

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio



**Pompa centrifuga di serie utilizzata come motore primo
per micro-impianto idroelettrico allo scarico del
depuratore acque reflue
Risultati tecnici ed economici dell'impianto per un centro urbano di
16 mila abitanti**

Relatore: Prof. Alberto BIANCHI

Correlatore: Ing. Giovanni PEDRAZZINI

Matteo GARLASCHELLI

Matr. N° 724817

Anno Accademico 2009-2010

Indice generale

Indice delle foto.....	4
Indice delle figure.....	5
Indice dei grafici.....	6
Indice delle tabelle.....	8
RINGRAZIAMENTI.....	10
PREMESSA.....	11
1 INQUADRAMENTO DELL'IMPIANTO AS Mortara.....	13
1.1 Introduzione.....	13
1.2 Schema dell'impianto.....	18
1.2.1 Pretrattamenti.....	18
1.2.2 Trattamento acque.....	20
1.2.3 Trattamento fanghi biologici.....	25
1.2.4 Stazione di trattamento dei rifiuti speciali.....	26
2 INTRODUZIONE ALLO STUDIO DELLE PAT.....	32
2.1 Premessa.....	32
2.2 La differenza tra pompe e turbine.....	33
2.3 Una pompa usata come turbina.....	36
2.3.1 Introduzione.....	36
2.3.2 Vantaggi.....	36
2.3.3 Svantaggi.....	37
2.4 Applicazioni particolari delle PAT.....	38
2.4.1 Dimensione della macchina.....	38
2.4.2 Progetto della pompa.....	39
2.4.3 Campo di applicazione di turbine e PAT.....	41
2.5 Condizioni e limiti delle applicazioni delle PAT.....	42
2.6 Progetto di un impianto micro-idroelettrico con una PAT.....	43
2.6.1 Componenti di un impianto micro-idroelettrico usando una PAT.....	43
2.6.2 Panoramica delle possibili applicazioni di impianti micro-idroelettrici.....	44
2.7 Parametri di progetto.....	45
2.7.1 Portata.....	45
2.7.2 Prevalenza.....	47

2.7.3 Carico.....	47
2.8 Abbinamento del potenziale idroelettrico e domanda di energia. Portata di progetto per varie applicazioni di energia idroelettrica.....	48
2.8.1 Azionamento diretto dei macchinari.....	48
2.8.2 Alternanza di funzionamento delle macchine e del generatore.....	50
2.8.3 Generazione di elettricità in parallelo ad una rete nazionale o regionale.....	51
2.8.4 Produzione di elettricità in una rete isolata usando una PAT.....	54
2.8.5 Casi particolari.....	56
2.8.6 Progettazione preliminare - Stima di fattibilità economica.....	58
3 PROCEDURE DI SELEZIONE DELLA PAT.....	59
3.1 Selezione di una PAT.....	59
3.1.1 Stato dell'opera.....	59
3.1.2 La differenza tra il funzionamento in modalità pompa e in modalità turbina.....	59
3.1.3 Teoria di base.....	61
3.1.4 Approcci esistenti per la predizione del funzionamento in produzione di una PAT.....	65
Funzionamento in modalità turbina legato al rendimento di una pompa.....	65
3.1.4 Procedura di selezione delle PAT.....	68
4 VERIFICA DELLA SELEZIONE DELLA POMPA UTILIZZATA COME PAT PRESSO L'AZIENDA ASMortara.....	80
4.1 Realizzazione del micro-impianto idroelettrico.....	80
4.1.1 Introduzione.....	80
4.1.2 Descrizione del progetto.....	80
4.1.3 Caratteristiche tecniche del micro-impianto idroelettrico.....	82
4.1.4 Valutazioni conclusive.....	83
4.2 Procedura di selezione della pompa.....	83
4.3 Utilizzo del programma HI2 (Hydraulic Investigator 2).....	88
5 STUDIO DI DUE POSSIBILI ALTERNATIVE E CONFRONTO CON IL CASO DELLA PAT INSTALLATA.....	92
5.1 Introduzione.....	92
5.2 1° CASO → PAT1.....	95
5.2.1 Valutazione del funzionamento.....	95
5.2.2 Analisi economica.....	98

5.3 2° CASO → Turbina.....	103
5.3.1 Valutazione del funzionamento.....	103
5.3.2 Analisi economica.....	106
5.4 3° CASO → PAT1 + PAT2.....	108
5.4.2 Analisi economica.....	111
5.5 Confronto tra le tipologie di impianto studiate.....	114
5.5.1 Funzionamento dell'impianto.....	114
5.5.2 Energia prodotta.....	116
5.5.3 Confronto Economico.....	117
5.6 Riflessioni conclusive.....	121
ALLEGATO A.....	125
Schema dell'Impianto.....	125
ALLEGATO B.....	127
Immagini della PAT installata presso l'Impianto di Depurazione ASMortara.....	127
ALLEGATO C.....	131
Valori di Portata disponibile acquisiti nel 2009	131
BIBLIOGRAFIA.....	133

Indice delle foto

FOTO 1: Impianto di depurazione di Mortara	16
FOTO 2: Impianto di depurazione di Mortara	16
FOTO 3: Impianto di depurazione di Mortara	17
FOTO 4: Comparti Linea A per l'ossidazione biologica/nitrificazione	21
FOTO 5: Comparti Linea B per l'ossidazione biologica/nitrificazione	22
FOTO 6: Sedimentatore Linea A	23
FOTO 7: Sedimentatore Linea B	24
FOTO 8: Vasca di disinfezione	25
FOTO 9: Serbatoi di immagazzinamento	28
FOTO 10: La pompa durante la lavorazione in officina	128
FOTO 11: La pompa durante la lavorazione in officina	128
FOTO 12: La PAT installata presso l'impianto di Mortara	129
FOTO 13: La PAT installata presso l'impianto di Mortara	129
FOTO 14: La PAT installata presso l'impianto di Mortara	130
FOTO 15: Quadro elettrico della PAT installata presso l'impianto di Mortara	130

Indice delle figure

FIGURA 1: Confronto tra il funzionamento di una pompa e di una turbina	33
FIGURA 2: Confronto tra la struttura di una pompa e di una turbina	34
FIGURA 3: Struttura di una pompa	39
FIGURA 4: Schema di un generico impianto idroelettrico	44
FIGURA 5: Esempio dello schema di un impianto di produzione di energia	50
FIGURA 6: Esempio dello schema di un impianto di produzione di energia	52
FIGURA 7: Schema con singolo generatore	57
FIGURA 8: Schema con due unità indipendenti di generatore	57
FIGURA 9: Esempio di schema di un impianto idroelettrico	58
FIGURA 10: Schema del sito del micro-impianto idroelettrico di Mortara	81
FIGURA 11: Schermata di avvio del programma HI2	88
FIGURA 12: Inserimento dei valori di progetto nel programma HI2	89
FIGURA 13: Modelli di pompa proposti dal programma HI2	89
FIGURA 14: Grafici caratteristici della pompa selezionata col programma HI2	90
FIGURA 15: Disegno dell'impianto di depurazione di Mortara	126
FIGURA 16: Sezione di progetto del micro-impianto idroelettrico installato a Mortara	127

Indice dei grafici

GRAFICO 1: Percentuali delle spese economiche per un impianto < 1 MW	38
GRAFICO 2: Percentuali delle spese economiche per un impianto > 10 MW	38
GRAFICO 3: Campi di applicazione di una turbina	41
GRAFICO 4: Campi di applicazione di una PAT	41
GRAFICO 5: Esempio di idrogramma e curva di durata	45
GRAFICO 6: Funzionamento di una PAT con $Q_{\text{progetto}} < Q_{\text{min}}$	46
GRAFICO 7: Funzionamento di una PAT con $Q_{\text{progetto}} > Q_{\text{min}}$	46
GRAFICO 8: Esempio di andamento della domanda di potenza giornaliera	48
GRAFICO 9: Funzionamento di un impianto idroelettrico con $Q_{\text{progetto}} < Q_{\text{min}}$	49
GRAFICO 10: Funzionamento di un impianto idroelettrico con $Q_{\text{progetto}} > Q_{\text{min}}$	49
GRAFICO 11: Esempio di curva di durata	52
GRAFICO 12: Situazioni differenti di sfruttamento della portata disponibile	54
GRAFICO 13: Esempio di andamento della domanda di potenza giornaliera	55
GRAFICO 14: Differenze di funzionamento nelle modalità pompa e turbina	60
GRAFICO 15: Applicazione della teoria di Eulero per le due modalità di funzionamento	62
GRAFICO 16: Confronto del funzionamento in modalità pompa e turbina	63
GRAFICO 17: Fattore di conversione per il salto	69
GRAFICO 18: Fattore di conversione per la portata	69
GRAFICO 19: Rapporto tra le velocità specifiche in modalità pompa e turbina	71
GRAFICO 20: Raccomandazioni per la selezione della pompa da utilizzare come PAT	74
GRAFICO 21: Rapporto tra i valori di rendimento in modalità pompa e turbina	76
GRAFICO 22: Salto in funzione del rendimento in pompaggio e della portata	77
GRAFICO 23: Rendimento turbina in funzione del rendimento in pompaggio e della portata	77
GRAFICO 24: Campo di funzionamento della PAT	78
GRAFICO 25: Individuazione del tipo di pompa da utilizzare	84
GRAFICO 26: Rapporto tra le velocità specifiche in modalità pompa e turbina	85
GRAFICO 27: Curve di rendimento in funzione di portata e velocità specifica	86
GRAFICO 28: Fattore di conversione per il salto (PAT di Mortara)	87
GRAFICO 29: Fattore di conversione per la portata (PAT di Mortara)	87
GRAFICO 30: Andamento della portata disponibile nel 2009 all'impianto di Mortara	93

GRAFICO 31: Curva di durata	94
GRAFICO 32: Curva di durata (PAT1)	95
GRAFICO 33: Andamento dell'energia prodotta (PAT1)	97
GRAFICO 34: Curva di durata (Turbina)	104
GRAFICO 35: Andamento dell'energia prodotta (Turbina)	105
GRAFICO 36: Curva di durata (PAT1+PAT2)	108
GRAFICO 37: Andamento dell'energia prodotta (PAT1+PAT2)	110
GRAFICO 38: Funzionamento della PAT1 durante l'anno	114
GRAFICO 39: Funzionamento della Turbina durante l'anno	115
GRAFICO 40: Funzionamento di PAT1+PAT2 durante l'anno	115
GRAFICO 41: Energia prodotta in un anno dalle tre tipologie di installazione	116
GRAFICO 42: Andamento del flusso attualizzato cumulato (30 anni, $i = 2\%$)	119
GRAFICO 43: Andamento del flusso attualizzato cumulato (30 anni, $i = 5\%$)	119

Indice delle tabelle

TABELLA 1: Offerta economica PAT1	101
TABELLA 2: Costi di produzione e prezzo presentato al cliente (PAT1)	102
TABELLA 3: Offerta economica Turbina	106
TABELLA 4: Costi di produzione e prezzo presentato al cliente (Turbina)	107
TABELLA 5: Offerta economica PAT2	111
TABELLA 6: Costi di produzione e prezzo presentato a cliente (PAT2)	112
TABELLA 7: Costi di produzione e prezzo presentato al cliente (PAT1+PAT2)	112
TABELLA 8: Confronto economico tra le tre tipologie di installazione	117
TABELLA 9: Dati utilizzati per valutare il tempo di ritorno dell'investimento	118
TABELLA 10: Valore Attuale Netto	120
TABELLA 11: Riassunto dei risultati ottenuti	123
TABELLA 12: Dati di portata disponibile acquisiti nel 2009 (pater 1)	131
TABELLA 13: Dati di portata disponibile acquisiti nel 2009 (pater 2)	132

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare il *prof. Bianchi* per la fiducia fin da subito dimostratami nell'aver accettato questo argomento di tesi e per avermi seguito durante lo svolgimento del lavoro con consigli e confronti che mi hanno aiutato ad intraprendere, ogni volta, le scelte più appropriate.

Un sentito ringraziamento è rivolto all'*Ing. Pedrazzini*, correlatore di questa tesi, per la disponibilità e la generosità con cui mi ha aiutato ad affrontare le numerose problematiche connesse al lavoro svolto. La sua collaborazione è risultata indispensabile per il compimento di questo lavoro di tesi, e, inoltre, mi ha aiutato a maturare dal punto di vista formativo.

Mi sembra doveroso ringraziare l'Azienda *ASMortara* per il materiale messo a disposizione e per le visite che mi ha concesso di effettuare presso l'Impianto di Depurazione.

Meritati ringraziamenti sono rivolti alla mia famiglia che, oltre ad avermi costantemente “supportato”, mi ha anche “sopportato” con incredibile pazienza. Il mio primo pensiero va, ovviamente, ai miei *genitori*, a cui dedico questo lavoro di tesi. Sono davvero grato per il loro sostegno economico, ma più di ogni altra cosa per quello emotivo, con continui incoraggiamenti e dandomi sempre importanti soddisfazioni. Un enorme grazie anche a *Francesco* e *Marta*, fratello e sorella fantastici, per l'immane apporto affettivo.

Come non ringraziare i miei *nonni*, costantemente presenti nel mio non breve periodo di studio e sempre a sostegno dei miei sforzi in tutti gli ambiti della vita.

Infine ringrazio gli *amici*, che rappresentano i compagni di ogni viaggio da me intrapreso. Un grosso grazie in particolare a *Claudio*, *Marco* e *Alberto*, che hanno reso speciali questi anni di studio.

PREMESSA

In tutto il mondo, e in particolar modo in Italia, la produzione di energia elettrica avviene in gran parte grazie all'utilizzo di fonti non rinnovabili (quali il carbone, il petrolio e il gas naturale) e in misura minore con fonti rinnovabili (come lo sfruttamento dell'energia geotermica, dell'energia idroelettrica e dell'energia eolica).

Durante gli studi sostenuti presso il Politecnico di Milano, la mia attenzione si è progressivamente focalizzata proprio nel campo del recupero energetico da fonti rinnovabili, generando grandi interesse e curiosità connessi soprattutto all'ambito idroelettrico.

Nella ricerca di questi approfondimenti, sono venuto a contatto con l'Azienda Servizi Mortara s.p.a., che ha sede presso il comune di Mortara, ed in quell'occasione sono maturate le condizioni per una possibile collaborazione.

L'Azienda è proprietaria della rete di distribuzione del gas metano e gestisce (eroga) tre servizi: ciclo idrico integrato, igiene ambientale, trattamento rifiuti liquidi con terzi.

Nei primi mesi del 2010, l'azienda è stata dotata di una PAT (pump as turbine) allo scopo di ottenere un determinato recupero energetico. Questo macchinario è stato progettato e costruito dalla società Ser.Ge.M.A. di Guardamiglio, grazie alla quale mi è stato messo a disposizione tutto il materiale utile per l'approfondimento degli aspetti progettuali e di funzionamento meccanico dell'apparecchiatura.

Attraverso il presente elaborato ho voluto studiare le modalità del funzionamento teorico di una PAT, presentando le motivazioni che hanno portato all'utilizzo di una pompa invertita in sostituzione di una vera e propria turbina. Oltre ad un confronto delle teorie meccaniche di base tra le due modalità di funzionamento, ho presentato sia un bilancio di tipo economico sia un bilancio di tipo energetico dell'impianto nel suo complesso.

A seguito di una descrizione dello schema dell'impianto di depurazione ho effettuato un'analisi dell'energia che viene recuperata (con riferimento ai dati messi gentilmente a disposizione dall'Azienda di Mortara).

Nella conclusione dell'elaborato sono state presentate delle alternative all'impianto di recupero energetico esistente, con relativi vantaggi e svantaggi, attraverso analisi di fattibilità economica e di bilancio energetico, fornendo a tale scopo un'indagine comparativa tra le diverse soluzioni ricercate.

Come complemento, le seguenti informazioni sono state inserite in appendice:

- i disegni relativi allo schema dell'impianto, sia nel suo complesso sia nella sezione interessata dal mio studio;
- le foto della PAT installata;
- i dati di portata disponibile acquisiti durante l'anno 2009.

1 INQUADRAMENTO DELL'IMPIANTO AS Mortara

1.1 Introduzione

L'azienda è stata costituita il 1° gennaio 1981 col nome A.M.G. - Azienda Municipalizzata Gas del Comune di Mortara, con lo scopo di rendere pubblica la gestione del servizio di distribuzione del gas, allora affidato a soggetto privato.

Il 1° gennaio 1987, l'azienda assume dal Comune la gestione anche del servizio di prelievo e distribuzione dell'acqua potabile e la gestione del depuratore recentemente realizzato e della rete fognaria, modificando la ragione sociale in A.S.M. – Azienda Servizi Municipalizzati del Comune di Mortara.

A partire dal 1990, A.S.M. incrementa i servizi forniti acquisendo l'autorizzazione alla gestione del trattamento dei liquami derivanti dalla pulizia di fosse biologiche, pozzi neri e caditoie stradali.

Nel 1994, A.S.M. ottiene dalla Regione Lombardia l'autorizzazione al trattamento dei rifiuti speciali liquidi anche di origine industriale, mentre nel 1995 acquisisce il servizio di spazzamento stradale.

Il 1° giugno 1996, A.S.M. modifica nuovamente la ragione sociale trasformandosi da Azienda Municipalizzata ad Azienda Speciale col nome di A.S.M. Mortara.

Nel 1997 la A.S.M. Mortara assume dal Comune il servizio di sgombero neve; nel 1998 assume la gestione della piazzola ecologica per la raccolta differenziata dei rifiuti ingombranti; nel 1999 attiva un servizio di pulizia per fosse biologiche e fognature, svolto, oltre che per le proprie esigenze, anche per conto terzi e nel 2001 acquisisce il servizio di manutenzione stradale.

Il 3 ottobre 2001 A.S.M. Mortara diventa un'Azienda Servizi con denominazione AS Mortara S.p.A..

Nel mese di aprile 2005 l'Azienda ha ottenuto la certificazione di conformità alla norma UNI EN ISO 14001 (n° 0164A/0).

L'impianto di depurazione dell'Azienda Servizi Mortara è attualmente costituito da due Unità Operative operanti in serie, alle quali si aggiunge anche una piazzola ecologica per la raccolta differenziata dei rifiuti prodotti nel territorio del comune di Mortara (Unità Operativa III):

- ◆ Unità Operativa I: impianto di depurazione biologica, dedicato al trattamento delle acque reflue

urbane provenienti dalla città di Mortara unitamente all'effluente dell'Unità Operativa II (rifiuti speciali in uscita dalla piattaforma di trattamento);

- ◆ Unita Operativa II: piattaforma di trattamento rifiuti speciali non pericolosi e pericolosi non tossico-nocivi provenienti da terzi, costituita da un'unità di trattamento di tipo chimico-fisico articolata su più linee, e sezione di immagazzinamento rifiuti in arrivo in testa;
- ◆ Unità Operativa III: piazzola ecologica per la raccolta differenziata di rifiuti urbani ed assimilabili.

L'Unità Operativa II è stata autorizzata dalla Regione Lombardia a ritirare un quantitativo di rifiuti speciali provenienti da terzi pari a 442 m³/d e a trattare un quantitativo pari a 108.000 m³/anno, mentre l'impianto biologico (Unità I) ha potenzialità pari a 43.000 abitanti equivalenti. Per quanto riguarda la piazzola ecologica (Unità III), non sussistono limitazioni per la raccolta differenziata di rifiuti urbani ed assimilabili, essendo un servizio dedicato ai cittadini risiedenti nel comune di Mortara.

Nel luglio 2004 la Provincia di Pavia ha autorizzato (Autorizzazione n°25/2004 – R), contestualmente:

- ◆ il rinnovo all'esercizio, sino all'anno 2009, dell'attività di deposito preliminare (D15) e trattamento/smaltimento (D8, D9) di rifiuti speciali liquidi, non pericolosi e pericolosi non tossico-nocivi, provenienti da terzi;
- ◆ una prima variante sostanziale consistente nell'aumento del carico di BOD₅ da 850 kg/d a 4.500 kg/d;
- ◆ una seconda variante sostanziale consistente nella possibilità di effettuare operazioni di miscelazione di rifiuti opportunamente individuati prima del loro invio al trattamento di depurazione.

I rifiuti speciali conferibili provenienti da terzi sono meglio specificati, con i relativi codici CER, nell'allegato della delibera autorizzativa della Regione Lombardia; di fatto essi sono costituiti principalmente da acque reflue di origine industriale derivanti da processi di lavorazione, lavaggio, etc. di industrie chimiche, alimentari, manifatturiere e da percolati, etc.

In particolare, tutti i rifiuti in ingresso sono di tipo speciale, pericolosi e non pericolosi ai sensi del D.Lgs. 22/97 e successive modifiche ed integrazioni, nonché speciali non tossico nocivi ai sensi del

D.P.R. 915/82 e della Deliberazione del Comitato Interministeriale 27/07/84.

I rifiuti speciali, conferiti a mezzo autocisterna, vengono preventivamente sottoposti a pesatura, verifica della documentazione di trasporto e verifica analitica presso il laboratorio interno.

In caso di esito positivo delle verifiche di cui sopra, i rifiuti vengono immessi nei serbatoi di immagazzinamento, da dove, in funzione delle loro caratteristiche chimiche e fisiche, vengono inviati all'Unità Operativa II e sottoposti al trattamento più idoneo.

L'effluente in uscita dell'Unità II è immesso in testa all'impianto biologico, insieme alle acque reflue urbane provenienti dalla rete di fognatura.

L'impianto biologico, o Unità operativa I, effettua la depurazione della miscela delle acque reflue urbane e dei rifiuti speciali pretrattati.

L'effluente finale è immesso in corpo idrico ricettore, costituito in questo caso da un cavo irriguo. All'occorrenza l'effluente può essere sottoposto a disinfezione finale prima dell'immissione in corso d'acqua al fine di garantire l'eliminazione della carica batterica e dei patogeni ancora contenuti.

I fanghi derivanti dai processi di depurazione biologica e chimico-fisica vengono estratti separatamente e disidratati: i fanghi chimici sono inviati allo smaltimento in discarica mentre quelli biologici, se conformi ai requisiti di legge, sono destinati al riutilizzo in agricoltura.

L'insediamento è infatti dotato di linee di trattamento fanghi dedicate, cioè distinte per i fanghi biologici e per quelli chimici.

L'insediamento, che si sviluppa su di un'area di circa 29.000 m², è dotato anche di un apposito locale servizi, comprendente uffici, spogliatoi, servizi igienici sanitari per il personale ed il laboratorio analitico.



FOTO 1: Impianto di depurazione di Mortara



FOTO 2: Impianto di depurazione di Mortara



FOTO 3: Impianto di depurazione di Mortara

1.2 Schema dell'impianto

L'impianto di Mortara è di tipo biologico a fanghi attivi, articolato in due linee principali (linea A e linea B), suddivise a loro volta in linee secondarie operanti anch'esse in parallelo.

Lo schema impiantistico può essere suddiviso nel seguente modo:

- Pretrattamenti;
- Trattamento acque;
- Trattamento fanghi.

1.2.1 Pretrattamenti

Di seguito vengono descritte le fasi di pretrattamento destinate al trattamento della acque fognarie.

1. Opere di presa e pozzetto di raccolta

L'opera di presa è dotata di una paratoia regolabile per lo sfioro delle acque meteoriche (che by-passano l'impianto); da qui le acque arrivano al pozzetto di raccolta in cui confluiscono:

- acque in uscita dalla piattaforma di trattamento rifiuti speciali;
- acque reflue urbane provenienti dalla fognatura pubblica;
- acque di pioggia dai piazzali e strade di servizio dell'insediamento;
- surnatanti derivanti dagli ispessitori e dalle filtropresse dei fanghi;
- acque reflue dall'edificio servizi.

2. Grigliatura grossolana

La grigliatura grossolana, a pulizia manuale, è in acciaio zincato con spaziatura pari a 15 mm ed ha lo scopo di rimuovere i solidi grossolani e proteggere i trattamenti successivi.

La carente funzionalità della fase di grigliatura è causa di:

- accumulo di materiali galleggianti nei pozzetti delle pompe nei casi di sollevamenti iniziali;
- insufficienza dei sistemi di recupero dei materiali galleggianti in sedimentazione primaria;
- presenza di materiali grossolani galleggianti nell'effluente finale;
- danni alle apparecchiature della linea fanghi quali intasamenti delle pompe, abrasione

dei teli delle macchine disidratatrici e intasamenti nei sistemi di stabilizzazione;

- presenza di materiali indesiderati nei fanghi da smaltire.

3. Stazione di sollevamento

La stazione di sollevamento è necessaria per innalzare il liquame in modo che riesca a proseguire per caduta naturale ed è dotata di tre elettropompe, ciascuna in grado di sollevare fino a 300 m³/h.

4. Grigliatura fine a pulizia automatica

La grigliatura fine è a pulizia automatica ed è dotata di due griglie del tipo autopulente aventi passaggio di 3 mm.

5. Dissabbiatura e disoleatura aerata

Il trattamento di dissabbiatura e disoleatura aerata serve per rimuovere sabbie, oli e grassi ed ha un volume utile di 65 m³; è inoltre dotato di un compressore soffiante a canali laterali da 150 Nm³/h.

Le sabbie devono essere rimosse perché:

- esercitano azione abrasiva su pompe, lame raschiatrici e condotte;
- occludono luci di passaggio per accumuli successivi;
- per la loro natura prevalentemente inerte occupano spazio causando volumi morti.
- costituiscono materiale inerte che non necessita di trattamento biologico.

Gli oli ed i grassi devono essere rimossi perché:

- sono sostanze altamente inquinanti per i corpi idrici ricettori;
- inducono gravi inconvenienti in molte fasi di trattamento dell'impianto;
- nella vasca a fanghi attivi ostacolano l'adsorbimento nutritivo e lo scambio di ossigeno;
- nella sedimentazione finale aderiscono ai fiocchi di fango e tendono a flottare, ostacolando la sedimentazione, inoltre, tendono a defluire con l'effluente;
- in fase di aerazione causano la formazione di schiume.

La disoleatura consente di rimuovere unicamente oli e grassi allo stato disperso, ma non permette di eliminare le emulsioni per le quali è necessario un processo chimico di destabilizzazione. Nel caso di disoleatura aerata non è opportuno eccedere nell'aria insufflata per non favorire la formazione di emulsioni.

1.2.2 Trattamento acque

La linea di trattamento acque prevede la fase di denitrificazione a monte del comparto di ossidazione biologica/nitrificazione, seguite dalla fase di sedimentazione e disinfezione finale.

1. Predenitrificazione

L'impianto è dotato di una sezione di predenitrificazione composta da 4 comparti operanti in parallelo sulle 2 linee principali (A e B) a loro volta suddivise su due linee aventi le seguenti caratteristiche:

- Linea A (composta da due linee in parallelo suddivise a loro volta su due linee in serie):
 - lunghezza: 7,5 m;
 - larghezza: 15 m;
 - altezza utile: 4,1 m;
 - volume utile: 461 m³;
 - volume utile totale: 1.845 m³.
- Linea B (composta da due linee in parallelo):
 - lunghezza: 16,45 m;
 - larghezza: 12,9 m;
 - altezza utile: 4,3 m;
 - volume utile: 913 m³;
 - volume utile totale: 1.825 m³.

Il volume complessivo disponibile è pari a 3.670 m³.

Nei comparti, oltre al liquame proveniente dai pretrattamenti, confluiscono anche:

- i fanghi di ricircolo dalla sedimentazione finale;
- il mixed-liquor dalla fase di nitrificazione/ossidazione.

Le vasche sono attrezzate con mixer sommersi nella seguente misura:

- 4 mixer sulle linea A, 1 per ogni vasca;
- 4 mixer sulla linea B, 2 per ogni vasca.

2. Ossidazione biologica/nitrificazione

L'ossidazione biologica/nitrificazione è composta da quattro comparti operanti in parallelo sulle due linee A e B (che ricevono, ciascuna, il 50% della portata entrante), così suddivise:

- Linea A: composta da due linee in parallelo suddivise a loro volta in due linee in serie aventi le seguenti caratteristiche:
 - lunghezza: 15 m;
 - larghezza: 15 m;
 - altezza utile: 4,1 m;
 - volume utile: 922,5 m³;
 - volume utile totale: 3.690 m³.
- Linea B: suddivisa in due linee in parallelo aventi le seguenti caratteristiche:
 - lunghezza: 26,05 m;
 - larghezza: 12,9 m;
 - altezza utile: 4,3 m;
 - volume utile: 1.475,5 m³;
 - volume utile totale: 2.875 m³.

Le vasche sono attrezzate con un sistema d'aerazione del tipo a bolle fini alimentato da una batteria di compressori, alloggiati in apposito locale, che erogano una portata d'aria pari a 18.000 Nm³/h.



FOTO 4: Comparti linea A per ossidazione biologica/nitrificazione



FOTO 5: Comparti linea B per ossidazione biologica/nitrificazione

Il liquame in uscita dalle vasche viene convogliato ad una stazione di sollevamento, una per ogni linea, da dove, una parte del liquame perviene ai compartimenti di sedimentazione finale, mentre una parte viene inviata, per mezzo di pompe, in testa ai compartimenti di predenitrificazione.

Le linee di ricircolo fanghi e ricircolo del mixed-liquor prevedono che, dal sedimentatore finale, il fango sia inviato al pozzetto di rilancio del comparto biologico e da qui:

- per la Linea A:
 - due pompe rilanciano in testa alla predenitrificazione;
 - una pompa rilancia il fango di supero all'ispessitore fanghi o direttamente alla fase di disidratazione fanghi.
- Per la Linea B:
 - due pompe rilanciano in testa alla predenitrificazione;
 - due pompe rilanciano il fango di supero all'ispessitore fanghi o direttamente alla fase di disidratazione fanghi.

3. Sedimentazione finale

I sedimentatori presenti sono due, uno per ogni linea (A o B), aventi le seguenti caratteristiche:

- diametro: 24 m;
- superficie utile: 452 m²;
- superficie utile complessiva: 904 m²;
- altezza utile: 2 m;
- volume utile: 904 m³;
- volume utile complessivo: 1.808 m³.



