}}$$

Un ruolo fondamentale, in regime turbolento, è ricoperto dalla scabrezza della tubazione, per la quale si assume il valore di 1 mm. Nella formula di Gauckler- Strickler tuttavia compare il coefficiente c , il quale non presenta le dimensioni del millimetro. Il valore corrispondente da inserire nella formula è infatti $c = 90 \frac{m^{1/3}}{s}$. con Q è indicata la portata [$\frac{m^3}{s}$] e con D il diametro della tubazione [m].

Considerando i punti nei quali l'acqua scorre in regime laminare la trattazione risulterebbe certamente più rigorosa, ma dal momento che l'errore che si commette risulta trascurabile, si opta per questa semplificazione. Lo stesso ragionamento vale per la distribuzione della portata nel caso in cui vi sia più di una pompa in funzione: l'applicazione dell'equazione di continuità e dell'equilibrio ai nodi andrebbe solamente ad appesantire i calcoli, senza fornire significativi cambiamenti al risultato finale.

Dal momento che $\Delta H = J * L$, tra le estremità delle tubazioni vi è una differenza di pressione $\Delta p = \rho * g * \Delta H$. Sommando tutte le perdite di carico dei tratti si ottengono le perdite distribuite totali.

Il sistema di tubazione in pressione presenta però valvole di vario tipo, pezzi speciali, curve, gomiti, pezzi a T, imbocchi, sbocchi, allargamenti e restringimenti. Queste singolarità comportano ulteriori dissipazioni di energia, che prendono il nome di perdite di carico concentrate o localizzate. Esse andranno sommate alle perdite di carico distribuite per ottenere quelle totali, secondo la seguente formula:

$$\Delta p_{tot} = \sum \Delta p_{distr} + \sum \Delta p_{conc}$$

Il moto all'interno delle valvole e dei pezzi speciali è molto complesso e una analisi teorica risulta in generale non plausibile, per cui si utilizza la seguente formula:

$$\Delta H = K * \frac{V^2}{2 * g}$$

in cui il coefficiente K è determinato sperimentalmente e viene assunto pari a:

- $K = 0,5$ per l'imbocco;
- $K = 1$ per lo sbocco;
- $K = 0,8$ per le curve a 90° ;
- $K = 1,8$ per le diramazioni a T;
- $K = 0,2$ per le saracinesche;
- $K = 2,5$ per le valvole di non ritorno a clapet.

Perdita di carico localizzata di Borda

Nei punti corrispondenti ad allargamenti delle condotte vi sono perdite di carico che prendono il nome di perdite di Borda [17].

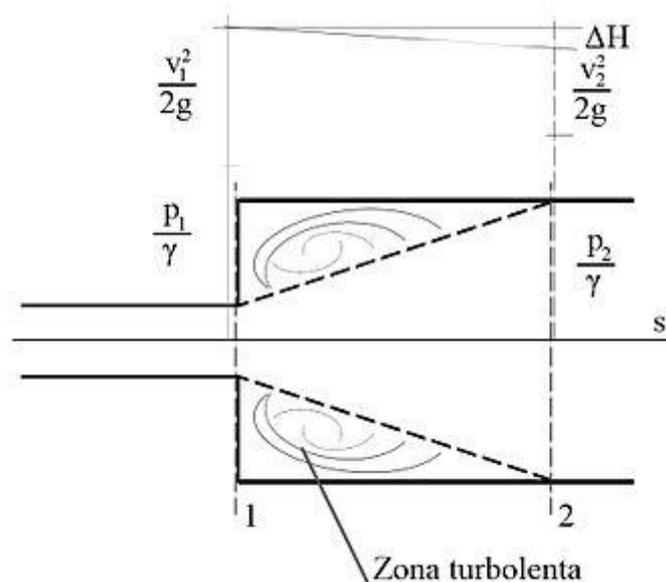


Figura 31. Perdite di Borda

Infatti, come si può notare dalla figura 31, la corrente che attraversa la sezione 1 non riesce a rimanere aderente alla parete della condotta e perciò tenderà ad espandersi

fino a raggiungere la parete stessa. Questo fenomeno causa un rallentamento del flusso e, poiché il moto è in pressione, si crea una corrente secondaria di ricircolo che ha velocità minore di quella principale uscente dalla sezione 1. L'attrito tra le due correnti comporta una perdita di energia localizzata, ricavabile grazie ai teoremi di Bernoulli e della quantità di moto. Si perviene alla formula:

$$\Delta p = \frac{k}{2 * g} * (V_1 - V_2)^2$$

Nella quale:

- V_1 è la velocità della corrente nella sezione minore;
- V_2 è la velocità della corrente nella sezione maggiore;
- g è l'accelerazione di gravità;
- k è un coefficiente che viene determinato sperimentalmente e dipende dal rapporto delle due sezioni. Nel caso di brusco allargamento e moto turbolento si fa riferimento alla seguente tabella:

A_1/A_2	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0
k	1.0	0.81	0.64	0.5	0.36	0.25	0.16	0.09	0.04	0

Una perdita di energia localizzata avviene anche nel caso di brusco restringimento, con dissipazione comunque minore rispetto al caso appena analizzato. La formula da utilizzare rimane la stessa del brusco allargamento, ma il coefficiente k si calcola mediante la seguente relazione:

$$k = 0,5 * \left(1 - \frac{A_2}{A_1}\right)^{\frac{3}{4}}$$

In cui A_1 è la sezione più stretta e A_2 la sezione più larga.

La centrale di Castelnovo Bariano presenta:

- Un primo restringimento di sezione tra diametri 0,4/0,2 m, per il quale si assume un coefficiente $K= 0,4$ e un secondo restringimento tra i diametri 0,4/0,3 m, a cui corrisponde un coefficiente k del valore di 0,27;
- Un allargamento tra i diametri 0,2/0,4 m, con relativo k pari a 0,6.

La centrale di Occhiobello presenta invece:

- Un unico restringimento di sezione con diametri 0,315/0,15 m, per il quale si assume $K=0,412$;

- Un allargamento di sezione tra i diametri 0,15/0,3 m, con relativo k pari a 0,55.

Le pompe di rilancio in rete sono tre, sia per la centrale di Castelnovo Bariano sia per quanto riguarda la centrale di Occhiobello, perciò è necessario conoscere lo stato di funzionamento eventuale di ognuna di esse.

Dall'analisi dei dati storici delle centrali si evince che:

- nel caso in cui la portata Q risulti minore di $10 \frac{l}{s}$ tutte le pompe sono spente;
- Se la portata è compresa tra i 10 l/s e i 45 l/s entra in funzione una prima pompa;
- Una seconda pompa affianca la prima, in parallelo, nel caso in cui la portata cresca ulteriormente ma rimanga minore di 70 l/s;
- Per una portata maggiore di 70 l/s le tre pompe lavorano contemporaneamente in parallelo.

La presenza di tre casi in cui almeno una pompa è funzionante implica lo studio di tre diversi casi possibili per quanto concerne le perdite di carico.

Nel seguito vengono presentati i calcoli eseguiti per ricavare il valore della pressione p_0 in aspirazione:

ΔH_{d1asp} [m]	ΔH_{d2asp} [m]	ΔH_{d3asp} [m]	ΔH_{c1asp} [m]	ΔH_{c2asp} [m]	ΔH_{c3asp} [m]	$\Delta h_{asp, tot}$ [m]	p_0 [bar]
0,0149	0,0082	0,0061	0,1176	0,1876	0,1025	0,1958	0,5557
0,0149	0,0082	0,0061	0,1176	0,1876	0,1025	0,1958	0,5527
0,0149	0,0082	0,0061	0,1173	0,1871	0,1022	0,1953	0,5488
0,0148	0,0081	0,0061	0,1167	0,1861	0,1017	0,1943	0,5460
0,0148	0,0081	0,0061	0,1165	0,1859	0,1015	0,1940	0,5431
0,0148	0,0081	0,0061	0,1165	0,1859	0,1015	0,1940	0,5401
0,0147	0,0081	0,0060	0,1162	0,1854	0,1013	0,1935	0,5372
0,0147	0,0081	0,0060	0,1160	0,1852	0,1011	0,1932	0,5343
0,0147	0,0081	0,0060	0,1157	0,1846	0,1008	0,1927	0,5314
0,0146	0,0080	0,0060	0,1154	0,1842	0,1006	0,1922	0,5285
0,0146	0,0080	0,0060	0,1151	0,1837	0,1003	0,1917	0,5256
0,0146	0,0080	0,0060	0,1150	0,1834	0,1002	0,1914	0,5227
0,0145	0,0080	0,0060	0,1147	0,1829	0,0999	0,1909	0,5198
0,0145	0,0080	0,0060	0,1145	0,1827	0,0998	0,1907	0,5169
0,0145	0,0080	0,0059	0,1142	0,1822	0,0995	0,1902	0,5140
0,0144	0,0079	0,0059	0,1140	0,1820	0,0994	0,1899	0,5121
0,0144	0,0079	0,0059	0,1140	0,1820	0,0994	0,1899	0,5091
0,0144	0,0079	0,0059	0,1140	0,1820	0,0994	0,1899	0,5268
0,0144	0,0079	0,0059	0,1140	0,1820	0,0994	0,1899	0,5592
0,0144	0,0079	0,0059	0,1140	0,1820	0,0994	0,1899	0,5916
0,0141	0,0078	0,0058	0,1113	0,1775	0,0970	0,1853	0,6234
0,0153	0,0084	0,0063	0,1209	0,1929	0,1054	0,2014	0,6356
0,0153	0,0084	0,0063	0,1207	0,1926	0,1052	0,2010	0,6169
0,0151	0,0083	0,0062	0,1193	0,1904	0,1040	0,1987	0,5917
0,0150	0,0082	0,0061	0,1181	0,1884	0,1029	0,1966	0,5693
0,0149	0,0082	0,0061	0,1176	0,1876	0,1025	0,1958	0,5596
0,0149	0,0082	0,0061	0,1176	0,1876	0,1025	0,1958	0,5557
0,0149	0,0082	0,0061	0,1173	0,1871	0,1022	0,1953	0,5528
0,0149	0,0082	0,0061	0,1173	0,1871	0,1022	0,1953	0,5498
0,0148	0,0082	0,0061	0,1171	0,1869	0,1021	0,1951	0,5469
0,0148	0,0082	0,0061	0,1171	0,1869	0,1021	0,1951	0,5440
0,0148	0,0081	0,0061	0,1167	0,1861	0,1017	0,1943	0,5411
0,0148	0,0081	0,0061	0,1167	0,1861	0,1017	0,1943	0,5381
0,0147	0,0081	0,0060	0,1163	0,1856	0,1014	0,1937	0,5353
0,0147	0,0081	0,0060	0,1162	0,1854	0,1013	0,1935	0,5323
0,0147	0,0081	0,0060	0,1160	0,1852	0,1011	0,1932	0,5294
0,0146	0,0080	0,0060	0,1154	0,1842	0,1006	0,1922	0,5266

Tabella dati 3. Perdite e pressione all'aspirazione, Castelnuovo Bariano

ΔH_{d1asp} [m]	ΔH_{d2asp} [m]	ΔH_{d3asp} [m]	ΔH_{c1asp} [m]	ΔH_{c2asp} [m]	ΔH_{c3asp} [m]	$\Delta h_{asp, tot}$ [m]	p_0 [bar]
0,0847	0,0476	0,0360	0,3463	0,2978	0,2934	0,3455	0,2820
0,0824	0,0464	0,0350	0,3372	0,2900	0,2857	0,3364	0,2770
0,0750	0,0422	0,0319	0,3069	0,2639	0,2600	0,3061	0,2829
0,0819	0,0461	0,0348	0,3350	0,2881	0,2838	0,3341	0,2841
0,0762	0,0429	0,0324	0,3116	0,2680	0,2640	0,3108	0,2893
0,0746	0,0420	0,0317	0,3052	0,2625	0,2585	0,3044	0,2939
0,0743	0,0418	0,0316	0,3039	0,2613	0,2574	0,3031	0,2979
0,0721	0,0406	0,0307	0,2950	0,2537	0,2499	0,2942	0,3017
0,0719	0,0405	0,0306	0,2941	0,2530	0,2492	0,2934	0,3057
0,0755	0,0425	0,0321	0,3090	0,2658	0,2618	0,3083	0,3072
0,0747	0,0420	0,0318	0,3055	0,2628	0,2589	0,3048	0,3115
0,0742	0,0417	0,0315	0,3034	0,2609	0,2570	0,3027	0,3146
0,0730	0,0411	0,0310	0,2987	0,2569	0,2531	0,2980	0,3190
0,0723	0,0407	0,0307	0,2958	0,2544	0,2506	0,2951	0,3223
0,0743	0,0418	0,0316	0,3039	0,2613	0,2574	0,3031	0,3215
0,0737	0,0414	0,0313	0,3013	0,2592	0,2553	0,3006	0,3099
0,0695	0,0391	0,0296	0,2845	0,2447	0,2410	0,2838	0,2979
0,0733	0,0413	0,0312	0,3000	0,2580	0,2542	0,2993	0,2826
0,0705	0,0397	0,0300	0,2883	0,2479	0,2442	0,2876	0,2828
0,0755	0,0425	0,0321	0,3090	0,2658	0,2618	0,3083	0,2847
0,0771	0,0434	0,0328	0,3155	0,2714	0,2673	0,3148	0,2879
0,0767	0,0432	0,0326	0,3137	0,2698	0,2658	0,3130	0,2920
0,0766	0,0431	0,0326	0,3134	0,2695	0,2655	0,3126	0,2960
0,0733	0,0413	0,0312	0,3000	0,2580	0,2542	0,2993	0,3012
0,0691	0,0389	0,0294	0,2829	0,2433	0,2396	0,2822	0,3068
0,0707	0,0398	0,0300	0,2891	0,2486	0,2449	0,2884	0,3102
0,0719	0,0405	0,0306	0,2941	0,2530	0,2492	0,2934	0,3136
0,0762	0,0429	0,0324	0,3116	0,2680	0,2640	0,3108	0,3158
0,0742	0,0417	0,0315	0,3034	0,2609	0,2570	0,3027	0,3205
0,0721	0,0406	0,0307	0,2950	0,2537	0,2499	0,2942	0,3243
0,0752	0,0423	0,0320	0,3077	0,2646	0,2607	0,3070	0,3123
0,0737	0,0414	0,0313	0,3013	0,2592	0,2553	0,3006	0,3040
0,0751	0,0423	0,0319	0,3073	0,2643	0,2604	0,3066	0,2976
0,0759	0,0427	0,0323	0,3103	0,2669	0,2629	0,3096	0,2904
0,0723	0,0407	0,0307	0,2958	0,2544	0,2506	0,2951	0,2860
0,0706	0,0397	0,0300	0,2887	0,2483	0,2445	0,2880	0,2896
0,0711	0,0400	0,0302	0,2907	0,2501	0,2463	0,2900	0,3002

Tabella dati 4. Perdite e pressione all'aspirazione, Occhiobello

Perdita di carico nei filtri a Carboni Attivi (GAC)

Come già esposto, il percorso dell'acqua nella centrale di Castelnuovo Bariano incontra i filtri a carboni attivi (GAC) dopo il prelievo dalla vasca di accumulo, ovvero nel tragitto preso in considerazione per il calcolo delle perdite di carico. Pertanto è necessario ricavare il valore di perdita, intesa alla stregua delle altre perdite concentrate, relativo al passaggio nei filtri GAC, ricordando che essi sono quattro, 3 dei quali in funzione, in serie.

La forma dei filtri è cilindrica perciò, considerando che il raggio di base misura 1,6 metri, l'area complessiva dei tre filtri GAC in funzione in serie risulta pari a 24 m^2 . L'altezza di ogni filtro è di 3,5 m.

Dividendo il valore della portata per la sezione totale di passaggio si ottiene il valore della velocità del flusso in [m/h], da convertire in [cm/s] per poter ricavare il valore di perdita di carico secondo il seguente grafico sperimentale [18]:

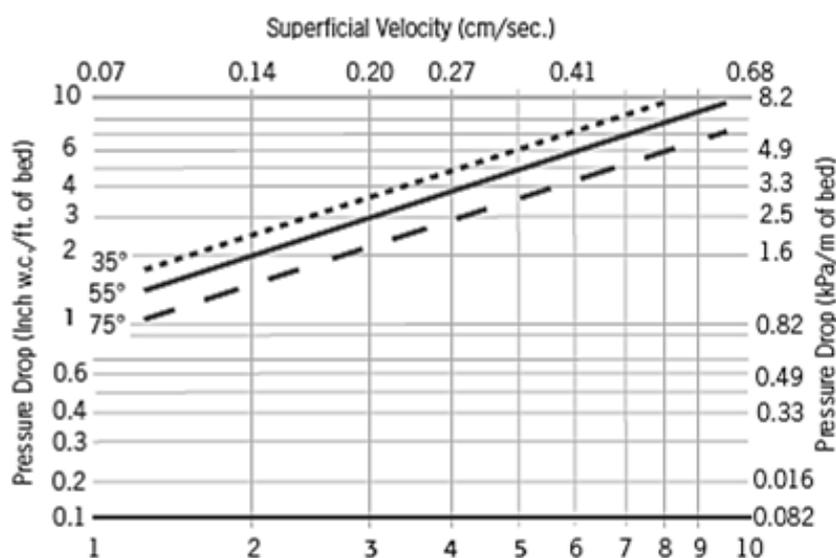


Figura 32. Perdite di carico nei GAC

Dal grafico in figura 32 si ricava quindi il valore della perdita di carico ΔH_s [pollici/piede] corrispondente a quattro valori di portata $[\frac{m^3}{h}]$, scelti come base di interpolazione.

