

## ***Ammodernamento dei quadri di potenza di stazioni di pompaggio dell'acquedotto di Trieste in una logica di miglioramento dell'efficienza energetica.***

**Ing. Fabio Fontanot - AcegasAps SpA - Trieste**

### **L'approvvigionamento idrico della città di Trieste**

La città di Trieste, situata nell'estremo nord-est d'Italia, si estende su un sistema di colline che dal livello del mare raggiunge nel punto più alto - la vetta del Monte Cocusso, sull'altipiano carsico - la quota di 677 metri. L'approvvigionamento idrico dell'intero territorio provinciale è garantito principalmente da un complesso di pozzi freatici situati a 40 km dalla città, in prossimità dell'aeroporto di Ronchi dei Legionari. L'acqua viene emunta ad una profondità fino a 200 m sotto il livello del mare, convogliata all'Acquedotto "Giovanni Randaccio" di San Giovanni di Duino - dove si trovano altre due punti integrativi di captazione da acque superficiali - e da qui sollevata fino ad una quota di 110-120 m sul livello del mare per poter raggiungere dopo un percorso di circa 20 km il centro cittadino, con una pressione residua di circa 70 m di colonna acqua. Da qui, dieci centrali di risollevarimento alimentano un complesso di 55 serbatoi ed interruttori di pressione che consentono all'acqua di raggiungere per caduta i quartieri periferici posti alle diverse quote superiori con una pressione residua adeguata alle esigenze domestiche (figura 1). La rete di distribuzione, che serve circa 230.000 abitanti, è lunga complessivamente circa 1.100 km ed il volume medio annuo immesso è pari a 52.000.000 di metri cubi.

Appare quindi evidente quanto sia rilevante il costo dell'energia necessaria per azionare le oltre cento elettropompe che consentono l'esercizio di un siffatto sistema, completamente diverso da quello della città di Genova, orograficamente simile ma servita da bacini di captazione posti perlopiù sul retroterra appenninico e quindi con l'acqua già disponibile in quota.

### **Il progetto di ammodernamento del sistema di risollevarimento**

AcegasAps SpA, la multiutility di Padova e Trieste che gestisce - fra l'altro - il ciclo idrico integrato nell'Ambito Territoriale Ottimale "Orientale Triestino" comprendente l'intero territorio della Provincia, ha avviato pertanto, in occasione di un generale ammodernamento degli impianti di pompaggio, in molti casi vetusti nella componentistica (interruttori contenenti amianto nei camini di estinzione) e nella tecnologia (motori asincroni a 2.000 Volt, fuori da qualsiasi standard commerciale), in qualche caso con 40-50 anni di servizio alle spalle, ha colto l'opportunità per inserire in questo necessario piano di aggiornamento degli impianti, anche un ragionamento sul risparmio energetico, sviluppato attraverso tre filoni di intervento:

- sostituzione del macchinario a 2.000 V o comunque vetusto con motori ad alta efficienza di tipo standard a 400/690 Volt;
- introduzione di azionamenti a velocità variabile con inverter;
- implementazione, grazie all'inverter, di una logica di controllo che consenta di sfruttare al meglio la differenza di prezzo dell'energia nelle fasce orarie.

## Impiego di motori ad alta efficienza

I motori ad alta efficienza sono caratterizzati da ottimizzazione di numero e della geometria delle cave,, impiego di lamierini a basse perdite e sezioni maggiorate dei conduttori di statore e rotore, in modo da ridurre le perdite a vuoto, Joule ed addizionali e raggiungere rendimenti fino al 95%, con incremento di 4-5 punti percentuali rispetto alle macchine asincrone tradizionali (figura 2).

L'impiego di questi motori, oltre a consentire un certo risparmio fiscale, aiuta a compensare quel rendimento minore di uno dell'inverter, ovvero quel po' di rendimento globale che si perde introducendo l'inverter nella catena tra alimentazione e girante della pompa.