FOTO 6: Sedimentatore linea A



FOTO 7: Sedimentatore linea B

Il liquame chiarificato perviene alla successiva fase di disinfezione, mentre i fanghi estratti vengono inviati alla predenitrificazione (ricircoli) e all'ispessimento o disidratazione (supero).

4. Disinfezione finale

In questa sezione si riuniscono i liquami provenienti dalle sedimentazioni delle due linee. La disinfezione (attualmente non effettuata) viene realizzata mediante ipoclorito.

La sezione ha le seguenti caratteristiche:

- volume utile: 60 m³;
- tempo di contatto: 6 minuti;
- dosaggio di ipoclorito: 4 mg/l;
- serbatoio di immagazzinamento ipoclorito: in PEAD da 25.000 l.



FOTO 8: Vasca di Disinfezione

1.2.3 Trattamento fanghi biologici

La linea di trattamento dei fanghi biologici prevede una fase di ispessimento ed una fase di disidratazione meccanica; di seguito viene riportata la descrizione dei diversi comparti.

1. Ispessimento fanghi

In questa sezione vengono convogliati i fanghi di supero dei due sedimentatori. Il fango arriva nella vasca con un tenore di secco compresa tra l'1,5 e il 2% ed esce con una percentuale variabile dal 5 al 6%. Il manufatto ha le seguenti caratteristiche:

- diametro: 9 m;
- altezza utile: 7 m;
- volume utile: 450 m³.

Il surnatante prodotto viene raccolto in una canaletta ed inviato in testa all'impianto.

2. Disidratazione fanghi

Il fango in uscita dall'ispessitore perviene alla fase di disidratazione composta da una filtropressa a camere; ai fanghi in ingresso alla macchina vengono aggiunti reagenti chimici (polielettrolita in soluzione acquosa con rapporto di diluizione variabile tra 0,5 e 0,2%).

Il fango pressato è scaricato automaticamente all'interno di cassoni scaricabili. Il surnatante originato dal processo di pressatura viene raccolto nella fognatura interna ed inviato in testa all'impianto.

1.2.4 Stazione di trattamento dei rifiuti speciali

L'impianto di Mortara è autorizzato a ricevere i seguenti quantitativi di reflui speciali:

- quantità: 360 m³/d (pari a 108.000 m³/anno);
- COD: 10.000 kg/d (come carico massimo);
- BOD₅: 4.500 kg/d (come carico massimo).

L'impianto di pretrattamento è articolato in differenti linee, dedicate al trattamento di rifiuti con specificità ben distinte:

- stazione di pesatura (comune a tutte le linee);
- accettazione e immagazzinamento rifiuti liquidi (comune a tutte le linee);
- linea di trattamento 1;
- linea di trattamento 2;
- linea di trattamento 3;
- ispessimento fanghi chimici (comune a tutte le linee);
- disidratazione meccanica fanghi chimici (comune a tutte le linee).

1. Stazione di pesatura

La stazione è composta da una pesa a ponte del tipo multicelle collegata al terminale elettronico per la registrazione e la stampa dei carichi di portata pari a 50 t a lunghezza di 18 m.

2. Accettazione e immagazzinamento rifiuti liquidi

I rifiuti liquidi conferiti vengono sottoposti a campionamento per la verifica di conformità del contenuto (accettazione rifiuti).

L'Azienda è dotata di un proprio protocollo di accettazione ed omologazione dei rifiuti.

In caso di esito positivo delle analisi effettuate, i rifiuti vengono conferiti al comparto di immagazzinamento; in caso di esito negativo delle analisi il carico viene respinto.

Gli unici rifiuti che non vengono inviati a immagazzinamento sono i "bottini" che vengono conferiti direttamente alla linea dedicata (linea di trattamento 1).

Il comparto di immagazzinamento rifiuti è costituito da una batteria di 10 serbatoi cilindrici verticali in acciaio inox così suddivisi:

- 9 serbatoi della capacità di 40 m³;
- 1 della capacità di 30 m³.

La capacità complessiva è pari a 390 m³.

Le modalità operative adottate per lo scarico, il riempimento ed il rilancio dei rifiuti alle fasi di trattamento più appropriate possono essere così riassunte:

- dopo la pesatura e la verifica analitica del rifiuto si procede allo svuotamento;
- individuato il serbatoio da caricare si procede allo svuotamento della cisterna per mezzo di pompa volumetrica (da 7,5 kW, 380 V) la cui mandata è collegata con tutti i serbatoi da 40 m³ (da 1 a 9);
- le pompe di caricamento sono 2, una per i serbatoi da 1 a 9 ed una per il serbatoio 10 (emulsioni oleose);
- allo svuotamento dei serbatoi provvede una batteria di 9 pompe suddivise in gruppi di tre, secondo i seguenti campi di portata: da 300 a 1.200 l/h; da 500 a 4.000 l/h; da 2.500 a 12.000 l/h.

Tutti i serbatoi sono provvisti di sfiato collegato ad un collettore che convoglia le emissioni gassose al sistema di trattamento (biofiltro e filtro a carboni attivi).

3. Linea di trattamento 1

La linea 1 è dedicata al trattamento dei “bottini” che vengono conferiti a mezzo autospurgo, avente il limite di potenzialità pari a 12 m³/h.

La linea è costituita dalle seguenti fasi:

- microgrigliatura con spaziatura di 3 mm, portata di 12 m³/h e compattatore a pistone; il liquame grigliato può seguire tre percorsi differenti:
 - dissabbiatura – comparto di accumulo – trattamento chimico/fisico;
 - dissabbiatura – testa dell'impianto biologico;
 - comparto di accumulo – trattamento chimico/fisico.
- Dissabbiatura tipo “pista” avente diametro di 2 m e portata di 400 m³/h.
- Accumulo con vasca in c.a. dotata di miscelatore sommerso avente un volume di 40 m³.



FOTO 9: Serbatoi di immagazzinamento

4. Linea di trattamento 2

La linea 2 è dedicata al trattamento dei rifiuti speciali con componente oleosa, avente il limite di potenzialità pari a 10 m³/h.

La linea è composta da un flottatore avente volume di 10 m³, portata di 10 m³/h e tempo di reazione di 1 ora.

Per la rottura delle emulsioni vengono dosati specifici reattivi chimici.

La fase oleosa che si separa rimane comunque un'emulsione (contenuto di acqua > 15%) e viene ceduta a ditte terze autorizzate per il successivo trattamento. La fase acquosa viene inviata al trattamento chimico-fisico.

5. Linea di trattamento 3

La linea di trattamento 3 si articola a sua volta in due ulteriori linee di trattamento quali:

- ossidazione chimica;
- chiariflocculazione.

Linea di ossidazione chimica – trattamento Fenton.

Il trattamento di Fenton è basato sul dosaggio di perossido di idrogeno e cloruro ferroso a pH 2,5 ed è composto dalle seguenti fasi:

- Vasca di reazione dotata di agitatore veloce avente:
 - capacità: 15 m³;
 - portata: 15 m³/h;

- tempo di reazione: 60 minuti;
- reattivi dosati: acido solforico, acqua ossigenata e cloruro ferroso.
- Vasca di neutralizzazione dotata di agitatore avente le seguenti caratteristiche:
 - capacità: 6 m³;
 - portata: 15 m³/h;
 - tempo di reazione: 24 minuti;
 - reattivi dosati: latte di calce.
- Sedimentazione avente le seguenti caratteristiche:
 - capacità: 12 m³;
 - portata: 15 m³/h;
 - tempo di reazione: 48 minuti;
 - reattivi dosati: polielettrolita in linea tra la neutralizzazione e la sedimentazione.

Il liquame chiarificato viene immesso nella fognatura che adduce alla stazione di sollevamento iniziale dell'impianto biologico.

Il fango chimico viene inviato all'ispessitore dei fanghi chimici.

Per le sue caratteristiche questa linea può, all'occorrenza, diventare una seconda linea di chiariflocculazione da affiancare alla prima, impiegando il comparto di ossidazione chimica come flocculazione.

Linea di chiariflocculazione.

Il trattamento è basato sul dosaggio di cloruro ferroso, latte di calce e polielettrolita a base organica ed è composto dalle seguenti fasi:

- Coagulazione avente le seguenti caratteristiche:
 - capacità: 4 m³;
 - portata: 15 m³/h;
 - tempo di reazione: 16 minuti;
 - reattivo dosato: cloruro ferroso.

La sezione è dotata di agitatore veloce.

- Flocculazione avente le seguenti caratteristiche:
 - capacità: 2 m³;
 - portata: 15 m³/h;

- tempo di reazione: 8 minuti;
- reattivo dosato: latte di calce.

La sezione è dotata di agitatore lento.

- Sedimentazione avente le seguenti caratteristiche:
 - capacità: 12 m³;
 - portata: 15 m³/h;
 - tempo di reazione: 48 minuti;
 - reattivo dosato: polielettrolita in linea.

Il liquame chiarificato viene immesso nella fognatura che adduce alla stazione di sollevamento iniziale dell'impianto biologico. Il fango chimico viene inviato all'ispessitore dei fanghi chimici.

Le modalità attuali di funzionamento, riferite dai gestori, prevedono il seguente schema di trattamento (linea Fenton e linea di chiariflocculazione in serie):

- il primo dosaggio di FeCl₂ abbassa il pH intorno a 5;
- il dosaggio di H₂O viene regolato in modo da mantenere un potenziale redox intorno a valori positivi pari a circa +500 mV; l'obiettivo è quello di favorire la successiva rimozione dei metalli (particolarmente problematici risultano Zn, Pb, Cu);
- il dosaggio di calce nel primo comparto di neutralizzazione/precipitazione viene effettuato in modo da mantenere il pH attorno a 10,2; si tratta della prima fase di precipitazione di alcuni metalli come idrossidi;
- nella vasca di regolazione, il dosaggio di correttori di pH viene effettuato per mantenere il pH intorno a 10 e l'eventuale dosaggio di H₂O₂ è finalizzato a portare il potenziale redox attorno a 0 mV;
- nel secondo comparto di precipitazione, il pH è mantenuto a 12.

Eventualmente la rimozione dei metalli è coadiuvata dal dosaggio di un tiocarbammato (precipitazione dei metalli come solfuri).

6. Ispessimento fanghi chimici

Il processo di ispessimento è identico a quello per i fanghi biologici, ossia, separazione del surnatante, inviato tramite fognatura dedicata in testa all'impianto biologico, dai fanghi che sono inviati alla disidratazione meccanica. Questo ispessitore è in uso per i soli fanghi chimici.

7. Disidratazione fanghi chimici

Il processo di disidratazione è identico a quello per i fanghi biologici. A tale scopo viene utilizzata una filtropressa dedicata.

La concentrazione di secco nel fango filtropressato è pari al 50%. Il fango pressato è scaricato automaticamente in cassoni scarrabili. Il surnatante originato dal processo di pressatura viene raccolto nella fognatura interna ed inviato in testa all'impianto.

2 INTRODUZIONE ALLO STUDIO DELLE PAT

2.1 Premessa

La scelta di usare una convenzionale turbina o una pompa azionata in senso inverso (PAT) in un determinato impianto idroelettrico è influenzata dai seguenti aspetti:

- ◆ **PROGETTAZIONE:** disponibilità di conoscenze tecniche, disponibilità di componenti del sistema;
- ◆ **PROGETTO DI INGEGNERIA:** parametri di sito (portata, prevalenza), regime idrico (variazioni stagionali del flusso), fattibilità dell'opera, requisiti di potenza (curve di carico);
- ◆ **FUNZIONAMENTO E MANUTENZIONE:** regolazione di velocità e/o portata, esperienza di manutenzione disponibile, affidabilità dei componenti del sistema, disponibilità di pezzi di ricambio;
- ◆ **PARAMETRI ECONOMICI:** costi iniziali di investimento, costi di funzionamento e manutenzione, produzione di energia e ricavi annui, beneficio netto e recupero di capitale.

Utilizzare una pompa come una turbina (PAT) in un impianto idroelettrico non consiste semplicemente nella sostituzione della turbina con un'altra macchina che potrebbe risultare meno costosa e sofisticata. Quasi tutti gli aspetti di un impianto idroelettrico, dalla progettazione al funzionamento, sono influenzati da questa scelta.

2.2 La differenza tra pompe e turbine

La teoria idraulica di base è la stessa per entrambe le macchine. Tuttavia, il comportamento del flusso del fluido reale, compresi attrito e turbolenza, segue differenti regole nella progettazione di pompe e turbine.

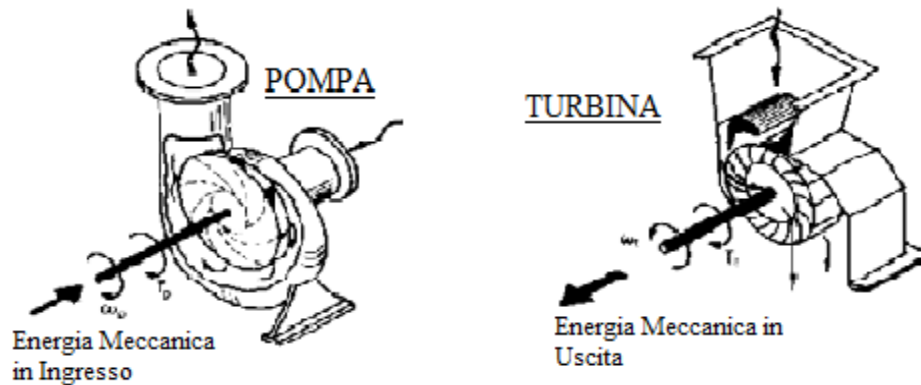


FIGURA 1: Confronto tra il funzionamento di una pompa e di una turbina

	Turbina	Pompa
Flusso di energia	Ingresso di energia idraulica (acqua sotto pressione). Produzione di energia meccanica (momento torcente sull'albero).	Ingresso di energia meccanica (momento torcente sull'albero). Produzione di energia idraulica (acqua sotto pressione).
Altezza piezometrica	L'altezza piezometrica disponibile della turbina decresce all'aumentare della portata (perdite dovute all'attrito)	Il carico dinamico totale, generato dalla pompa, aumenta al crescere della portata
Verso di rotazione	La turbina ruota in verso OPPOSTO rispetto alla girante della pompa	
Verso del momento torcente	Il verso rimane lo stesso in entrambe le modalità di funzionamento	

Alcune particolari differenze:

1. Le condizioni di funzionamento.

Le **pompe** operano generalmente con velocità, portata e carico costanti. Una pompa è quindi progettata per un dato punto di funzionamento e non richiede un dispositivo di regolazione. Idealmente, il punto di funzionamento coincide con la massima efficienza della pompa.

Le **turbine** operano in condizioni di portata e carico variabili. In un impianto idroelettrico, la portata deve essere regolabile in risposta alle variazioni stagionali delle risorse idriche disponibili o per adeguare l'erogazione di potenza alla domanda dei consumatori. In *FIGURA 2*, per quanto riguarda la turbina, si possono vedere pale regolabili e/o lame di guida, necessari per regolare il flusso.

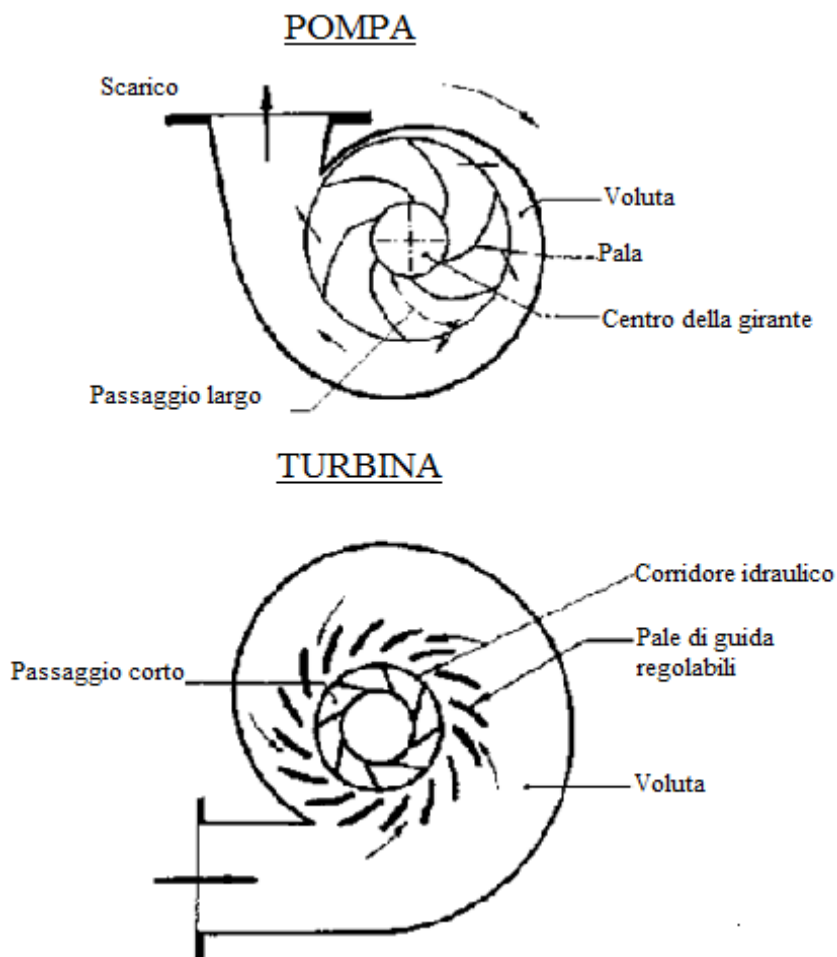


FIGURA 2: Confronto tra la struttura di una pompa e di una turbina

2. Progetto idraulico.

In una **pompa**, l'energia cinetica impressa al liquido deve essere convertita in energia di pressione; ossia, la portata deve essere rallentata mentre passa attraverso la girante e il corpo a spirale. La portata decelerata è generalmente molto sensibile al distacco e alla formazione di vortici. Per evitare che ciò accada, la girante viene progettata con canali lunghi e lisci, caratterizzati da un'area della sezione trasversale che aumenta gradualmente. Le perdite di attrito che si ottengono attraversando questi lunghi passaggi sono relativamente alte.

Al contrario, la portata attraverso una **turbina** viene accelerata, facendo sì che risulti meno soggetta a turbolenze; i passaggi sono quindi relativamente corti in modo da ridurre le perdite di attrito.

3. Posizionamento della macchina – Cavitazione.

Il posizionamento della **pompa** rispetto al pelo libero dell'acqua nella camera di aspirazione dalla quale l'acqua viene pompata è cruciale. Se la pompa si trova troppo in alto, potrebbe verificarsi la cavitazione. In questo contesto, il progetto del tubo di aspirazione è molto importante, poiché le perdite di attrito nel tubo stesso riducono la pressione all'entrata della pompa aumentando la tendenza alla cavitazione.

Le **turbine** sono meno sensibili al verificarsi della cavitazione poiché le perdite di attrito nel tubo aumentano la depressione sulla turbina.

2.3 Una pompa usata come turbina

2.3.1 Introduzione

Quando una pompa opera come una turbina, il portata attraverso la macchina presenta caratteristiche simili a quelle osservabili in una turbina. In questo modo, le caratteristiche vantaggiose di una turbina (vale a dire flusso accelerato e condizioni operative meno soggette a cavitazione) si verificano anche per le PAT. D'altro canto, la girante della pompa con i suoi lunghi passaggi non è essenzialmente progettata per funzionare in senso inverso (poiché caratterizzata da elevate perdite d'attrito); per questo motivo una PAT può essere leggermente meno efficacemente di una turbina ben progettata.

Generalmente, si è osservato che le efficienze che si possono attendere da una pompa che funziona da turbina sono uguali o leggermente inferiori a quelle che si avrebbero come pompa.

Il principale difetto di una PAT consiste nel fatto che, a causa della mancanza di un dispositivo di regolazione di portata, viene richiesto che la portata sia abbastanza costante. Quando la disponibilità di portata decresce, la portata della turbina deve essere strozzata al fine di evitare che il serbatoio di carico venga svuotato, col rischio che si proceda con l'aspirazione dell'aria. Lo strozzamento dello scarico (ad esempio con una valvola di controllo) comporta un notevole calo di efficienza, in quanto, innanzitutto, il corpo a spirale della pompa non è stato concepito per portate differenti da quella di progetto e, in secondo luogo, la valvola di strozzamento dissipa energia, riducendo così il salto netto della PAT.

I principali vantaggi e svantaggi di pompe utilizzate come turbine (PAT) sono riassunti qui di seguito.

2.3.2 Vantaggi

Costi: i costi di investimento delle PAT possono essere inferiori del 50% rispetto a quelli di una turbina comparabile (soprattutto per le piccole unità, inferiori a 50 kW). Questo potrebbe essere una motivazione importante per i progetti con risorse economiche limitate;

Costruzione: l'assenza di un dispositivo di regolazione della portata, solitamente percepito come uno svantaggio, è al tempo stesso un vantaggio, poiché, in questo modo, la costruzione della pompa risulta più semplice e resistente nel tempo;

Disponibilità: poiché il loro utilizzo è richiesto per una vasta gamma di applicazioni (irrigazione, industria, approvvigionamento idrico), le pompe standard sono facilmente disponibili (con brevi tempi di consegna) ed i produttori e i loro rappresentanti operano a livello mondiale. Inoltre, i pezzi di ricambio sono facilmente reperibili, in quanto i principali produttori di pompe offrono servizi anche dopo la vendita in quasi in tutto il mondo;

Manutenzione: non sono richieste attrezzature speciali e particolari competenze.

2.3.3 Svantaggi

Nessun dispositivo di regolazione idraulica: ciò comporta che una valvola di controllo deve essere inserita lungo la condotta forzata (costi aggiuntivi) per avviare e arrestare la PAT. Se la valvola è utilizzata per adeguare il funzionamento alle variazioni di portata, le perdite idrauliche dell'impianto aumenteranno fortemente;

Efficienza massima: le efficienze delle PAT sono inferiori rispetto alle sofisticate turbine di medio-alta produzione che raggiungono oltre il 90%;

Minor rendimento a carico parziale: una turbina convenzionale dispone di un efficace controllo idraulico (pale regolabili, lame guida) per regolare la macchina in funzione della portata disponibile o della produzione richiesta. Se le PAT vengono lasciate operare a portate differenti a quella di progetto, vale a dire sotto il loro punto di migliore efficienza, si verificherà una rapida riduzione di efficienza.

Gli svantaggi delle PAT possono essere ridotti al minimo se la pompa da utilizzare verrà selezionata molto attentamente e sarà applicata solo dove necessario. Le scarse prestazioni, connesse alla selezione non appropriata della macchina e alla sua messa in opera, porteranno ad una riduzione dei rendimenti annui generati dall'impianto idroelettrico. Questa ridotta produzione rischia di annullare

l'enorme vantaggio relativo al costo della PAT (più bassi costi di investimento) rispetto ad una turbina tradizionale.

2.4 Applicazioni particolari delle PAT

2.4.1 Dimensione della macchina

I vantaggi delle PAT rispetto a turbine convenzionali possono essere rilevanti per impianti fino a 500 kW. Per produzioni maggiori, come impianti di produzione di massa, le pompe non rappresentano più lo standard, ma vengono proposte macchine convenzionali come le turbine. Pertanto, il vantaggio del costo delle PAT è ridotto. Inoltre, potrebbe essere utile nei maggiori impianti idroelettrici spendere di più per una turbina più efficiente poiché, più grande è l'installazione, minore sarà il contributo del sistema idraulico rispetto ai costi complessivi di investimento. Tale tendenza è mostrata in GRAFICO1 e GRAFICO2.

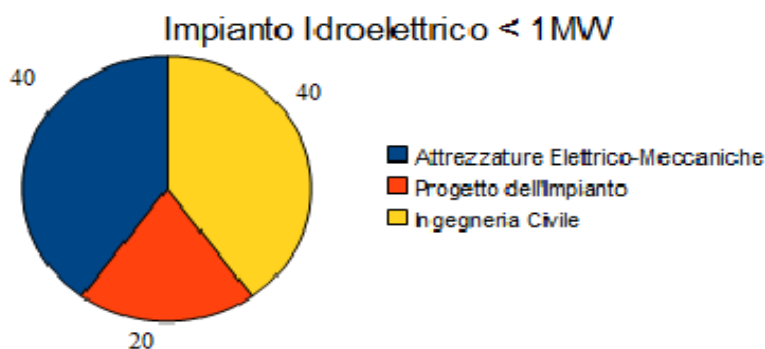


GRAFICO 1: Spese Economiche per Impianto < 1 MW

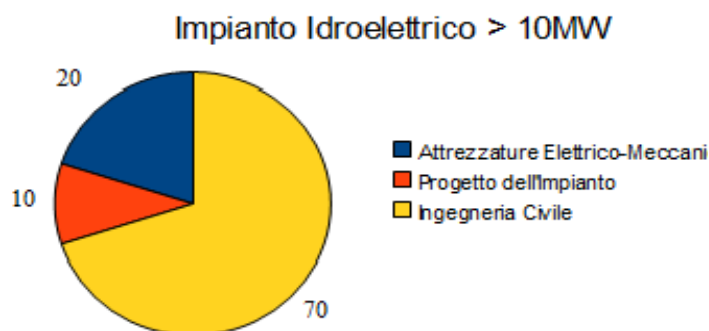


GRAFICO 2: Spese Economiche per Impianto > 10 MW

2.4.2 Progetto della pompa

Le numerose e sempre più variegata applicazioni delle pompe ha portato a continui sviluppi nella loro progettazione. Per un'acqua relativamente pulita, che è solitamente disponibile presso gli impianti idroelettrici, il progetto del classico corpo della spirale ha dimostrato di essere efficiente e affidabile. E' questo tipo di pompa, disponibile in tutto il mondo, che rappresenta anche la migliore soluzione per l'applicazione come PAT. La semplice e robusta costruzione e anche i prezzi relativamente bassi rendono questo tipo di pompa perfettamente adatto alla filosofia del basso costo delle PAT. La FIGURA3 mostra un corpo della spirale della pompa a singola fase del progetto classico.

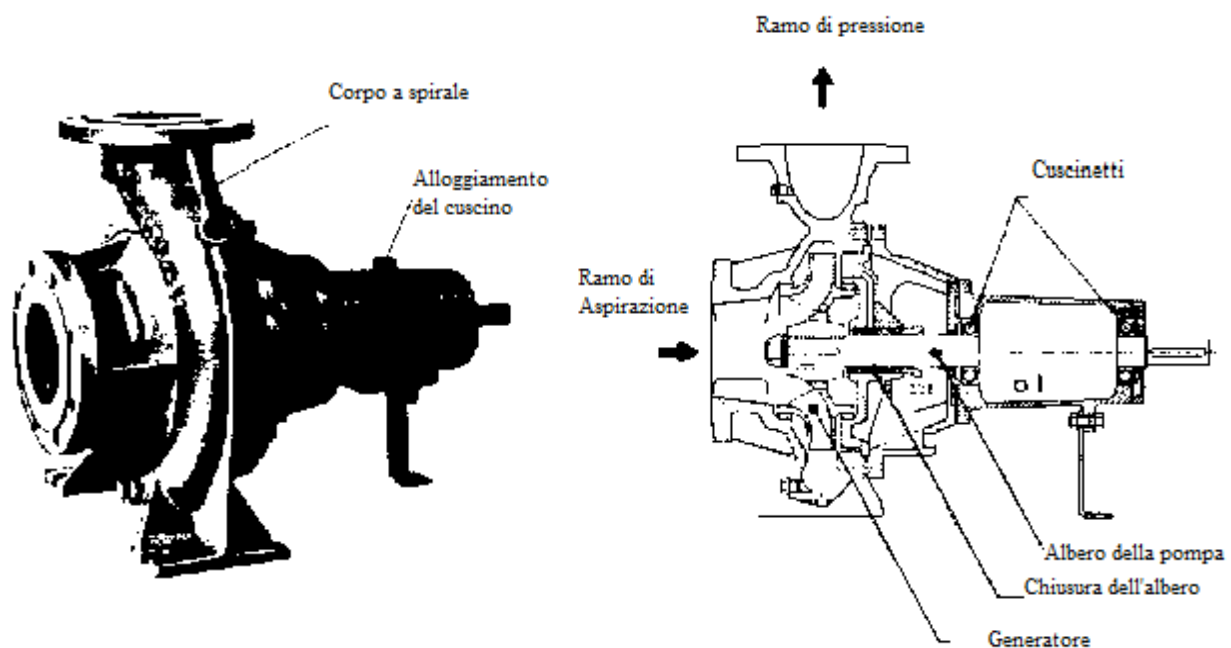


FIGURA 3: Struttura di una pompa

La classificazione di base delle pompe può essere data in funzione della loro portata. L'industria della pompa utilizza il concetto di *velocità specifica* per descriverne il modello in termini più generali:

$$n_q = n \times \frac{\sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H^3}}$$

dove n = velocità proposta della pompa (RPM)

Q = portata allo scarico (m^3/s)

H = prevalenza per ogni stadio della pompa (m)

Possono essere distinti i seguenti principali progetti di pompa:

- pompe a flusso radiale (centrifughe) - bassa velocità specifica $n_q =$ da 10 a 50;
- pompe a flusso misto - velocità specifica media $n_q =$ da 50 e 150;
- pompe a flusso assiale - alta velocità specifica $n_q =$ da 135 a 320.

Come regola generale, le pompe a flusso assiale sono di solito selezionate per il pompaggio di grandi volumi d'acqua contro prevalenze relativamente basse (da 1 a 15 m) mentre pompe a flusso misto sono utilizzate per sollevamenti intermedi (da 6 a 30 m).

Le pompe centrifughe possono coprire un campo da bassi ad alti sollevamenti. Il loro vantaggio principale è la loro capacità di aspirazione; vale a dire che la pompa può essere collocata sopra la sorgente di acqua e la girante non è necessario che venga sommersa per pompare il fluido.

Il campo di applicazione di queste pompe può essere ampliato utilizzando pompe multi-fase con giranti in serie.

In una pompa a doppio (o multi-) flusso (chiamata anche pompa a doppio ingresso o multi-ingresso), le giranti sono disposte, invece, in parallelo raddoppiando così la capacità della singola unità della pompa a parità di prevalenza.

2.4.3 Campo di applicazione di turbine e PAT

Il GRAFICO3 e il GRAFICO4 rappresentano il campo di applicazione di diversi tipi di turbine e PAT disponibili per impianti micro-idroelettrici.