Q [m ³ /h]	Velocità [m/h]	Velocità [cm/s]	ΔH_s [pollici/piede]	ΔH_s [pollici]	ΔH GAC [m]
121	5,01	0,13	2,5	20	0,50
180	7,46	0,20	3,7	29,6	0,75
234	9,69	0,26	5	40	1,01
360	14,92	0,41	7,5	60	1,52

Riportando le misure in metri di colonna d'acqua [m.c.a] è possibile riportare i punti ottenuti in funzione dei valori di portata stabiliti ed ottenere il seguente grafico:

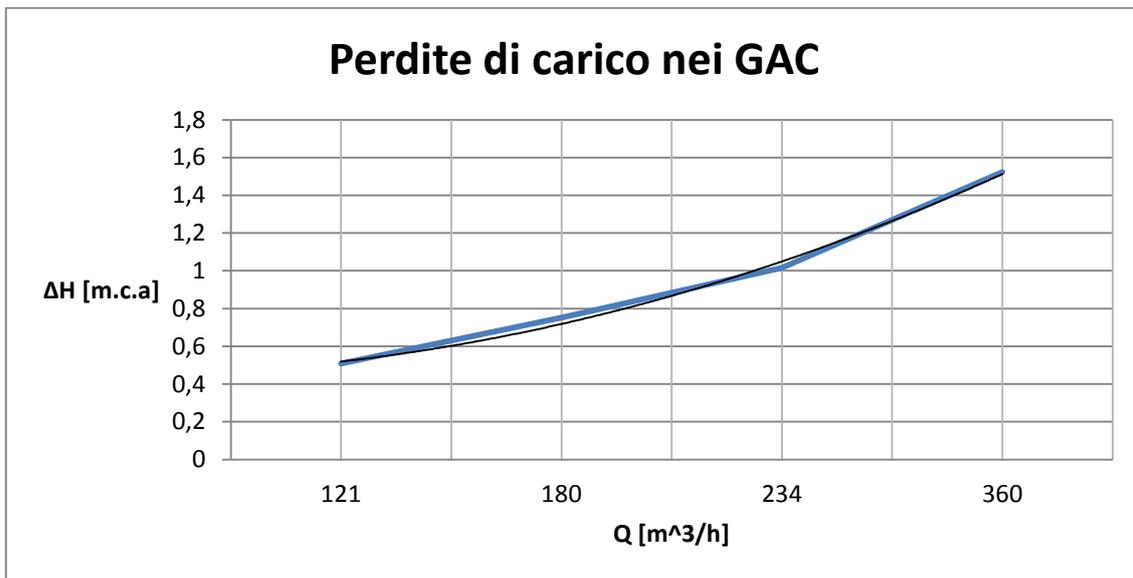


Figura 33. Interpolazione curva di perdita di carico nei GAC

Interpolando al secondo ordine si ottiene l'equazione della parabola:

$$y = 0,000006717 * Q^2 + 0,002111 * Q + 0,1542$$

mediante la quale è possibile ricavare la perdita di carico nei filtri a carboni attivi relativa ad ogni valore di portata.

Tale stima tuttavia non considera che l'acqua si trova ad una temperatura ben inferiore di 35° e che nei filtri con il tempo insorgono fenomeni di sporramento. Questi, causando una maggiore ostruzione, comportano un aumento nelle perdite, che nel calcolo appena eseguito, risultano quindi lievemente sottostimate.

Nel complesso, i casi possibili di perdite in mandata e il relativo valore della pressione p_1 a valle delle pompe (nello stato di fatto) risultano:

ΔH_{GAC} [m]	ΔH_{d1man} [m]	ΔH_{d2man} [m]	ΔH_{d3man} [m]	ΔH_{c1man} [m]	ΔH_{c2man} [m]	ΔH_{c3man} [m]	$\Delta h_{man, tot}$ [m]	p_1 , fatto [bar]
0,9968	0,1428	0,1204	0,1029	0,7742	0,4690	0,3711	1,5862	5,0535
0,9968	0,1428	0,1204	0,1029	0,7742	0,4690	0,3711	1,5862	5,0545
0,9953	0,1425	0,1201	0,1026	0,7723	0,4679	0,3702	1,5832	5,0562
0,9921	0,1417	0,1195	0,1021	0,7682	0,4654	0,3682	1,5769	5,0566
0,9913	0,1415	0,1193	0,1020	0,7672	0,4648	0,3678	1,5754	5,0574
0,9913	0,1415	0,1193	0,1020	0,7672	0,4648	0,3678	1,5754	5,0594
0,9897	0,1411	0,1190	0,1017	0,7651	0,4635	0,3667	1,5721	5,0610
0,9889	0,1410	0,1188	0,1016	0,7641	0,4629	0,3663	1,5706	5,0618
0,9872	0,1406	0,1185	0,1013	0,7619	0,4616	0,3652	1,5673	5,0625
0,9857	0,1402	0,1182	0,1010	0,7600	0,4604	0,3643	1,5644	5,0642
0,9842	0,1399	0,1179	0,1008	0,7581	0,4593	0,3634	1,5614	5,0648
0,9833	0,1396	0,1177	0,1006	0,7569	0,4585	0,3628	1,5596	5,0666
0,9818	0,1393	0,1174	0,1003	0,7550	0,4574	0,3619	1,5566	5,0683
0,9811	0,1391	0,1173	0,1002	0,7540	0,4568	0,3614	1,5551	5,0701
0,9794	0,1387	0,1169	0,0999	0,7519	0,4555	0,3604	1,5518	5,0708
0,9787	0,1385	0,1168	0,0998	0,7509	0,4549	0,3599	1,5504	5,0726
0,9787	0,1385	0,1168	0,0998	0,7509	0,4549	0,3599	1,5504	5,0736
0,9787	0,1385	0,1168	0,0998	0,7509	0,4549	0,3599	1,5504	5,0706
0,9787	0,1385	0,1168	0,0998	0,7509	0,4549	0,3599	1,5504	5,0638
0,9787	0,1385	0,1168	0,0998	0,7509	0,4549	0,3599	1,5504	5,0579
0,9644	0,1352	0,1139	0,0974	0,7327	0,4439	0,3512	1,5222	5,0482
1,0137	0,1469	0,1238	0,1058	0,7962	0,4823	0,3816	1,6198	5,0529
1,0128	0,1466	0,1236	0,1057	0,7949	0,4816	0,3810	1,6180	5,0527
1,0056	0,1449	0,1222	0,1044	0,7856	0,4759	0,3766	1,6037	5,0533
0,9992	0,1434	0,1209	0,1033	0,7774	0,4709	0,3726	1,5910	5,0540
0,9968	0,1428	0,1204	0,1029	0,7742	0,4690	0,3711	1,5862	5,0545
0,9968	0,1428	0,1204	0,1029	0,7742	0,4690	0,3711	1,5862	5,0565
0,9953	0,1425	0,1201	0,1026	0,7723	0,4679	0,3702	1,5832	5,0582
0,9953	0,1425	0,1201	0,1026	0,7723	0,4679	0,3702	1,5832	5,0591
0,9945	0,1423	0,1200	0,1025	0,7713	0,4673	0,3697	1,5817	5,0600
0,9945	0,1423	0,1200	0,1025	0,7713	0,4673	0,3697	1,5817	5,0619
0,9921	0,1417	0,1195	0,1021	0,7682	0,4654	0,3682	1,5769	5,0624
0,9921	0,1417	0,1195	0,1021	0,7682	0,4654	0,3682	1,5769	5,0644
0,9904	0,1413	0,1191	0,1018	0,7660	0,4641	0,3672	1,5736	5,0660
0,9897	0,1411	0,1190	0,1017	0,7651	0,4635	0,3667	1,5721	5,0679
0,9889	0,1410	0,1188	0,1016	0,7641	0,4629	0,3663	1,5706	5,0687
0,9857	0,1402	0,1182	0,1010	0,7600	0,4604	0,3643	1,5644	5,0700

Tabella dati 5. Perdite e pressione di mandata, Castelnovo Bariano

ΔH_{d1man} [m]	ΔH_{d2man} [m]	ΔH_{d3man} [m]	ΔH_{c1man} [m]	ΔH_{c2man} [m]	ΔH_{c3man} [m]	$\Delta h_{man, tot}$ [m]	p1, fatto [bar]
0,4463	0,3221	0,2789	3,1420	1,6622	1,1886	1,9843	4,3634
0,4345	0,3136	0,2716	3,0594	1,6185	1,1574	1,9321	4,3603
0,3954	0,2854	0,2471	2,7840	1,4728	1,0532	1,7582	4,3461
0,4316	0,3115	0,2698	3,0389	1,6077	1,1496	1,9192	4,3619
0,4015	0,2898	0,2509	2,8267	1,4954	1,0693	1,7852	4,3517
0,3932	0,2838	0,2458	2,7687	1,4647	1,0474	1,7485	4,3511
0,3916	0,2826	0,2447	2,7568	1,4584	1,0429	1,7410	4,3523
0,3801	0,2743	0,2376	2,6761	1,4157	1,0124	1,6901	4,3493
0,3790	0,2736	0,2369	2,6686	1,4118	1,0095	1,6853	4,3517
0,3982	0,2874	0,2489	2,8036	1,4832	1,0606	1,7706	4,3611
0,3937	0,2842	0,2461	2,7721	1,4665	1,0487	1,7507	4,3611
0,3910	0,2822	0,2444	2,7526	1,4562	1,0413	1,7384	4,3619
0,3850	0,2778	0,2406	2,7105	1,4339	1,0254	1,7117	4,3622
0,3812	0,2751	0,2382	2,6837	1,4197	1,0152	1,6948	4,3635
0,3916	0,2826	0,2447	2,7568	1,4584	1,0429	1,7410	4,3700
0,3883	0,2803	0,2427	2,7340	1,4464	1,0343	1,7266	4,3705
0,3666	0,2646	0,2291	2,5811	1,3654	0,9764	1,6300	4,3650
0,3866	0,2791	0,2417	2,7222	1,4401	1,0298	1,7192	4,3747
0,3715	0,2681	0,2322	2,6156	1,3837	0,9895	1,6518	4,3710
0,3982	0,2874	0,2489	2,8036	1,4832	1,0606	1,7706	4,3827
0,4066	0,2935	0,2541	2,8628	1,5145	1,0830	1,8080	4,3883
0,4043	0,2918	0,2527	2,8465	1,5058	1,0768	1,7976	4,3883
0,4038	0,2914	0,2524	2,8430	1,5040	1,0755	1,7955	4,3910
0,3866	0,2791	0,2417	2,7222	1,4401	1,0298	1,7192	4,3865
0,3645	0,2631	0,2278	2,5663	1,3576	0,9708	1,6207	4,3807
0,3726	0,2689	0,2328	2,6230	1,3876	0,9923	1,6565	4,3862
0,3790	0,2736	0,2369	2,6686	1,4118	1,0095	1,6853	4,3910
0,4015	0,2898	0,2509	2,8267	1,4954	1,0693	1,7852	4,4008
0,3910	0,2822	0,2444	2,7526	1,4562	1,0413	1,7384	4,3991
0,3801	0,2743	0,2376	2,6761	1,4157	1,0124	1,6901	4,3973
0,3965	0,2862	0,2478	2,7917	1,4768	1,0561	1,7630	4,4055
0,3883	0,2803	0,2427	2,7340	1,4464	1,0343	1,7266	4,3960
0,3960	0,2858	0,2475	2,7883	1,4750	1,0548	1,7609	4,3896
0,3999	0,2886	0,2499	2,8156	1,4895	1,0651	1,7781	4,3815
0,3812	0,2751	0,2382	2,6837	1,4197	1,0152	1,6948	4,3645
0,3720	0,2685	0,2325	2,6189	1,3854	0,9907	1,6539	4,3516
0,3747	0,2704	0,2342	2,6379	1,3955	0,9979	1,6659	4,3440

Tabella dati 6. Perdite e pressione di mandata, Occhiobello

La situazione attuale dello stato di fatto è quindi sintetizzata nelle seguenti tabelle:

Data	Ora	ΔH di fatto [m]	Energia di fatto [kWh]	m ³ sollevati
06/07/2012	09:35	45,850	4,612	19,2
06/07/2012	09:40	45,890	4,616	19,2
06/07/2012	09:45	45,947	4,616	19,2
06/07/2012	09:50	45,979	4,607	19,1
06/07/2012	09:55	46,017	4,608	19,1
06/07/2012	10:00	46,067	4,613	19,1
06/07/2012	10:05	46,114	4,611	19,1
06/07/2012	10:10	46,152	4,612	19,1
06/07/2012	10:15	46,188	4,609	19,0
06/07/2012	10:20	46,235	4,608	19,0
06/07/2012	10:25	46,271	4,605	19,0
06/07/2012	10:30	46,319	4,607	19,0
06/07/2012	10:35	46,366	4,605	19,0
06/07/2012	10:40	46,414	4,607	18,9
06/07/2012	10:45	46,450	4,604	18,9
06/07/2012	10:50	46,488	4,605	18,9
06/07/2012	10:55	46,528	4,609	18,9
06/07/2012	11:00	46,318	4,588	18,9
06/07/2012	11:05	45,918	4,549	18,9
06/07/2012	11:10	45,528	4,510	18,9
06/07/2012	11:15	45,106	4,414	18,7
06/07/2012	11:20	45,029	4,593	19,5
06/07/2012	11:25	45,217	4,609	19,4
06/07/2012	11:30	45,480	4,608	19,3
06/07/2012	11:35	45,716	4,608	19,2
06/07/2012	11:40	45,820	4,609	19,2
06/07/2012	11:45	45,880	4,615	19,2
06/07/2012	11:50	45,927	4,614	19,2
06/07/2012	11:55	45,967	4,618	19,2
06/07/2012	12:00	46,005	4,619	19,2
06/07/2012	12:05	46,055	4,624	19,2
06/07/2012	12:10	46,089	4,618	19,1
06/07/2012	12:15	46,139	4,623	19,1
06/07/2012	12:20	46,185	4,621	19,1
06/07/2012	12:25	46,234	4,623	19,1
06/07/2012	12:30	46,272	4,624	19,1
06/07/2012	12:35	46,315	4,616	19,0

Tabella dati 7. Stato di fatto, Castelnovo Bariano

Nella centrale di Castelnovo Bariano, solamente per le elettropompe di rilancio in rete, sono stati necessari 1,67 GWh nell'intero periodo considerato (6 Luglio 2012-6 Luglio 2016).

Considerando lo stato di funzionamento delle pompe si è ricavato il tempo di funzionamento delle stesse: tale dato è stato utilizzato sia nel computo dell'energia sia nella stima dei metri cubi di acqua sollevati, che sono risultati essere 7.100.496 m³.