## Regolazione della velocità di rotazione delle pompe

Se consideriamo un'elettropompa alimentata alla frequenza nominale di circa 50 Hz e la facciamo funzionare a una frequenza ridotta, per esempio 45 Hz, la velocità si riduce proporzionalmente e la curva di funzionamento (prevalenza-portata) trasla verso il basso; il punto di funzionamento, all'intersezione fra la curva del circuito si sposta verso sinistra. La curva della potenza assorbita in funzione della portata trasla anch'essa, mostrando un notevole risparmio di energia in corrispondenza del nuovo punto di funzionamento a velocità ridotta, graficamente rappresentato dall'areola azzurra (figura 3).

Per spiegare il fenomeno, ricordiamo schematicamente le leggi fondamentali delle macchine idrauliche:

- Portata  $\equiv n$
- Prevalenza  $\equiv n^2$
- Potenza  $\equiv n^3$

dove il segno " $\equiv$ " indica proporzionalità diretta e  $n$  è la velocità di rotazione espressa in giri/min.

Quindi, se potessimo dimezzare il numero di giri, la prevalenza si ridurrebbe a 1/4 e la potenza assorbita, ovvero l'energia consumata, di 8 volte! Ciò accade perché si riducono le perdite di carico, che a loro volta dipendono dalla portata, cioè più bassa è la portata del circuito idraulico, minori sono le perdite di carico a parità di altre condizioni. Ovviamente nel nostro caso pratico dobbiamo tener conto del limite fisico dovuto al dislivello geodetico, mediamente sui 100 m c.a., e puntiamo perciò a ridurre le perdite di carico, che sono circa il 10% del dislivello geodetico, ma non possiamo ridurre più di tanto la velocità di rotazione (si vede infatti nella figura 3 che già a 40 Hz, ovvero all'80% del numero di giri nominale, la curva della pompa non interseca mai la curva del circuito e perciò non esiste più un punto di funzionamento).

Il massimo beneficio teorico di questa applicazione è pertanto il 21%, per i limiti fisici anzidetti.

## Controllo a livello variabile

L'impiego dell'inverter ci consente di conseguire, con un'opportuna logica di controllo, un ulteriore risparmio economico, sfruttando il minore costo dell'energia nelle ore notturne.

Il nostro sistema-tipo è costituito da un serbatoio di valle, dal quale una pompa azionata da un motore, che a questo punto comanderemo con l'inverter, preleva l'acqua per convogliarla ad un serbatoio di monte attraverso una tubazione lunga 2-3 km, superando con un dislivello di circa 100 m (figura 4).

L'idea di base è quella di sfruttare l'accumulo del serbatoio di monte per pompare di notte, piuttosto che di giorno, fino a quando è possibile: infatti, se il serbatoio di monte avesse una capacità sufficiente a garantire l'intero fabbisogno giornaliero, basterebbe far funzionare le pompe ad orario, per esempio da mezzanotte alle sei, e lavorare con la riserva durante le fasce di picco ... purtroppo, i nostri serbatoi reali hanno delle capacità d'accumulo che in qualche caso garantiscono un'autonomia di poche ore e quindi questa semplice soluzione non era praticabile.

E' stato pertanto sviluppato innanzitutto un modello teorico di uno dei sistemi di sollevamento oggetto dell'intervento, costituito da una pompa da 184 kW nominali che alimenta un serbatoio di circa 3.700 m<sup>3</sup> di capacità, tramite una condotta DN200 lunga 3.200 m che supera un dislivello geodetico di circa 118 metri; in questo impianto si può giocare su un livello dell'esercizio misurato dal fondo da un minimo di 1,80 m ad un massimo di 2,60 m rispetto al fondo vasca. Per quanti riguarda lefasce orarie, si è assunto:

- fascia F1 (picco): dalle 8 alle 19 dei giorni feriali;
- fascia F2 (fuori picco): dalle 7 alle 8 e dalle 19 alle 23 dei giorni feriali, prezzo per kWh pari al 82% del prezzo nella fascia di picco;
- fascia F3 (prezzo ridotto) dalle 23 alle 7, prezzo per kWh pari al 56% del prezzo nella fascia di picco.