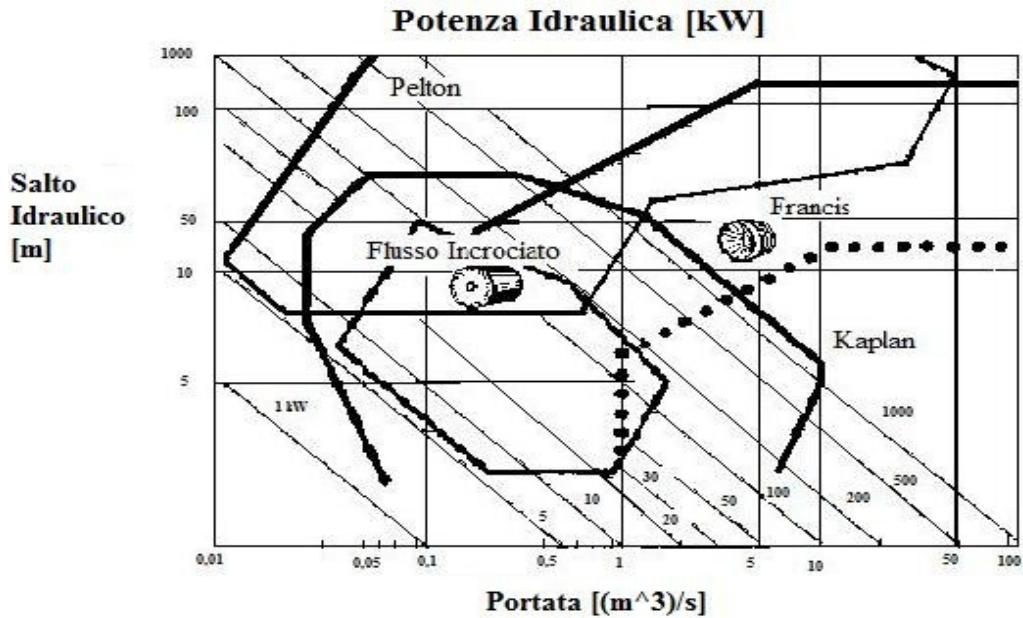


GRAFICO 3: Campi di applicazione di una turbina

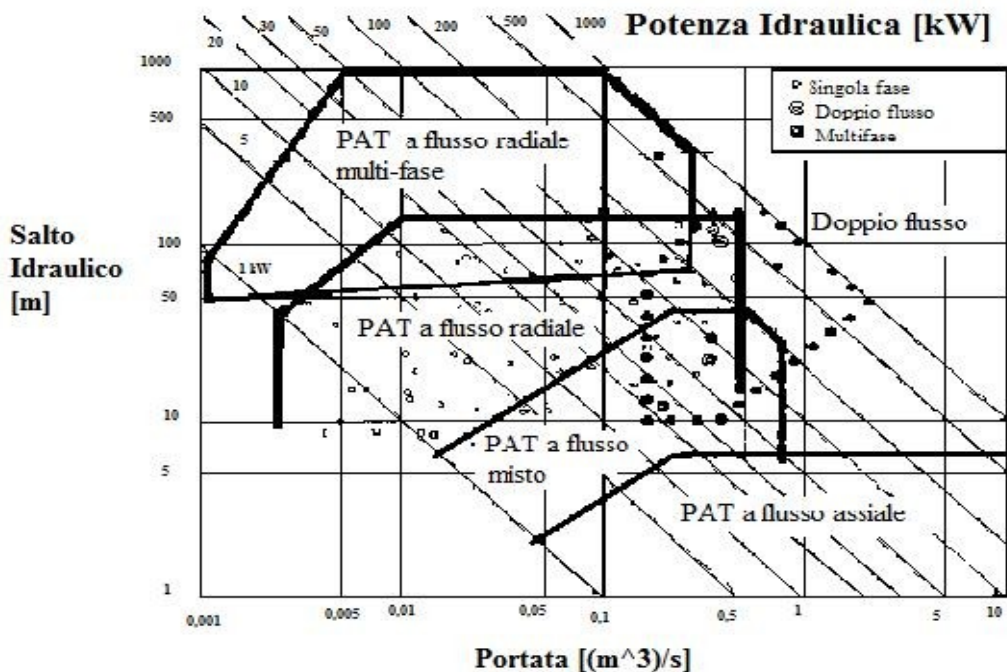


GRAFICO 4: Campi di applicazione di una PAT

2.5 Condizioni e limiti delle applicazioni delle PAT

Un efficiente funzionamento delle PAT richiede regimi di portata e di carico costanti a causa della mancanza di dispositivi di regolazione idraulica.

In un campo limitato, la portata può essere regolata (manualmente) da una valvola di controllo; questa è una soluzione frequentemente adottata per il diretto funzionamento di macchinari per i quali le variazioni di velocità non sono solitamente un problema. Tuttavia, questo metodo è scarsamente efficiente poiché la valvola non solo riduce la portata, ma dissipa anche una notevole quantità di energia di pressione. L'erogazione di potenza quindi diminuirà bruscamente.

Le variazioni di portata possono anche essere ottenute utilizzando diverse PAT in parallelo, accendendole e spegnendole in funzione della portata disponibile. Tuttavia, il vantaggio del costo di una tale installazione rispetto ad una turbina convenzionale, con regolazione di flusso, risulta meno marcato.

Per la generazione di elettricità isolata, cioè, non connessa ad una rete, dove il carico al generatore di solito varia notevolmente nel corso della giornata, le PAT possono essere utilizzate, ma preferibilmente in unione con controllori elettronici che permettono di mantenere il carico sulla PAT costante con la produzione di carichi zavorra quando la richiesta di elettricità diminuisce. Dissipare l'energia generata producendo carichi zavorra, invece di ridurre il flusso nei momenti di bassa richiesta di potenza è una soluzione accettabile solo se il massimo dell'acqua raccolta non è necessaria (portata del fiume sempre sufficiente; bacino di immagazzinamento non disponibile).

2.6 Progetto di un impianto micro-idroelettrico con una PAT

2.6.1 Componenti di un impianto micro-idroelettrico usando una PAT

Gli elementi principali di un impianto sono:

- ◆ l'opera di presa, dove l'acqua di un fiume, di una sorgente, di un lago o di un bacino viene deviata dal suo corso naturale o prelevata. In alcuni casi è caratterizzata dalla presenza di strutture di controllo e di regolazione come dighe;
- ◆ nel bacino di decantazione o dissabbiatore, i sedimenti (sabbia e/o limo) sono separati dall'acqua. Infatti, se non eliminati, i sedimenti possono accumularsi nella condotta dell'impianto riducendo la portata e, inoltre, le particelle potrebbero causare una rapida usura della turbina;
- ◆ il canale di testa o condotto porta l'acqua all'inizio della condotta forzata;
- ◆ il bacino di carico o serbatoio è una camera con una superficie d'acqua a pelo libero all'inizio della condotta forzata. Serve per i seguenti scopi:
 - sedimentazione di quelle particelle che sono riuscite a transitare attraverso il dissabbiatore;
 - cattura di detriti galleggianti per mezzo di una rastrelliera per rifiuti;
 - protezione del canale di testa o condotto da eccessive variazioni del livello delle acque provocato dalle variazioni di portata nella turbina o nella PAT;
- ◆ la condotta forzata, è un condotto in pressione che porta l'acqua alla turbina o alla PAT;
- ◆ la turbina o la PAT, che converte l'energia del fluido in energia meccanica agente sull'albero che può essere utilizzata in vari modi.

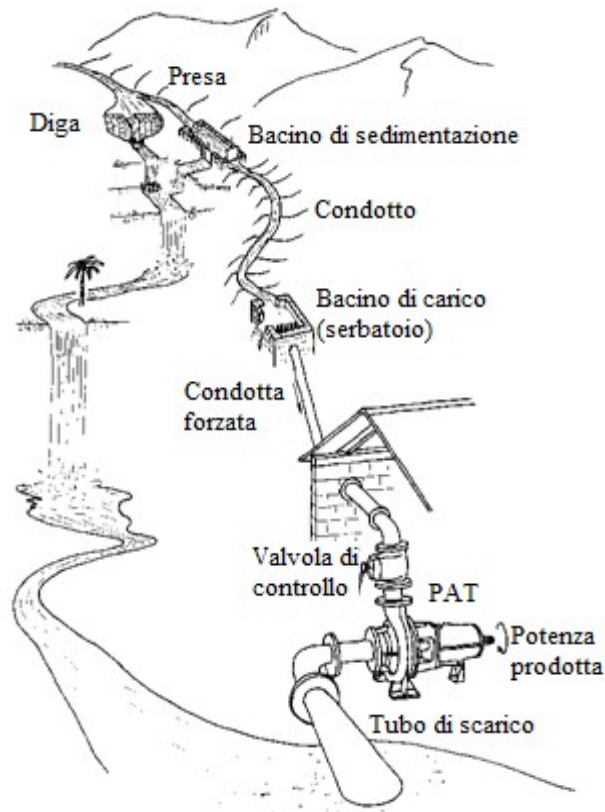


FIGURA 4: Schema di un generico impianto idroelettrico

2.6.2 Panoramica delle possibili applicazioni di impianti micro-idroelettrici

L'uso di una PAT in un impianto micro-idroelettrico non limita la tipologia di consumatori di energia idroelettrica. L'azionamento diretto di macchine, la produzione di energia elettrica (in parallelo ad una rete di grandi dimensioni o isolata) o combinazioni di questi, sono possibili come nel caso di una turbina convenzionale. L'unica differenza è che una PAT non può fare uso delle risorse idriche disponibili in maniera efficiente come una turbina a causa della mancanza di dispositivi di regolazione idraulica.

2.7 Parametri di progetto

2.7.1 Portata

Una PAT non può funzionare in modo efficiente al di sotto della portata di progetto. E' quindi molto importante conoscere l'effettivo regime idrologico del corpo idrico che consentirà al progettista di determinare la portata nominale della PAT. Sfortunatamente, i dati di portata del fiume per diversi anni sono raramente disponibili per gli impianti micro-idroelettrici e potrebbe non esserci tempo sufficiente per effettuare una campagna di misurazione prima della progettazione dell'impianto; tuttavia, alcune misurazioni di portata (soprattutto durante la stagione più secca) devono essere fatte in ogni caso. Metodi di misurazione della portata sono per esempio lo sbarramento o il metodo a sorso di sale. Queste misure, in combinazione con la stima delle portate minime, possono essere elaborate in una curva delle durate delle portate (GRAFICO5).

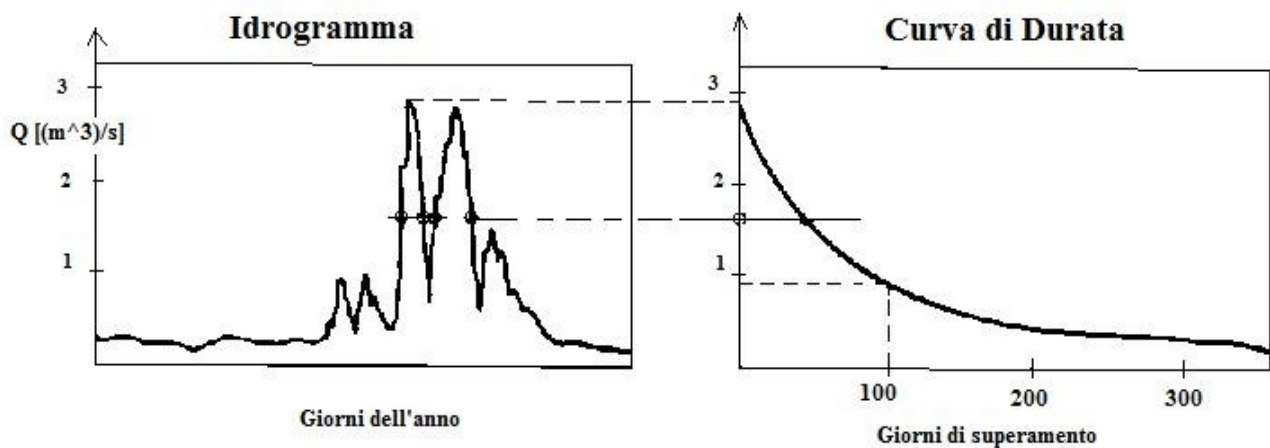


GRAFICO 5: Esempio di idrogramma e curva di durata

Utilizzando la curva delle durate, si può determinare la portata che può essere utilizzata e la potenza che può essere generata con una data PAT.

1. Se la potenza deve essere disponibile tutto l'anno, allora la portata di progetto della PAT non deve superare quella minima del fiume (questa è la portata superata durante il 100% del tempo = 365 giorni nella curva flusso-durata); ma, nella pratica, il tempo di funzionamento annuale di una PAT sarà inferiore al 100%, in quanto può essere interrotta durante la manutenzione e la riparazione (a seguito del guasto di componenti) o durante le piene

eccezionali del fiume. Inoltre, una portata minima deve essere lasciata nel fiume per soddisfare le esigenze ambientali;

2. Se la potenza richiesta dai consumatori è superiore a quella che può essere fornita dalla PAT alla minima portata del fiume, allora la portata di progetto della PAT deve essere aumentata.

a) $Q_{progetto} < Q_{min}$
Potenza disponibile tutto l'anno

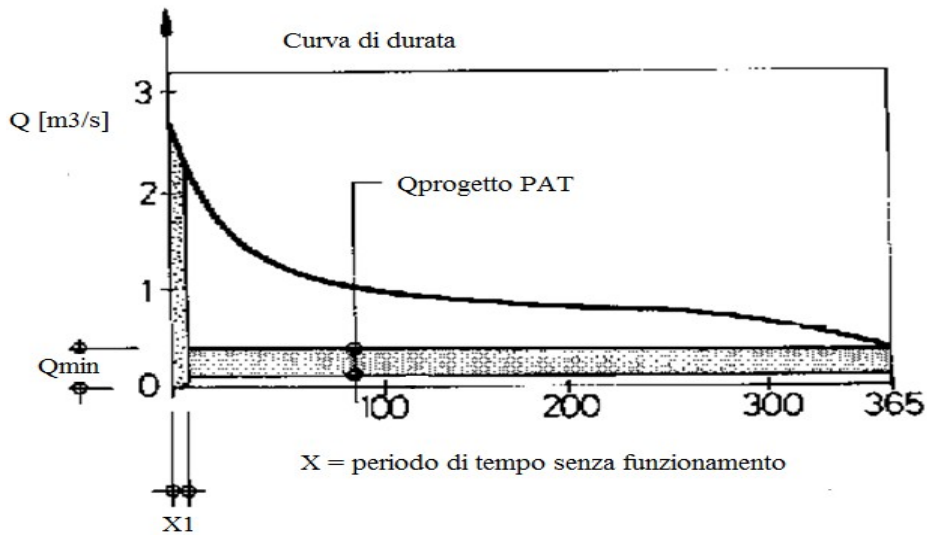


GRAFICO 6: Funzionamento di una PAT con $Q_{progetto} < Q_{min}$

b) $Q_{progetto} > Q_{min}$
Aumento di potenza disponibile in un periodo limitato di tempo

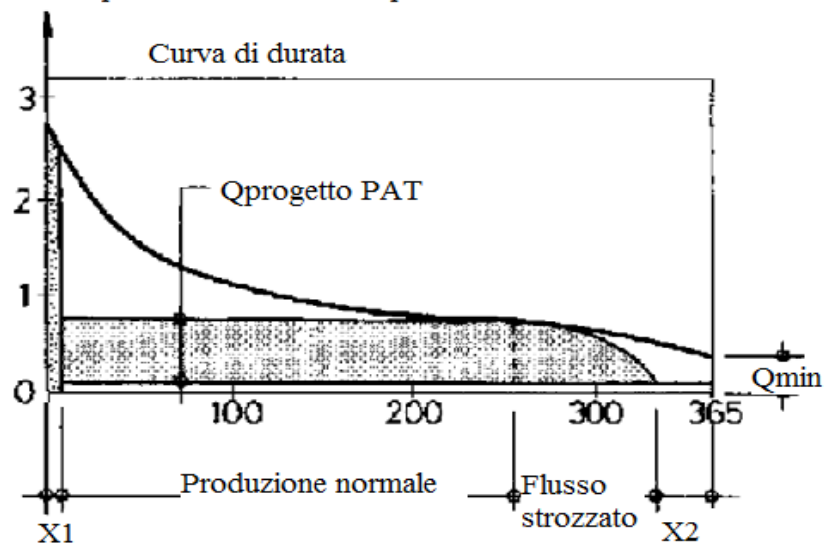


GRAFICO 7: Funzionamento di una PAT con $Q_{progetto} > Q_{min}$

2.7.2 Prevalenza

La prevalenza è la pressione disponibile alla PAT espressa in metri di colonna d'acqua. Si deve distinguere tra prevalenza totale, che è la differenza di quota tra la superficie dell'acqua della vasca di carico e l'estremità inferiore, e la prevalenza netta, che è la pressione effettiva disponibile alla turbina. Per ottenere la prevalenza netta, si introducono delle riduzioni connesse alle perdite nella condotta forzata e nel tubo di progetto. La prevalenza totale può essere determinata da un rilievo topografico utilizzando i livelli e le misure metriche. Se non sono disponibili mappe adatte della zona da un ufficio di geodesia, il progettista deve compiere un sopralluogo. Di particolare importanza sono le alluvioni o le impronte di acqua alta del torrente, ossia il livello più alto raggiunto dall'acqua del torrente durante il diluvio. Queste impronte influenzeranno il progetto della presa e determineranno l'ubicazione più bassa possibile della centrale. Sulla base di queste mappe, il progetto di base dell'impianto micro-idroelettrico può essere sviluppato contenendo l'assetto della condotta forzata, la posizione della centrale, l'opera di presa e il dissabbiatore.

2.7.3 Carico

Il carico è definito come la potenza dagli utenti collegati alla PAT. Predire il carico degli impianti micro-idroelettrici è particolarmente importante per il funzionamento isolato. Il carico massimo delle macchine e delle pompe ad azionamento diretto può essere calcolato sommando la potenza nominale di tutte le macchine che saranno in funzione contemporaneamente. Predire il carico di un generatore è più complicato in quanto gli apparecchi sono numerosi e il loro tempo di funzionamento di norma non può essere controllato dal gestore della PAT. Il progettista di un impianto micro-idroelettrico deve quindi sviluppare una curva di carico che indichi i requisiti di potenza totale nell'arco di un definito periodo di tempo.

Un aumento della domanda di potenza durante la vita dell'impianto di solito può essere previsto. Se la portata disponibile è sufficiente, la curva di carico deve essere estrapolata per tenere conto di nuovi utenti che si aggiungono allo schema negli anni successivi, vale a dire, la potenza nominale della PAT sarà superiore alla domanda massima durante i primi anni di attività. Tuttavia, il tecnico ed i progettisti dell'impianto dovrebbero adottare una politica chiara per quanto riguarda il numero di consumatori che hanno il permesso di adesione all'impianto in quanto il sovraccarico di una PAT di solito causa un guasto di tutta la rete isolata.

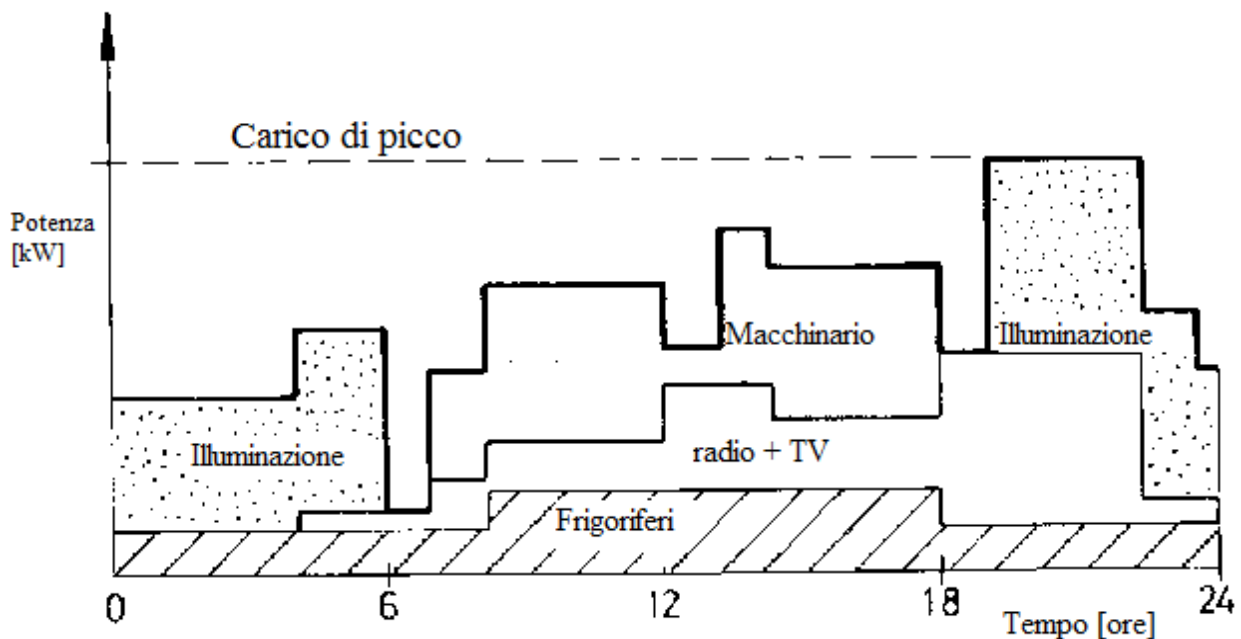


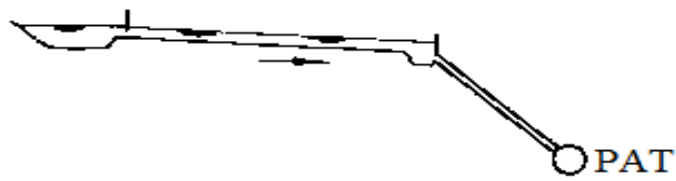
GRAFICO 8: Esempio di andamento della domanda di potenza giornaliera

2.8 *Abbinamento del potenziale idroelettrico e domanda di energia. Portata di progetto per varie applicazioni di energia idroelettrica*

2.8.1 **Azionamento diretto dei macchinari**

L'uso di PAT per azionare esclusivamente macchinari di aziende agricole e di piccole industrie (segherie, cartiere, officine per il metallo, etc...) può essere una soluzione molto economica. Vari tipi di cinghie sono utilizzate per adattare la velocità di uscita della PAT alle esigenze di velocità delle macchine. Il carico di queste macchine dipende dal loro funzionamento. Se la macchina non è sotto carico, l'installazione verrà accelerata alla velocità di fuga. Pertanto, l'integrità strutturale della PAT, l'ingranaggio e il macchinario devono anche essere assicurati in condizioni di velocità di fuga. La portata di progetto della PAT è determinata dalla potenza richiesta della macchina azionata. Se la portata del fiume scende al di sotto di questi requisiti durante la stagione secca, un laghetto di stoccaggio, raccogliendo l'acqua durante la notte, potrebbe fornire il supporto necessario per far funzionare la PAT alla massima potenza durante le ore di lavoro.

a) Schema del corso del fiume



Curva di durata

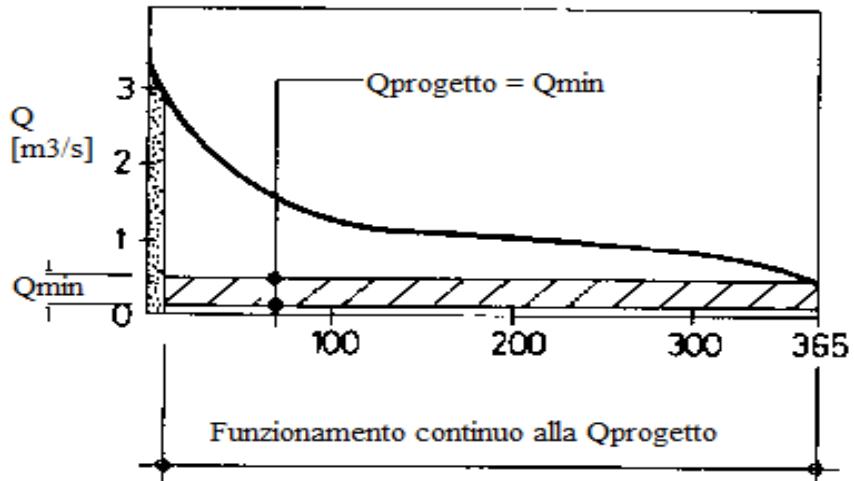


GRAFICO 9: Funzionamento di un impianto idroelettrico con $Q_{progetto} < Q_{min}$

b) Con bacino di stoccaggio

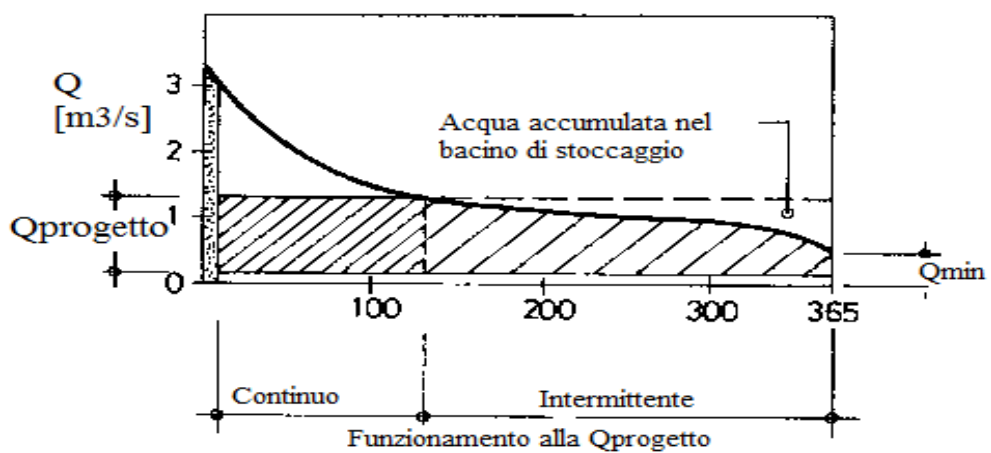
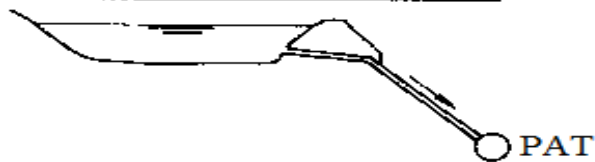


GRAFICO 10: Funzionamento di un impianto idroelettrico con $Q_{progetto} > Q_{min}$

2.8.2 Alternanza di funzionamento delle macchine e del generatore

Le macchine non sono di solito funzionanti durante la notte. La portata disponibile potrebbe quindi essere utilizzata per generare energia elettrica per l'illuminazione, la cottura, radio, TV durante le ore serali. La PAT opera al flusso di progetto e alla piena potenza di uscita proprio come quando il macchinario opera durante il giorno. La potenza nominale del generatore deve dunque corrispondere al massimo di uscita della PAT per evitare fuorigiri (e sovratensione). Regolamentare la produzione della PAT chiudendo la valvola di controllo e installando un generatore più piccolo non è raccomandato. La valvola di controllo potrebbe accidentalmente essere lasciata completamente aperta durante il funzionamento del generatore esponendolo alla massima potenza della PAT che potrebbe causare danni alle apparecchiature elettriche. Dato che la richiesta di potenza non incontra di norma la produzione del generatore, un regolatore di carico conviene che sia installato. Come suggerisce il nome, un controllore di carico regola la potenza del generatore producendo carichi di zavorra ogni volta che la domanda di energia elettrica degli apparecchi si riduce. Essa, tuttavia, non regola la portata della PAT e della turbina.

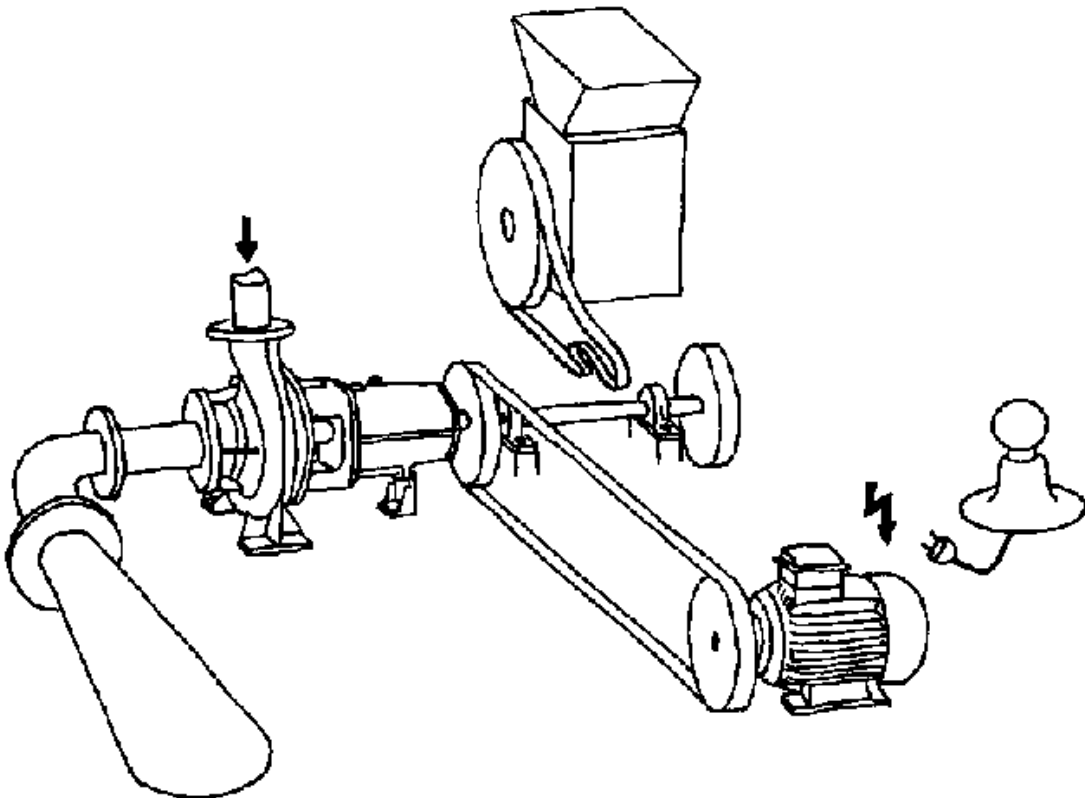


FIGURA 5: Esempio dello schema di un impianto di produzione di energia

2.8.3 Generazione di elettricità in parallelo ad una rete nazionale o regionale

La produzione di elettricità in parallelo a una rete di grandi dimensioni elimina la necessità di un controllo del carico. La completa produzione del generatore può essere fornita alla rete in qualsiasi momento, utilizzando la rete stessa come un immagazzinamento virtuale; ossia, un eventuale eccesso di produzione viene consegnato alla rete, mentre in caso di picchi della domanda dei consumatori locali, la rete può fornire energia elettrica a supporto del generatore. Un tale sistema può sfruttare appieno il potenziale idroelettrico, a condizione che la turbina possa essere adattata alle variazioni della portata disponibile. Ciò può essere realizzato al meglio da una turbina convenzionale con un regolatore di portata che agisce sulle pale della turbina e sugli ugelli. L'apertura della turbina è continuamente regolata per mantenere un livello d'acqua costante nella vasca di carico, di conseguenza tutta l'acqua disponibile (salvo durante le alluvioni) potrebbe essere utilizzata per la produzione di energia.