Il rapporto tra l'energia totale impiegata ed i metri cubi di acqua sollevati restituisce il valore di 0,24 $\frac{kWh}{m^3}$. Questo parametro, moltiplicato per gli effettivi metri cubi di acqua sollevati, secondo i dati disponibili in centrale, oltre ad essere l'indicatore chiave da diminuire per conseguire l'efficienza desiderata, permette una stima più accurata dell'energia annuale:

Energia 2013 [kWh]
331.438
Energia 2014 [kWh]
329.414
Energia 2015 [kWh]
318.281

Con un procedimento analogo si ricavano gli stessi parametri per la centrale di Occhiobello:

Data	Ora	ΔH_{di} fatto [m]	Energia di fatto [kWh]	m ³ sollevati
06/07/2012	09:35	41,605	4,546	20,9
06/07/2012	09:40	41,623	4,488	20,6
06/07/2012	09:45	41,419	4,261	19,6
06/07/2012	09:50	41,568	4,467	20,5
06/07/2012	09:55	41,411	4,292	19,8
06/07/2012	10:00	41,358	4,243	19,6
06/07/2012	10:05	41,329	4,230	19,5
06/07/2012	10:10	41,259	4,161	19,2
06/07/2012	10:15	41,244	4,154	19,2
06/07/2012	10:20	41,324	4,266	19,7
06/07/2012	10:25	41,280	4,237	19,6
06/07/2012	10:30	41,256	4,220	19,5
06/07/2012	10:35	41,215	4,183	19,4
06/07/2012	10:40	41,195	4,160	19,3
06/07/2012	10:45	41,269	4,224	19,5
06/07/2012	10:50	41,392	4,219	19,5
06/07/2012	10:55	41,459	4,106	18,9
06/07/2012	11:00	41,713	4,243	19,4
06/07/2012	11:05	41,674	4,155	19,0
06/07/2012	11:10	41,774	4,312	19,7
06/07/2012	11:15	41,798	4,360	19,9
06/07/2012	11:20	41,756	4,343	19,8
06/07/2012	11:25	41,743	4,339	19,8
06/07/2012	11:30	41,643	4,236	19,4
06/07/2012	11:35	41,528	4,101	18,8
06/07/2012	11:40	41,550	4,149	19,1
06/07/2012	11:45	41,564	4,186	19,2
06/07/2012	11:50	41,641	4,316	19,8
06/07/2012	11:55	41,576	4,252	19,5
06/07/2012	12:00	41,519	4,187	19,2
06/07/2012	12:05	41,725	4,298	19,7
06/07/2012	12:10	41,712	4,252	19,5
06/07/2012	12:15	41,712	4,294	19,6
06/07/2012	12:20	41,703	4,314	19,7
06/07/2012	12:25	41,575	4,199	19,3
06/07/2012	12:30	41,407	4,131	19,0
06/07/2012	12:35	41,221	4,127	19,1

Tabella dati 8. Stato di fatto, Occhiobello

In totale sono stati consumati 1,66 GWh, per un totale di 7.682.833 m³ sollevati.

Sempre nei quattro anni considerati in questa trattazione risulta quindi un valore di 0,22 $\frac{kWh}{m^3}$, più basso rispetto alla centrale precedente.

Negli anni 2013, 2014 e 2015, per i quali si dispone dei dati in maniera completa, è stata calcolata l'energia annua sulla base dei reali metri cubi di acqua sollevati:

Energia 2013 [kWh]
429.964
Energia 2014 [kWh]
431.285
Energia 2015 [kWh]
419.161

In figura sono stati uniti i punti di uguale efficienza: sono state così ottenute le curve rosse, dette di isorendimento, che mostrano come il rendimento della pompa rimanga costante per piccole variazioni di velocità.

Molti sistemi di pompaggio, come nel caso preso in esame per le due centrali di Polesine Acque, necessitano una variazione di portata o pressione. Per eseguire tale operazione correttamente, devono essere modificate sia la curva del sistema che quella della pompa.

3.2 Altre implicazioni nell'usare pompe a regime variabile

Oltre ai risparmi di energia possono esserci altri benefici legati alla variazione della velocità, in particolare quando questa venga diminuita. Le forze idrauliche che agiscono sulla girante, create dal profilo di pressione nel corpo pompa, si riducono infatti approssimativamente con il quadrato della velocità. Queste forze vengono contenute con dei cuscinetti, di cui si riesce ad allungare la vita utile. Inoltre vibrazione e rumore vengono ridotti e, purchè il punto operativo rimanga nel range operativo ammesso, aumenta la durata di vita della tenuta.

Dall'altro lato, quando è necessario incrementare la velocità, aumenteranno la potenza assorbita, lo stress all'albero, il rumore, le vibrazioni e il carico dei cuscinetti. Va ricordato che la pompa e il motore vanno dimensionati sulla base della massima velocità alla quale la pompa sarà chiamata ad operare.

In generale, dotare le pompe di inverter per consentire un funzionamento delle pompe di rilancio a velocità variabile non assicura sempre un vantaggio rispetto alla modalità on-off, ma risulta sicuramente un miglioramento nei confronti di un sistema che preveda strozzature mediante valvole.

Mediante strozzamento della valvola infatti aumentano le resistenze dell'impianto. La curva dell'impianto diventa perciò più ripida, come si nota in figura 35 [13].

Se la velocità di rotazione della pompa è costante, il punto di funzionamento si sposta verso una portata inferiore (dal punto B1 al punto B2 sulla curva caratteristica della pompa).

In questo nuovo punto la pompa crea una pressione (prevalenza) superiore a quella necessaria per l'impianto. La valvola strozzata abbatte l'eccesso di prevalenza come caduta di pressione, che risulta quindi una perdita di carico: il risparmio di potenza è limitato rispetto al pieno carico.

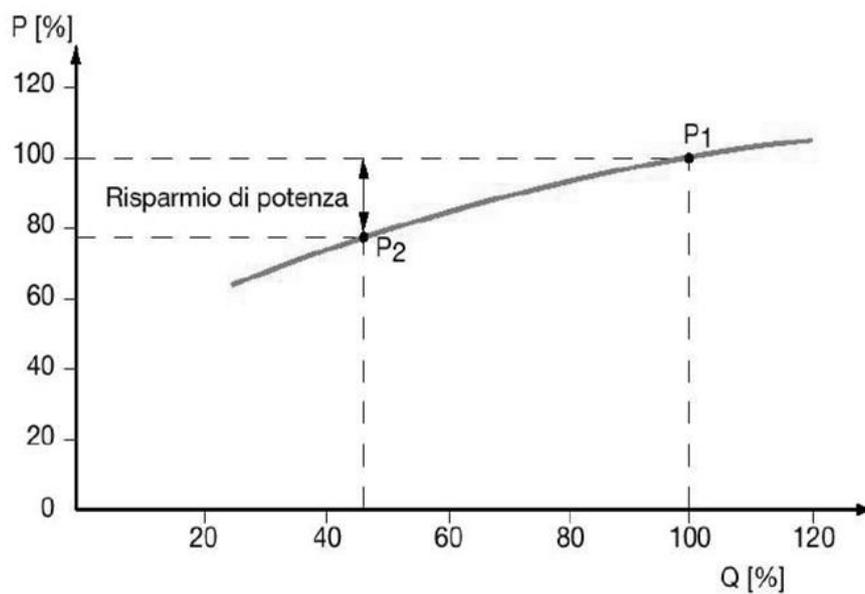
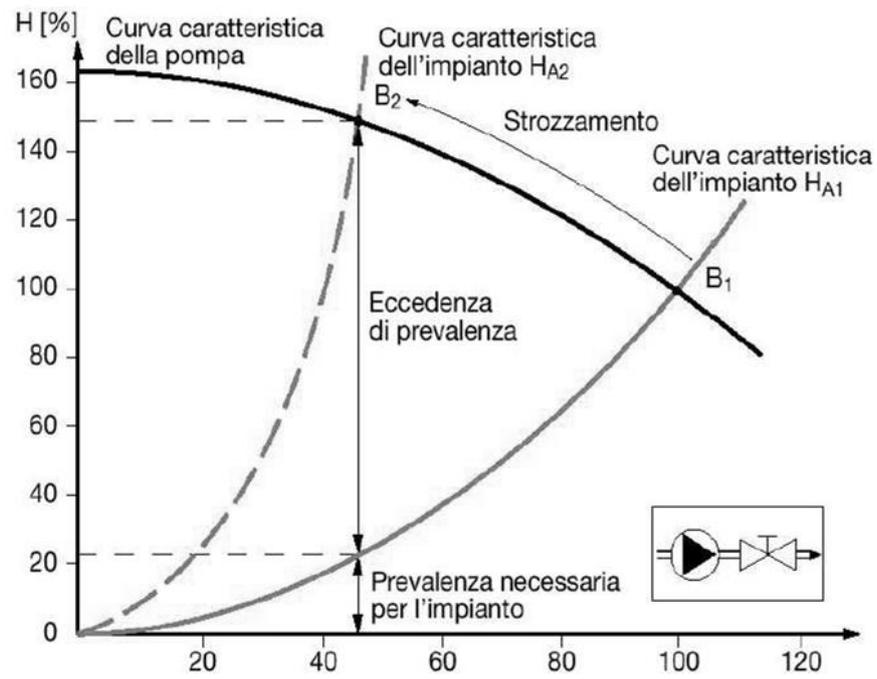


Figura 35. Curva impianto con valvola di strozzamento

3.3 L'utilizzazione delle elettropompe a velocità variabile negli acquedotti

Impiegare pompe centrifughe a velocità variabile negli impianti di sollevamento degli acquedotti rappresenta il metodo più immediato per ottenere vantaggi notevoli sia dal punto di vista della qualità del servizio, sia per l'economia di gestione. Nelle due centrali prese in esame non si vuole però rischiare un'errata utilizzazione di questa risorsa, per non ridurre gli ampi margini di miglioramento dell'efficienza, possibili grazie alla regolazione tramite inverter. In seguito verranno descritti gli errori più frequenti in questo campo e gli accorgimenti da adottare per evitarli.

La caratteristica principale della pompa a velocità variabile è, come ampiamente spiegato, quella di consentire un sollevamento differenziato dell'acqua, al fine di soddisfare le diverse esigenze del circuito idrico. Nel caso delle due centrali oggetto di studio di questa tesi, nelle quali si vuole mantenere fissa la pressione della rete al valore $p_r = 3,5 \text{ bar}$, non è sufficiente una sola pompa per coprire tutta la gamma di portate, ma è necessario l'accoppiamento in parallelo di più pompe, come del resto già avviene nello stato di fatto.

Si deve quindi adottare un tipo di installazione che garantisca il funzionamento ottimale dell'insieme. Più pompe entrano in funzione in modo che la fascia generale di lavoro, data dalla sovrapposizione degli elementi singoli, possa agevolmente contenere la curva caratteristica del circuito.

Per economizzare i costi, si potrebbe pensare di installare due o più pompe uguali regolate da un unico inverter. Il funzionamento di un impianto di questo tipo, assolutamente da evitare, prevede l'iniziale entrata in funzione di una prima pompa che fornisca le basse portate, regolate tramite inverter. Il progressivo aumento della velocità di rotazione, permette il raggiungimento della massima potenzialità della pompa, fino al pieno regime.

Un'ulteriore aumento della portata richiede la sostituzione della prima pompa con una seconda pompa, identica alla prima ma a giri fissi. Quella variabile viene azzerata, in modo da poter soddisfare altri aumenti di portata dando luogo ad un nuovo ciclo uguale al precedente. Nel caso in cui si rendesse necessario può entrare in funzione una terza pompa a giri fissi, mentre la prima viene nuovamente azzerata. Il ripetersi di questi cicli può susseguirsi fino ad avviare tutte le pompe che compongono l'impianto, salvo provvedere a diminuire le velocità e quindi arrestare le pompe man mano che la richiesta di portata cala.

La soluzione descritta ricopre sicuramente tutto il range di portata che il circuito può richiedere e sebbene possa apparire la soluzione intuitivamente più economica, non si rivela essere la scelta più adatta a causa dei pessimi rendimenti meccanici delle pompe, costrette a lavorare quasi sempre al di fuori del campo di massimo rendimento.

Da notare come le pompe a giri fissi finiscano, per gran parte dei regimi di basse velocità, addirittura a girare a vuoto, cioè senza sollevare la minima portata d'acqua ma dissipando in calore tutta l'energia assorbita. Non di rado si incontrano installazioni di questo tipo, totalmente errate. Per i motivi appena citati, tutte le pompe in parallelo, nello stato di progetto, saranno munite di inverter.

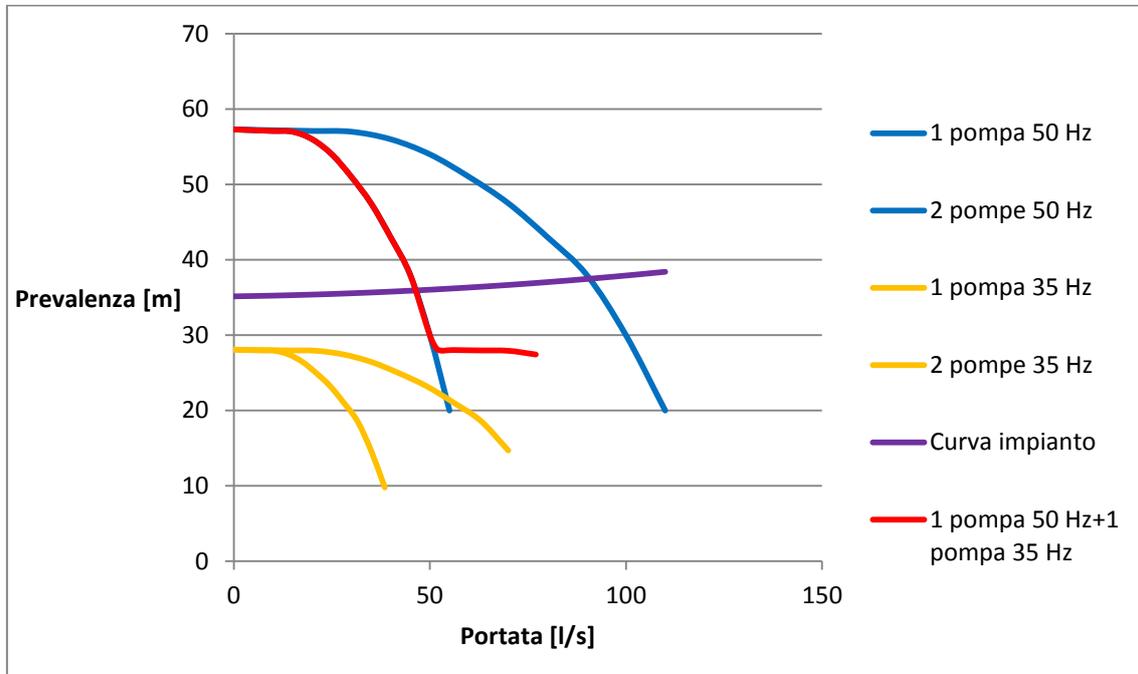


Figura 36. Parallelo di pompe a diversa frequenza

La curva rossa in figura 36 rappresenta il funzionamento in parallelo di una pompa a giri fissi (50 Hz) e di una a giri variabili (35 Hz). In casi come questo, in cui la curva di impianto incrocia di fatto solamente la curva della pompa a giri fissi, la pompa munita di inverter finirebbe per girare a vuoto.

3.4 Principi di controllo per pompe a regime variabile

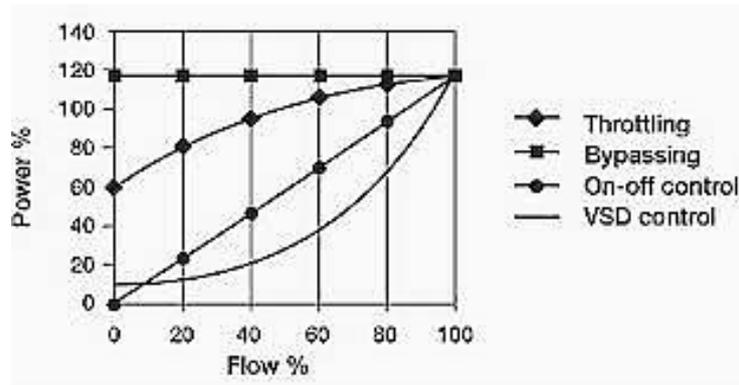


Figura 37. Diversi sistemi di controllo

La figura 37 mostra come l'impiego di un controllo VSD, ovvero tramite inverter, elimini in maniera rilevante inefficienze energetiche rispetto ai sistemi di strozzamento e by pass. Il controllo on- off in alcuni casi può risultare più vantaggioso di un controllo VSD, ma nel nostro caso il problema è rappresentato dalle perdite intrinseche al sistema di pompaggio al serbatoio pensile e successivo impiego della valvola Clayton come strozzatura.

Questo assetto migliorerà l'efficienza per basse richieste di carico.

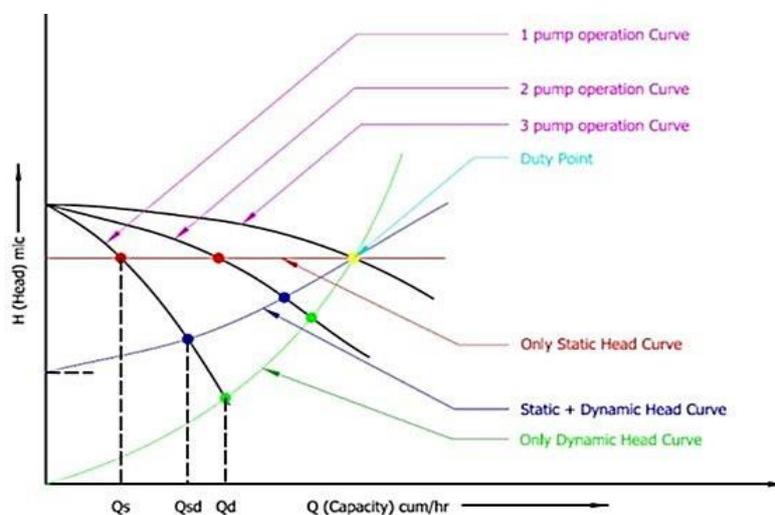


Figura 38. Punto operativo con più pompe in funzione

Un sistema di controllo automatico metterà in funzione le pompe a seconda della reale domanda assicurando che abbiano lo stesso numero di giri.