Il sistema tradizionale con cui funzionavano i nostri impianti era il sistema on/off, cioè quando il livello del serbatoio, per effetto della portata in uscita, arriva al valore minimo (1,80 m dal fondo nel caso analizzato) la pompa si accende, lavora a pieno regime per alcune ore finché si raggiunge il livello massimo (2,60 m dal fondo), poi si spegne e sta ferma finché il livello non torna al minimo. Questo fa sì che la pompa lavori in periodi ogni giorno diversi, senza alcun riguardo per le fasce orarie. Nella [figura 5](#) si vede, per esempio, che nel giorno considerato lavora dalle 8.30 fino alle 15, poi sta ferma fino alle 4 del mattino, quindi riparte per fermarsi solo in tarda mattinata.

Il sistema di controllo che è stato ideato, sperimentato e implementato è battezzato "controllo a livello variabile" e funziona su questa logica: si definisce per ogni istante della giornata-tipo un livello obiettivo e lo si confronta con il livello reale, usando la differenza come segnale di retroazione per regolare la portata variando la frequenza di alimentazione per mezzo dell'inverter ([figura 6](#)) in modo da mantenere il profilo del livello il più congruente possibile con il profilo ottimale determinato analiticamente come soluzione del problema del sollevamento dell'acqua a costo minimo.

La portata istantanea in uscita, che - sebbene statisticamente conosciuta e prevedibile - è intrinsecamente una variabile aleatoria, a differenza di quanto comunemente si riscontra in letteratura, è trattata come un *segnale di disturbo* da compensare attraverso il sistema di regolazione e pertanto non occorre fare nessuna stima., ovvero il sistema - entro certi limiti - si adegua automaticamente alle variazioni della domanda.

Attraverso il modello teorico, si vede che - a parità di curva della portata d'uscita nelle 24 ore considerate, il sistema consente di caricare il serbatoio di notte e di modulare la portata durante il giorno, con numerose partenze e fermate graduali impossibili con l'avviamento diretto, con un consumo di 2.144 kWh un costo, considerate le varie fasce, di circa 146 Euro contro un consumo di 2.242 kWh ed un costo di 205,60 E con il sistema tradizionale on/off. Quindi si ottiene un risparmio energetico del 4% , grazie alla riduzione di portata (rispetto al 10% massimo teorico), ed un risparmio economico del 29% grazie allo spostamento nelle fasce orarie meno costose. Rispetto al prezzo medio consuntivo con la distribuzione casuale nelle

fasce orarie, che è pari al 92% del prezzo di picco, con il controllo a livello variabile si scende al 68% del prezzo massimo, avvicinandosi all'ideale 56% che si otterrebbe facendo funzionare le pompe solo di notte.

Per validare i risultati dello studio teorico, è stata realizzata un'installazione pilota nella centrale di sollevamento di Farnei, in comune di Muggia (TS), che alimenta il serbatoio di Monte Castellier, che ha mostrato un buon funzionamento della pompa fino ad un minimo di 42÷43 Hz (figura 7); l'algoritmo tiene conto di questo limite, ovvero rallenta la pompa quando il livello reale è superiore al livello desiderato fino al minimo di 42 Hz, per poi fermare la macchina e riavviarla quando il livello reale scende sotto il valore desiderato. Confrontando un trimestre del 2010 (con funzionamento on/off) con lo stesso trimestre del 2011 dopo l'implementazione dell'algoritmo di controllo a livello variabile si osserva, in corrispondenza di un volume totale sollevato pressoché uguale, una riduzione del 13% del consumo energetico, da 0,7651 kWh/m<sup>3</sup> a 0,6628 kWh/m<sup>3</sup>, grazie alla modulazione della portata e l'impiego del motore ad alta efficienza, ed uno spostamento della distribuzione dei consumi di energia nelle fasce F1-F2-F3 da 36%-24%-40% a 17%-25%-58% grazie al controllo a livello variabile, il che fa scendere complessivamente del 20% il costo dell'energia, confermando le previsioni teoriche (figura 8).

### **L'azionamento unificato polivalente**

Nella definizione del progetto complessivo, l'inverter è stato integrato in un nuovo quadro di comando progettato secondo una logica di unificazione, con i seguenti criteri:

- 2 motori identici per ciascun impianto di sollevamento (ridondanza 100%);
- 1 inverter per ciascun impianto di sollevamento con alternanza dei motori;
- possibilità di esclusione dell'inverter e di parallelo manuale di emergenza.