L'utilizzo di una PAT per la produzione di energia elettrica di rete potrebbe non essere favorevole in quanto non può essere regolata in modo efficiente alle diverse variazioni della portata. In alcuni casi, può essere una soluzione tecnicamente ed economicamente fattibile per la generazione di energia elettrica in parallelo ad una rete più ampia:

- nei siti di impianti micro-idroelettrici con una portata disponibile costante durante gran parte dell'anno (come frequentemente riscontrato nei paesi tropicali senza stagioni distinte) una PAT che utilizza una portata nominale pari alla portata minima del corpo d'acqua è una soluzione semplice, ma ancora relativamente efficiente. La produzione di energia supplementare di una turbina a portata regolata è piccola e potrebbe non compensare i bassi costi di investimento di una PAT;

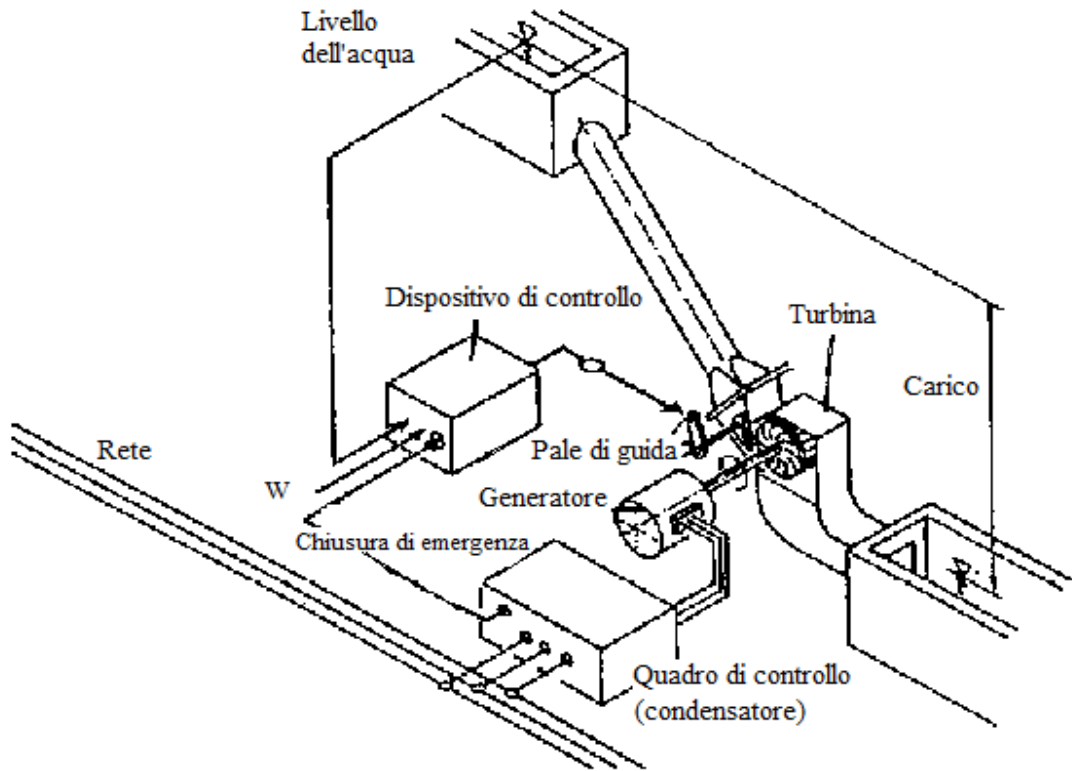


FIGURA 6: Esempio dello schema di un impianto di produzione di energia

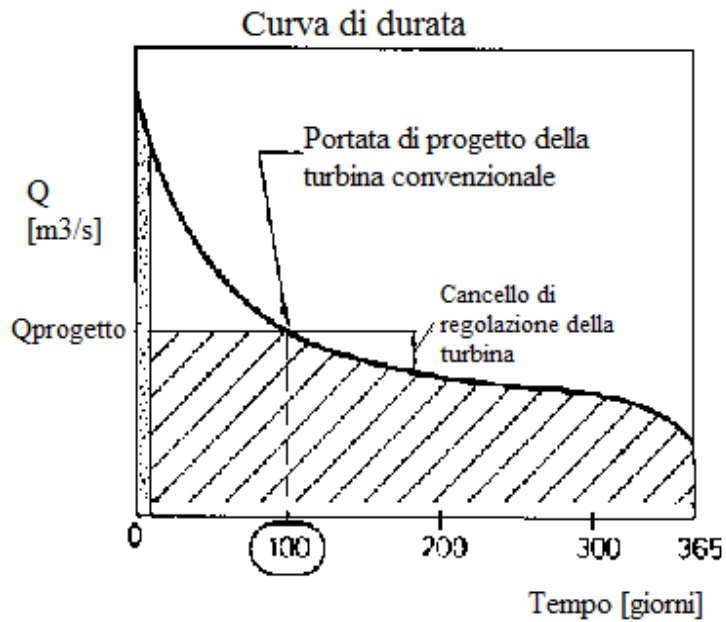


GRAFICO 11: Esempio di una curva di durata

- in associazione con un bacino di accumulo, la PAT può fornire una produzione di energia elevata allo stesso modo di una turbina a portata regolata. Il funzionamento intermittente della PAT per valori di portata nominale non pregiudica i consumatori locali, dato che può anche essere fornita dalla rete nazionale/regionale. Tuttavia, i bacini di immagazzinamento richiedono in molti casi opere civili relativamente grandi (e costose) e ciò non è necessariamente in accordo con l'approccio di riduzione dei costi in genere adottato quando si considera una PAT;
- in alternativa, il controllo di portata su una PAT potrebbe essere realizzato utilizzando la valvola di controllo come un dispositivo di strozzamento. Questo può essere fatto automaticamente da un dispositivo di rilevamento del livello dell'acqua nella vasca di carico con un servomotore che agisce sulla valvola, oppure attraverso la regolazione manuale della valvola di scarico. Come discusso in precedenza, la valvola di controllo non è un efficiente dispositivo di regolazione di portata e la PAT potrebbe non erogare la potenza sotto il 40%-60% della portata nominale;
- le variazioni stagionali di portata possono essere gestite attraverso l'uso di parecchie PAT in parallelo e avviandole e arrestandole in funzione della portata disponibile. Selezionando differenti modelli di PAT si può sfruttare una maggiore varietà di portate, utilizzando così la portata disponibile in modo più efficiente. Tuttavia, il vantaggio del basso costo della PAT rispetto ad una turbina a portata regolata è notevolmente ridotto.

L'uso di PAT in parallelo presenta vantaggi dal punto di vista del funzionamento e della manutenzione. In primo luogo, permette di realizzare la manutenzione su un'unità senza arrestare completamente l'impianto. In secondo luogo, ogni unità avrà una durata minore di funzionamento e quindi si logorerà più lentamente. Si deve prestare attenzione nella scelta delle PAT, calcolando la loro produzione per uno dato sito. Quando due PAT funzionano contemporaneamente, l'effetto della caduta della prevalenza a causa dell'aumento delle perdite nella condotta forzata per il flusso combinato può risultare più piccolo rispetto ad una PAT che produce una potenza aggiuntiva veramente bassa.

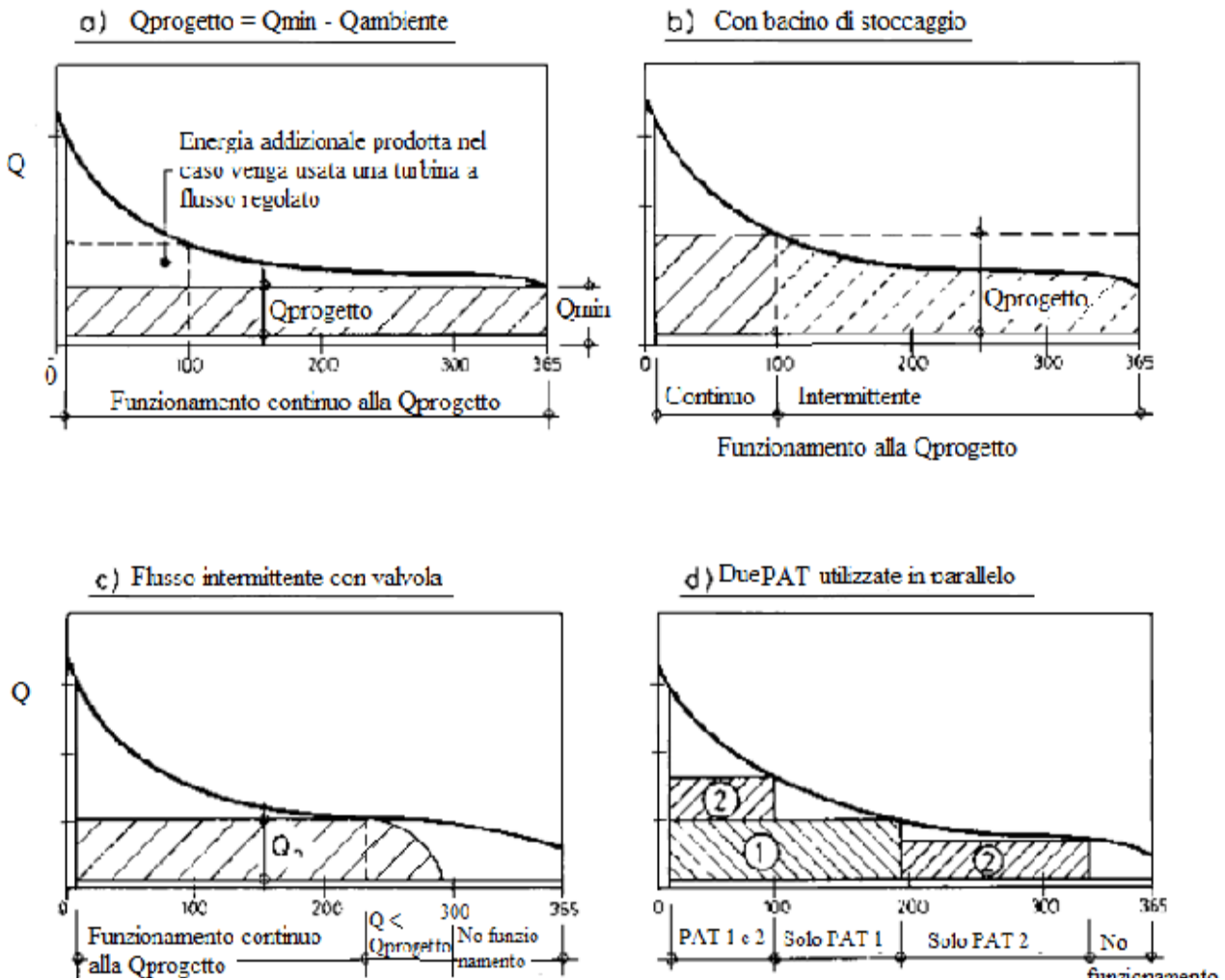


GRAFICO 12: Esempi di diverse situazioni per lo sfruttamento della portata disponibile

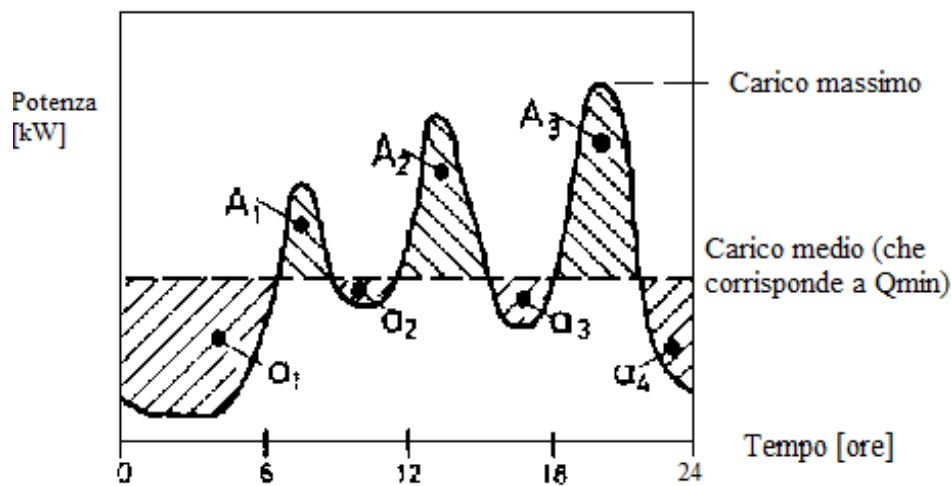
2.8.4 Produzione di elettricità in una rete isolata usando una PAT

L'impianto è l'unico produttore di energia in una rete isolata. Per evitare il malfunzionamento del sistema, il generatore deve in ogni istante coprire la richiesta di potenza dei consumatori. Pertanto, il principale parametro di progettazione per i sistemi isolati è il carico di picco, piuttosto che l'uso efficiente del potenziale idroelettrico come nel funzionamento in parallelo. La portata di progetto di un impianto micro-idroelettrico corrisponde quindi al picco di domanda dei consumatori.

- Portata disponibile sufficiente durante tutto l'anno. Finché la portata disponibile supera sempre quella di progetto dell'impianto, un progetto semplice può essere adottato e l'uso di una PAT al posto di una turbina convenzionale è adatto in molti casi. PAT e generatore

possono funzionare a potenza nominale costante e richiedono quindi un regolatore di carico per giustificare le variazioni della domanda di energia.

- Portata insufficiente del fiume. Se la portata è inferiore alla richiesta, devono essere prese misure per risolvere il problema che si ha nei periodi di elevato consumo di energia. Queste possono essere:
 - Bacini di deposito che immagazzinano acqua nei periodi di bassa richiesta di potenza e che forniscono portata all'impianto nei periodi dei picchi di domanda. La dimensione necessaria del bacino di accumulo può essere valutata dalla curva di carico, come mostrato nel GRAFICO13.



Viene assunto costante il rendimento totale

GRAFICO 13: Esempio andamento della domanda di potenza giornaliera

- Si noti che i bacini di accumulo qui considerati sono stati progettati per bilanciare solo la fornitura e la domanda quotidiana della potenza. Accogliere le variazioni stagionali di portata richiede bacini di immagazzinamento di grandi dimensioni che non sono considerati rilevanti per l'energia idroelettrica a meno che possa essere utilizzato un lago naturale.
- La seconda possibilità per evitare strozzature nel sistema di alimentazione in isolata generazione di energia elettrica è l'uso di altre fonti di energia non idroelettrica come gruppi elettrogeni diesel durante il periodo in cui la portata disponibile non è sufficiente.

E' evidente che una PAT priva di controllo idraulico non è adatta se è richiesto il massimo risparmio idrico in quanto il funzionamento sotto carico parziale è inefficiente o non è possibile. Pertanto, nei casi in cui l'approvvigionamento energetico è limitato, dovrebbe essere utilizzata una turbina convenzionale con regolatore di portata, con collegamento ad un bacino di accumulo. A seconda del livello di affidabilità della fornitura di energia richiesta in un sistema isolato, una PAT potrebbe ancora essere una soluzione fattibile:

- se la portata disponibile durante la stagione secca è accettabile, due (o più) PAT potrebbero essere installate. Mentre una di loro fornisce un carico di base durante tutto l'anno, l'altra dovrebbe coprire i picchi di domanda quando la portata è sufficiente;
- se la sospensione completa dell'alimentazione è accettabile, un'unica PAT può essere utilizzata sia con lavoro intermittente in condizioni di portata nominale (utilizzando un bacino di accumulo) sia con il completo arresto di fornitura a bassissima portata.

2.8.5 Casi particolari

Come accennato in precedenza, l'uso di gruppi elettrogeni in combinazione con una PAT nella produzione di elettricità di impianti isolati potrebbe essere una soluzione molto efficace in molti casi. Il gruppo elettrogeno può essere usato sia per coprire entrambi i carichi di picco (funzionando simultaneamente con la PAT) sia il carico di base durante le soste della PAT a causa di insufficiente portata o di manutenzione dell'impianto idroelettrico. Numerosi schemi e sistemi di controllo della PAT e dei gruppi micro-idroelettrici sono possibili; un sistema semplice sarebbe quello in cui i due produttori di energia sono indipendentemente azionati e arrestati da un operatore. I sistemi più sofisticati con regolazione automatica delle apparecchiature a seconda della domanda di potenza sono in ogni caso più convenienti. In tutti i casi, una qualche forma di protezione (ruota libera, ripetitore di potenza inversa) è necessaria per evitare che la PAT o il gruppo elettrogeno azioni/alimenti altre apparecchiature come motore o pompa in caso di bassa portata o di bassa domanda di potenza. Come in tutti gli impianti isolati, un regolatore di carico dovrebbe dissipare l'eccessiva potenza prodotta dalla PAT sempre in funzione alla portata di progetto.

Opzione 1: generatore singolo

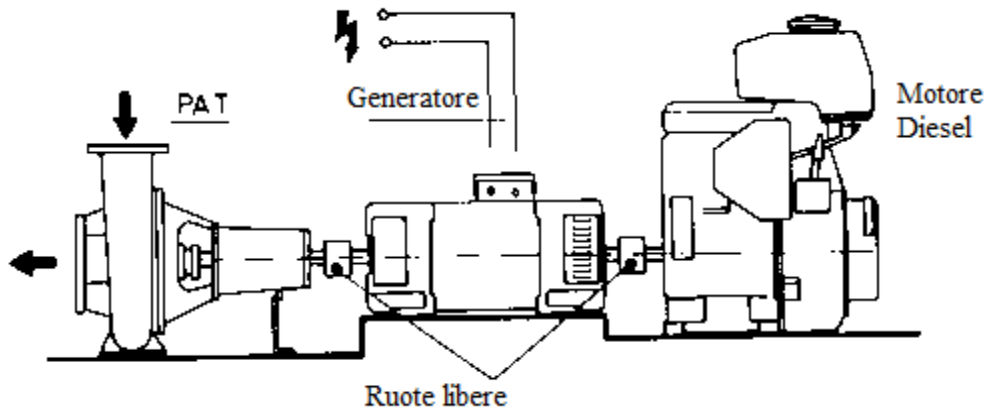


FIGURA 7: Schema con generatore singolo

Opzione 2: due unità indipendenti

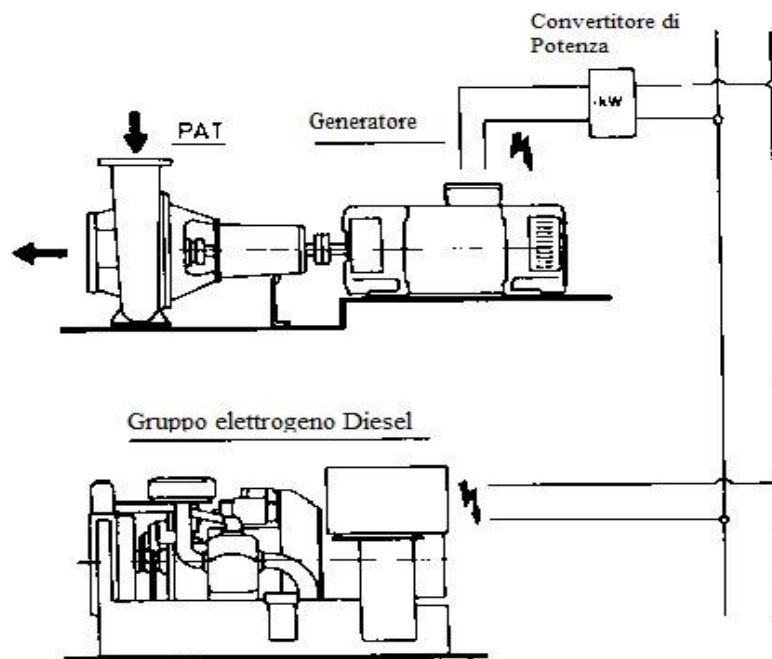


FIGURA 8: Schema con due unità indipendenti di generatore

2.8.6 Progettazione preliminare - Stima di fattibilità economica

Avendo determinato la portata di progetto (curva di durata) e la configurazione complessiva dell'impianto (con/senza bacino di immagazzinamento, ecc), un progetto preliminare può essere effettuato utilizzando le mappe e i profili. Da queste, il salto a disposizione della PAT può essere valutata.

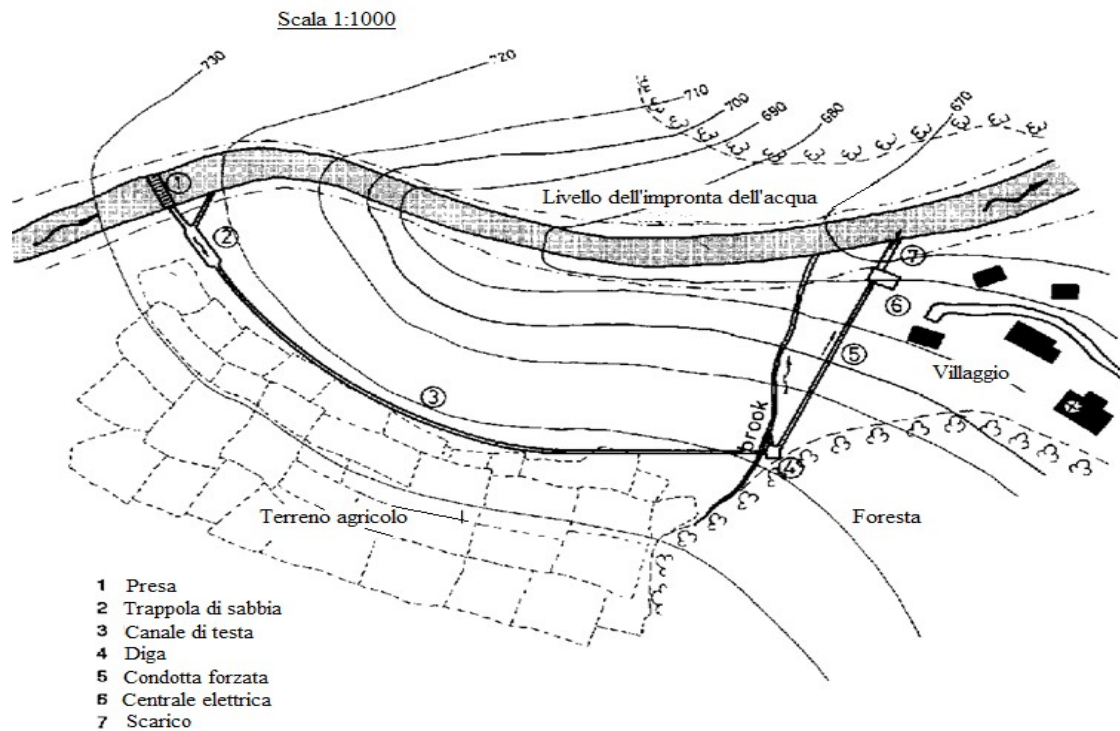


FIGURA 9: Esempio dello schema di un impianto idroelettrico

Prima di scegliere un sistema operativo della pompa in funzione dei parametri (portata nominale e velocità) caratteristici del funzionamento in modalità turbina, dovrebbe essere effettuata una stima approssimativa della fattibilità economica dell'impianto tenendo conto del vantaggio relativo al basso costo di una PAT.

3 PROCEDURE DI SELEZIONE DELLA PAT

3.1 Selezione di una PAT

3.1.1 Stato dell'opera

Teoricamente, la selezione di una PAT dovrebbe essere facile come la scelta di una pompa standard: diagrammi di rendimento di diversi produttori vengono esaminati al fine di ricercare la pompa fornendo la portata richiesta in funzione del salto disponibile e del rendimento ottimale. Purtroppo, questo non è il caso delle PAT, al momento attuale. Di solito le informazioni sul funzionamento in produzione delle pompe non sono disponibili. Diversi approcci - metodi empirici e teorici - previsti per il funzionamento in modalità turbina delle pompe sono stati proposti negli ultimi anni. L'obiettivo consiste nel predire le prestazioni della PAT da dati che sono in genere facilmente disponibili, vale a dire la prevalenza nominale, la portata e il rendimento massimo. Tuttavia, nessuno dei metodi proposti finora risulta completamente affidabile. Errori tra il funzionamento reale e previsto in produzione delle pompe standard raggiungono anche il 20% e più. Pertanto, il progettista di impianti micro-idroelettrici deve essere ben consapevole del fatto che un certo grado di imprecisione sarà connesso a tutti i calcoli, indipendentemente dal metodo che egli utilizza.

Una deviazione tra la prestazione effettiva e quella prevista di una PAT si verifica sempre, ma nella maggioranza dei casi non avrà effetti negativi sul corretto funzionamento dell'impianto (a condizione che il punto di funzionamento della PAT sia stato opportunamente scelto).

3.1.2 La differenza tra il funzionamento in modalità pompa e in modalità turbina

Il funzionamento di una pompa o di una turbina dipende generalmente dai diagrammi di flusso. Le modalità di funzionamento di pompa e turbina possono essere tracciate in un unico diagramma estendendo l'asse della portata (Q) verso valori negativi che rappresentano l'operazione inversa della pompa, cioè le prestazioni di una turbina (GRAFICO14).

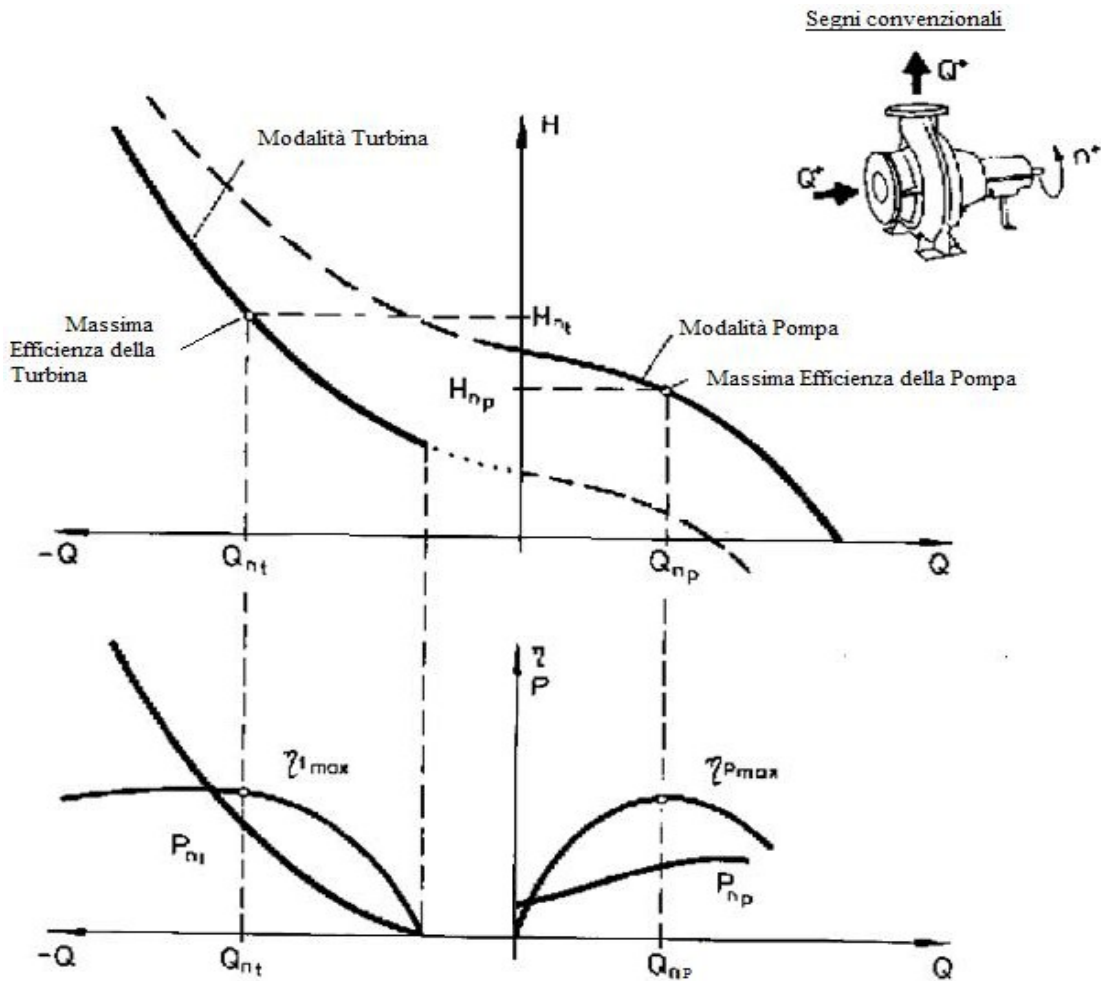


GRAFICO 14: Differenze di funzionamento nelle modalità pompa e turbina

Ovviamente, l'approccio fondamentale quando si seleziona una PAT consiste nel convertire le prestazioni osservate in modalità di pompaggio (prevalenza, portata) di una data macchina nelle sue prestazioni in modalità di produzione. Il rapporto tra la modalità di funzionamento di una pompa e di una turbina non è la stessa per tutti i tipi e le dimensioni di pompe, ma dipende dal disegno di flusso attraverso la macchina (espressi dalle velocità specifiche) e dalle perdite subite che sono espresse in funzione del rendimento della macchina. Il problema è legato al fatto che queste perdite in modalità pompa non sono esattamente le stesse quando il flusso è invertito nella modalità di funzionamento in produzione (modalità turbina).