Capitolo 4. Lo stato di progetto

4.1 Stima dell'energia per lo stato di progetto

Appurato che la scelta di munire le elettropompe di inverter può rivelarsi vantaggiosa, si eseguono calcoli analoghi a quelli esposti nel capitolo 2, mantenendo fissa la pressione della rete a 3,5 bar.

In questo modo si simula il comportamento dell'impianto nel caso in cui le pompe funzionino a regime variabile ed il serbatoio pensile venga bypassato.

È necessario calcolare le relative perdite di carico che si avrebbero nella situazione sopracitata: la pressione p_1 a valle delle pompe non sarà la stessa, ma varierà rispetto allo stato di fatto.

Data	Ora	p1 di progetto [bar]	ΔH di progetto [m]	Energia di progetto [kWh]
06/07/2012	09:35	3,658	31,626	3,181
06/07/2012	09:40	3,658	31,656	3,184
06/07/2012	09:45	3,658	31,692	3,184
06/07/2012	09:50	3,657	31,715	3,178
06/07/2012	09:55	3,657	31,743	3,178
06/07/2012	10:00	3,657	31,773	3,181
06/07/2012	10:05	3,657	31,799	3,179
06/07/2012	10:10	3,657	31,827	3,180
06/07/2012	10:15	3,656	31,853	3,178
06/07/2012	10:20	3,656	31,880	3,177
06/07/2012	10:25	3,656	31,906	3,176
06/07/2012	10:30	3,655	31,934	3,176
06/07/2012	10:35	3,655	31,961	3,175
06/07/2012	10:40	3,655	31,989	3,175
06/07/2012	10:45	3,655	32,015	3,173
06/07/2012	10:50	3,655	32,033	3,173
06/07/2012	10:55	3,655	32,063	3,176
06/07/2012	11:00	3,655	31,883	3,158
06/07/2012	11:05	3,655	31,553	3,126
06/07/2012	11:10	3,655	31,223	3,093
06/07/2012	11:15	3,652	30,870	3,021
06/07/2012	11:20	3,662	30,846	3,146
06/07/2012	11:25	3,661	31,033	3,163
06/07/2012	11:30	3,660	31,277	3,169
06/07/2012	11:35	3,659	31,492	3,174
06/07/2012	11:40	3,658	31,586	3,177
06/07/2012	11:45	3,658	31,626	3,181
06/07/2012	11:50	3,658	31,652	3,180
06/07/2012	11:55	3,658	31,682	3,183
06/07/2012	12:00	3,658	31,711	3,184
06/07/2012	12:05	3,658	31,741	3,187
06/07/2012	12:10	3,657	31,765	3,183
06/07/2012	12:15	3,657	31,795	3,186
06/07/2012	12:20	3,657	31,821	3,184
06/07/2012	12:25	3,657	31,849	3,184
06/07/2012	12:30	3,657	31,877	3,185
06/07/2012	12:35	3,656	31,900	3,179

Tabella dati 9. Stato di progetto, Castelnovo Bariano

Data	Ora	p1 di progetto [bar]	ΔH di progetto [m]	Energia di progetto [kWh]
06/07/2012	09:35	3,702	34,862	3,810
06/07/2012	09:40	3,697	34,858	3,759
06/07/2012	09:45	3,679	34,618	3,561
06/07/2012	09:50	3,695	34,773	3,737
06/07/2012	09:55	3,682	34,580	3,584
06/07/2012	10:00	3,678	34,496	3,539
06/07/2012	10:05	3,677	34,447	3,526
06/07/2012	10:10	3,672	34,355	3,465
06/07/2012	10:15	3,671	34,309	3,455
06/07/2012	10:20	3,680	34,383	3,549
06/07/2012	10:25	3,678	34,319	3,523
06/07/2012	10:30	3,677	34,274	3,506
06/07/2012	10:35	3,674	34,201	3,471
06/07/2012	10:40	3,672	34,151	3,449
06/07/2012	10:45	3,677	34,207	3,501
06/07/2012	10:50	3,676	34,310	3,497
06/07/2012	10:55	3,666	34,332	3,400
06/07/2012	11:00	3,675	34,580	3,517
06/07/2012	11:05	3,668	34,509	3,441
06/07/2012	11:10	3,680	34,613	3,573
06/07/2012	11:15	3,684	34,618	3,611
06/07/2012	11:20	3,683	34,566	3,595
06/07/2012	11:25	3,683	34,523	3,589
06/07/2012	11:30	3,675	34,390	3,498
06/07/2012	11:35	3,665	34,231	3,381
06/07/2012	11:40	3,669	34,235	3,418
06/07/2012	11:45	3,671	34,229	3,447
06/07/2012	11:50	3,682	34,310	3,556
06/07/2012	11:55	3,677	34,214	3,499
06/07/2012	12:00	3,672	34,125	3,442
06/07/2012	12:05	3,679	34,324	3,536
06/07/2012	12:10	3,676	34,370	3,503
06/07/2012	12:15	3,679	34,471	3,549
06/07/2012	12:20	3,681	34,562	3,575
06/07/2012	12:25	3,672	34,521	3,486
06/07/2012	12:30	3,668	34,441	3,436
06/07/2012	12:35	3,670	34,346	3,439

Tabella dati 10. Stato di progetto, Occhiobello

Per quanto concerne la centrale di Castelnuovo Bariano i nuovi risultati ottenuti, da confrontare con i valori dello stato di fatto, sono esposti nella seguente tabella:

GWh totali, stato di fatto	GWh totali, stato di progetto	kWh/m³ fatto	kWh/m³ progetto
1,67	1,13	0,24	0,16

In evidenza come il valore dei kWh utilizzati per metro cubo di acqua sollevato sia stato abbassato del 32%.

Anche nella centrale di Occhiobello tale parametro risulta inferiore nello stato di progetto, come desiderato, ma in percentuale minore (17%).

GWh totali, stato di fatto	GWh totali, stato di progetto	kWh/m³ fatto	kWh/m³ progetto
1,66	1,37	0,22	0,18

Nel paragrafo 1.3 sono indicati i reali metri cubi sollevati annualmente, per cui moltiplicando tali valori per il parametro dei $\frac{kWh}{m^3}$ calcolati, si ottiene un consumo di energia annuale più aderente alla realtà:

Castelnuovo Bariano
Energia 2013 [kWh]
331.438
Energia 2014 [kWh]
329.414
Energia 2015 [kWh]
318.281

Occhiobello
Energia 2013 [kWh]
429.964
Energia 2014 [kWh]
431.285
Energia 2015 [kWh]
419.161

Questa prima stima della situazione dello stato di progetto permetterà di eseguire l'analisi dei consumi, oggetto del prossimo capitolo, in modo da poter scegliere le pompe più idonee agli impianti. È infatti possibile risalire ai valori di portata in uscita ed effettuare un approfondimento statistico. Successivamente sarà possibile ricalcolare i consumi di energia con maggior precisione.

4.2 Analisi dei consumi

Per la valutazione delle portate e delle pressioni si è fatto riferimento ai dati provenienti dall'impianto di telecontrollo di cui la centrale di Boara è dotata.

Ciò che interessa ai fini del presente studio sono i dati statistici e i valori medi e massimi riscontrati, sinteticamente riassunti nelle seguenti tabelle.

Relativamente alla portata in uscita, la centrale di Castelnuovo Bariano presenta la seguente situazione:

Portata Massima M [l/s]	
	77
Portata media m [l/s]	
	56
Varianza	
	56
Scarto quadratico medio s [l/s]	
	7
m+s	
	63
m-s	
	48
m+2s	
	71
m-2s	
	41
m+3s	
	79
m-3s	
	33

Per la centrale di Occhiobello si hanno i seguenti riscontri:

Portata Massima M [l/s]	
	100
Portata media m [l/s]	
	61
Varianza	
	76
Scarto quadratico medio s [l/s]	
	8
m+s	
	69
m-s	
	52
m+2s	
	78
m-2s	
	43
m+3s	
	87
m-3s	
	34

La portata in uscita è stata ricavata mediante la seguente formula:

$$Q_{out}^i = \frac{Q_{in}^{i-1} - Q_{in}^i}{2} - \frac{A_p * (H_p^i - H_p^{i-1})}{\Delta t}$$

In cui:

- Q_{out}^i è la portata in uscita dal serbatoio pensile nell'intervallo di tempo i ;
- Q_{in}^i e Q_{in}^{i-1} sono le portate elaborate dalle pompe di rilancio in rete, rispettivamente all'intervallo i e all'intervallo di tempo precedente $i - 1$.
- A_p è la superficie del serbatoio pensile, pari a 254 m^2 per la centrale di Castelnuovo Bariano e pari a 94 m^2 per la centrale di Occhiobello;
- $(H_p^i - H_p^{i-1})$ è la differenza di quota del livello dell'acqua nel serbatoio pensile tra due intervalli di tempo successivi;
- Δt è l'intervallo di tempo considerato, ovvero 5 minuti.

I valori di portata massima, portata media, varianza e scarto quadratico medio delle tabelle precedenti sono stati calcolati sulla base della portata in uscita, per entrambe le centrali. Un esempio di alcuni valori registrati, sempre nell'intervallo orario del 6 luglio 2012 che va dalle 09:35 alle 12:35, è riportato di seguito:

Data	Ora	Portata in uscita [l/s]
06/07/2012	09:35	63,98
06/07/2012	09:40	63,98
06/07/2012	09:45	63,94
06/07/2012	09:50	63,81
06/07/2012	09:55	63,71
06/07/2012	10:00	63,69
06/07/2012	10:05	63,64
06/07/2012	10:10	63,58
06/07/2012	10:15	63,51
06/07/2012	10:20	63,43
06/07/2012	10:25	63,35
06/07/2012	10:30	63,28
06/07/2012	10:35	63,22
06/07/2012	10:40	63,16
06/07/2012	10:45	63,09
06/07/2012	10:50	63,03
06/07/2012	10:55	63,01
06/07/2012	11:00	63,01
06/07/2012	11:05	63,01
06/07/2012	11:10	63,01
06/07/2012	11:15	62,63
06/07/2012	11:20	63,56
06/07/2012	11:25	64,86
06/07/2012	11:30	64,64
06/07/2012	11:35	64,28
06/07/2012	11:40	64,04
06/07/2012	11:45	63,98
06/07/2012	11:50	63,94
06/07/2012	11:55	63,90
06/07/2012	12:00	63,88
06/07/2012	12:05	63,86
06/07/2012	12:10	63,79
06/07/2012	12:15	63,73
06/07/2012	12:20	63,68
06/07/2012	12:25	63,62
06/07/2012	12:30	63,58
06/07/2012	12:35	63,47

Tabella dati 11. Portate in uscita, Castelnuovo Bariano

Data	Ora	Portata in uscita [l/s]
06/07/2012	09:35	69,05
06/07/2012	09:40	69,05
06/07/2012	09:45	67,01
06/07/2012	09:50	66,90
06/07/2012	09:55	67,14
06/07/2012	10:00	65,59
06/07/2012	10:05	65,18
06/07/2012	10:10	64,63
06/07/2012	10:15	64,10
06/07/2012	10:20	64,86
06/07/2012	10:25	65,47
06/07/2012	10:30	65,17
06/07/2012	10:35	64,81
06/07/2012	10:40	64,40
06/07/2012	10:45	64,67
06/07/2012	10:50	64,97
06/07/2012	10:55	63,92
06/07/2012	11:00	63,85
06/07/2012	11:05	64,06
06/07/2012	11:10	64,54
06/07/2012	11:15	66,00
06/07/2012	11:20	66,25
06/07/2012	11:25	66,14
06/07/2012	11:30	65,41
06/07/2012	11:35	63,76
06/07/2012	11:40	63,16
06/07/2012	11:45	63,78
06/07/2012	11:50	65,00
06/07/2012	11:55	65,49
06/07/2012	12:00	64,60
06/07/2012	12:05	64,83
06/07/2012	12:10	65,18
06/07/2012	12:15	65,16
06/07/2012	12:20	65,64
06/07/2012	12:25	65,02
06/07/2012	12:30	63,85
06/07/2012	12:35	63,58

Tabella dati 12. Portate in uscita, Occhiobello

L'elaborazione statistica è stata svolta calcolando appunto il valore medio (m), il valore massimo (M) e la varianza:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{out}^i - m)^2$$

in cui n è il numero delle misure e Q_{out}^i la singola portata misurata.

Lo scarto quadratico medio s è stato calcolato con la seguente formula:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_{out}^i - m)^2}$$

A fronte di questi valori sono stati calcolati i valori $m+1s$, $m+2s$, $m+3s$; si ricorda che nei casi in cui la popolazione dei valori sia distribuita secondo una qualsiasi distribuzione (disuguaglianza di Tchebycheff) o normalmente (gaussiana), ai valori sopra indicati sono correlate le seguenti probabilità di non superamento:

Valore	Distribuzione qualsiasi	Distribuzione normale
$m+1s$		68,3%
$m+2s$	75%	95,4%
$m+3s$	91%	99,7%

In base a tali dati si evidenzia come il valore $m+3s$ possa essere considerato il valore estremo della popolazione.

Sono state infine sviluppate le curve gaussiane relative alle portate riscontrate; la funzione utilizzata è la seguente:

$$f(x) = \frac{1}{s * \sqrt{2 * \pi}} * e^{-\frac{(x-m)^2}{s}}$$

La distribuzione normale di probabilità della portata in uscita dalla centrale di Castelnuovo Bariano assume la seguente forma:

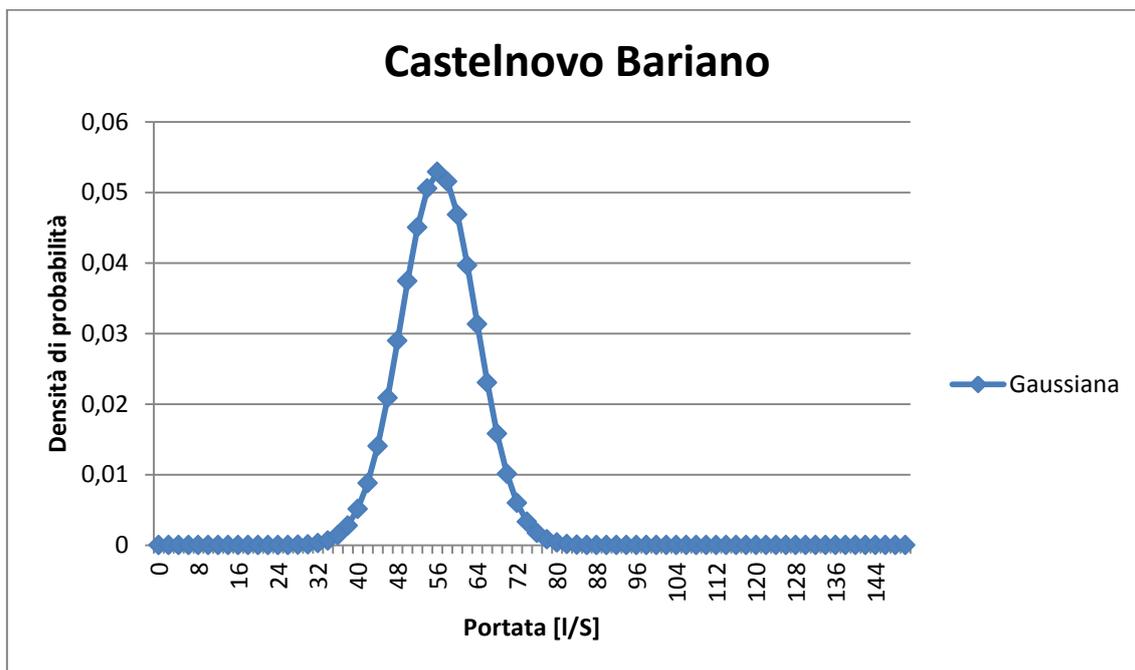


Figura 39. Gaussiana relativa alle portate in uscita della centrale di Castelnuovo Bariano

La centrale di Occhiobello presenta una curva di Gauss molto simile:

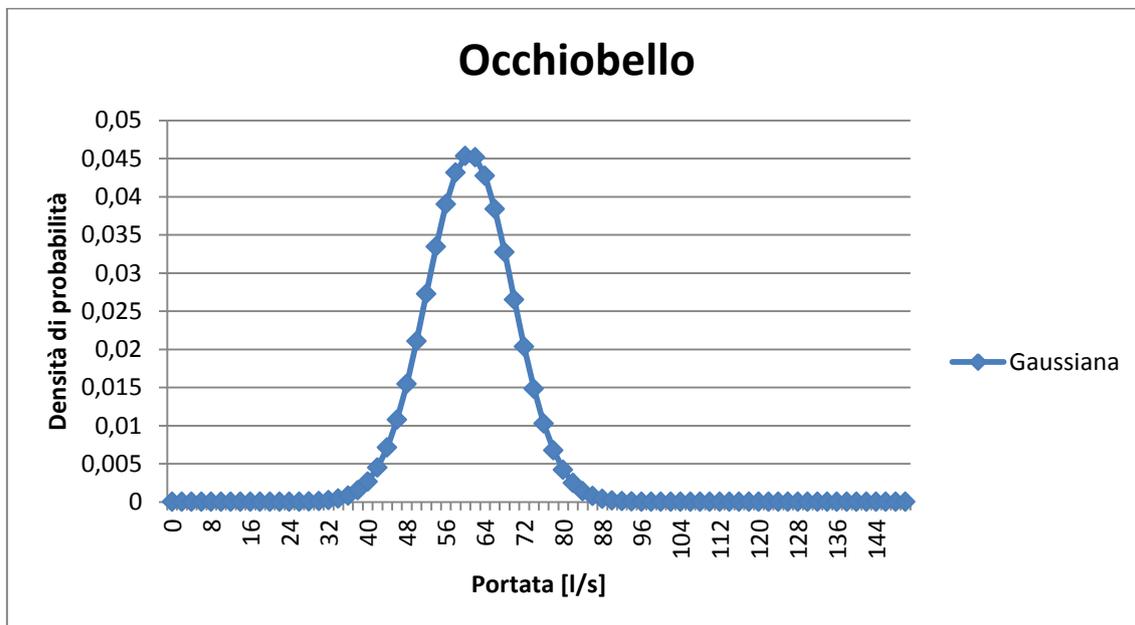


Figura 40. Gaussiana relativa alle portate in uscita della centrale di Castelnuovo Bariano

Per determinare la necessità di apportare coefficienti maggiorativi alle portate di progetto, al fine di tener conto di uno sviluppo demografico futuro, è stata svolta un'analisi del comprensorio utilizzando i dati messi a disposizione dall'ISTAT.