Il quadro, battezzato "azionamento unificato polivalente", comprende (figura 9):

- sezionatore generale con blocco apertura porta (QS1);
- sezionatore a fusibile rapido per protezione inverter (QU1);
- sezionatore a fusibile ritardato (QU2) per protezione dei motori contro il cortocircuito, dimensionato per consentire il funzionamento di entrambi i motori in parallelo;
- inverter OMRON per la regolazione di velocità con filtro induttivo per il contenimento delle armoniche;
- 2 teleruttori (K1 e K2) per il comando separato di ciascun motore con protezione integrata contro sovraccarico (FR1 e FR2) e mancanza di una fase;
- interblocco meccanico tra i sezionatori QU1 e QU2;
- interruttore magnetotermico/differenziale (QF1) per i servizi ausiliari di quadro.

In questo modo, si ottiene in primo luogo una riserva del 100% rispetto all'eventuale avaria di un motore, requisito essenziale in un servizio pubblico come un acquedotto. L'impiego di motori standard consente infatti il reperimento di una macchina di ricambio in pronta consegna, senza necessità di tenerne a scorta, e il sistema può funzionare senza limitazioni (per il dimensionamento si è tenuto conto del massimo volume giornaliero storico decennale, maggiorato del 20%) anche con una sola pompa efficiente; la logica di comando, inoltre, fa in modo - in condizioni di piena efficienza - di avviare alternativamente le due macchine in modo da dimezzare il numero di avviamenti l'ora e di garantire un'usura uniforme delle due elettropompe.

L'inverter invece è uno solo, per ragioni economiche e di spazio; in caso di guasto semplicemente lo si esclude, commutando il sistema sull'avviamento diretto con logica on/off, ovviamente rinunciando al beneficio del risparmio energetico per il tempo necessario alla sostituzione, anche qui limitato a pochi giorni avendo fatto uso di prodotti commerciali standard, affidabili ed ampiamente diffusi, (figura 10)

Infine, in caso di necessità, si può riempire il serbatoio in maniera rapida, escludendo l'inverter ed avviando manualmente le due pompe in parallelo; questo è possibile grazie all'impiego di pompe identiche e consente di fare fronte a esigenze improvvise d'esercizio in caso di guasti o lavori programmati in rete.

## Conclusioni

Il progetto di ammodernamento delle centrali di risolleamento, in corso di realizzazione, prevede di intervenire complessivamente su 1.247 kW di potenza installata, che elaborano un volume medio di circa 11 milioni di metri cubi l'anno.

Complessivamente, sono stati acquistati 9 inverter OMRON, precisamente:

- Serie E7Z a 400 V: 2 x 45 kW, 1 x 55 kW, 2 x 90 kW, 1 x 132 kW, 1 x 160kW
- Serie SX a 400V: 2 x 315kW

realizzando altrettanti "azionamenti unificati polivalenti".

Estrapolando i dati teorici e sperimentali, si stima di poter ottenere una riduzione del 10% sul consumo specifico ed una redistribuzione dell'energia consumata (target: 15% in fascia costosa, 25% in fascia normale e 60% in fascia notturna), e di poter risparmiare oltre 70.000 Euro l'anno sul costo dell'energia.

In assoluto non è una cifra altissima, ma - tenendo conto del solo extracosto degli inverter, rispetto a quello che comunque si sarebbe dovuto fare, anche in base alle previsioni del Piano d'Ambito, per eliminare i vecchi quadri, i vecchi motori, le vecchie tensioni fuori standard e per adeguare le consegne MT alla delibera AEEG 33/2007 (c.d. "adeguatezza") - si osserva che l'investimento per l'impiego dell'elettronica di potenza ha un periodo di pay-back di circa 9 mesi (!), a fronte di un beneficio che si cumula per molti anni a seguire e diventa rilevante nel contesto del contenimento dei costi di esercizio dell'acquedotto.