A seconda del progetto della pompa (numero di pale e loro angolazione, rivestimento dell'involucro o guida delle pale) il rapporto tra le due tipologie di funzionamento può variare notevolmente da una macchina all'altra, sebbene la velocità specifica (e l'efficienza della pompa) possa essere la stessa.

3.1.3 Teoria di base

Applicando l'equazione di Eulero per le macchine ideali, si possono ottenere le curve del funzionamento ideale sia nel caso di funzionamento in modalità pompa che nel caso di funzionamento in modalità turbina. Per le condizioni ideali, la portata e la prevalenza di progetto sono identici nelle due modalità di funzionamento.

Tuttavia, per i fluidi e le macchine ideali, due effetti devono essere considerati:

- ◆ geometria della pompa. Il funzionamento ottimale di una pompa è raggiunto per una portata che corrisponde a condizioni di vortice nell'insenatura. La corrispondente prevalenza è determinata dal diagramma del vettore della velocità di uscita con l'angolo della pala β_2 come elemento fondamentale in modalità di pompaggio (GRAFICO15). La prestazione teorica di una pompa, come descritta da Eulero, assume un numero infinito di lame. La portata attraverso giranti di pompe reali, aventi un numero finito di lame, è sottoposta ad un modello di flusso secondario nei passaggi attraverso la girante, nota come la perdita di circolazione causata dalla rotazione della girante. A causa di questa perdita di circolazione, la velocità di uscita del fluido dalla girante è leggermente deviata e lascia la girante non a lama con angolo β_{2inf} ma con angolo β_2 . Questo produce una riduzione della prevalenza della pompa generata. Si noti che la perdita di circolazione non è una perdita di energia come ad esempio le perdite di attrito. Si tratta solo della riduzione del trasferimento di energia tra fluido e girante, ma non del contenuto energetico del fluido stesso. Se questa pompa è azionata al contrario, ossia come una turbina, il suo funzionamento è principalmente determinato dal triangolo d'ingresso con l'elemento che governa il corpo a spirale (angolo α_2). Ora la perdita di circolazione si verifica all'ingresso della girante che, a causa del minore diametro al lato di aspirazione della girante stessa, risulta praticamente trascurabile. La prestazione in modalità turbina, in assenza di perdite di attrito, corrisponde quindi all'ideale condizione di Eulero (numero infinito di lame, nessuna perdita di circolazione) e, sia la prevalenza sia il flusso al punto di massimo rendimento (insenatura del triangolo con velocità α_2 e β_{2inf}), saranno maggiori che in modalità di pompaggio. Questo fenomeno lo indichiamo come “effetto geometrico” in quanto è fondamentalmente causato dai differenti parametri geometrici che determinano la trasmissione dell'energia tra il fluido e la girante della macchina:

1. in modalità pompa: la portata lascia la girante (parametro fondamentale: angolo β_2);

2. in modalità turbina: la portata si avvicina alla girante (parametro fondamentale: angolo α).

E' stato trovato, nella pratica, che un leggero vortice nel tubo di aspirazione o di scarico di una PAT (e una turbina in generale) è favorevole soprattutto in vista delle perdite dovute al processo di diffusione (decelerazione del flusso) al lato di aspirazione di una PAT o di una turbina.

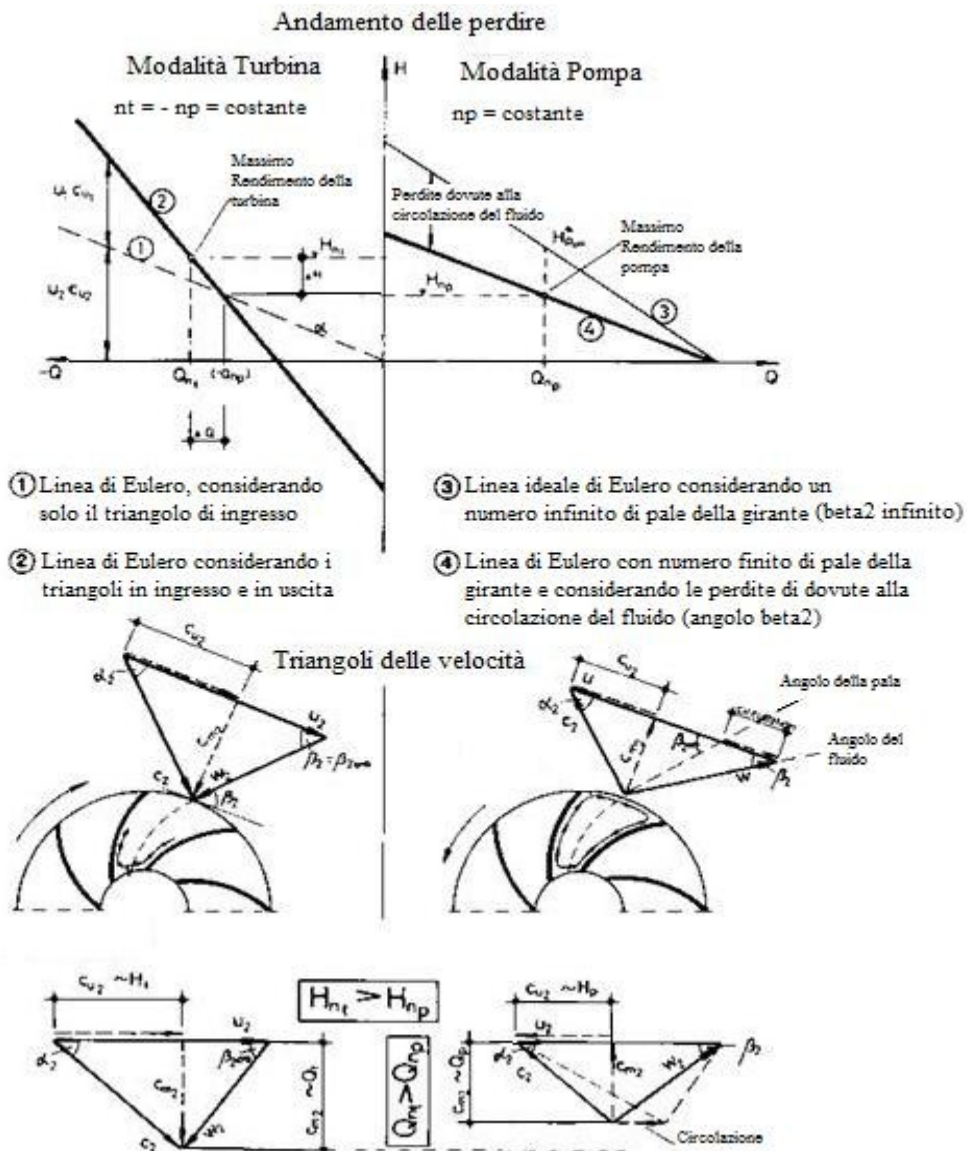


GRAFICO 15: Applicazione della teoria di Eulero nel funzionamento in modalità pompa e turbina

- ◆ perdite idrauliche. Quando il fluido passa attraverso la girante, è sottoposto ad attrito e a perdite dovute agli urti. A causa di queste perdite, il trasferimento ideale dell'energia dalla rotazione della girante al fluido, come espresso dall'equazione di Eulero, non viene raggiunto. La prevalenza dinamica totale generata dalla pompa è sempre inferiore a quella ideale, in condizioni di assenza di attrito. Questa riduzione di prevalenza è espressa dall'efficienza energetica della pompa. In modalità di produzione (turbina) il trasferimento di energia avviene in senso inverso. Per evitare che la PAT operi in condizioni di flusso ottimale, una maggiore pressione deve agire sulla PAT stessa. Pertanto, le perdite dovute all'attrito e agli urti devono essere aggiunte alla prevalenza ideale in accordo con la teoria di Eulero. Ulteriori perdite idrauliche si verificano in una pompa a causa della fuga all'indietro del fluido, dal lato ad alta pressione verso quello a bassa pressione, riducendo la portata totale pompata; queste perdite sono chiamate perdite volumetriche e il rendimento corrispondente è quello volumetrico. Perdite simili esistono in modalità turbina, cioè piccoli quantitativi di fluido evitano la girante della PAT e non contribuiscono al trasferimento dell'energia. Per mantenere condizioni ottimali di portata/prevalenza (miglior rendimento) la portata avvicinandosi alla PAT deve essere aumentata per compensare ciò che è andato perduto.

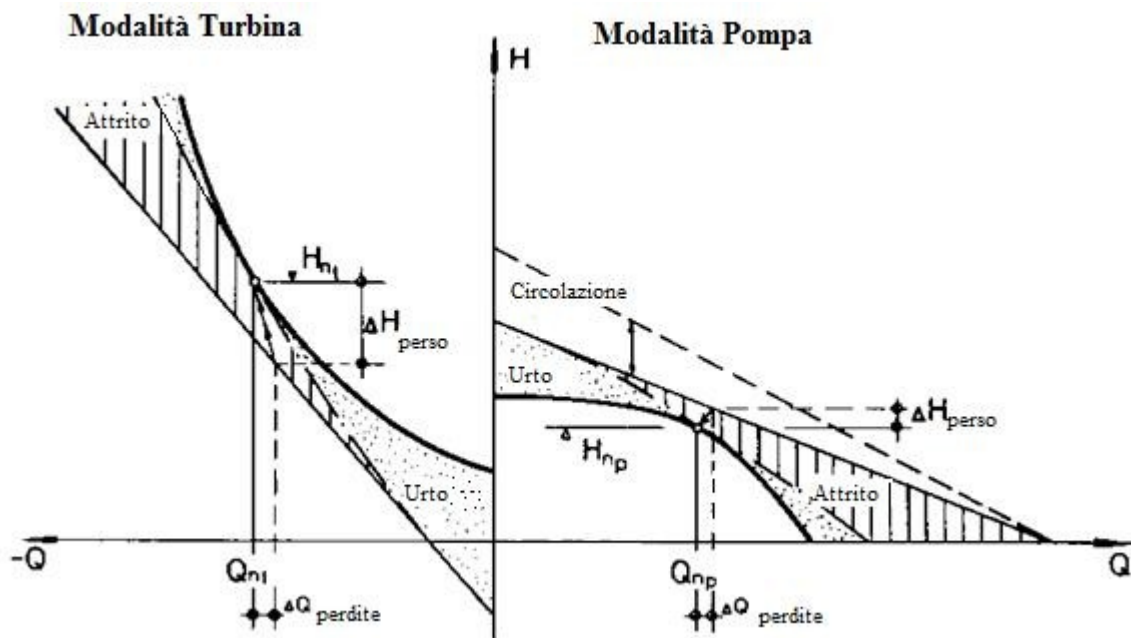


GRAFICO 16: Confronto del funzionamento in modalità pompa e turbina

Al fine di visualizzare le perdite idrauliche nella relazione tra il funzionamento in modalità pompa e quello in modalità turbina, possono essere fatte le seguenti considerazioni:

$$H_p = HE \times E_p$$

H_p = prevalenza pompa, HE = prevalenza ideale, E_p = rendimento pompa.

$$H_t = \frac{HE}{E_t}$$

H_t = prevalenza turbina, E_t = rendimento turbina.

Poiché le prevalenze ideali in accordo con Eulero, a parità di portata, sono le stesse nelle due modalità di funzionamento, allora possiamo immediatamente scrivere:

$$\frac{H_p}{H_t} = E_p \times E_t$$

I dati sperimentali hanno mostrato che i rendimenti in modalità turbina potrebbero raggiungere i valori che si hanno nel funzionamento in pompaggio. Ipotizzare un rendimento dell'80% comporta:

$$\frac{H_p}{H_t} = E_p^2 = 0,8^2 = 0,64 \quad \text{oppure} \quad \frac{H_t}{H_p} = \frac{1}{0,64} = 1,56$$

(si noti che l'effetto geometrico non è stato preso in considerazione)

Conclusione: le pompe che operano come turbine richiedono un salto netto che è tra il 30 e il 150% superiore a quello in modalità pompa per operare in corrispondenza del punto di massimo rendimento. In altre parole, per un determinato sito (quindi per fissate condizioni di portata/salto) una pompa “più piccola” deve essere selezionata affinché operi in modalità turbina, rispetto alle stesse condizioni in modalità pompa.

3.1.4 Approcci esistenti per la predizione del funzionamento in produzione di una PAT

- Funzionamento in modalità turbina legato al rendimento di una pompa

Sulla base di considerazioni teoriche, Stepanoff (1957) afferma che il funzionamento di una pompa che lavora come una turbina alla stessa velocità avrebbe le seguenti caratteristiche:

$$H_{nt} = \frac{H_{np}}{E_{np}}$$

H_{nt} = prevalenza nominale turbina, H_{np} = prevalenza nominale pompa, E_{np} = rendimento nominale pompa.

$$Q_{nt} = \frac{Q_{np}}{\sqrt{E_{np}}}$$

Q_{nt} = portata nominale turbina, Q_{np} = portata nominale pompa.

McClaskey e Lundqvist (1976) hanno consigliato per Q_{nt} l'equazione:

$$Q_{nt} = \frac{Q_{np}}{E_{np}}$$

Il confronto tra i risultati della prova effettiva e le raccomandazioni sia di Stepanoff sia di McClaskey mostrano relativamente grandi differenze; pertanto, l'uso di queste formule si consiglia per la progettazione preliminare o solo per scopi di pre-selezione.

Il metodo BUTU, sviluppato in primo luogo in Messico (BUTU = PAT in spagnolo) e successivamente affinato in Gran Bretagna, propone formule empiriche che sono state ricavate dalle curve di prova di dati sperimentali per il funzionamento di pompe standard in pompaggio e in produzione. Il metodo BUTU predice la prestazione in modalità turbina a partire dai dati della pompa, ma non viceversa; pertanto, devono essere considerati diversi modelli di pompe al fine di trovare il migliore abbinamento delle necessarie condizioni di portata/salto per un dato impianto micro-idroelettrico.

In una fase successiva, il metodo BUTU predice il funzionamento in modalità turbina di una PAT lontano dal suo punto di massimo rendimento. Questo è utile poiché, data la gamma di pompe disponibili, è improbabile che la PAT scelta funzionerà esattamente in corrispondenza della massima efficienza per un determinato sito, ma vicino. Il metodo presuppone che la forma della curva di funzionamento sia funzione della velocità specifica della macchina.

Si noti che le formule non rispecchiano nessuna considerazione teorica, come per esempio le formule di Stepanoff, ma sono semplicemente il risultato di funzioni matematiche di curve sperimentali applicate alle curve di funzionamento delle macchine provate. Purtroppo, l'uso delle formule richiede relativamente molto tempo se non si dispone di un calcolatore. Nonostante l'aspetto "scientifico" delle formule, gli errori tra l'effettivo funzionamento di una PAT e quello previsto utilizzando il metodo BUTU potrebbe anche raggiungere il 10% e più.

- Funzionamento in turbina-mode legato alla velocità specifica di una pompa

E' stato innanzitutto Kittredge (1961) che ha studiato la dipendenza del funzionamento in modalità turbina di una pompa ad una data velocità. L'ipotesi di partenza presuppone che tutte le pompe con la stessa velocità specifica possano generare simili caratteristiche di salto e di portata in modalità turbina. Egli ha presentato i risultati della prova di quattro pompe in entrambi i modi, normalizzati al loro punto di massimo rendimento. Così un progettista potrebbe utilizzare una serie di curve normalizzate della prestazione della pompa e confrontarle con i risultati di Kittredge.

Sistemando queste pompe nella migliore delle quattro curve caratteristiche di Kittredge, il funzionamento in produzione (modalità turbina) potrebbe essere ottenuto dalla curva che corrisponde ai risultati della prova di Kittredge.

Mentre questo metodo potrebbe fornire risultati precisi per alcune pompe con disegno simile, potrebbe non esserlo per altre con diverse caratteristiche di progettazione o diverse dimensioni. Inoltre, le quattro serie di prove presentate non sono rappresentative per la vasta gamma di diverse pompe disponibili oggi.

Diederich (1967), Buse (1981) e Lewinski-Kesslitz (1987) propongono lo stesso approccio utilizzando la velocità specifica come parametro fondamentale. Mentre Diederich e Lewinski-Kesslitz vedono un rapporto diretto tra il funzionamento come pompa e quello in modalità turbina, dato solo per i punti di massima efficienza in entrambi i modi, Buse va ancora oltre a questo proposito sostenendo che l'intera curva di funzionamento in produzione e la curva di rendimento

potrebbero essere previste in funzione della velocità specifica della pompa. Tuttavia, Yang (1983) e Yedidiah (1983) hanno dimostrato che la correlazione stabilita da Buse può essere poco accurata per alcune macchine.

- Metodi combinati

$$\frac{P_{hnp}}{P_{hnt}} = 2 \times \eta_p^{9,5} + 0,205$$

dove $P_{hn} = \rho \times g \times Q_n \times H_n =$ potenza idraulica nominale.

$$\frac{H_{np}}{H_{nt}} = 0,85 \times \eta_p^5 + 0,385$$

$$\eta_{nt} = \eta_{np} - 0,03$$

Una ricerca di Engeda (1987) è volta a coniugare entrambi i parametri di rendimento e di velocità specifica per prevedere il funzionamento in modalità turbina. Supponendo pari efficienze massime sia nelle due modalità di funzionamento, egli ha stabilito un cosiddetto prodotto caratteristico:

$$\frac{H_{np}}{H_{nt}} \times \frac{Q_{np}}{Q_{nt}} = E_p^3 \quad \text{per la velocità specifica di una pompa} \quad [1]$$

Egli ha inoltre proposto questo rapporto per migliorare la selezione della PAT: utilizzando i dati della turbina richiesti ($H_t \cdot Q_t$) e cercando di risolvere l'equazione [1] per diversi dati di funzionamento della pompa ($H_p \cdot Q / E_{tap}$), si creerebbe la possibilità di selezionare rapidamente la PAT richiesta. Analogamente al metodo BUTU, Engeda fornisce i diagrammi per prevedere il funzionamento in modalità turbina lontano dal punto di massimo rendimento. Come tutti gli altri metodi presentati finora, la proposta di Engeda funziona perfettamente per una determinata gamma di progetti di pompe ma manca di accuratezza per molte altre.

3.1.4 Procedura di selezione delle PAT

Il metodo più affidabile per selezionare una PAT è certamente l'uso di dati sperimentali messi a disposizione dai produttori di pompe. La selezione di una PAT basata sui risultati di prove permette in pratica di escludere gli errori in previsione del funzionamento in modalità turbina.

Purtroppo, i produttori con esperienza nel campo delle PAT sono pochi e coloro che hanno provato alcune delle loro pompe standard in modalità turbina pubblicano i risultati solo se sono invitati a fare un'offerta per un determinato sito.

Inoltre, le PAT offerte dai produttori sono dal 30 al 100% più costose rispetto alla situazione in cui la stessa macchina è offerta come una pompa standard. I produttori dichiarano che un prezzo più elevato è necessario al fine di coprire le spese aggiuntive sostenute per lo sviluppo degli studi sulle PAT, provando e modificando la pompa standard per il suo utilizzo come una turbina. In questo modo il vantaggio legato al basso costo di una PAT rispetto ad una tradizionale turbina potrebbe in parte venir perso. Risulterebbe più economico per un progettista di impianti micro-idroelettrici, al fine di prevedere il funzionamento in modalità turbina, effettuare i necessari controlli e modifiche, ordinando semplicemente una pompa standard. In questo caso, è, pertanto, il progettista che dovrà correre il rischio di predizioni non accurate del funzionamento in modalità turbina o eventuali danni causati dal funzionamento inverso della macchina.

- Predizione del punto di massima efficienza del funzionamento in modalità turbina a partire dal funzionamento in modalità pompa.

Questo è il metodo comunemente utilizzato per la selezione di una PAT. Il punto di massimo rendimento della turbina è calcolato a partire da quello della pompa che è solitamente noto. Utilizzando i dati di funzionamento misurati in entrambe le modalità, per oltre 80 macchine, sono stati costruiti il GRAFICO17 e il GRAFICO18. I due principali parametri che influenzano il funzionamento in modalità turbina di una PAT, vale a dire, velocità specifica ed rendimento della pompa, sono stati considerati. La relativamente ampia dispersione indica le incertezze che provengono dalle caratteristiche geometriche che, per le pompe esaminate, non sono state considerate.

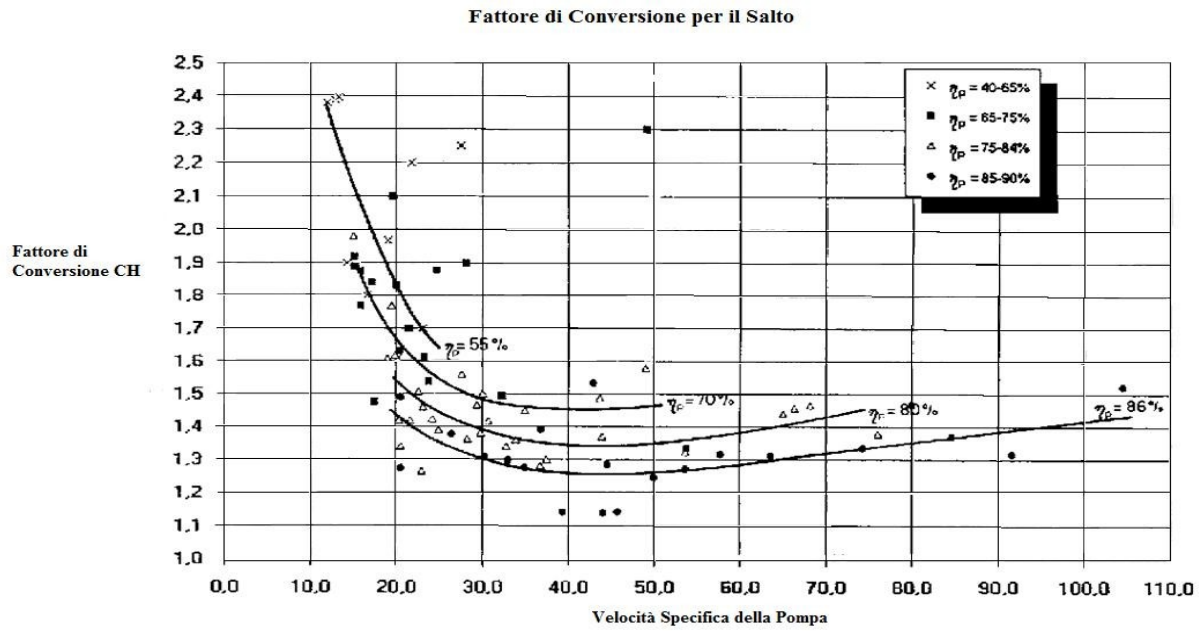


GRAFICO 17: Fattore di conversione per il salto

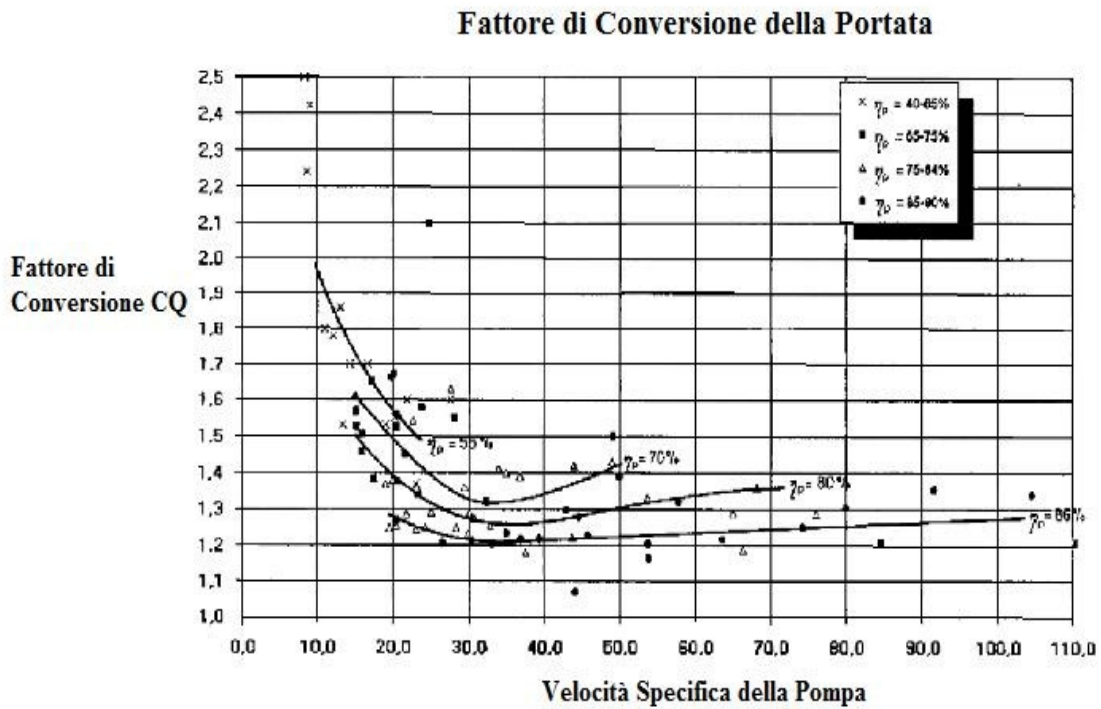


GRAFICO 18: Fattore di conversione per la portata

Possono essere adottate le seguenti procedure:

1. Salto e portata di progetto.

Dal progetto preliminare, sono noti i seguenti dati:

- Q_{nt} = portata nominale della turbina (dalla curva di durata e dalla configurazione di carico);
- H_{nt} = salto netto nominale o salto netto della turbina (dalla progettazione preliminare).

Le PAT selezionate dovrebbero operare, sotto queste condizioni di flusso e di salto, vicino al suo punto di massimo rendimento.

2. Velocità specifica in modalità turbina.

Calcolare la velocità specifica dell'installazione (in produzione):

$$n_{qt_i} = n_t \times \frac{\sqrt{Q_{t_i}}}{\sqrt[4]{H^3}}$$

dove n_t è la velocità in rpm (=min⁻¹) della PAT proposta.

3. Velocità specifica in pompa-mode.

Al fine di essere in grado di utilizzare i diagrammi relativi ai fattori di conversione (GRAFICO17 e GRAFICO18), la velocità specifica in modalità turbina, calcolata con la formula precedente, deve essere posta in relazione alla velocità specifica in modalità di pompaggio.

E' stato trovato da risultati di una prova che il rapporto tra le velocità specifiche nelle due modalità di funzionamento assume un valore abbastanza costante: la velocità specifica di una turbina corrisponde approssimativamente a 0,89 volte la velocità specifica della pompa (GRAFICO19).

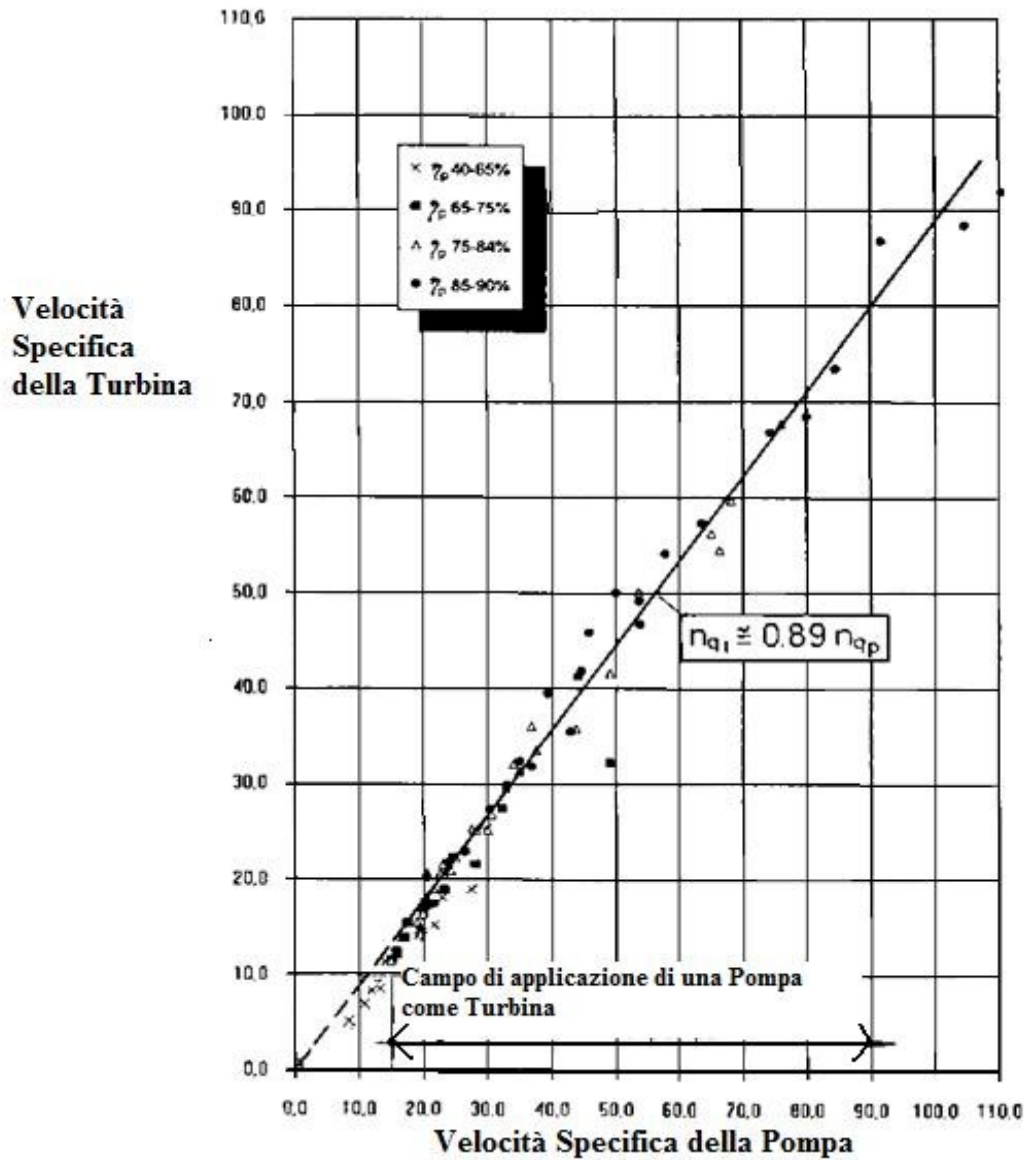


GRAFICO 19: Rapporto tra le velocità specifiche in modalità pompa e turbina

$$n_{qp} = \frac{n_{qt}}{0,89}$$

Si noti che le pompe con velocità specifiche $n_{qp} < 15$ non devono essere utilizzate come turbine. Le efficienze di tali giranti sono modeste (lungi e stretti passaggi portano ad avere perdite dovute all'attrito) e il funzionamento di tali pompe come turbine non può essere previsto con precisione. Inoltre, questi valori di velocità specifica costituiscono generalmente il campo di funzionamento di piccole turbine Pelton che in termini di costi possono essere vantaggiose come le PAT.