Le rilevazioni condotte nel periodo 2002 – 2011 riportano una sostanziale mancanza di variazione demografica per la provincia di Rovigo (242.294 abitanti nel 2002 contro i 242.876 del 2011) ed un aumento nel Veneto di circa lo 0,7% annuo (4.529.008 del 2002 contro i 4.851.958 del 2013). Le previsioni dell'ISTAT nell'orizzonte di progetto dei 50 anni (2064) non sono disponibili per la provincia di Rovigo, ma lo sono per il Veneto e indicano un aumento demografico di circa lo 0,29% annuo (corrispondente ad un 15% sui 50 anni).

Da quanto sopra riportato non sono quindi prevedibili apprezzabili aumenti demografici per la Provincia di Rovigo nell'orizzonte temporale considerato, e, di conseguenza, aumenti di richieste idriche legate a tale fattore. Inoltre si prevede un miglioramento delle condizioni della rete acquedottistica legato a piani di risanamento delle perdite che il Gestore attiverà nei prossimi anni, il che ridurrà ulteriormente i quantitativi in uscita dalla centrale.

Pertanto come portate di progetto si sono assunte quelle rilevate in questi anni.

Da tutto quanto sopra riportato deriva il seguente specchietto riassuntivo delle portate in gioco, per la centrale di Castelnovo Bariano:

Portata media attuale	= 56 l/s
Portata massima attuale rilevata	= 77 l/s
Portata massima attuale con probabilità di non superamento superiore al 91%	= 79 l/s

Per quanto riguarda la centrale di Occhiobello invece:

Portata media attuale	= 61 l/s
Portata massima attuale rilevata	= 100 l/s
Portata massima attuale con probabilità di non superamento superiore al 91%	= 87 l/s

L'impianto sarà quindi progettato secondo i seguenti criteri:

- 1) Verranno installate tre elettropompe in ciascun impianto;
- 2) La portate massime (79 l/s per Castelnuovo Bariano e 87 l/s per Occhiobello) verranno garantite dal funzionamento contemporaneo di 2 elettropompe;
- 4) Il valore di massimo rendimento della curva della singola pompa verrà ricercato in corrispondenza del valore di portata media (rispettivamente 56 l/s e 61 l/s), considerando il funzionamento di due pompe in parallelo;
- 5) Le curve delle pompe dovranno essere tali da poter sollevare al serbatoio pensile una portata pari a quella media (rispettivamente 56 l/s e 61 l/s) con 3 pompe.

4.3 Scelta delle pompe

La selezione delle elettropompe per il presente studio è stata effettuata dall'analisi dei cataloghi riportanti le curve di prestazione, forniti dalle ditte costruttrici. Ciascun impianto presenta una curva diversa a seconda che vengano utilizzate 1 o 2 pompe per il rilancio in rete dell'acqua. Sono stati quindi ricostruiti i grafici pompa-impianto sia per la centrale di Castelnuovo Bariano che per la centrale di Occhiobello, rappresentando dapprima il funzionamento che si avrebbe per l'attuale stato di fatto (funzionamento a 50 Hz), successivamente il funzionamento nello stato di progetto e con il sollevamento al pensile. In questi ultimi due casi si mettono a confronto il funzionamento a 50 Hz con quello a 47 Hz.

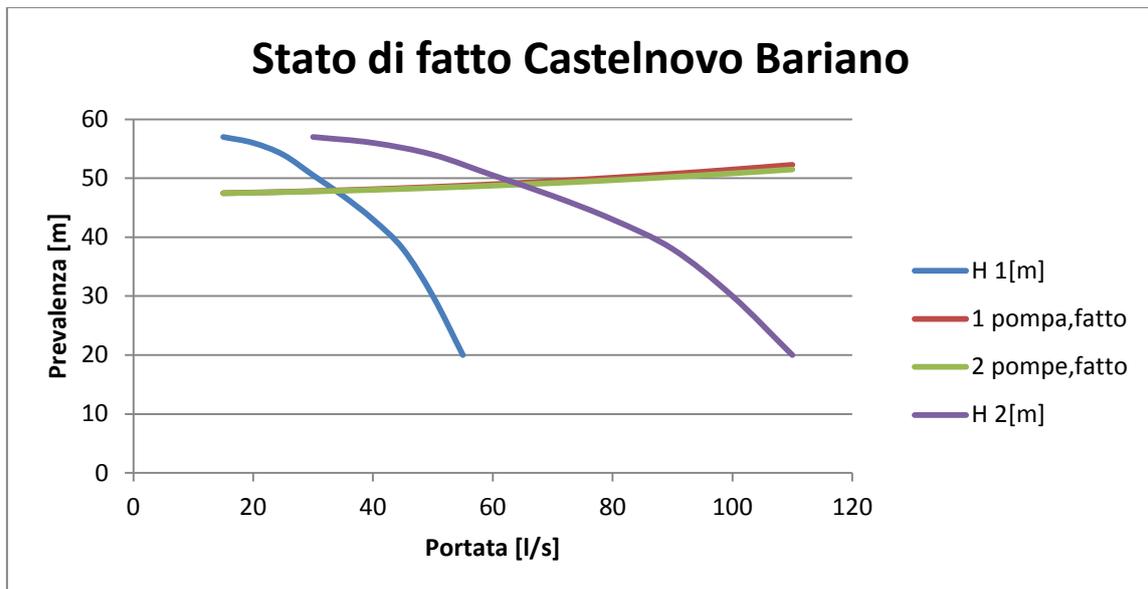


Figura 41. Stato di fatto Castelnuovo Bariano

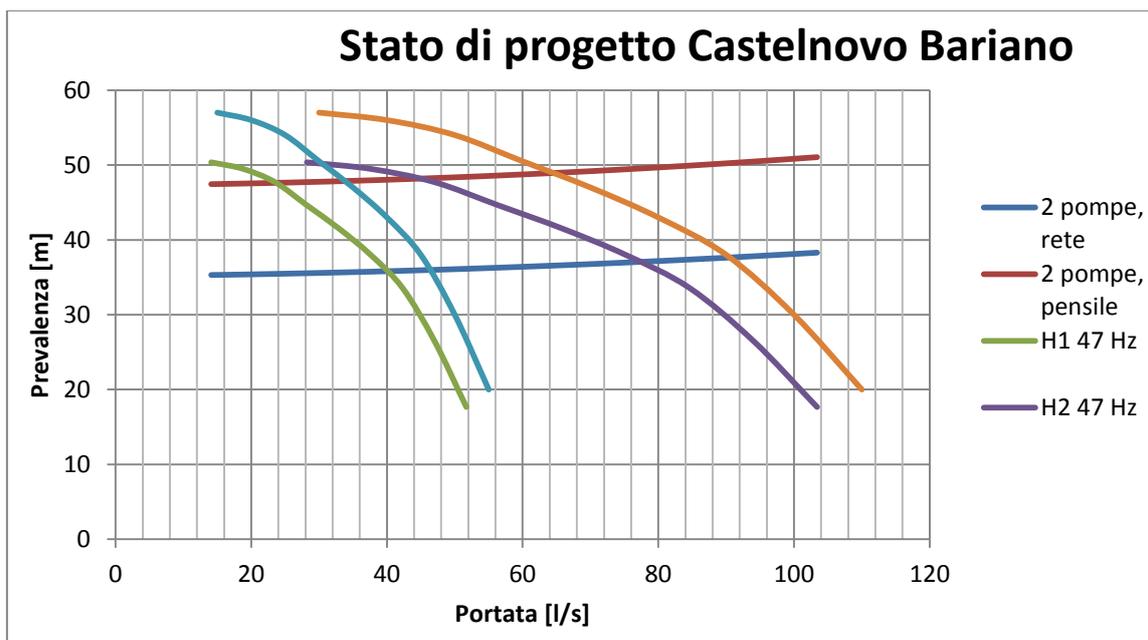


Figura 42. Stato di progetto Castelnuovo Bariano

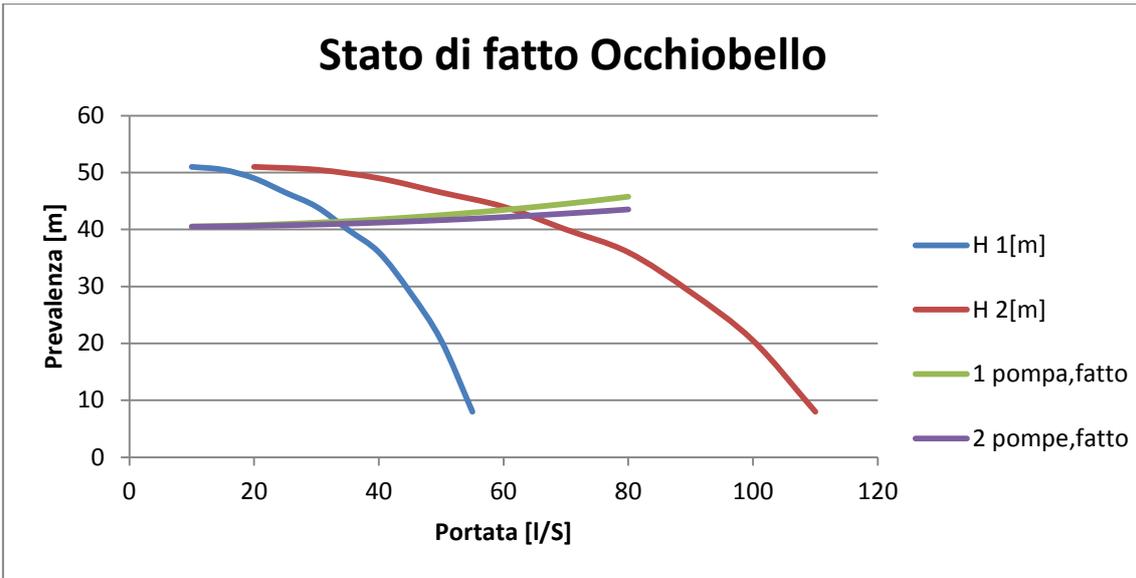


Figura 43. Stato di fatto Occhiobello

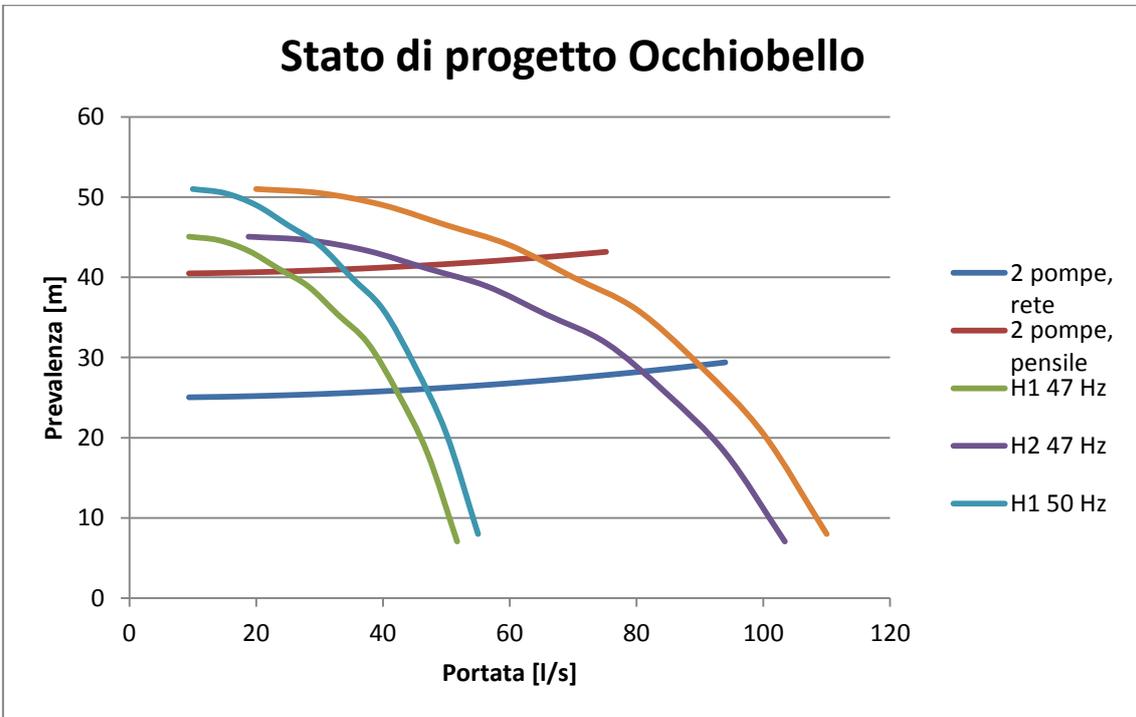


Figura 44. Stato di progetto Occhiobello

4.4 Stima dettagliata dei rendimenti

Nei capitoli precedenti i calcoli sono stati eseguiti tenendo conto di un rendimento medio, costante e pari a 0,52. Tale assunzione è verosimile per quanto riguarda lo stato di fatto, mentre è certamente penalizzante per lo stato di progetto: l'inverter infatti adegua la frequenza alle condizioni di funzionamento, ricercando sempre il massimo rendimento.

Per questo motivo, si vogliono ricavare i rendimenti puntuali da utilizzare sia per lo stato di fatto che per lo stato di progetto, in modo da ottenere risultati ancora più precisi ed affidabili.

Stato di fatto

Dalle tabelle fornite dai costruttori si ricavano i valori di portata Q [$\frac{m^3}{s}$], di prevalenza H [m] e di potenza assorbita P_2 [kW], grazie ai quali è possibile ricavare il rendimento idraulico e volumetrico:

$$\eta_{idr+vol} = \frac{g * Q * H}{P_2}$$

Nella formula sopra esposta g rappresenta l'accelerazione di gravità ed è pari a $9,81 \frac{m}{s^2}$.

Il rendimento totale si ricava moltiplicando il rendimento idraulico e volumetrico per il rendimento elettrico, assunto pari a 0,9 per quanto concerne lo stato di fatto.