Figura 2:

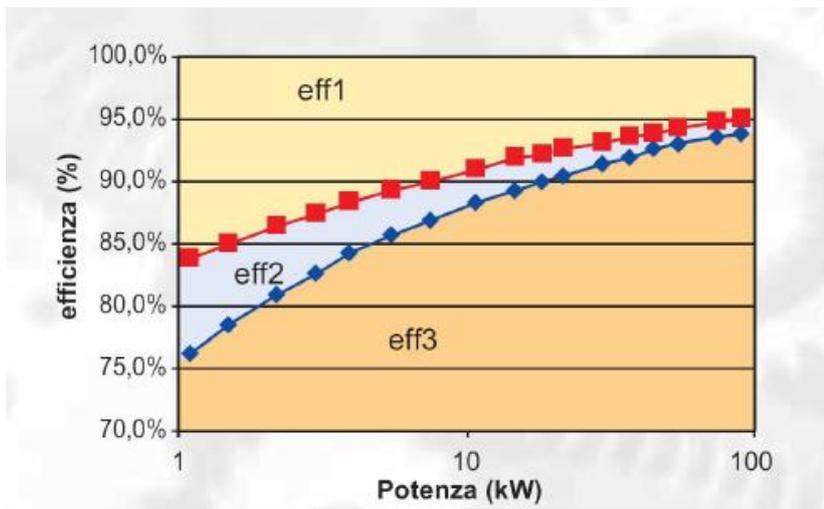


Figura 3:

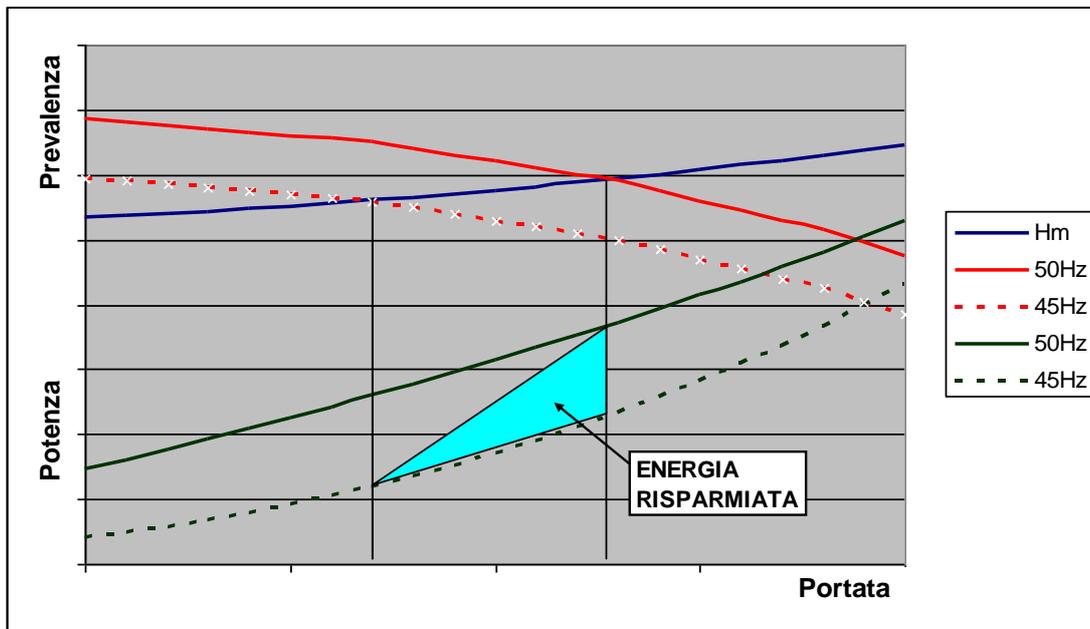


Figura 4:

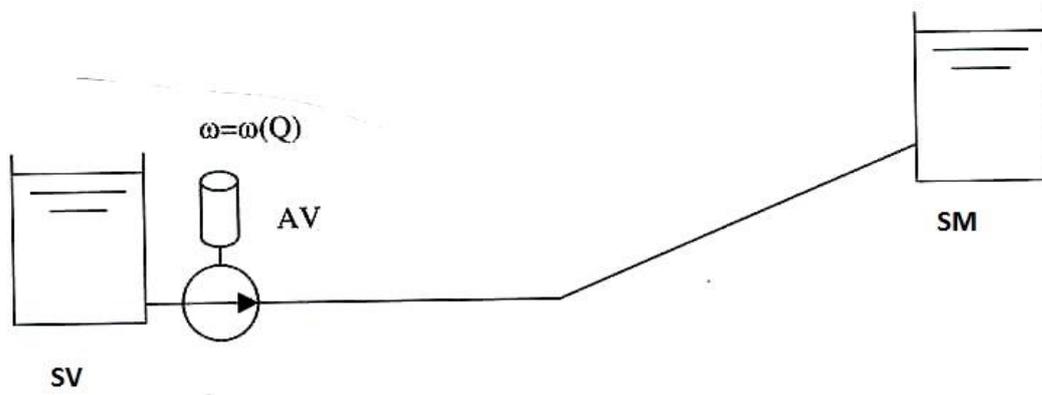


Figura 5:

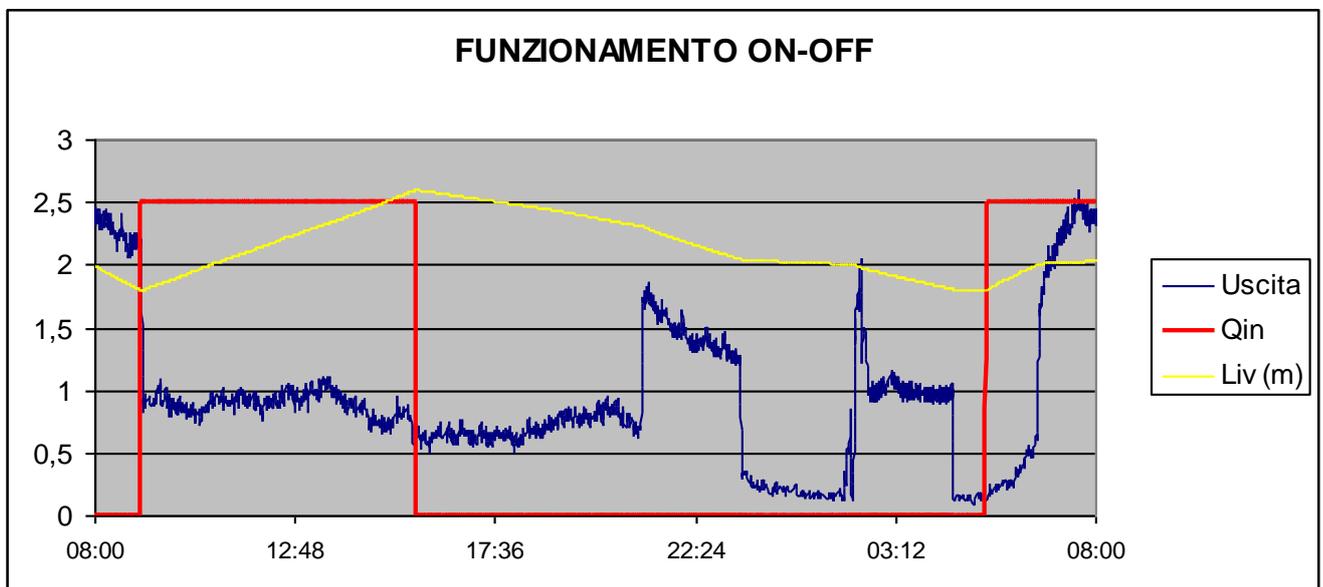


Figura 6:

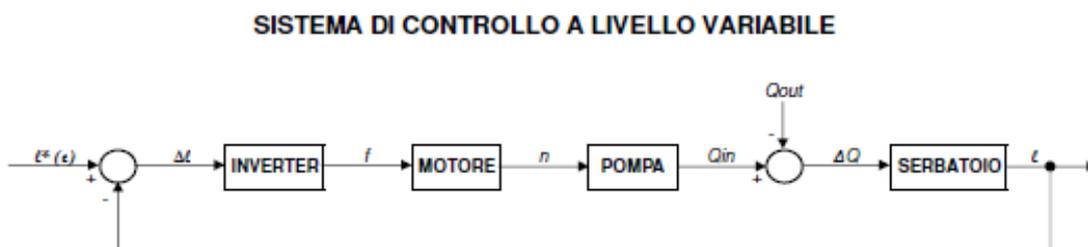


Figura 7:

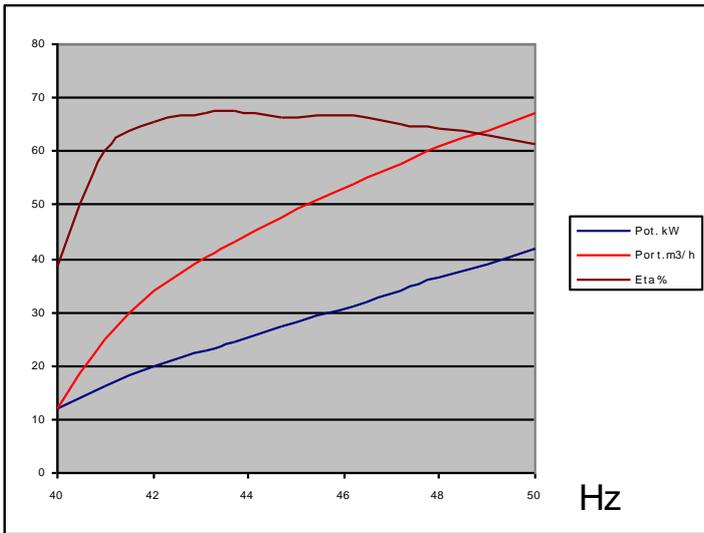


Figura 8:

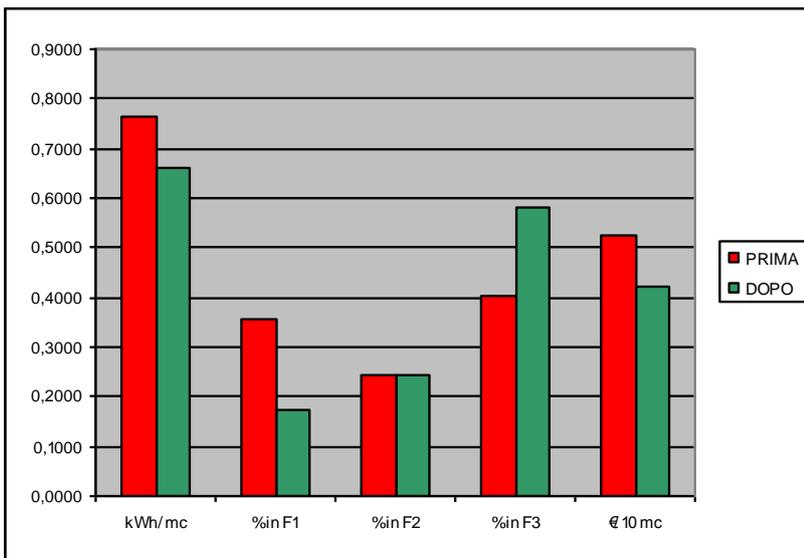


Figura 9

QUADRO DI POTENZA TIPO B

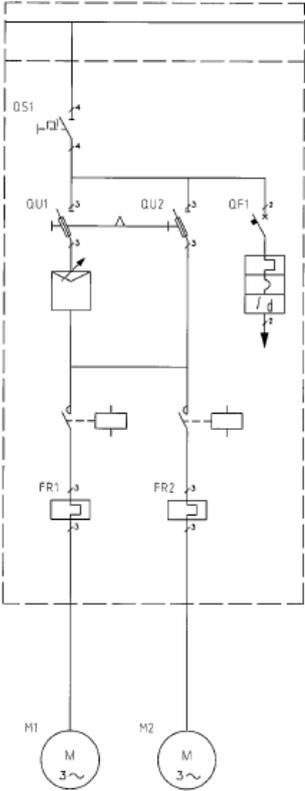


Figura 10