4. Efficienza della pompa.

La conversione delle condizioni di progetto di una turbina in condizioni di progetto di una pompa dipende dal rendimento della macchina. Usando la portata disponibile Q_t diviso 1,3 (= fattore di conversione medio) si ottiene un valore sufficientemente accurato per una pre-selezione.

5. Conversione delle condizioni di progetto di una turbina in condizioni di progetto di una pompa.

Entrando nel GRAFICO17 e nel GRAFICO18, introdotti precedentemente, con la velocità specifica della pompa e con il rendimento, si leggono i fattori di conversione per la prevalenza CH e per la portata CQ:

$$\frac{H_{nt}}{H_{np}} = CH \quad \text{e} \quad \frac{Q_{nt}}{Q_{np}} = CQ$$

Applicando i fattori di conversione CH e CQ sul salto e sulla portata di progetto in modalità turbina, otteniamo i parametri di funzionamento della pompa (punto di massimo rendimento) alla velocità della turbina che è stata proposta.

Salto nominale della pompa in funzione della velocità nominale della turbina:

$$H_{np}(nt) = \frac{H_{nt}}{CH}$$

Portata nominale della pompa in funzione della velocità nominale della turbina:

$$Q_{np}(nt) = \frac{Q_{nt}}{CQ}$$

6. Conversione delle condizioni di progetto della pompa, alla velocità nominale della turbina, in velocità nominale della pompa.

La selezione generale dei grafici negli opuscoli dei produttori indica il tipo di pompa e la sua velocità nominale che probabilmente soddisferebbero le condizioni richieste di salto/portata per

l'installazione. Tuttavia, la velocità nominale della pompa nella maggior parte dei casi non corrisponde alla velocità nominale della turbina proposta, pertanto, i valori di salto/portata, appena calcolati, devono essere trasformati nelle nuove condizioni di salto/portata valide per la velocità nominale della pompa.

Prevalenza nominale della pompa alla velocità nominale della pompa:

$$H_{np}(np) = H_{np}(nt) \times \left(\frac{n_p}{n_t} \right)^2$$

Portata nominale della pompa alla velocità nominale della pompa:

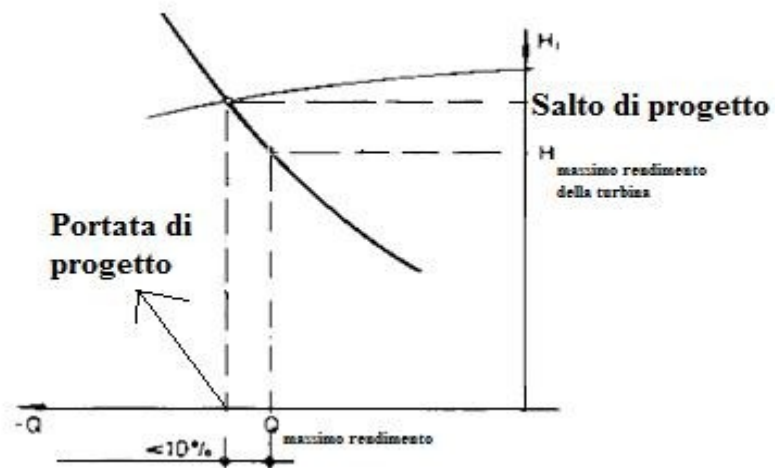
$$Q_{np}(np) = Q_{np}(nt) \times \frac{n_p}{n_t} \quad [2]$$

Se non è disponibile una pompa standard per queste condizioni di salto/portata alla proposta velocità della pompa, ricalcolare dal punto (2) utilizzando una diversa velocità della turbina o assumere un differente numero di stadi o ingressi della girante.

7. Raccomandazioni nella selezione delle PAT.

Può verificarsi che una pompa, che genera delle date condizioni di salto/portata, non compaia nei grafici presentati dai progettisti. Dunque, conviene selezionare una pompa con una portata nominale (Q_{np}) leggermente inferiore al valore ottenuto dalla formula [2]. La PAT opererà poi ad una portata superiore a quella nominale in modalità turbina, ossia, opererà in un campo di sovraccarico. Questo è un aspetto assai importante del progetto di una PAT in quanto contribuisce a commettere errori e imprecisioni meno gravi nella previsione del funzionamento in modalità turbina.

Selezione della PAT raccomandata



Selezione della PAT non raccomandata

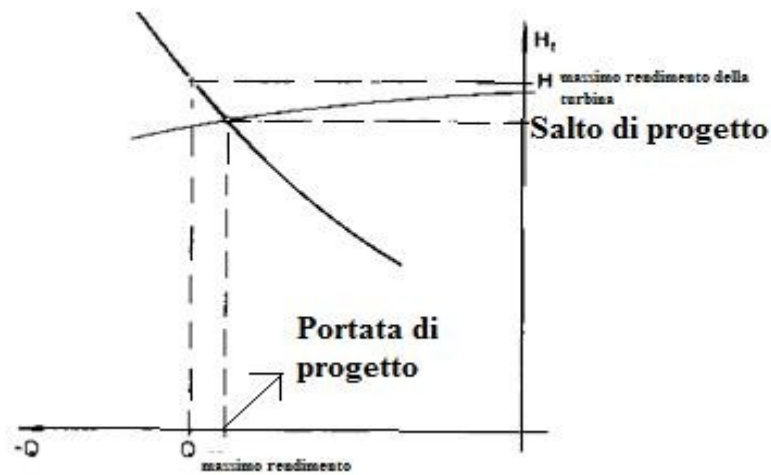


GRAFICO 20: Raccomandazioni per la selezione della pompa da utilizzare come PAT

8. Conversione del punto di massima efficienza della pompa selezionata in turbina-mode.
 - Calcolare la velocità specifica della pompa selezionata

$$n_{qp_i} = n_p \times \frac{\sqrt{Q_{p_i}}}{\sqrt[4]{H^3}}$$

pompe multifase, ist = numero di fasi

$$H_{p_i} = \frac{H_{np}}{ist}$$

pompe multiflusso, ifl= ingressi

$$Q_{p_i} = \frac{Q_{np}}{ifl}$$

- Leggere i fattori di conversione per salto e portata dai grafici precedentemente presentati (GRAFICO17 e GRAFICO18), usando la massimo rendimento della pompa selezionata come indicato dal costruttore.

Nota importante: l'accuratezza della conversione dei dati di funzionamento della pompa nel funzionamento in modalità turbina è limitata. E' improbabile che la PAT fornirà esattamente il rendimento calcolato. Al fine di valutare il possibile campo di funzionamento in modalità turbina, occorre applicare la doppia conversione, una volta utilizzando i minimi fattori di conversione e una volta con i massimi fattori. Sono proposti i seguenti fattori di dispersione:

- per il fattore di conversione del salto: +- 10%

- per il fattore di conversione della portata: +- 7,5 %

fattore di conversione per la prevalenza: $CH_{max} = 1,1 \times CH$ $CH_{min} = 0,9 \times CH$

fattore di conversione per la portata: $CQ_{max} = 1,075 \times CQ$ $CQ_{min} = 0,925 \times CQ$

- Calcolare il punto di massima efficienza della turbina sia utilizzando il fattore di conversione massimo, sia quello minimo, relativamente al salto nominale e alla portata nominale in funzione della velocità della pompa.

$$H_{nt}(np) = CH \times H_{np}$$

$$Q_{nt}(np) = CQ \times Q_{np}$$

- Convertire le condizioni di questa turbina in velocità nominale della turbina usando le regole di affinità come al precedente punto (6).

Prevalenza nominale della turbina in funzione della velocità nominale della turbina:

$$H_{nt}(nt) = H_{nt}(np) \times \left(\frac{nt}{np} \right)^2$$

Portata nominale della turbina in funzione della velocità nominale della turbina:

$$Q_{nt}(nt) = Q_{nt}(np) \times \frac{nt}{np}$$

9. Potenza prodotta in modalità turbina al punto di massimo rendimento.

I risultati del test hanno mostrato che il massimo rendimento in modalità turbina è in media leggermente inferiore a quello che si avrebbe in funzionamento come pompa. Di seguito, proponiamo una turbina con rendimento massimo inferiore del 3% rispetto al massimo rendimento di una pompa. Questa ipotesi fa riferimento al GRAFICO21, che riporta i risultati delle prove di circa 70 pompe.

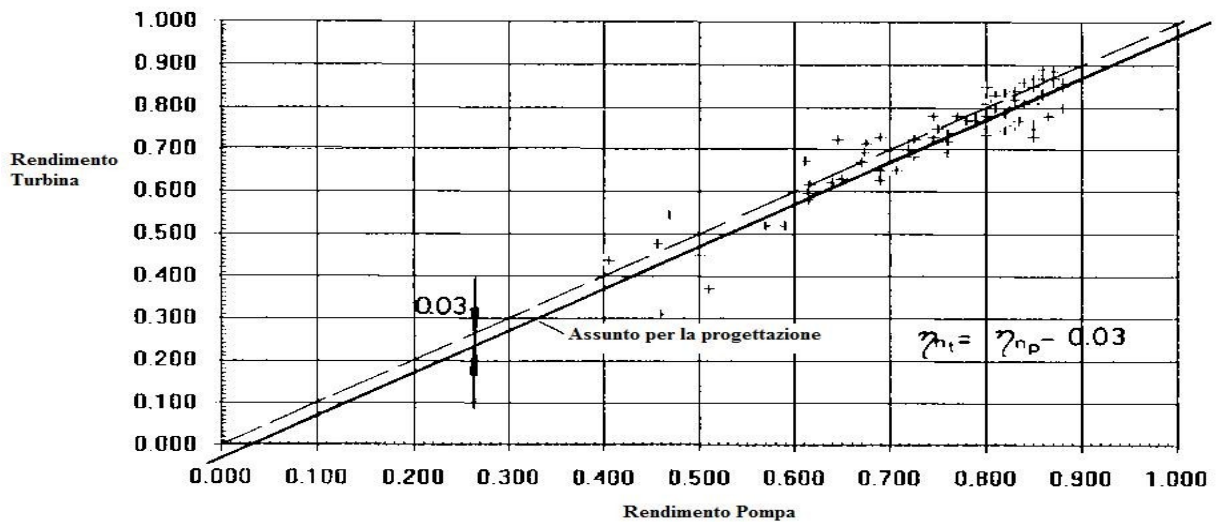


GRAFICO 21: Rapporto tra i rendimenti in modalità pompa e turbina

$$P_{nt} = \rho \times g \times Q_{nt} \times H_{nt} \times (E_{p_{\max}} - 0,03)$$

10. Predizione del funzionamento di una PAT lontano dal punto di massima efficienza.

Le condizioni di salto/portata (sia minimo che massimo) calcolate in precedenza non dovranno coincidere con le condizioni di progetto. Al fine di determinare il flusso assorbito dalla PAT selezionata sotto il salto netto disponibile per la turbina, si deve prevedere la curva delle prestazioni della PAT lontano dal punto di massimo rendimento. Basati sui risultati del test, il GRAFICO22 ed il GRAFICO23 presentano un ravvicinamento delle curve di prestazione in modalità turbina (salto e rendimento in funzione della portata) in funzione della velocità specifica e normalizzata al punto di massimo rendimento della turbina (H_{nt}/Q_{nt}). Si noti che l'accuratezza di queste curve diminuisce rapidamente per punti di funzionamento più lontani dal punto di massima efficienza della turbina.

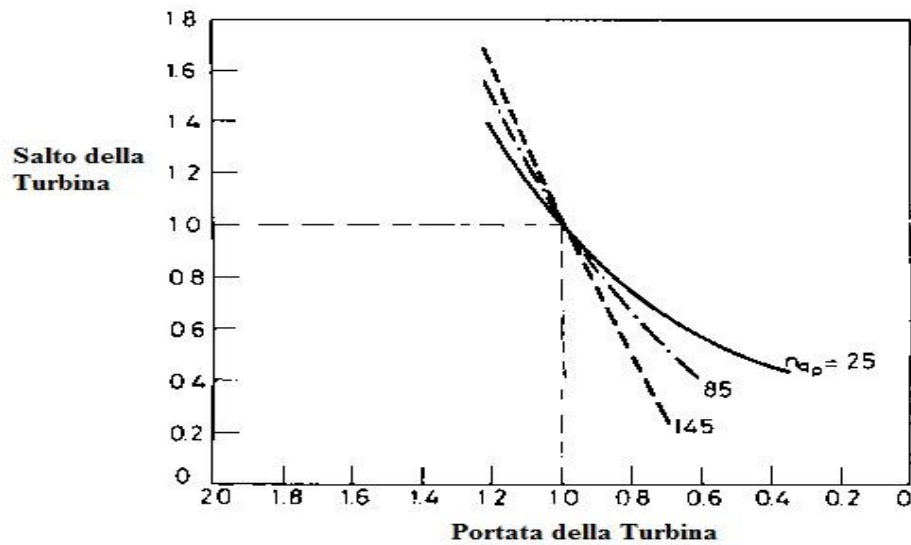


GRAFICO 22: Andamento del salto in funzione del rendimento in modalità di pompaggio e della portata disponibile

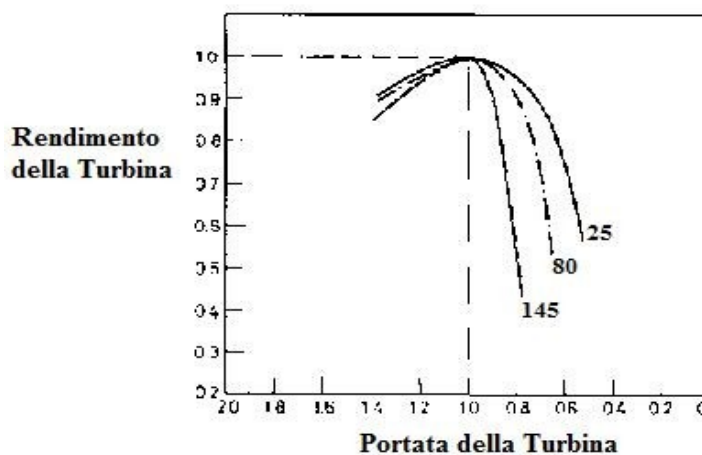


GRAFICO 23: Andamento del rendimento in funzione del rendimento in modalità di pompaggio e della Portata disponibile

Il GRAFICO22 ed il GRAFICO23 mostrano la tendenza generale delle caratteristiche in modalità turbina in funzione della velocità specifica. Non è destinata all'utilizzo per calcoli reali. Il salto e la potenza (normalizzati al salto nominale della turbina e alla produzione) sono indicati per quattro diversi valori di portata (0.8, 0.9, 1.1 e 1.2 Q_{nt}) in funzione della velocità specifica della pompa. Utilizzando questi quattro punti, possono essere tracciate le curve approssimate del funzionamento della turbina per salto e potenza.

I punti di intersezione delle curve del sistema di resistenza e le curve di rendimento del funzionamento della PAT (valori massimi e minimi) forniscono il campo del possibile funzionamento della PAT (GRAFICO24). Si noti che la curva del sistema di resistenza non è una linea costante come ipotizzato finora. I coefficienti d'attrito dei tubi della condotta forzata utilizzati nel calcolo potrebbero variare notevolmente, sia da prodotto a prodotto sia in funzione della durata dell'installazione (depositi nei tubi). Utilizzando i coefficienti d'attrito massimo e minimo, il possibile campo operativo della PAT selezionata si amplia ulteriormente.

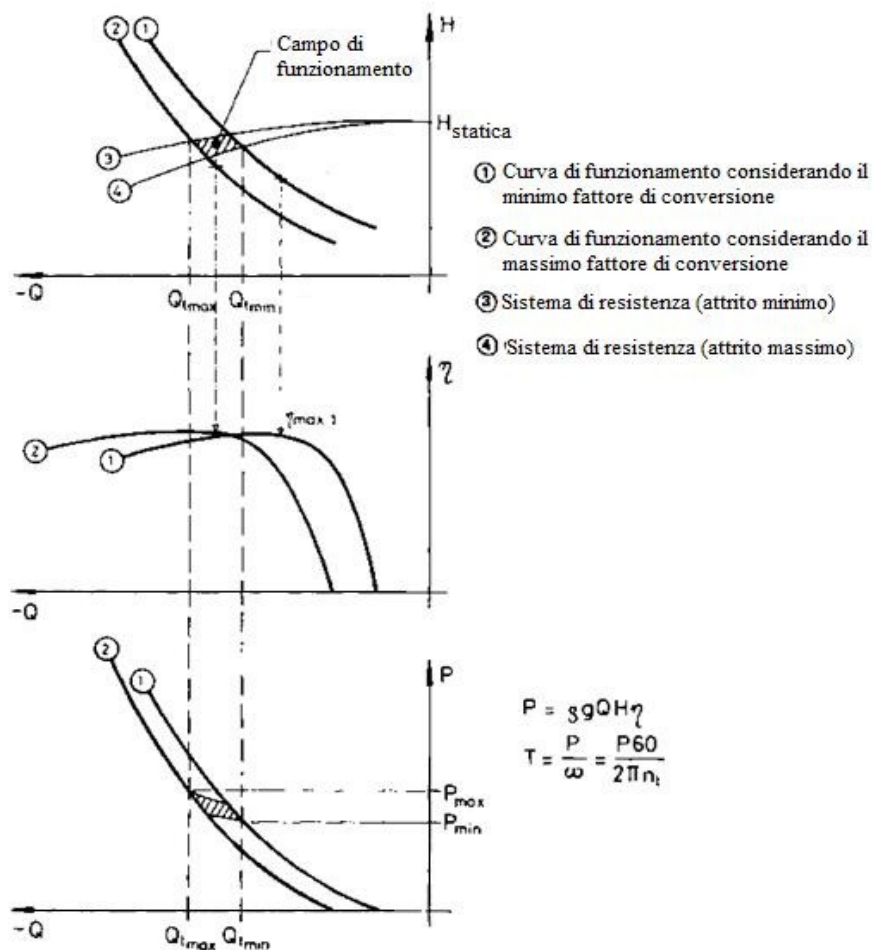


GRAFICO 24: Campo di funzionamento della PAT

Il progettista deve ora accertare se:

- la portata (Q_{effmax}) assorbita dalla PAT selezionata è accettabile per quanto riguarda la portata disponibile (flusso disponibile > flusso massimo stimato Q_{eff}).
- la potenza effettiva (P_{effmin} o P_{max}) resa disponibile dalla PAT soddisfa l'applicazione (macchine o generatore)

$$P_{\text{eff}} = \rho \times g \times Q_{\text{eff}} \times H_{\text{eff}} \times E_{\text{eff}}$$

P_{effmax} è utilizzato per selezionare la categoria del generatore (la potenza nominale del generatore potrebbe essere del 20 o del 30% superiore al P_{effmax} ; tuttavia, per ragioni legate alla procedura di rilascio delle Concessioni, è più opportuno indicare il valore della potenza della macchina selezionata, uguale alla potenza massima del motore primo; per la Legislazione italiana è opportuno selezionare la macchina elettrica con potenza massima pari a quella della PAT, perché di solito le autorità rilasciano la concessione ed applicano le gabelle ed i balzelli in conformità con la potenza nominale, che per loro è quella maggiore che ritrovano sui documenti di progetto).

P_{effmin} dovrebbe coprire le esigenze dei consumatori.

- la massima pressione di salto e la forza torcente agenti sulla PAT entro i limiti sono fornite dal fabbricante della pompa.
- Se una o più di queste condizioni non sono accettabili, dovrebbe essere selezionata un'altra PAT. Se non è disponibile una scelta migliore, potrebbero essere considerate modifiche su alcuni progetti e/o condizioni di funzionamento.

4 VERIFICA DELLA SELEZIONE DELLA POMPA UTILIZZATA COME PAT PRESSO L'AZIENDA ASMortara

4.1 *Realizzazione del micro-impianto idroelettrico*

4.1.1 Introduzione

Nell'ambito del ciclo idrico integrato, l'attività fondamentale di ASMortara, consiste principalmente nella gestione del trattamento di rifiuti liquidi del capoluogo.

Il progetto consiste nella realizzazione di un micro-gruppo idroelettrico capace di sfruttare l'energia potenziale della massa d'acqua derivante dalla vasca di disinfezione dell'impianto che prevede, come ultimo, lo scarico della stessa nella Roggia Regola.

Le motivazioni che hanno portato alla formulazione del progetto comprendono, in primo luogo, l'applicazione di tecnologie oltre che l'ottimizzazione di risorse economiche e la riduzione virtuale dei costi di gestione dell'impianto comunale; inoltre, l'applicazione di un micro-impianto idroelettrico integrato al processo di trattamento, rappresenta una fonte di energia a bassissimo impatto ambientale.

Si è passati dalla fase di ricerca alla fase di definizione della tecnologia di impianto più adatta alle caratteristiche idrauliche di salto e portata disponibili ed a valutare, nell'arco dell'anno, l'energia ottenibile dal canale di scarico presente.

4.1.2 Descrizione del progetto

Il bacino di accumulo, che determina il pelo libero superiore necessario al calcolo del salto utile per trasformare l'energia potenziale della portata disponibile in energia meccanica utilizzabile per l'utilizzo dell'impianto idroelettrico, è la vasca di disinfezione. Nello schema di trattamento dei liquami reflui civili è ubicata immediatamente a monte dello scarico finale dell'impianto; la portata finale allo scarico è di 100 l/s e la quota piezometrica corrispondente è 107,44 m; da questo punto, per mezzo di una condotta forzata, l'acqua verrà portata ad una turbina a reazione. L'albero della girante è collegato ad un generatore di elettricità (generatrice asincrona); nel progetto in questione

l'acqua in uscita dalla turbina verrà rilasciata immediatamente nella Roggia Regola, la quale è caratterizzata da una quota massima di 104,59 m e una quota minima di 103,29 m. Qualora la portata disponibile fosse superiore a quella del dimensionamento, l'acqua in eccesso verrà scaricata nell'attuale cavo ricettore attraverso lo sfioratore presente nella vasca di disinfezione.

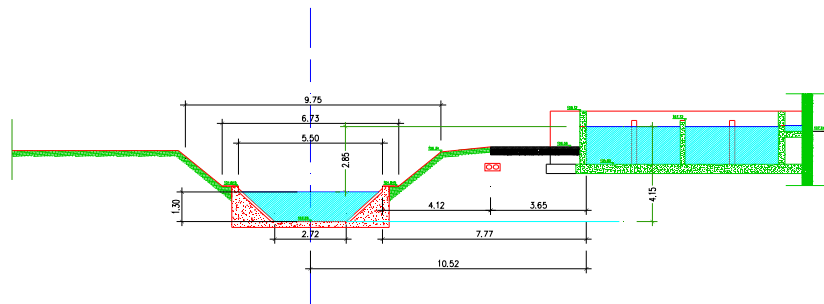


FIGURA 10: Schema del sito del micro-impianto idroelettrico di Mortara

Il dislivello disponibile minimo è $H_{\min} = 2,85 \text{ m}$; quello massimo $H_{\max} = 4,15 \text{ m}$.

La potenza idraulica lorda media del salto è definita nel seguente modo:

$$P = \frac{\gamma \times Q \times H}{102} = 3,43 \text{ kW}$$

dove γ = densità dell'acqua = 1000 kg/m^3 , Q = portata = $0,11 \text{ m}^3/\text{s}$, $H = 3,5 \text{ m}$ è il salto medio.

La turbina verrà posizionata su una fondazione in calcestruzzo con muri laterali per il contenimento del terreno. La tubazione di mandata sarà realizzata con tubazione in acciaio inox del diametro nominale (DN) di 273 mm con interclusa valvola di intercettazione a corpo piatto. Detto collettore presenterà un restringimento con DN di 168 mm sino al corpo della turbina. In uscita, la tubazione di scarico, sempre in acciaio inox del DN 168 mm, si allargherà, con sezione troncoconico, sino a raggiungere una vasca ellittica in acciaio inox (diffusore di scarico) posta sul fondo del canale ricettore.

4.1.3 Caratteristiche tecniche del micro-impianto idroelettrico

L'impianto che verrà installato è di tipo PAT (Pump As Turbine), costituito dal corpo a spirale di una pompa centrifuga opportunamente modificato per accogliere la girante Francis appositamente realizzata per la portata ed il salto disponibili. La velocità di rotazione scelta per il gruppo è di 750 giri /min.

La turbina così realizzata consente il raggiungimento del rendimento meccanico del 61%, quindi di ottenere sull'albero la potenza di 2,09 kW.

Alla turbina è accoppiata una generatrice asincrona a quattro coppie di poli della potenza di 2,2 kW.

La generatrice asincrona è collegata alla rete come un normale motore asincrono trifase, dal quale assume la potenza magnetizzante e restituisce la potenza attiva ricevuta dall'albero della turbina.

Il rendimento della generatrice accoppiata al gruppo è dell'80%, dunque la potenza disponibile ai morsetti è 1,67 kW.

Il fattore di potenza della generatrice selezionata per l'applicazione è del 67% e, per la presenza nell'impianto di depurazione di sistemi di rifasamento adeguati a potenze ben più rilevanti, non è necessario considerare per ora la necessità di munire il sistema di recupero di rifasamento ad esso dedicati.

La potenza prodotta dalla generatrice è ceduta direttamente in bassa tensione all'impianto di depurazione, in particolare il gruppo si comporta alla stregua di un qualsiasi macchinario che si trova a funzionare in "reverse"; il gruppo stesso, essendo sempre sottoposto all'azione idraulica dell'acqua in scarico, cede alla rete la potenza attiva prodotta.

La portata del depuratore è continua e pressoché costante nell'arco dell'anno, 24 ore al giorno; di conseguenza l'energia prodotta in un anno dal gruppo idroelettrico è (con riferimento al salto medio):

$$E = P_e \times 365 \times 24 = 1,67 \times 8760 = 14.668 \frac{kWh}{anno}$$

Energia equivalente a 4,4 ton di petrolio , se prodotta da una centrale termoelettrica tradizionale. In questo caso le tonnellate di anidride carbonica immesse in atmosfera sarebbero circa 3.

4.1.4 Valutazioni conclusive

L'energia elettrica prodotta da questo impianto idroelettrico è da considerarsi a tutti gli effetti come **energia rinnovabile** in quanto l'acqua utilizzata sarà fornita in modo gratuito e potrà essere riutilizzata infinite volte per lo stesso scopo senza depauperamento e sprechi del patrimonio idrico. Le attività progettuali sopra descritte, consentiranno la diminuzione del consumo di energia fornito dalla rete di distribuzione senza comportare modifiche sostanziali all'opera di convogliamento e scarico finale delle acque trattate dal depuratore.

4.2 Procedura di selezione della pompa

Di seguito vengono riportate le fasi di selezione della pompa che da utilizzare come PAT.

- Prevalenza e portata di progetto

Dallo schema progettuale preliminare, sono noti i seguenti dati:

$$Q_{nt} = \text{portata nominale della turbina} = 396 \text{ m}^3/\text{h} = 0,11 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$H_{nt} = \text{prevalenza nominale (netta) della turbina} = 2,85 \text{ m}$$

$$P = \frac{\gamma \times g \times Q_{nt} \times H_{nt}}{1000} = 3,08 \text{ kW}$$

dove $\gamma = 1000 \text{ kg/m}^3$, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Con i valori disponibili di portata e prevalenza nominali, entro nel GRAFICO25, ottenendo così informazioni relative al tipo di pompa da utilizzare. Per il sito preso in esame (impianto di depurazione di Mortara) è suggerito l'utilizzo di una *pompa a flusso assiale*.

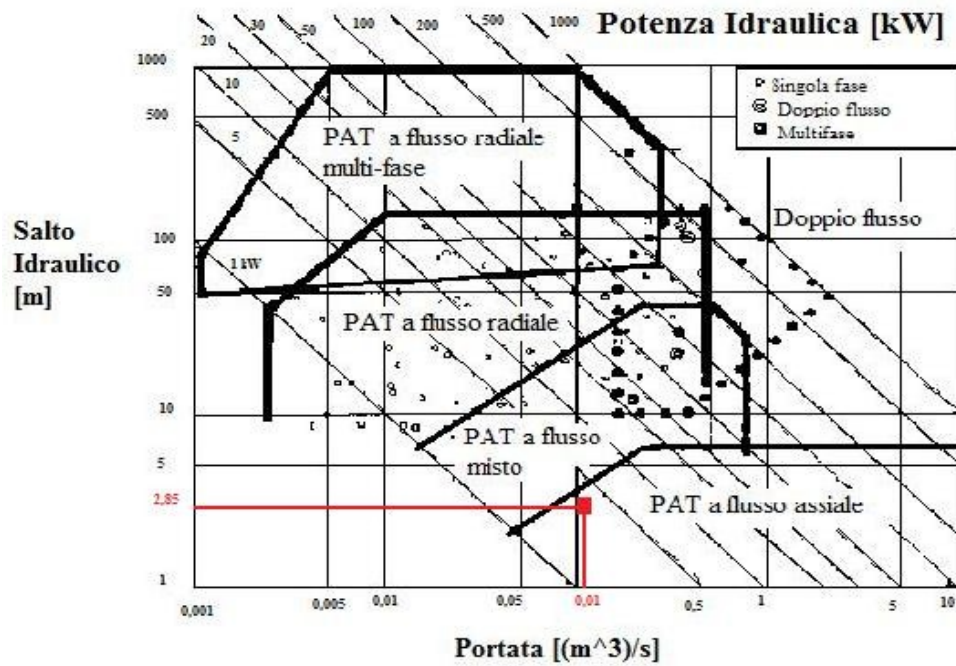


GRAFICO 25: Individuazione del tipo di pompa da utilizzare

- Calcolo della velocità specifica dell'installazione in modalità turbina

$$n_{st} = n_t \times \frac{\sqrt{Q_t}}{\sqrt[4]{H^3}} = 113,4rpm$$

- Calcolo della velocità specifica in modalità pompa

$$n_{sp} = \frac{n_{st}}{0,89} = 127,4rpm$$

Dai risultati di una prova si è stabilito che il rapporto tra la velocità specifica in modalità turbina e quella in modalità pompa assume un valore abbastanza costante, pari al fattore 0,89, come si evince anche dal GRAFICO26.