Q tabella [l/s]	Q tabella [m ³ /s]	H tabella [m]	P2 [kW]	η idr+vol	η tot
25	0,025	60,7	26,6	0,55	0,50
30	0,03	60,7	29,4	0,60	0,54
40	0,04	60	34,6	0,68	0,61
50	0,05	58,3	39,5	0,72	0,65
60	0,06	55,8	43,9	0,74	0,67
70	0,07	52,5	47,8	0,75	0,67
80	0,08	48,5	51,7	0,73	0,66
90	0,09	43,3	55,7	0,68	0,61
100	0,1	36,8	58,8	0,61	0,55

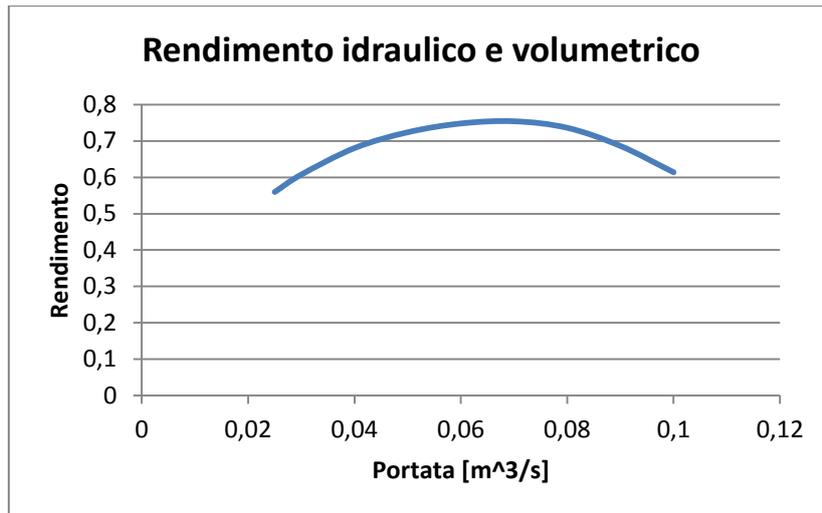


Figura 45. Rendimento idraulico e volumetrico in funzione della portata

Graficando il rendimento idraulico e volumetrico in funzione della portata è possibile ricavarne la linea di tendenza, in modo da poter calcolare il valore di tale rendimento per valori discreti di portata compresi tra gli 0 e gli 80 l/s, ad intervalli di 5 l/s.

Per ottenere il rendimento totale sarà sufficiente moltiplicare per il rendimento elettrico, sempre pari a 0,9.

Q fittizia [l/s]	η tot
0	0,18
5	0,26
10	0,33
15	0,39
20	0,45
25	0,50
30	0,54
35	0,58
40	0,61
45	0,63
50	0,65
55	0,65
60	0,66
65	0,65
70	0,64
75	0,62
80	0,59

A questo punto è stato inserito un controllo sulla portata: nel caso in cui non sia in funzione alcuna pompa, la portata è nulla, se risulta in funzione una pompa, la portata è esattamente quella rilevata dal sistema di telecontrollo, mentre se sono in funzione

due o tre pompe in parallelo la portata rilevata con il sistema di telecontrollo viene rispettivamente dimezzata o divisa per tre.

Un ulteriore controllo associa ad ogni range di portata della tabella sopra esposta il relativo valore di rendimento, che verrà inserito nel calcolo dell'energia già eseguito nel capitolo 2. Anziché utilizzare sempre un rendimento medio pari a 0,52 si utilizza dunque, per ogni intervallo di 5 minuti, il rendimento puntuale calcolato per quell'intervallo.

Nell'arco dei 4 anni analizzati risulta quindi un dispendio di energia pari a 1,69 GWh per la centrale di Castelnuovo Bariano e di 1,67 GWh per la centrale di Occhiobello. Tali risultati si discostano veramente di poco dai valori già calcolati al capitolo 2, a testimonianza del fatto che l'assunzione di un rendimento medio per lo stato di fatto è plausibile.

Stato di progetto

Per stimare i rendimenti nello stato di progetto si deve tenere conto di due aspetti. In primo luogo la variazione della velocità delle pompe avviene secondo un criterio ben preciso: ricercare la frequenza che renda massimo il rendimento idraulico e volumetrico. Tale rendimento presenterà quindi valori molto alti per un range di funzionamento ampio. Tuttavia, variando la frequenza, il rendimento elettrico subirà una diminuzione. In ogni caso, se nello stato di fatto si era assunto un rendimento elettrico del 90%, in questo caso si considera di utilizzare motori molto più recenti e prestanti, di classe IE3, che presentano la seguente curva di rendimento in funzione della frequenza:

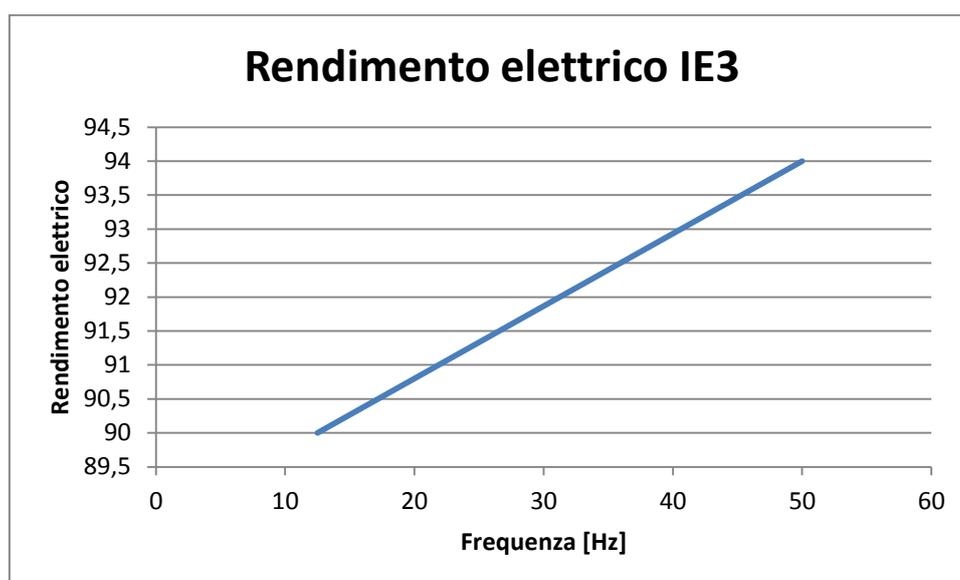


Figura 46. rendimento elettrico classe IE3

Come risulta evidente dal grafico il rendimento elettrico considerato nello stato di progetto è più alto del 90% nella fascia compresa tra i 20 e 50 Hz.

Questa duplice considerazione porta ad attendere un risultato, in termini di GWh totali richiesti, ben diverso da quello calcolato nei precedenti paragrafi.

Indicando con Q_2 e H_2 rispettivamente la portata e la prevalenza di due pompe in parallelo, si riporta in forma tabellare innanzitutto il funzionamento nominale a 50 Hz. Nella parte destra della seguente tabella invece è rappresentata la curva di due pompe in parallelo al variare della frequenza. Il caso riportato corrisponde alla frequenza di 47,5 Hz.

L'esempio riguarda la centrale di Occhiobello:

Curva pompa 50 Hz				Curva pompa a 47,5 Hz			
Q1 [l/s]	Q2 [l/s]	H 1 [m]	H 2 [m]	Q1 [l/s]	Q2 [l/s]	H 1 [m]	H 2 [m]
0	0	57,3	57,3	0	0	51,7	51,7
5	10	57,2	57,2	4,75	9,5	51,6	51,6
10	20	57,1	57,1	9,5	19	51,5	51,5
15	30	57	57	14,25	28,5	51,4	51,4
20	40	56	56	19	38	50,5	50,5
25	50	54	54	23,75	47,5	48,7	48,7
30	60	50,5	50,5	28,5	57	45,5	45,5
35	70	47	47	33,25	66,5	42,4	42,4
40	80	43	43	38	76	38,8	38,8
45	90	38	38	42,75	85,5	34,2	34,2
50	100	30	30	47,5	95	27,0	27,0
55	110	20	20	52,25	104,5	18,0	18,0

Numero poli
2
Giri a 50 Hz
3000
Giri a 47,5 Hz
2850
Hz
47,5

Utilizzando le formule:

$$n = \frac{120 * f}{p}$$

$$Q_{Hz} = \frac{n_{Hz}}{n_{50}} * Q_{50}$$

$$H_{Hz} = \left(\frac{n_{Hz}}{n_{50}}\right)^2 * H_{50}$$

si ricavano portata e prevalenza corrispondenti alla nuova frequenza che viene impostata. Il numero dei giri è indicato con n , f rappresenta la frequenza, mentre p il numero dei poli. Il pedice 50 indica che la grandezza è considerata nel suo funzionamento appunto a 50 Hz, mentre il pedice Hz che la frequenza varia.

Una volta riportata graficamente la curva dell'impianto per due pompe in parallelo, risulta agevole trovare il valore di frequenza per cui la curva di due pompe in parallelo soddisfi il valore di una generica coppia portata-prevalenza. È sufficiente infatti annotare il punto in cui si intersecano le due curve, al variare delle coppie Q-H, con la portata che varia discretamente da 0 ad 80 l/s, ad intervalli di 5 l/s.

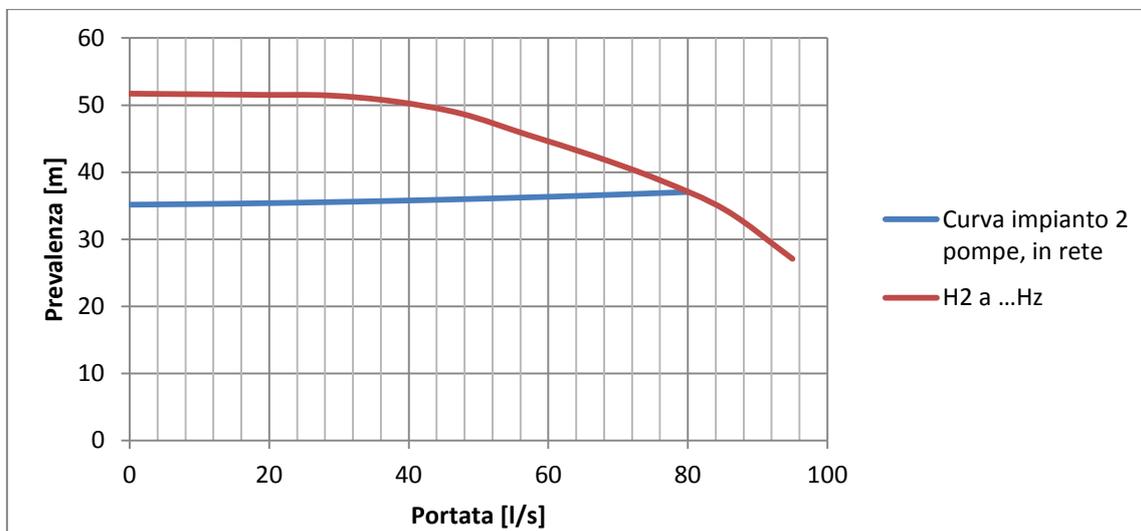


Figura 47. Esempio del punto operativo della centrale di Castelnuovo Bariano, con pompe a 47,5 Hz.

La tabella seguente riporta, per frequenze comprese tra 30 e 50 Hz ad intervalli di 1 Hz, le coppie Q-H relative alla frequenza indicata. Il rendimento idraulico e volumetrico è stato ricavato dalla curva della pompa ed è costante con la frequenza in ogni intervallo. La seguente tabella riporta a titolo di esempio la variazione di rendimento tra i 50 Hz e i 46 Hz nel funzionamento di una pompa per la centrale di Castelnuovo Bariano:

Hz	50									
Q [l/s]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
H [m]	57,3	57,2	57,1	57	56	54	50,5	47	43	38
η idr+vol	0,2	0,3	0,44	0,56	0,655	0,705	0,735	0,74	0,73	0,68
Hz	49									
Q [l/s]	0	4,9	9,8	14,7	19,6	24,5	29,4	34,3	39,2	44,1
H [m]	55,0	54,9	54,8	54,7	53,7	51,8	48,5	45,1	41,2	36,4
η idr+vol	0,2	0,3	0,44	0,56	0,655	0,705	0,735	0,74	0,73	0,68
Hz	48									
Q [l/s]	0	4,8	9,6	14,4	19,2	24	28,8	33,6	38,4	43,2
H [m]	52,8	52,7	52,6	52,5	51,6	49,7	46,5	43,3	39,6	35,0
η idr+vol	0,2	0,3	0,44	0,56	0,655	0,705	0,735	0,74	0,73	0,68
Hz	47									
Q [l/s]	0	4,7	9,4	14,1	18,8	23,5	28,2	32,9	37,6	42,3
H [m]	50,6	50,5	50,4	50,3	49,4	47,7	44,6	41,5	37,9	33,5
η idr+vol	0,2	0,3	0,44	0,56	0,655	0,705	0,735	0,74	0,73	0,68
Hz	46									
Q [l/s]	0	4,6	9,2	13,8	18,4	23	27,6	32,2	36,8	41,4
H [m]	48,4	48,4	48,3	48,2	47,3	45,7	42,7	39,7	36,3	32,1
η idr+vol	0,2	0,3	0,44	0,56	0,655	0,705	0,735	0,74	0,73	0,68

Ad ogni valore discreto di portata corrisponde quindi un valore di frequenza che rende il rendimento massimo. Nella sezione della tabella relativa a questo valore di frequenza ci sarà la coppia Q-H considerata: il rendimento idraulico e volumetrico di tale coppia è quello da considerare per il range di portata preso in esame.

Infine il rendimento idraulico e volumetrico, come già detto, andrà moltiplicato per il nuovo rendimento elettrico calcolato al variare della frequenza.

La seguente tabella riporta i rendimenti utilizzati per la centrale di Castelnovo Bariano:

Q fittizia [l/s]	Impianto in rete, 2 pompe	Hz	η idr+vol	η elettrico	η totale
0	35,15	39	0,2	92,82	18,5
5	35,19	39	0,36	92,82	33,4
10	35,25	39	0,55	92,82	51,0
15	35,31	39	0,65	92,82	60,3
20	35,38	39	0,705	92,82	65,4
25	35,46	40	0,735	92,9	68,3
30	35,56	40	0,73	92,93	67,8
35	35,66	40	0,69	92,93	64,1
40	35,77	41	0,7	93,04	65,1
45	35,90	42	0,71	93,14	66,1
50	36,03	42	0,735	93,14	68,4
55	36,17	43	0,74	93,25	69,0
60	36,33	44	0,735	93,36	68,6
65	36,49	45	0,735	93,46	68,6
70	36,66	46	0,7325	93,57	68,5
75	36,84	47	0,73	93,68	68,3
80	37,04	48	0,73	93,78	68,4

Per la centrale di Occhiobello invece i valori di rendimento considerati sono:

Q fittizia [l/s]	Impianto in rete, 2 pompe	Hz	η idr+vol	η elettrico	η totale
0	25	34,7	0,18	92,36	16,6
5	25,04	34,8	0,32	92,38	29,5
10	25,07	35	0,53	92,40	48,9
15	25,16	35	0,66	92,40	60,9
20	25,29	35,5	0,7	92,45	64,7
25	25,43	36	0,71	92,50	65,6
30	25,61	36,5	0,69	92,56	63,8
35	25,80	37	0,68	92,61	62,9
40	26,03	38	0,68	92,72	63,0
45	26,27	38,5	0,69	92,77	64,0
50	26,55	39,5	0,71	92,88	65,
55	26,84	41	0,71	93,04	66,0
60	27,17	41,5	0,695	93,09	64,7
65	27,51	42,5	0,694	93,20	64,
70	27,89	44	0,68	93,36	63,
75	28,28	46	0,675	93,57	63,1
80	28,71	47	0,67	93,68	62,7

4.5 Risultati finali e confronto tra le due centrali

Utilizzando i rendimenti ricavati nel precedente paragrafo, si può finalmente stimare l'energia che sarebbe stata necessaria, nei quattro anni analizzati, se fossero state installate delle pompe a regime variabile anziché pompe a giri fissi.

L'energia necessaria nello stato di fatto attuale risulta di 1,67 GWh per la centrale di Castelnuovo Bariano e di 1,66 GWh per la centrale di Occhiobello. Le due centrali, nel periodo preso in esame, hanno sollevato rispettivamente $7.100.000 m^3$ e $7.700.000 m^3$ di acqua: ciò restituisce i valori rispettivamente di $0,24 \frac{kWh}{m^3}$ e $0,22 \frac{kWh}{m^3}$.

Dal momento che l'energia richiesta è praticamente la stessa per le due centrali, ma che ad Occhiobello vengono sollevati circa $600.000 m^3$ in più, in quest'ultima centrale si consegue un maggior risparmio energetico, testimoniato dal valore inferiore del parametro dei $\frac{kWh}{m^3}$.

Con il primo calcolo eseguito per lo stato di progetto, per il quale sono stati utilizzati dei rendimenti indicativi, si evidenzia una differenza, in termini di GWh richiesti, per le due centrali.

Infatti la centrale di Occhiobello, che solleva annualmente volumi maggiori di acqua, necessita di 1,37 GWh (quindi $0,18 \frac{kWh}{m^3}$) contro gli 1,13 GWh di Castelnuovo Bariano (quindi $0,16 \frac{kWh}{m^3}$).

Utilizzando valori più precisi ed attendibili per i rendimenti, si ottiene un risparmio ancora maggiore: per la centrale di Castelnuovo Bariano sono sufficienti 0,85 GWh ($0,12 \frac{kWh}{m^3}$) mentre per la centrale di Occhiobello sono necessari 1,11 GWh ($0,14 \frac{kWh}{m^3}$).