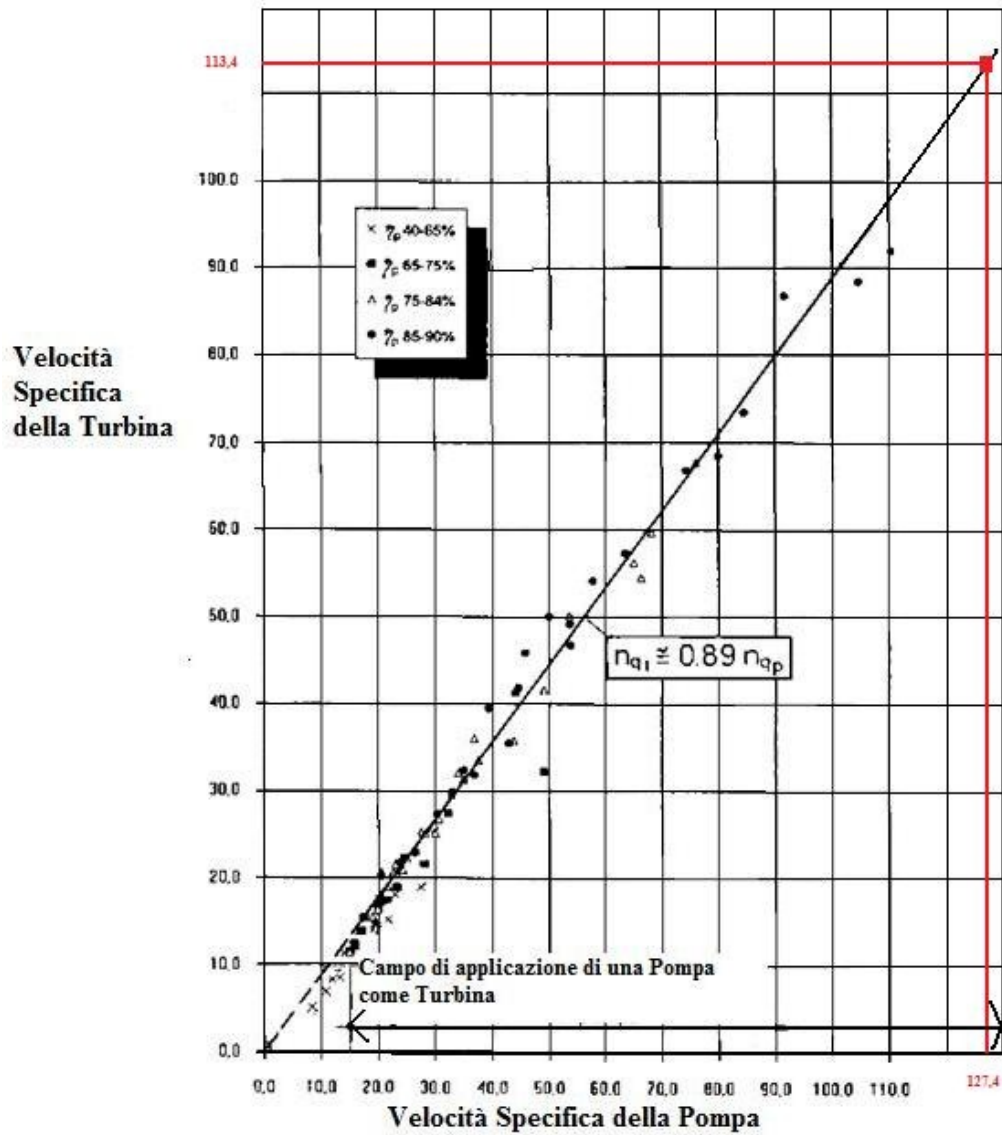


GRAFICO 26: Rapporto tra le velocità specifiche in modalità pompa e turbina

- Rendimento della pompa

$$Q_{np} = \frac{Q_{nt}}{1,3} = 0,085 \frac{m^3}{s}$$

dove Q_{np} = portata nominale della pompa.

Con questo valore di portata, si entra nel GRAFICO27, ottenendo il rendimento massimo della pompa $\eta_p = 0,83$.

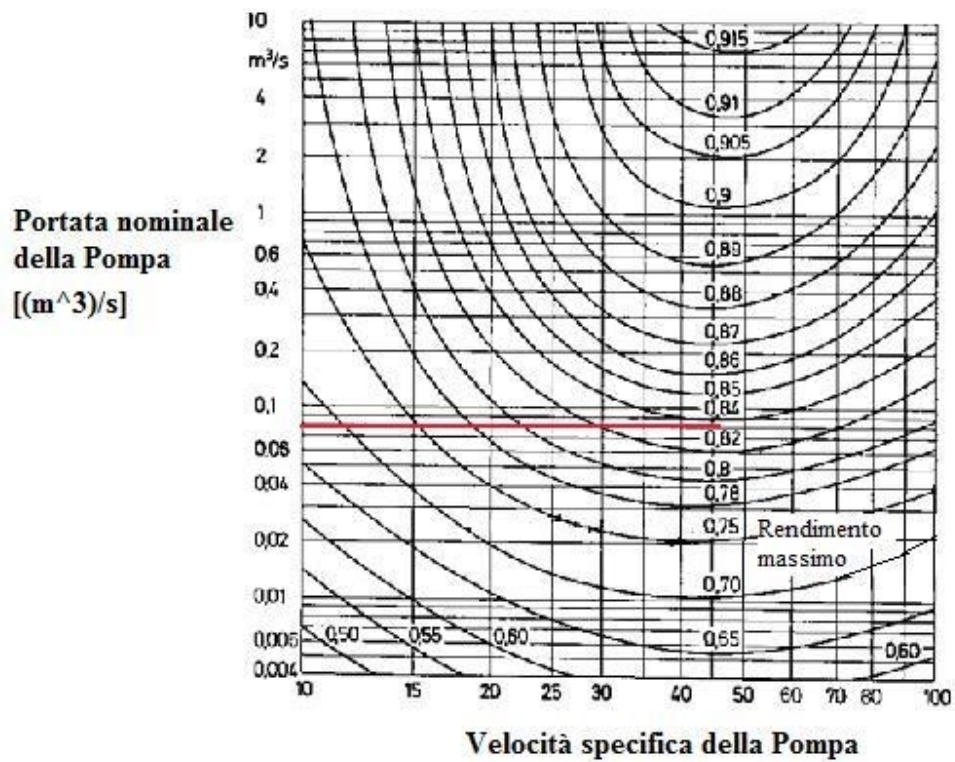


GRAFICO 27: Curve di rendimento in funzione di portata e velocità specifica

- Conversione delle condizioni di progetto della turbina in condizioni di progetto della pompa

I fattori, che permettono tale conversione, possono essere estrapolati dal GRAFICO28 e dal GRAFICO29, ponendo in ingresso la velocità specifica della pompa e l'efficienza.

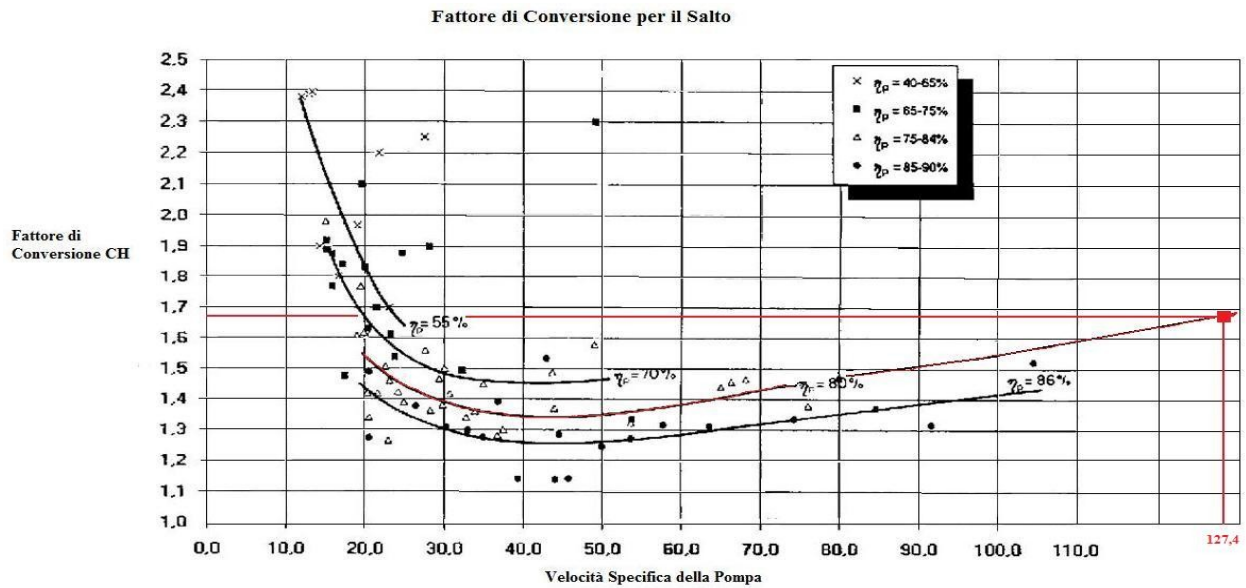


GRAFICO 28: Fattore di conversione per il salto

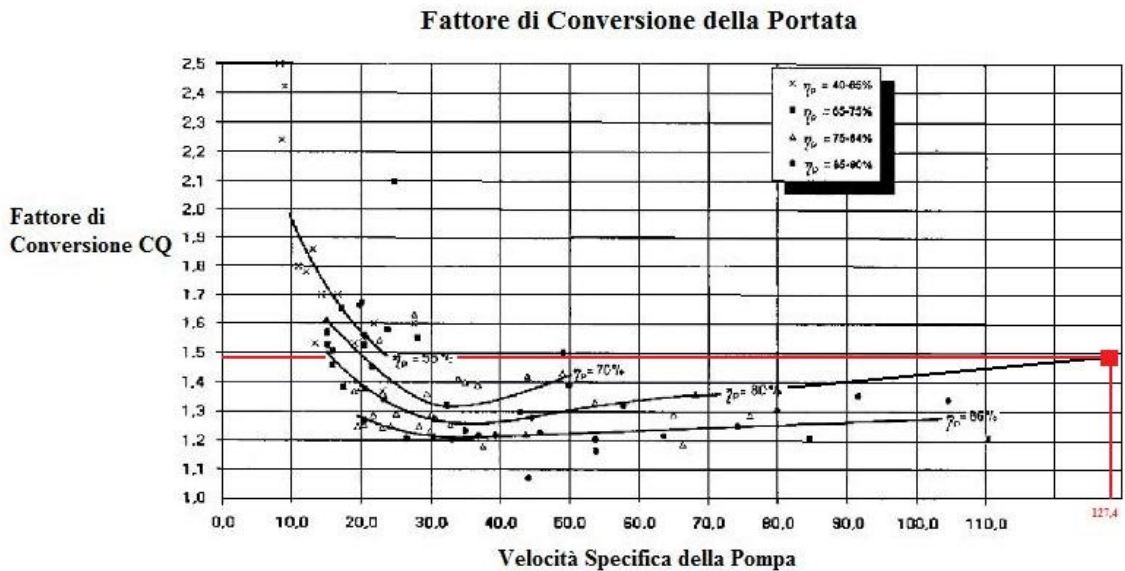


GRAFICO 29: Fattore di conversione per la portata

Si ricavano $CH = 1,675$ e $CQ = 1,49$, da cui la prevalenza e la portata della pompa alla proposta velocità della turbina:

$$H_{np}(nt) = \frac{H_{nt}}{CH} = 1,7m$$

$$Q_{np}(nt) = \frac{Q_{nt}}{CQ} = 0,074 \frac{m^3}{s} = 266,4 \frac{m^3}{h}$$

4.3 Utilizzo del programma HI2 (Hydraulic Investigator 2)

Tra i costruttori internazionali di pompe, si sceglie per comodità la JHONSON PUMP olandese, che, come tanti altri costruttori, mette a disposizione un programma di verifica facile da utilizzare e addirittura scaricabile gratuitamente via internet.

Aprendo il programma, compare la finestra principale (FIGURA11), dalla quale è possibile accedere al dimensionamento attraverso più scelte.

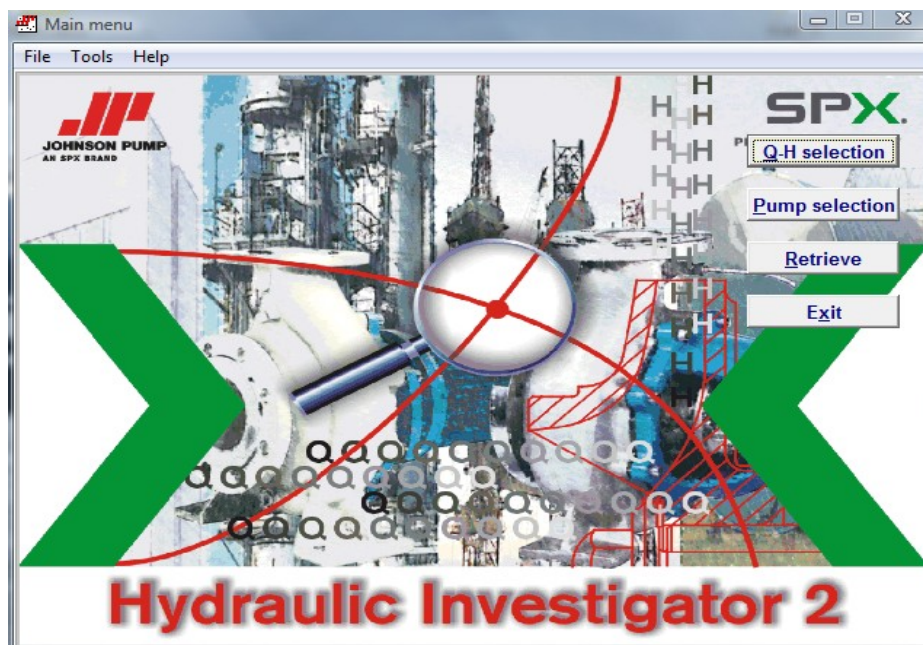


FIGURA 11: Schermata di avvio del programma HI2

Q-H selection: inserendo i valori di portata e di prevalenza della pompa, il programma cerca automaticamente il modello di pompa più idonea.

Pump selection: si definiscono la famiglia ed il tipo di pompa. Il programma in uscita, fornisce i grafici caratteristici della pompa.

E' di mio interesse verificare che il programma, alla portata e alla prevalenza della pompa, valutate nel paragrafo precedente in maniera computazionale, proponga l'utilizzo della pompa che effettivamente è stata installata. In questo modo la selezione della pompa risulterebbe verificata.

Selezionando l'opzione **Q-H selection** si apre un'altra finestra (FIGURA12), che richiede l'inserimento dei dati necessari per l'implementazione del programma:

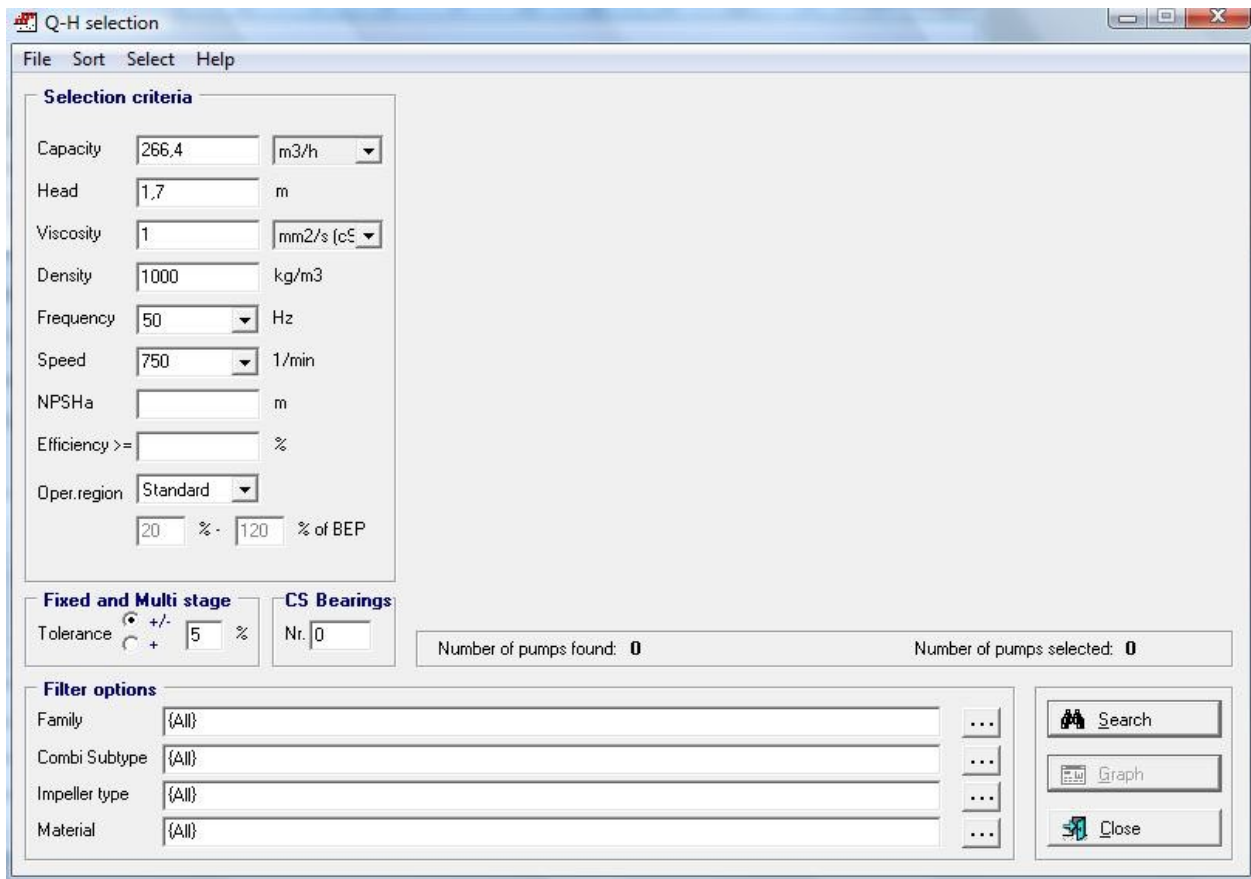


FIGURA 12: Inserimento dei valori di progetto nel programma HI2

Dati inseriti: $Q_{np}(nt) = 266,4 \text{ m}^3/\text{h}$, $H_{np}(nt) = 1,7 \text{ m}$, $n_t = 750 \text{ rpm}$.

Cliccando su **Search**, il programma inizia a lavorare, cercando i modelli di pompa idonei alle caratteristiche introdotte (FIGURA13).

Sel.	Familie	Type	Eff. %	Imp. type	Imp.mat.	Npshr	Rpm
=>	CombiBloc	250-200	64,1	CL	CI	2,29	750
=>	CombiNorm	250-200	64,1	CL	CI	2,29	750
=>	CombiSump	250-200	64,1	CL	CI	2,29	750
=>	CombiNorm	250-200	64,1	CL	BZ	2,29	750
=>	CombiBlocHorti	250-200	64,1	CL	CI	2,29	750
=>	CombiLine	200-200	54,2	CL	CI	3,15	750
=>	CombiLineBloc	200-200	54,2	CL	CI	3,15	750

FIGURA 13: Selezione della Pompa

Selezionando il modello *CombiBloc 250-200 CL/CI*, e cliccando su **Graph**, vengono riprodotti i grafici e i risultati che derivano dalla selezione di questa pompa (FIGURA 14).

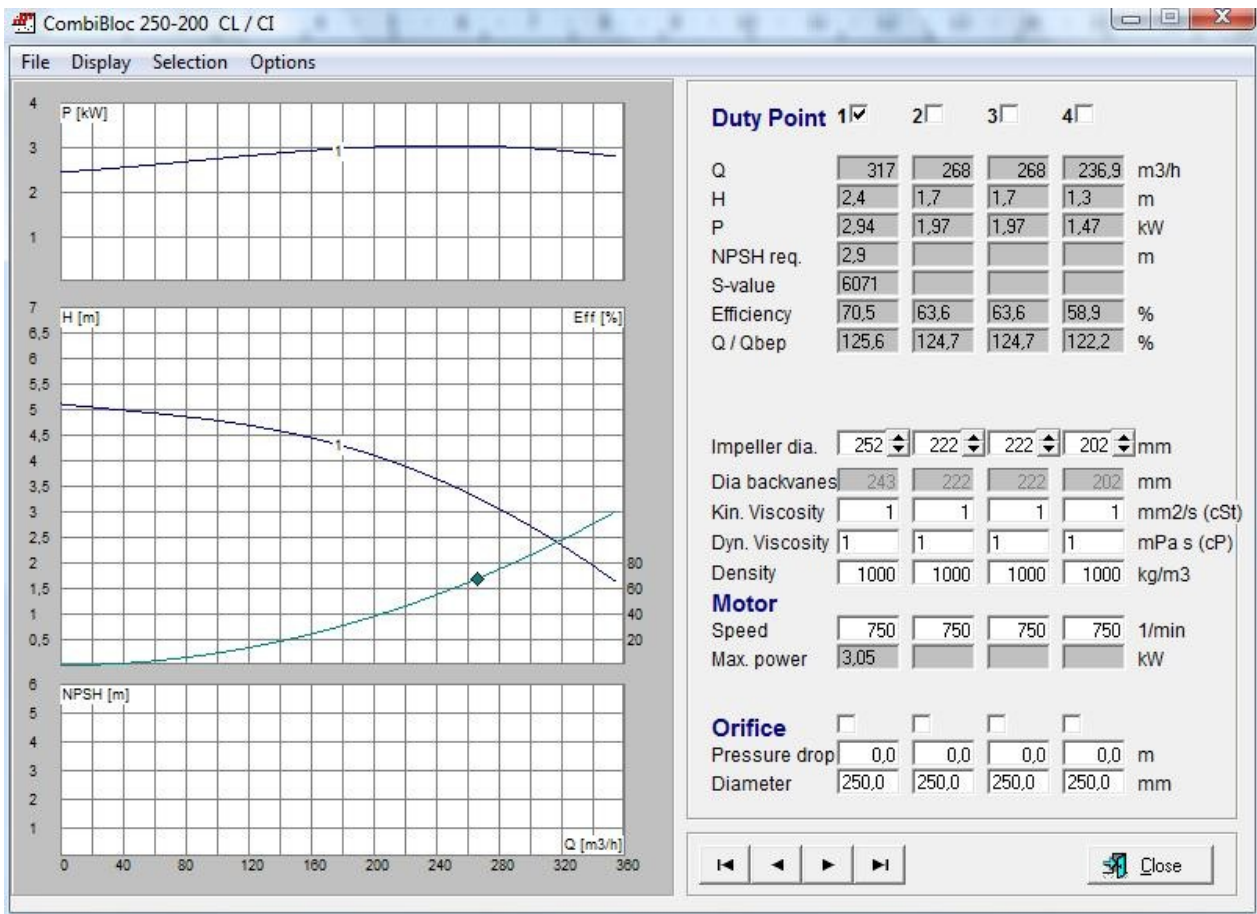


FIGURA 14: Grafici caratteristici della pompa selezionata col programma HI2

Per verificare la corretta selezione effettuata dal programma HI2, di seguito vengono riportati i dati più rilevanti della turbina idraulica installata presso l'impianto ASMortara.

DATI INIZIALI		
Salto di calcolo (netto)	2,85	m
Portata	396	m ³ /ora
Portata di massimo rendimento	110	l/sec
Giri al minuto (massimi)	750	
Potenza di calcolo (turbina)	1,5	KW
Giri caratteristici (ns)	75,5	
Altitudine del sito (s.l.m.)	100	m
Velocità del canale di scarico	0,02	m/sec
Temperatura dell'acqua	13-;-23	C°

CARATTERISTICHE GENERALI		
Girante a sette palette		
Diametro periferico	200	mm
Diametro albero	38	mm
Diametro ingresso	150	mm
Diametro uscita	150	mm
altezza della paletta	46	mm
Sezione complessiva delle luci	0,028	m ²
Altezza distributore	50	mm
Ingombro	852x440x570	mm
Peso	130	Kg
POTENZA, GIRI, COPPIA		
Potenza teorica lorda	3,07	KW
Rendimento	0,68	-
Coppia all'albero	61,25	Nm
PROFILO ENTRATA		
Angolo d'entrata	80	gradi
PROFILO USCITA		
Angolo d'uscita	55	gradi
SOLLECITAZIONI		
Spinta assiale	5,36	Kg
Momento torcente	1,91	Kgcm
DIFFUSORE CONICO		
Diametro d'entrata al diffusore	164,3	mm
Diametro d'uscita al diffusore	419	mm
Lunghezza del diffusore	1951	m
Pressione reale	0,31	m colonna d'acqua
Tratto immerso del diffusore	0,015	m
Altezza massima girante secondo Rogers/Moody	2,5	m

Si noti che la Potenza teorica lorda ed il rendimento della pompa selezionata col programma sono molto vicini a quelli reali. E' stata dunque verificata la corretta scelta del modello di pompa.

5 STUDIO DI DUE POSSIBILI ALTERNATIVE E CONFRONTO CON IL CASO DELLA PAT INSTALLATA

5.1 Introduzione

Nel presente capitolo si vuole porre a confronto l'effettiva installazione della PAT con due possibili alternative, sia dal punto di vista economico sia dal punto di vista del recupero energetico. Le situazioni che si prendono in considerazione, e che successivamente verranno descritte, sono:

- ◆ PAT singola; si avvia quando transitano almeno 60 l/s e permette il passaggio di un massimo di 100 l/s. Si tratta della situazione realmente in opera presso l'azienda ASMortara. Questa macchina per comodità verrà chiamata PAT1;
- ◆ Turbina singola; permette il passaggio di un massimo di 200 l/s ed inizia a funzionare quando transitano almeno 40 l/s (se la portata è inferiore a questo valore minimo di soglia, la macchina non entra in servizio);
- ◆ doppia PAT; ci sono due macchine, delle quali una è quella già descritta nel primo caso accoppiata ad una seconda PAT che opera a valle dello stramazzo. Quest'ultima è più piccola della prima, in quanto permette il transito di un massimo di portata di 40 l/s ed inizia a lavorare quando ne transitano almeno 20 l/s. Questa macchina, per distinguerla dall'altra dello stesso genere, verrà chiamata PAT2.

Prima di procedere con lo studio dei tre casi, riporto due grafici che risulteranno importanti per le analisi, cioè l'andamento annuale delle portate disponibili (GRAFICO30) e la curva di durata (GRAFICO31), costruite a partire dai dati del 2009.