Le due tabelle seguenti sintetizzano i risultati esposti:

Castelnuovo Bariano				
GWh totali, stato di fatto	GWh totali, primo stato di progetto	GWh totali, con rendimenti dettagliati	kWh/m ³ primo stato di progetto	kWh/m ³ rendimenti dettagliati
1,67	1,13	0,85	0,16	0,12

Occhiobello				
GWh totali, stato di fatto	GWh totali, primo stato di progetto	GWh totali, con rendimenti dettagliati	kWh/m ³ primo stato di progetto	kWh/m ³ rendimenti dettagliati
1,66	1,37	1,11	0,18	0,14

Per quantificare il risparmio conseguito si utilizza la formula:

$$\text{risparmio} = (kWh_{\text{fatto}} - kWh_{\text{progetto}}) * c$$

in cui $c = 0,15 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$.

La centrale di Castelnuovo Bariano, per la quale il risparmio energetico risulta di 840.000 kWh, ovvero il 50% del consumo totale dello stato di fatto, avrebbe potuto consentire un risparmio di 126.000 € se in questi ultimi quattro anni fosse stato presente l'impianto proposto nello stato di progetto. Considerando un anno medio si può ipotizzare un risparmio annuale di circa 31.500 €.

I calcoli eseguiti per la centrale di Occhiobello invece restituiscono un risparmio energetico di 560.000 kWh, pari al 34% dell'energia attuale richiesta. Se l'intervento di efficientamento fosse stato attuato nel 2012, sarebbero stati risparmiati circa 85.000 €, per un risparmio medio annuo di circa 21.000 €.

4.6 Ulteriori accorgimenti

Lo stato di progetto prevede l'installazione di un inverter per ciascuna pompa di rilancio in rete. Ovviamente questo intervento necessita di un adattamento di tutto il sistema alle nuove condizioni che si vengono a creare.

Innanzitutto si vuole ricordare come il serbatoio pensile non venga eliminato dal layout dell'impianto, ma venga tenuto come riserva in caso di guasti o altre emergenze. Nel primo nodo idraulico dopo il pensile verrà infatti inserita una idrovalvola che permetta di eseguire giornalmente lo svuotamento e il successivo riempimento del serbatoio. Il ricambio giornaliero consentirà di assicurare la salubrità e la qualità dell'acqua contenuta.

La presenza del pensile, sebbene comportasse notevoli perdite per il sistema rispetto al pompaggio diretto in rete, permetteva di equilibrare tutto il sistema, vista l'inerzia dell'ingente volume di acqua a disposizione. In caso di interruzione repentina del pompaggio dovuta a rarissimi ma possibili guasti nella fornitura elettrica si ha l'insorgenza di notevoli oscillazioni di pressione nel sistema.

Il sistema è dotato di semplici dispositivi di controllo delle oscillazioni pressione.

In caso di repentino spegnimento della stazione di pompaggio si ha inizialmente una forte depressione data dall'inerzia della massa d'acqua in moto nelle condotte. Tale depressione sarà assorbita da una valvola di non ritorno installata nella fossa tra la condotta di aspirazione e la condotta di mandata. Il volume di riserva aspirato nella mandata arriva direttamente dalle vasche a terra quindi il volume disponibile è illimitato rispetto alla rapidità del fenomeno. Le vasche a terra fungono pertanto da cassa di espansione per l'onda di depressione.

Successivamente si ha un'onda di pressione di ritorno positiva che tuttavia nella configurazione dei tubi viene scaricata direttamente nel serbatoio pensile stante che la mandata del pensile sia sempre aperta.

Il Serbatoio pensile funge pertanto da cassa di espansione per le sovrappressioni di ritorno.

Durante il normale funzionamento le variazioni di pressione dovute alla modifica del regime idraulico saranno di lieve entità in quanto gestite dagli inverter.

5. Giustificazioni finanziarie

I costi da sostenere per l'adeguamento delle centrali alle nuove condizioni di progetto sono riassunti nella seguente tabella:

Voce	Unità di misura	Quantità	Prezzo unitario	Prezzo totale
Fornitura e posa in opera di elettropompe ad asse verticale o orizzontale da acquedotto di potenza 30 kW - compreso motore elettrico e collegamenti elettrici ed idraulici	cadauno	3	€ 6.000,00	€ 18.000,00
Fornitura e posa in opera di inverter per motori da 30 kW	cadauno	3	€ 5.000,00	€ 15.000,00
Adeguamento dell'impianto elettrico	corpo	1	€ 4.000,00	€ 4.000,00
Adeguamenti dell'impianto idraulico	corpo	1	€ 3.000,00	€ 3.000,00
TOTALE				€ 40.000,00

Polesine Acque considera usualmente un tempo tecnico di ammortamento di 12 anni per gli impianti di sollevamento. Nel calcolo dei parametri economici che tengono conto del fattore tempo si farà quindi riferimento ad un periodo di 12 anni come vita utile dell'investimento.

Per evitare di sottostimare l'investimento che si andrà a perfezionare, si considera un costo totale di investimento maggiorato del 10%, per soppesare eventuali imprevisti.

Il costo di investimento totale per ciascuna centrale risulta quindi di 44.000 € e il tasso di sconto viene assunto del 5%.

5.1 Parametri economici

Nell'analisi di investimento delle soluzioni delle due centrali di Castelnuovo Bariano e Occhiobello, verranno utilizzati i seguenti indici economici per valutare la convenienza o meno del processo di efficientamento.

Il tempo di ritorno

L'indice economico più semplice e di immediata comprensione è il tempo di ritorno. Esso rappresenta il numero di anni necessari affinché le entrate eguaglino l'investimento iniziale. Pertanto si auspicano valori piccoli di tale parametro, in modo da ripagare velocemente l'investimento ed iniziare a conseguire guadagni netti. È possibile calcolare il valore del tempo di ritorno o payback (PB) mediante la formula:

$$PB = \frac{I_0}{E_i}$$

nella quale con I_0 si indica l'investimento iniziale di 44.000 € mentre con E_i il flusso di cassa netto annuale, pari a 31.500 € per la centrale di Castelnuovo Bariano e di 21.175 € per la centrale di Occhiobello. Generalmente nel mondo imprenditoriale si ritengono soddisfacenti valori di PB inferiori a 2-3 anni mentre si tende a scartare investimenti con valori superiori a 4-5 anni.

Se da un lato l'utilizzo di questo indice economico risulta semplice e veloce, offrendo una "misura del rischio" per l'investitore, dall'altro lato presenta due inconvenienti principali:

- Non tiene conto in nessun modo delle disponibilità che si verificano dopo il recupero dell'investimento, offrendo una visione solamente parziale dei benefici;
- Poiché non si attualizza, non viene considerato il valore del tempo. Il valore è dunque attendibile solamente per orizzonti temporali brevi.

Dai calcoli risulta:

- $PB_{CNB} = 1,4$ anni
- $PB_{OCB} = 2$ anni

Con il pedice *CNB* si intende la centrale di Castelnuovo Bariano, con il pedice *OCB* invece si indica che il parametro si riferisce alla centrale di Occhiobello.

Valore attuale netto

Il Valore Attuale Netto rappresenta il valore attuale di una serie attesa di flussi di cassa. La somma dei flussi di cassa non è semplicemente aritmetica, ma tiene conto del valore del tempo, attualizzando i singoli addendi al tasso di interesse r , secondo la seguente formula:

$$VAN = \sum_{j=1}^n \frac{E_j}{(1+r)^j} - I_0$$

E_j rappresenta il flusso di cassa all'anno j -esimo, r il tasso di rendimento al quale attualizzare per gli n anni di vita utile. Il vantaggio di utilizzare questo indice, seppur più complesso da calcolare rispetto ai precedenti che non consideravano il valore del tempo, è che offre una prospettiva completa dell'investimento. Se il VAN risulta negativo l'investimento, nella sua vita utile, genererà una perdita, mentre un VAN positivo sta ad indicare la creazione di un reale beneficio economico.

Dai calcoli si ottiene:

- $VAN_{CNB} = 224.000 \text{ €}$
- $VAN_{OCB} = 137.000 \text{ €}$

Indice di profittabilità

Consente di confrontare iniziative con investimenti di entità differente.

La formula:

$$IP = \frac{VAN}{I_0}$$

restituisce i valori di:

- $IP_{CNB} = 5,35$
- $IP_{OCB} = 3,27$

Tale indice permette di stimare quanto è vantaggioso un investimento rispetto all'investimento attuato. Poiché, a parità di investimento iniziale, la centrale di Castelnuovo Bariano persegue un maggiore risparmio sia energetico che economico, l'indice di profittabilità è più alto rispetto a quello della centrale di Occhiobello.

Tasso Interno di Redditività

Il tasso interno di redditività (TIR) corrisponde al tasso per cui il VAN risulta uguale a zero. Va calcolato per iterazioni successive della formula:

$$I_0 = \sum_{j=1}^n E_j * (1 + TIR)^{-j}$$

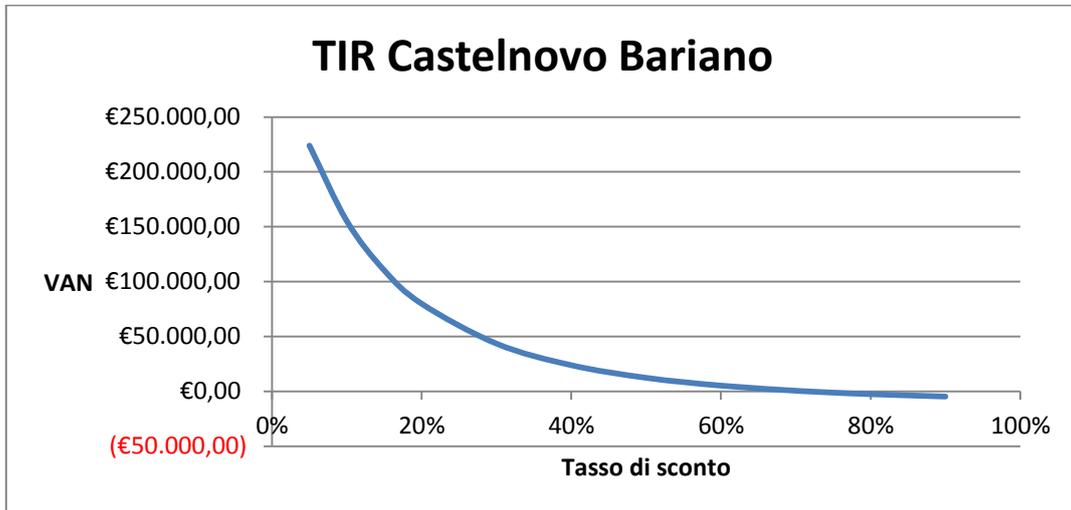


Figura 48. TIR della centrale di Castelnovo Bariano

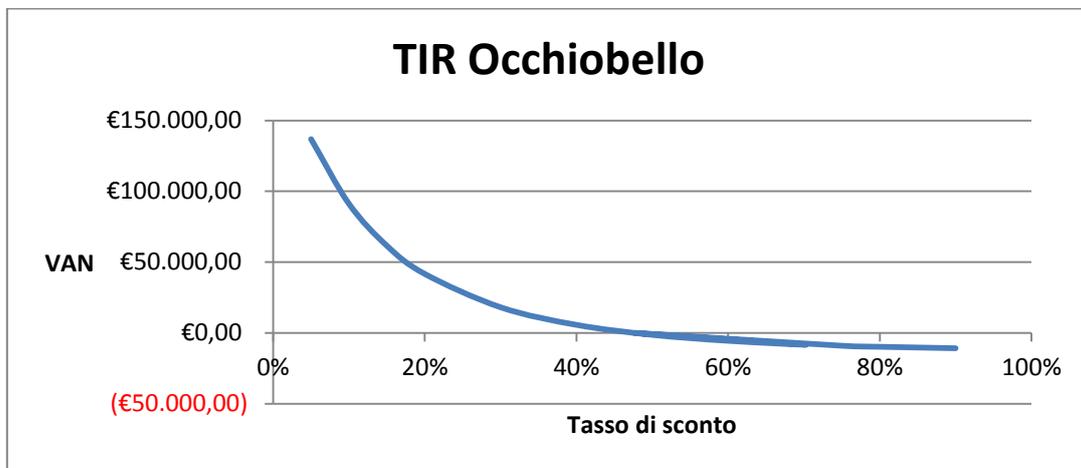


Figura 49. TIR della centrale di Occhiobello

Se il TIR risulta essere maggiore del costo opportunità del capitale, ovvero il tasso di interesse r , l'investimento è accettabile, in caso contrario il VAN risulta per definizione negativo.

In entrambi i casi presi in esame il TIR risulta ampiamente maggiore del tasso di interesse, giustificando abbondantemente la bontà dell'investimento:

- $TIR_{CNB} = 71\%$
- $TIR_{OCB} = 48\%$

Costo evitato di combustibile

Come ultimo indice economico si presenta il costo evitato del combustibile, parametro più legato al mondo energetico rispetto agli altri citati. Esso quantifica il risparmio derivante dal mancato acquisto di energia elettrica reso possibile dall'intervento di efficientamento eseguito. È definito come:

$$CEC = \frac{I_0 * \frac{r}{1 - (1 + r)^{-n}}}{RISP_{en}}$$

In cui I_0 è ancora una volta l'investimento iniziale, r il tasso di interesse ed n gli anni di vita utile. $RISP_{en}$ rappresenta invece il risparmio di energia annuo, pari a 210.000 kWh per la centrale di Castelnovo Bariano e di 140.000 kWh per la centrale di Occhiobello. Si rivela particolarmente interessante il confronto tra il CEC, ovvero il costo di ogni unità di energia risparmiata nel futuro attualizzata ad oggi e il costo attuale dell'energia primaria (in questo caso energia elettrica): qualora il CEC risultasse inferiore al prezzo dell'energia elettrica attuale, l'investimento genererebbe un reale risparmio, da cui l'azienda trarrebbe un reale beneficio economico.

- $CEC_{CNB} = 0,023 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$;
- $CEC_{OCB} = 0,035 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$.

5.2 Certificati bianchi

Il 24 Aprile 2004 il Ministero dell'Industria, Commercio e Artigianato in accordo con il Ministero dell'Ambiente hanno emesso i cosiddetti "Decreti Gemelli", i quali sono alla base del meccanismo dei Certificati Bianchi o Titoli di Efficienza Energetica (TEE).

Se essi hanno solamente definito un nuovo approccio normativo mirato all'incremento dell'efficienza energetica sul territorio nazionale, i D.M del 20 luglio 2004 "elettrico e gas" hanno dato l'impulso decisivo al sistema dei TEE [22].

I decreti seguenti, ovvero il D.M 21 Dicembre 2007, il D. Lgs 3 Marzo 2011 e il D.M 28 Dicembre 2012, trattavano alcune modifiche significative.

I titoli di efficienza energetica sono titoli negoziabili che attestano il raggiungimento di determinati risparmi energetici negli usi di energia finale, mediante interventi e progetti volti all'incremento dell'efficienza energetica.

A partire dal decreto ministeriale del 20 Luglio 2004 i distributori di energia elettrica e gas naturale sono incentivati a conseguire annualmente determinati obiettivi quantitativi di risparmio di energia primaria.

La normativa stabilisce che due categorie di soggetti possono accedere al meccanismo dei TEE:

- i soggetti obbligati, ovvero le grosse aziende distributrici di gas e/o energia elettrica (aventi più di 5000 utenti) che puntano al miglioramento dell'efficienza energetica presso gli utenti finali. Questi soggetti devono raggiungere traguardi esprimibili come rapporto tra le quantità di energia elettrica (o gas) erogata dal distributore e la quantità totale nazionale erogata. Per far ciò possono realizzare direttamente gli interventi presso gli utenti finali (in grado di ottenere la certificazione) oppure possono acquisire titoli conseguiti da altri soggetti. Le modalità di compravendita dei titoli sono la contrattazione bilaterale o direttamente il mercato dei titoli;
- i soggetti volontari: le ESCo e le società controllate dai soggetti obbligati, i distributori di gas ed energia elettrica con meno di 5000 utenti, le società con obbligo di Energy Manager e le imprese operanti nel settore industriale, civile, terziario, agricolo o dei trasporti e servizi pubblici, compresi enti pubblici che abbiano provveduto alla nomina del "responsabile per la conservazione e l'uso razionale dell'energia" (Energy Manager) oppure siano certificati ISO 50001 e mantengano in essere queste condizioni per tutta la vita tecnica dell'intervento.

5.3. Valutazione e verifica dei risparmi di energia primaria

I metodi previsti per valutare le proposte di risparmi energetico che consentano l'erogazione dei Certificati Bianchi sono tre [23]:

1. La valutazione standardizzata è il metodo più semplice ed immediato perché non è necessario presentare misurazioni al fine di certificare i risparmi. Infatti i TEE associati ad ogni intervento sono legati al numero di UFR (unità fisiche di riferimento) oggetto dell'intervento. Per unità di riferimento si può intendere il numero di motori elettrici sostituiti, così come i metri quadrati di superfici isolati o l'inserimento di inverter, ecc..
2. La valutazione analitica permette di quantificare il risparmio seguendo un algoritmo specifico, i cui parametri principali devono essere lo stato di funzionamento e l'assorbimento energetico dell'impianto oggetto dell'intervento.
3. La valutazione a consuntivo è invece prevista per le proposte per le quali non sono disponibili schede di valutazione standardizzata oppure laddove gli interventi sono eterogenei. In questo caso è necessario elaborare un algoritmo che dovrà essere approvato dal GSE.

Grazie all'intervento di efficientamento si ottiene un risparmio di energia primaria, base di valutazione per il numero di TEE conseguibili. Ogni titolo riconosciuto equivale al risparmio di una tonnellata equivalente di petrolio (tep).

5.4 Stima dei TEE ottenibili

Polesine Acque S.p.A. non appartiene alla categoria dei soggetti obbligati ma ha le caratteristiche per poter attuare interventi di efficientamento energetico sulle proprie reti ed impianti tali da poter ottenere Certificati Bianchi.

È stato verificato che i progetti di rifacimento dei comparti di rilancio finale di Castelnuovo Bariano e Occhiobello possano rientrare tra quelli per cui è possibile richiedere i certificati bianchi.

La categoria di intervento ricade tra quelli cosiddetti “a consuntivo”, secondo la catalogazione delle linee guida approvate con Deliberazione dell’AEEG del 27/10/2011 EEN 9/11; essa prevede che il numero di TEE da riconoscere derivi dalla misurazione effettiva del consumo energetico prima e dopo la realizzazione dell’intervento di efficientamento. Saranno quindi installati presso le sezioni di rilancio delle centrali degli analizzatori dei consumi elettrici che monitoreranno e registreranno in continuo tutti i parametri delle elettropompe di rilancio (assorbimenti, voltaggio, angolo di sfasamento, potenza ed energia attive e reattive). È altresì già presente in impianto una misura in continuo della portata sollevata.

Tutte le misure saranno integrate in un software specifico che consentirà la registrazione e il monitoraggio in continuo del parametro di riferimento che verrà utilizzato per valutare l’effettivo efficientamento energetico, ossia il consumo specifico per metro cubo sollevato: $\frac{kWh}{m^3}$.

Nella presente progettazione si vogliono fornire alcune prime indicazioni che consentono di dare un’idea dell’impatto economico che può avere l’accesso al sistema dei certificati bianchi mediante l’intervento in questione. A tal fine una prima stima dei TEE annualmente ottenibili può essere condotta suddividendo il valore previsto di riduzione del consumo energetico per il coefficiente 5348, che esprime il rapporto tra energia primaria (in TEP) e kWh elettrico. Questo valore deve essere successivamente moltiplicato per un coefficiente τ , previsto dalla Deliberazione sopra richiamata, che tiene conto del fatto che i Certificati Bianchi sono emessi per cinque anni mentre la vita utile dell’intervento è superiore; nel caso in questione τ assume il valore di 2,65. Pertanto i TEE annualmente acquisibili sono pari a:

- Per la centrale di Castelnuovo Bariano

$$TEE_{annui} = \frac{\Delta kWh}{5.348} * \tau = \frac{210000}{5348} * 2,65 = 104 TEE$$

- Per la centrale di Occhiobello

$$TEE_{annui} = \frac{\Delta kWh}{5.348} * \tau = \frac{140000}{5348} * 2,65 = 69 TEE$$

Nel periodo di osservazione Giugno 2015- Maggio 2016 il contributo tariffario unitario definitivo che è stato riconosciuto per singolo TEE è stato pari a 116,01 €. Pertanto qualora l'intervento riesca ad accedere al meccanismo dei certificati bianchi è lecito attendersi un contributo economico dell'ordine di:

- 12.000 €/anno per cinque anni, nel caso della centrale di Castelnuovo Bariano;
- 8.000 €/anno per cinque anni, nel caso della centrale di Occhiobello.

Centrale	Castelnuovo Bariano	Occhiobello
ΔkWh annuale	210000	140000
Coefficiente kWh/Tep	5348	5348
tau	2,65	2,65
TEE annui	104	69
Contributo unitario [€/TEE]	116,01	116,01
Contributo annuale per cinque anni [€]	12072	8048

Conclusioni

Questo lavoro di tesi evidenzia come l'efficienza energetica sia uno strumento di fondamentale importanza sia per generare un tangibile risparmio energetico, sia per ottenere un cospicuo ritorno economico negli impianti di potabilizzazione. Sono stati studiati i casi di due centrali, Castelnuovo Bariano ed Occhiobello: addentrandosi nell'intera filiera produttiva, si è scoperto che la principale causa di inefficienza riguarda il sistema di rilancio in rete, composto da elettropompe a giri fissi e passaggio obbligato per un serbatoio pensile, con successiva strozzatura fino alla pressione richiesta dalle utenze.

L'attuale stato di fatto richiede circa 420.000 kWh annui per entrambe le centrali, nonostante ad esempio la centrale di Castelnuovo Bariano sollevi circa l'8% in meno in termini di volume di acqua. Ciò significa che il consumo di energia non si adatta alla reale richiesta delle utenze, con l'intero sistema che si rivela inefficiente. Il parametro principale per registrare un eventuale miglioramento dell'efficienza è rappresentato dai chilowattora per metro cubo sollevato.

La soluzione studiata in questa tesi prevede di munire le pompe di inverter, in modo che possano funzionare a regime variabile e quindi adeguarsi alla reale richiesta delle utenze. Risulta altresì possibile rilanciare direttamente l'acqua in rete, by-passando il serbatoio pensile ed eliminando così le svantaggiose dissipazioni dovute alla valvola di strozzamento. Inoltre l'inserimento dell'inverter permette alle pompe di operare sempre nel punto di massimo rendimento delle nuove condizioni operative. Se nello stato di fatto si riscontrano valori di $0,24 \frac{kWh}{m^3}$ per la centrale di Castelnuovo Bariano e di $0,22 \frac{kWh}{m^3}$ per la centrale di Occhiobello, una volta eseguito l'intervento di efficientamento si arriva ad ottenere valori rispettivamente di $0,12 \frac{kWh}{m^3}$ e $0,14 \frac{kWh}{m^3}$. Munire le pompe di inverter permette sostanzialmente un risparmio energetico del 35-50%. La centrale di Castelnuovo Bariano, elaborando la minor portata di acqua, risulta più avvantaggiata poiché il nuovo intervento si adegua meglio alle basse richieste delle utenze, permettendo una minore dissipazione di energia.

In ogni caso, a fronte di un investimento iniziale di circa 44.000 €, si ottengono tempi di ritorno di 2 anni per la centrale di Occhiobello e addirittura di 1,4 anni per la centrale di Castelnuovo Bariano. Questi valori graditi, uniti ad indici VAN molto alti, trovano ulteriore riscontro anche nel calcolo del TIR, compreso tra il 50% e il 70%. L'investimento è certamente da perfezionare ed attuare, considerando che potrebbe sicuramente risultare idoneo per quanto concerne il meccanismo dei certificati bianchi. È possibile infatti ambire al riconoscimento di TEE per un totale di circa 20.000 € annui per 5 anni.

Prima dell'introduzione degli inverter il sistema del sollevamento al pensile era il migliore adottabile per garantire la sicurezza idraulica della rete. Inoltre presentava il vantaggio di fornire una riserva idrica ed è per questo che è stato applicato e mantenuto fino ad oggi.

Il nuovo sistema proposto consente di accostare i vantaggi derivanti dal risparmio energetico a quelli di mantenere una riserva idrica del pensile in caso di necessità.

Possibili studi futuri per un ulteriore miglioramento dell'efficienza energetica possono riguardare la diminuzione della potenza delle elettropompe, in modo da diminuire sia l'impegno di potenza con il gestore elettrico, sia il costo dell'investimento iniziale.

Ringraziamenti

Ringrazio la Polesine Acque S.P.A per avermi concesso l'opportunità di confrontarmi con una realtà nuova per me. In particolare Andrea, che oltre alla puntuale disponibilità, mi ha arricchito con preziosi consigli e ha risposto alle mie domande, chiarendo i miei dubbi. Daniel, Angelo, Ivan e Massimo per aver dimostrato entusiasmo durante i sopralluoghi: anziché un disturbo al loro lavoro mi sono sentito una novità.

La zia Luigina, sempre attiva e attenta nei propormi occasioni, come in questo frangente.

Lo zio Marco, precursore di idee, pozzo di scienza e magico risolutore di problemi informatici.

Ringrazio inoltre il professor Arturo Lorenzoni, relatore di questa tesi, per aver catturato la mia attenzione nel corso di Economia dell'Energia, facendo ciò che ogni insegnante dovrebbe fare: trasmettere l'insegnamento e stimolare la curiosità degli studenti.

I miei compagni di studi, Alberto, Daniele, Enrico e Francesco. Per il clima di complicità venutosi a creare, che ha permesso di affrontare serenamente anche i periodi più intensi.

Ringrazio Filippo e Francesco per l'interesse manifestato nei confronti di questo lavoro di tesi e la loro utile consulenza.

Ringrazio la mia famiglia per il sostegno, la presenza e l'esempio.

Angela, perché la sua stima e il suo attaccamento, sono per me fonte di entusiasmo in ogni cosa che faccio.

Ringrazio chiunque abbia contribuito a rendermi una persona migliore, in particolare gli amici di sempre, senza i quali non potrei aver provato la felicità.

Bibliografia

- [1] R. Moneta, I. Bertini, N. Di Franco, A. Federici, L. Manduzio, C. Martini, “Rapporto annuale efficienza energetica 2016”.
- [2] ENEA, “L’efficienza Energetica in Italia” 2011.
- [3] IEA, www.IEA.org International Energy Agency.
- [4] “Progettare i piccoli impianti di scarico civili “, Casa editrice la fiaccola S.r.l.
- [5] “Segni grafici e schemi elettrici”, TNE
- [6] “Acquedotti”, HOEPLI
- [7] “Water Quality & Treatment”, McGrawHill
- [8] “Potabilizzazione delle acque”, a cura di Carlo Collivignarelli e Sabrina Sorlini
- [9]” Pozzi per l’acqua”, Maurizio Gorla
- [10] “Impianti di trattamento acque: verifiche di funzionalità e collaudo”, HOEPLI
- [11]”Gli acquedotti del Polesine, cento anni di storia”
- [12] “Selezione delle pompe centrifughe”, KSB
- [13] “Efficienza, risparmio energetico e regolazione”, KSB
- [14] Schneider Electric, “Guida alle soluzioni di automazione” 2010-2011
- [15] ITT FLYGT, “Sistemi di pompaggio con inverter”
- [16] A. Cengel, M. Cimbala “Meccanica dei Fluidi”, McGraw-Hill, 2012
- [17] C. Gregoretti, “Idraulica”, 2008
- [18] “Calgon Carbon Corporation”, 2012
- [19] Europump and Hydraulic Institute, “Variable Speed Pumping, A Guide to Successful Applications”.

[20] www.pumps.org

[21] www.europumps.org

[22] www.gse.it

[23] GSE, “Rapporto Annuale sul meccanismo dei Certificati Bianchi”, 2013.

[24] AEEGSI Contributo tariffario TEE, Autorità per l’energia elettrica e il sistema idrico.

Appendice A

I dati disponibili grazie al sistema di telecontrollo presentavano due inconvenienti principali, a causa dei quali si è resa necessaria una rielaborazione di tipo informatico.

Innanzitutto gli intervalli del monitoraggio non sempre coincidevano per i quattro valori presi in esame (H_v, H_p, p_rete, Q). Ad esempio, per la centrale di Castelnuovo Bariano, il valore della pressione presenta una sensibilità del minuto, mentre il valore del livello della vasca viene registrato ogni cinque minuti. Inoltre vi sono alcuni casi in cui dei valori sono mancanti.

Per ovviare a questi problemi sono state create ed utilizzate delle tabelle di un database sql (Mysql) adatte a contenere righe con riferimento temporale ordinato ad intervalli di un secondo (di tipo "timestamp"), compresi tra le date più antica (6 luglio 2012) e più recente (6 luglio 2016) dell'intero campo dati, ed inoltre tutti i valori monitorati necessari. Per riempire le tabelle è stato creato uno script php che analizza le righe dei files sorgenti coi valori campionati e li screma in maniera discreta su intervalli di 5 minuti, inserendo in maniera assoluta per ogni riferimento temporale i valori schiacciati in maniera omogenea e sincronizzata. Questo ha fatto combaciare i dati fra di loro. Successivamente sono state operate delle query sql sulla tabella di partenza, con tutti i dati presenti inseriti, per creare un'altra tabella ottimizzata ove per ogni colonna in cui sia presente un valore nullo (perché non esistente) venisse riportato il primo valore non nullo risalendo indietro nel tempo.

Questo ha fatto sì di ottenere tabelle con valori H_v, H_p, p_rete, Q perfettamente omogenei e sincronizzati secondo la vera storia dell'impianto, ad intervalli di 5 minuti, senza valori nulli.

```

        // we must create a new row

        $query = "INSERT INTO `cnb`
                (`timestamp`, `time`, `date`, `$destField`)
                VALUES ('$timestamp', '$time', '$date', $value)

                ON DUPLICATE KEY UPDATE
                `$destField` = $value";

        try
        {
            $rows = $db->exec($query);
        }
        catch(PDOException $e )
        {
            echo "error: " . $e;
            $rows = 42; // we want an unknown error here
        }
    }

    return $rows;
}

// connecting to DB
try
{
    $db = new PDO( "mysql:host=" . DB_HOST . ";dbname=" . DB_DBNAME . ";charset=utf8",
                DB_USER,
                DB_PASSWORD);

    $db->exec("set names utf8");
    $db->setAttribute(PDO::ATTR_CASE, PDO::CASE_LOWER);
}
catch (PDOException $e)
{
    print "Error while connecting to DB server: " . $e->getMessage();
    die();
}

echo "\n\n\nExamining file to import: $filename\n\n\n";

$allOkFlag = true;
$counter = 0;

$fp = fopen($filename, "r");

while(!feof($fp))
{
    $row = fgets($fp, 4096); //, ";"");
    if ($row)
    {
        list ($date, $time, $value) = parseFileRow($row);
        list ($timestamp, $date, $time) = findTimestamp($date, $time);
    }
}

```

```

echo ($timestamp . " --- " . $date . " - " . $time . " - " . $value);
$rows = processDbRow($db, $destField, $timestamp, $time, $date, $value);

switch ($rows)
{
    case 0:
        $msg = "nothing done";
        break;

    case 1:
        $msg = "new value inserted";
        break;

    case 2:
        $msg = "old record updated with new value";
        break;

    case 10:
        $msg = "rounded value to 5 minutes or already present: skipped";
        break;

    case 42:
    default:
        $msg = "unknown !!";
}

echo("(" . ++$counter . ") --> " . $msg . "\n\n");
}

```

```

return array( (string) mktime($timeArray[0],
                             $timeArray[1],
                             $timeArray[2],
                             $dateArray[1],
                             $dateArray[0],
                             $dateArray[2]),
              $date,
              $time);
}

```

```

function processDbRow($db, $destField, $timestamp, $time, $date, $value)
{
    // $dateExploded = explode('/', $date);
    // $date = $dateExploded[2] . '/' . $dateExploded[1] . '/' . $dateExploded[0];

    $value = str_replace(',', '.', $value);

    $queryCount = "SELECT COUNT(*) FROM `cnb` WHERE `timestamp` = '$timestamp' AND `destField` = '$destField'";
    $count = $db->query($queryCount)->fetchColumn();

    if ($count > 0)
    {
        // timestamp exists
        // nothing to do

        $rows = 10;
    }
    else
    {

```

```
<?php
```

```
const DB_HOST = 'XXX';
const DB_DBNAME = 'XXX';
const DB_USER = 'XXX';
const DB_PASSWORD = 'XXX';

ini_set("memory_limit", "1000M");
set_time_limit(0);

$TMPDIR = sys_get_temp_dir();

if (isset($_SERVER['argv'][1]))
{
    $filename = $_SERVER['argv'][1];
}
else
{
    die("\n\n*** Filename missing ***\n\n");
}

if (isset($_SERVER['argv'][2]))
{
    $destField = $_SERVER['argv'][2];
}
else
{
    die("\n\n*** Destination field missing ***\n\n");
}
```

Esempio di query sql applicata per una particolare colonna, per riempire i valori nulli:

```
mysql> update cnb_optimized parent set hv = ifnull(parent.hv, (select hv from cnb son
where son.hv is not null and son.timestamp < parent.timestamp order by
son.timestamp desc limit 1)) where timestamp <= max(timestamp) order by timestamp
asc;
```

Appendice B

Seguono infine le planimetrie in foglio A3, rispettivamente per la centrale di Castelnovo Bariano e Occhiobello.