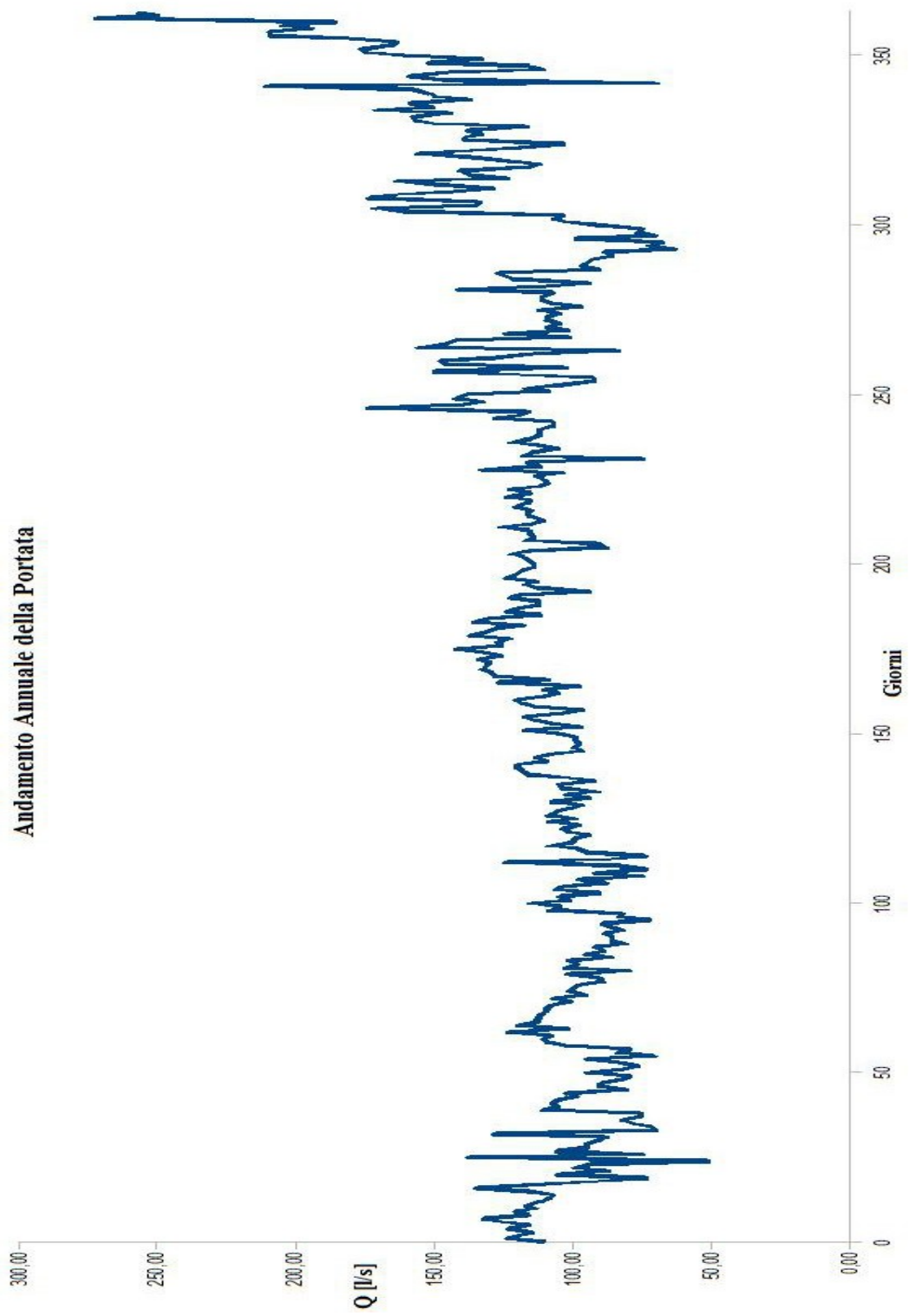


GRAFICO 30: Andamento della portata disponibile nel 2009

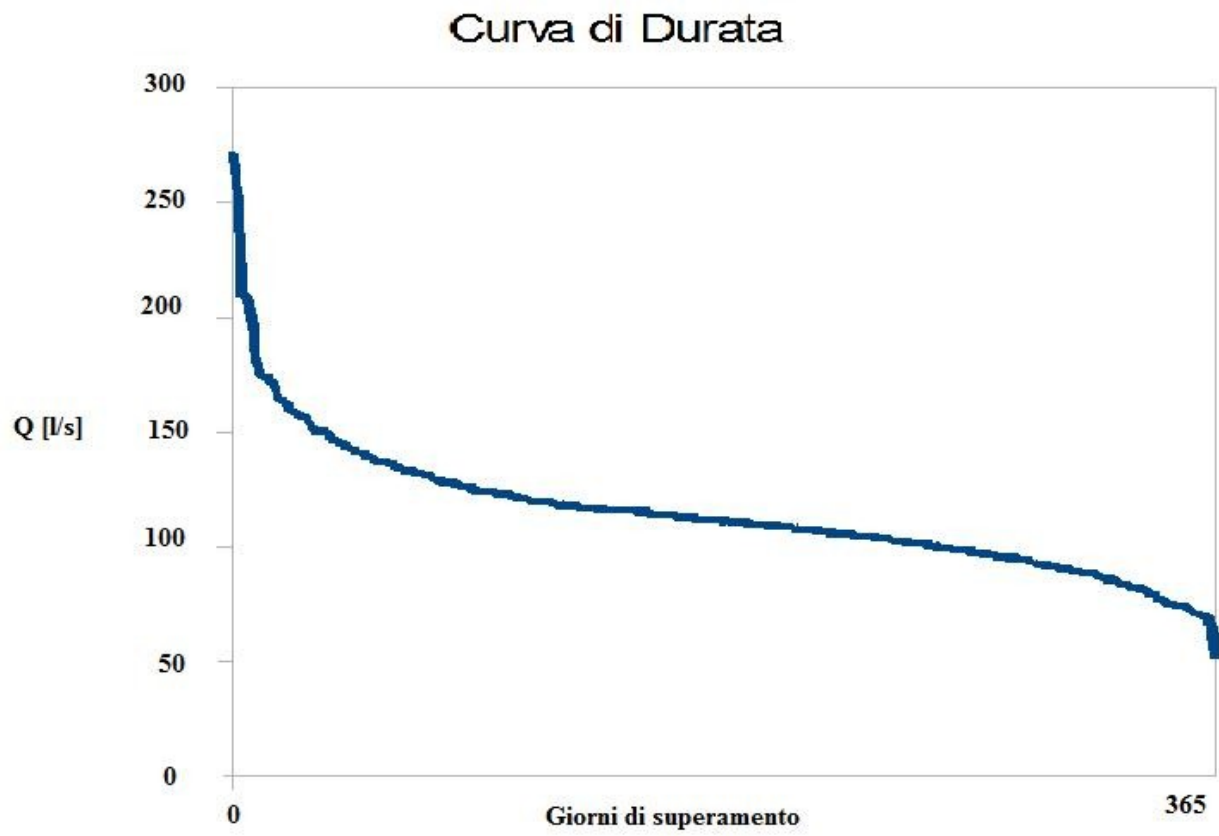


GRAFICO 31: Curva di durata

5.2 1° CASO → PAT1

5.2.1 Valutazione del funzionamento

La PAT1, come già evidenziato, si aziona quando la portata transitante è al di sopra dei 60 l/s, essa può garantire il passaggio di un massimo di 100 l/s. Ciò significa che per portate inferiori alla soglia minima di funzionamento la macchina non raggiunge la velocità di sincronismo e, di conseguenza, non entra in parallelo. Il sistema è a livello pressoché costante; superata la portata di 100 l/s, l'acqua in eccesso è costretta a lasciare la vasca di carico attraverso lo stramazzo senza attraversare la macchina e quindi senza poter convertire l'energia disponibile.

Tale situazione viene chiarita prendendo in considerazione la curva di durata (GRAFICO32):

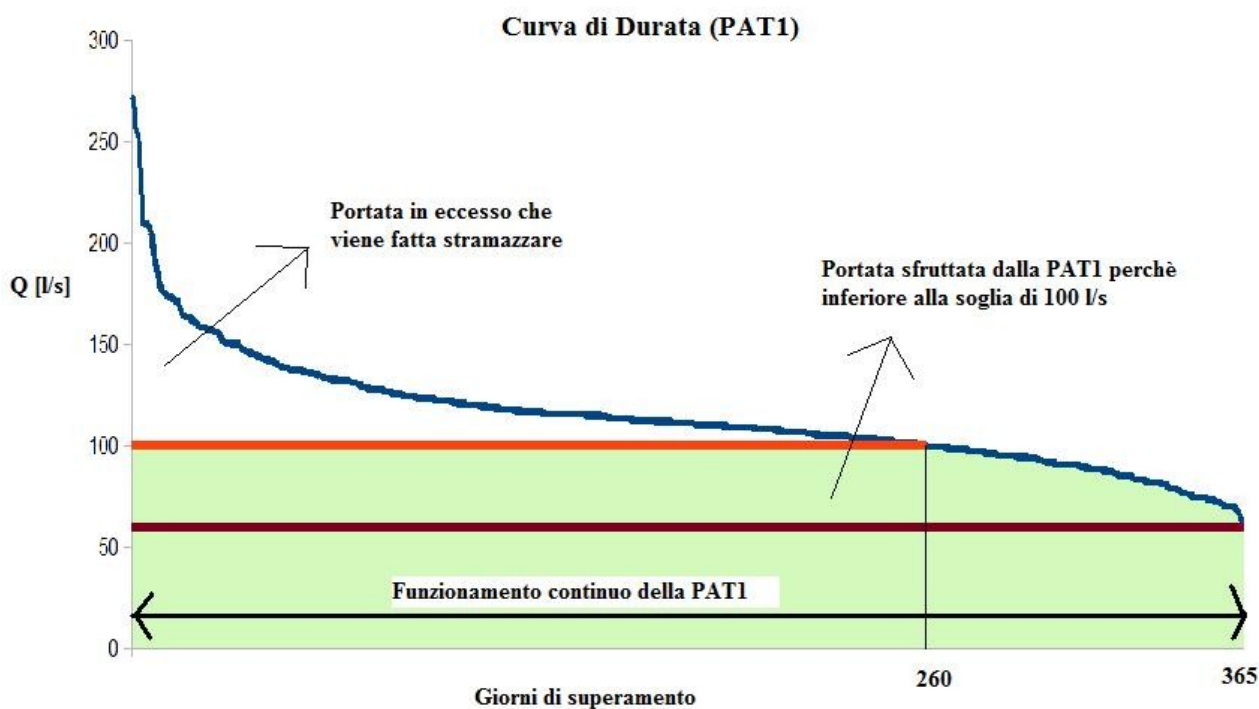


GRAFICO 32: Curva di durata (PAT1)

Dall'analisi della curva di durata si può affermare che la PAT1 ha lavorato ininterrottamente per tutto il 2009 e per 260 giorni ha operato a regime, cioè il 71% delle volte ha funzionato con 100 l/s, questo valore di portata coincide con la portata massima consentita dalla macchina.

A partire da questi valori di portata è possibile valutare la potenza netta P_N e l'energia netta E_N prodotta al giorno, utilizzando le seguenti formule:

$$P_N = \frac{\gamma \times g \times H \times Q \times \eta}{1000}$$

$$E_N = P_N \times 24$$

dove γ è la densità dell'acqua pari a 1000 kg/m^3 , g è l'accelerazione di gravità pari a $9,81 \text{ m/s}^2$, H è il salto disponibile pari a $2,85 \text{ m}$, Q è la portata in $[\text{m}^3/\text{s}]$ e η è il rendimento della macchina pari a $0,68$.

I risultati di energia netta prodotta giornalmente durante il 2009 sono riportati nel GRAFICO 33.

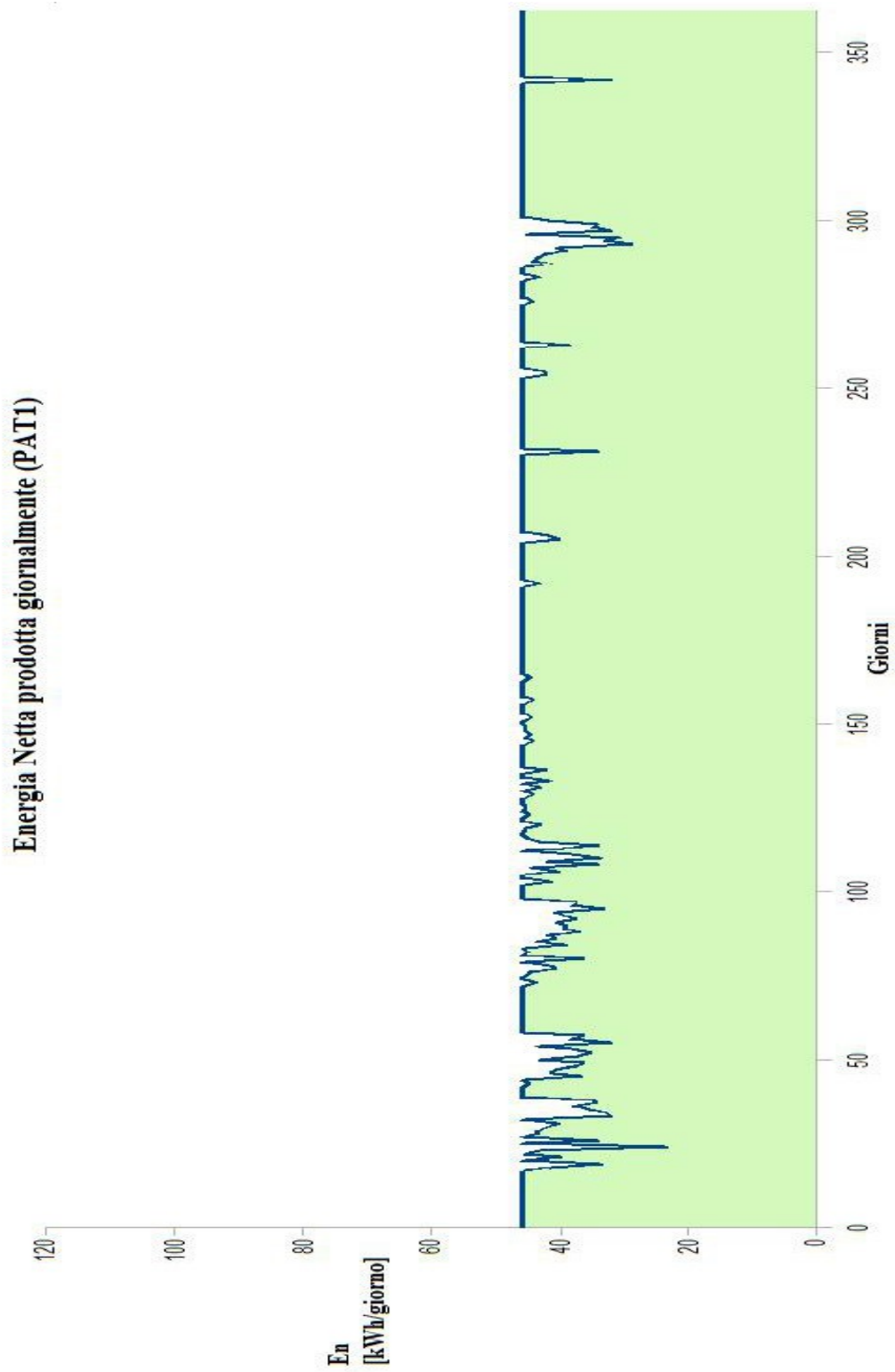


GRAFICO 33: Andamento dell'energia prodotta (PAT1)

5.2.2 Analisi economica

Le voci di costo che concorrono alla definizione dell'investimento per la realizzazione dell'impianto sono molteplici e per illustrarle si è qui utilizzato lo schema che le prende in esame singolarmente:

- ◆ **Perfezionamento della Commessa.** E' una fase in cui la Società, che ha acquisito l'ordine di progettazione, deve riprendere tutti gli studi fatti al momento della presentazione dell'offerta. Infatti, da quando è stata presentata l'offerta al cliente al momento in cui viene acquisito l'ordine, possono passare anche diversi mesi; occorre andare a ristudiare in dettaglio il dimensionamento che era stato fatto e capire se sono stati commessi errori. Certamente, si dovrebbe fare in modo da avere il progetto definitivo e corretto già in fase d'offerta, perché il progetto riguarda la fornitura di un certo materiale, che il cliente non vuole che cambi durante la progettazione. In teoria, la progettazione è una fase che dovrebbe precedere all'offerta. Tale fase, però, è a spese della società che effettua la proposta; se un cliente chiede che gli si presenti un'offerta per una centrale idroelettrica, ci si deve accollare i costi di progetto, anche nel caso di un impianto importante. Solo successivamente, se si prende l'ordine, allora il cliente pagherà anche il progetto redatto al momento dell'offerta, ma se l'ordine viene dato ad un'altra società, allora il progetto viene dimenticato senza ricevere alcun rimborso relativamente alle spese sostenute in fase d'offerta.
- ◆ **Ingegneria di Base.** Fase in cui si effettua il dimensionamento della macchina e si procede con l'avvio delle attività commerciali dei fornitori. Se il perfezionamento della commessa serve per verificare che, al momento dell'offerta, erano stati fatti correttamente i calcoli (dimensionamento, salto, coefficiente di flusso, scelta del tipo di pompa, studio del rendimento della pompa in funzione del numero di giri caratteristico, ...), nell'ingegneria di base si recuperano i disegni e i rilievi topografici del sito in cui si andrà ad installare la Turbina: per esempio, viene valutata la distanza che c'è dal punto di connessione con la rete, si controlla che i dati raccolti siano corretti, si eseguono delle misure e si osserva la morfologia del terreno. Con tutte queste informazioni è possibile abbozzare un disegno dell'impianto. Questa fase di progettazione ha lo scopo di fornire un'idea complessiva dell'impianto; infatti, al termine dell'ingegneria di base, si saprà quale tipo di bulloni dovranno essere comperati per fissare le fondazioni, oppure che tipologia di armadio sarà necessario acquistare per il contenimento delle

apparecchiature, o anche quali pezzi in acciaio inossidabile dovranno essere costruiti e con quale peso, ecc....

Al termine di questa fase è anche possibile stabilire quanta potenza verrà prodotta, valore che è già noto in fase d'offerta, ma che nell'ingegneria di base viene messo nel dettaglio.

- ◆ **Ingegneria di Dettaglio di Asportazione.** Questa fase è considerata solo nel caso dell'installazione della Turbina, in quanto la PAT non necessita di lavori aggiuntivi; ci sono solo alcune situazioni in cui occorre fare un giunto per accoppiare la pompa alla generatrice, ma, sicuramente, non si dovrà progettare l'albero della macchina o disegnarlo assieme ai vari componenti. Nell'ingegneria di dettaglio di asportazione della PAT, nel caso particolare di Mortara, è stata fornita la macchina elettrica già provvista di giunto.
- ◆ **Ingegneria di Dettaglio di Carpenteria.** Consiste nell'accoppiare la pompa con la generatrice e nel progettare la tuberia di collegamento tra la vasca e lo scarico. Come già detto, nel caso specifico di Mortara, la macchina è stata fornita all'azienda già provvista di giunto di accoppiamento tra macchina e generatrice.
- ◆ **Ingegneria del Quadro Elettrico.** E' una fase che coincide sia nel caso della PAT1, sia nel caso della Turbina, sia in quello di PAT1 + PAT2, poiché l'allacciamento alla rete risulta lo stesso in tutti e tre i casi.
- ◆ **Costruzione delle Membrature di Carpenteria.** In questa fase la società, che ha ricevuto l'ordine dal cliente di poter procedere con la progettazione, affida il lavoro a terzi. Non si tratta, dunque, di una fase che avviene all'interno dell'azienda contattata direttamente dal cliente, ma è un processo che verrà portato a compimento da altri fornitori. In tal caso, il tempo impiegato per portare a termine questa fase non assume il significato di giorni di lavoro, ma di giorni d'attesa, perché occorre attendere che l'esecuzione venga conclusa da altri operatori.
- ◆ **Riesame della Commessa.** Dopo aver organizzato il lavoro ed aver inviato ai fornitori la richiesta delle componenti indispensabili per la progettazione, si spende un breve periodo per effettuare un riesame della commessa, al fine di valutare se si è proceduto all'avvio dei lavori in maniera organizzata e senza errori.
- ◆ **Costruzione per Asportazione.** E' una fase non richiesta per la pompa, in quanto la macchina viene acquistata senza che si debbano effettuare ulteriori operazioni di sistemazione. Relativamente alla Turbina, invece, spesso è necessario eseguire alcuni lavori, quali costruzione disco, microfusione, girante, verniciatura. Ciò comporta un certo periodo di attesa e costi di lavoro piuttosto elevati, che, come detto sopra, nel caso della pompa non sono presenti.

- ◆ **Modellazione.** Solo nel caso dell'installazione di una Turbina è richiesta questa fase, in quanto tiene conto del fatto che si devono fare dei pezzi di fusione con conseguenti costi per pagare i lavoratori della fonderia. Tali costi non saranno contenuti, poiché dovranno essere prodotti i modelli della girante e dei pezzi interni della Turbina (per esempio, le palette del distributore).
- ◆ **Acquisto della Pompa.** Come indicato dal nome, questa fase compare solo nel caso della progettazione di una PAT. La società invia l'ordine a terzi e attende la consegna della macchina completa.
- ◆ **Microfusione.** Siccome la pompa da utilizzare come PAT viene consegnata senza che necessiti ulteriori lavori, questa fase compare solamente nell'offerta stilata per la Turbina. Anche in questo caso si tratta di lavoro esterno all'azienda principale.
- ◆ **Costruzione della Girante.** Fase in cui si procede con la sistemazione della girante, cioè viene tornita.
- ◆ **Verniciatura Carpenteria.**
- ◆ **Approntamento del Quadro Elettrico.**
- ◆ **Approntamento della Generatrice.**
- ◆ **Approntamento dei Materiali Commerciali.** Con “materiali commerciali” si intendono tutti gli strumenti necessari nelle varie fasi, includendo anche i possibili imprevisti.
- ◆ **Approntamento della Trasmissione.**
- ◆ **Premontaggio.** Questa fase viene fatta in officina per verificare che la macchina funzioni. Si tratta di un collaudo.
- ◆ **Approntamento dei Servizi Accessori.** In questo caso non sono segnalati lavori da parte dell'azienda fornitrice ma da parte del Committente. E' una fase che verrà analizzata a parte e il cui costo dovrà essere aggiunto al prezzo finale che la Società fornitrice presenterà al Cliente.
- ◆ **Smontaggio.** Successivamente al collaudo effettuato durante la fase di “Premontaggio”, la macchina viene smontata e preparata per la consegna al cliente.
- ◆ **Touch Up.** Si tratta di una fase relativamente rapida, e consiste nel risolvere i problemi che possono aversi dal punto di vista prettamente estetico del macchinario, nati durante la procedura di progettazione. E' una fase non sempre necessaria.
- ◆ **Trasporto in Centrale.** Consegna al cliente con pagamento del trasportatore.

La TABELLA1 è relativa all'offerta di una pompa utilizzata come PAT1:

Fasi di progettazione	Durata Lavoro/Tempo Attesa [giorni]	Costo della Fase [Euro]	Costo Prestazioni Esterne alla Società [Euro]	Costo Prestazioni Interne alla Società [Euro]
<i>Perfezionamento Commessa</i>	3	500,00		500,00
<i>Ingegneria di Base</i>	6	2.200,00		2.200,00
<i>Ingegneria di Dettaglio Asportazione</i>	-	-		
<i>Ingegneria di Dettaglio Carpenteria</i>	6	3.000,00		3.000,00
<i>Ingegneria del Quadro Elettrico</i>	6	3.000,00		3.000,00
<i>Costruzione Membrature Carpenteria</i>	60	4.400,00	4.400,00	
<i>Riesame di Commessa</i>	1	800,00		800,00
<i>Costruzione per Asportazione</i>	-	-		
<i>Acquisto Pompa</i>	45	2.100,00	2.100,00	
<i>Microfusione</i>	-	-		
<i>Costruzione Girante</i>	-	-		
<i>Verniciatura Carpenteria</i>	15	800,00	800,00	
<i>Approntamento Quadro Elettrico</i>	60	5.000,00	5.000,00	
<i>Approntamento Generatrice</i>	51	500,00	500,00	
<i>Approntamento Materiali Commerciali</i>	30	1.500,00	1.500,00	
<i>Approntamento Trasmissione</i>	3	200,00		200,00
<i>Premontaggio</i>	1	800,00		800,00
<i>Approntamento Servizi Accessori</i>	-	-		
<i>Smontaggio</i>	1	800,00		800,00
<i>Touch Up</i>	1	100,00		100,00
<i>Trasporto in Centrale</i>	1	500,00	500,00	
Totale	290	26.200,00	14.800,00	11.400,00

TABELLA 1: Offerta economica (PAT1)

La **Durata Lavoro/Tempo Attesa** è intesa come giorni di lavoro di un singolo uomo; si tratta, cioè, di quanto tempo impiegherebbe un solo uomo a portare a compimento la data fase, espresso in giorni.

La progettazione e l'installazione di una PAT1 da 100 l/s viene a costare all'azienda fornitrice 26.200 Euro, dei quali 14.800 sono costi esterni, mentre 11.400 Euro sono costi dovuti a lavori interni alla società. Considerando un ricarico del 36% sulla commessa, la PAT1 di Mortara è stata venduta al cliente a 35.630 Euro.

Si noti come i giorni totali di lavoro richiesti siano 290, dei quali, se si tolgono i giorni di attesa (relativi ai lavori sostenuti da altri fornitori, dunque, lavori esterni), si ottengono 28 giorni di

effettivo lavoro interno. Ciò significa che, se i 28 giorni sono rispettati e se si considera il prezzo a cui viene venduta la macchina, la società guadagnerà ogni giorno 1.270 Euro.

In TABELLA2 sono riportati i costi del lavoro ed il prezzo di vendita della PAT1:

	Costo Lavoro Esterno	Costo Lavoro Interno
	€ 14.800,00	€ 11.400,00
Costo Totale	€ 26.200,00	
Prezzo presentato al Cliente (Ricarico = 36%)	€ 35.632,00	
Redditività al Giorno (Giorni del solo Lavoro Interno = 28)	€ 1.272,57	

TABELLA 2: Costi di produzione e prezzo presentato al cliente (PAT1)

A questi 35.632 Euro vanno aggiunte altre spese che il Cliente deve sostenere per portare a compimento la fase di **Approntamento dei servizi accessori**. L'Azienda ASMortara ha dovuto spendere 6.700 Euro per la realizzazione della platea in calcestruzzo, del basamento del quadro elettrico e dei relativi condotti; nonché per l'installazione della tuberia di collegamento della macchina alla vasca di carico e la posa del cono di scarico.

**Spesa Complessiva
del Cliente = € 42.333**

5.3 2° CASO → Turbina

Inizialmente era stata redatta un'offerta economica che prevedeva lo sviluppo di una Turbina ad elica a giri variabili. Il gruppo era costituito da un'elica in linea d'asse, da una generatrice asincrona e da un inverter rigenerativo per convertire l'ottimale utilizzo del salto a portata variabile, da un minimo di 40 l/s ad un massimo di 200 l/s.

L'offerta venne considerata inaccettabile da ASM in quanto la piccola potenza del macchinario non giustificava il rientro del capitale nel tempo stabilito dagli uffici finanziari dell'Azienda stessa.

La necessità di installare comunque un gruppo idroelettrico per l'utilizzo dello scarico del Depuratore era tuttavia già stata fissata dalla Direzione dell'impianto tanto che era comunque stato messo a bilancio l'investimento per il gruppo idroelettrico.

La soluzione economicamente percorribile che consentiva la realizzazione dell'impianto con i fondi disponibili venne quindi individuata considerando l'utilizzo di una PAT.

La differenza sostanziale tra le due soluzioni, quella con Turbina ad elica e quella con la PAT, consiste nel fatto che la prima poteva funzionare prelevando tutta la portata disponibile, mentre la seconda, essendo a portata costante, è stata dimensionata per la portata minima del Depuratore.

5.3.1 Valutazione del funzionamento

Come detto sopra, la Turbina che si sarebbe dovuto installare permette il passaggio di un massimo di 200 l/s di portata e si aziona con portate superiori alla soglia minima di 40 l/s. Ciò significa che per portate inferiori a tale valore la macchina non funziona, mentre le quantità superiori a 200 l/s vengono divise, facendo stramazze le acque in eccesso, che, come si vedrà, sarebbe accaduto solamente 7 giorni nell'arco del 2009.

Prendendo in considerazione la curva di durata (GRAFICO34), si possono analizzare i periodi di funzionamento della Turbina:

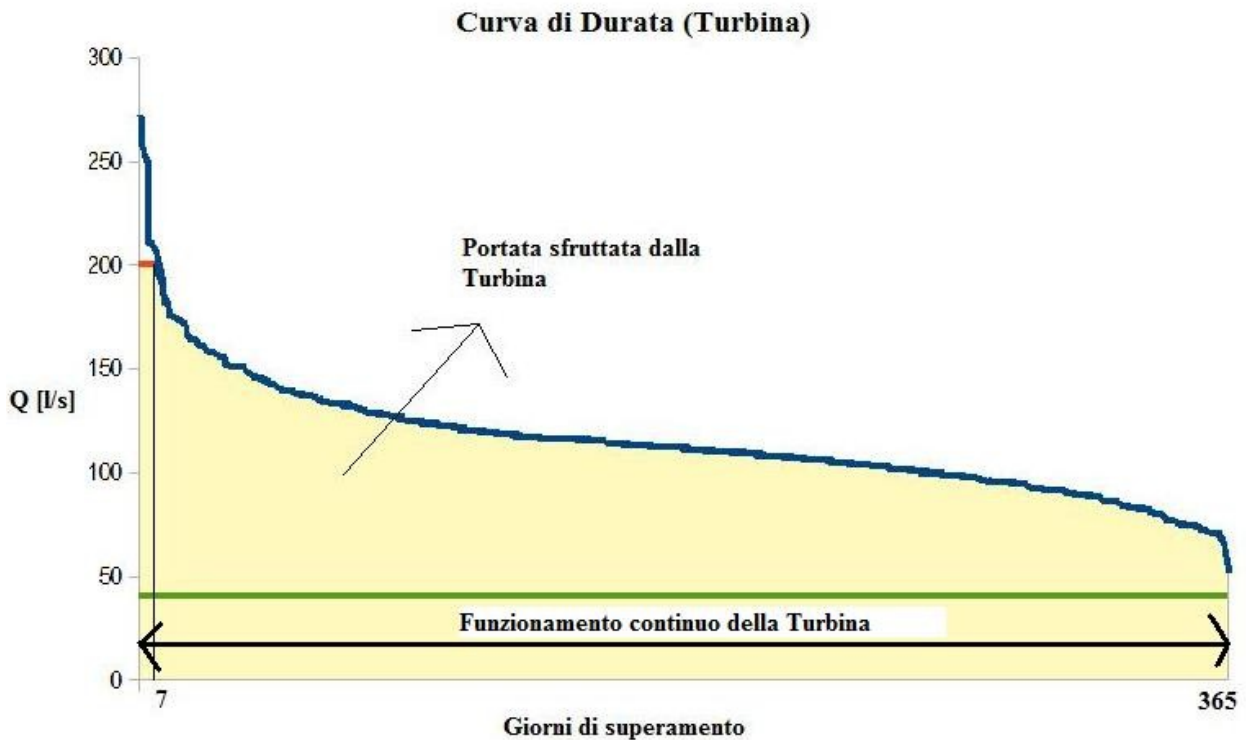


GRAFICO 34: Curva di durata (Turbina)

Dall'analisi della curva di durata, costruita a partire dai dati acquisiti durante il 2009, si può sostenere che la Turbina avrebbe lavorato per 365 giorni (senza interruzioni), in quanto la portata in arrivo è sempre maggiore della soglia minima di 40 l/s. Si conclude anche che, durante tutto l'anno, la macchina lavorerebbe a regime, cioè con 200 l/s, solo per 7 giorni.

A partire da questi valori di portata è possibile valutare la potenza netta P_N e l'energia netta E_N prodotta in un giorno, utilizzando le formule già introdotte nell'analisi precedente:

$$P_N = \frac{\gamma \times g \times H \times Q \times \eta}{1000}$$

$$E_N = P_N \times 24$$

dove γ è la densità dell'acqua pari a 1000 kg/m³, g è l'accelerazione di gravità pari a 9,81 m/s², H è

il salto disponibile pari a 2,85 m, Q è la portata in $[m^3/s]$ e η è il rendimento della macchina pari a 0,8.

I valori di energia netta prodotta giornalmente durante il 2009 sono riportati nel GRAFICO35:

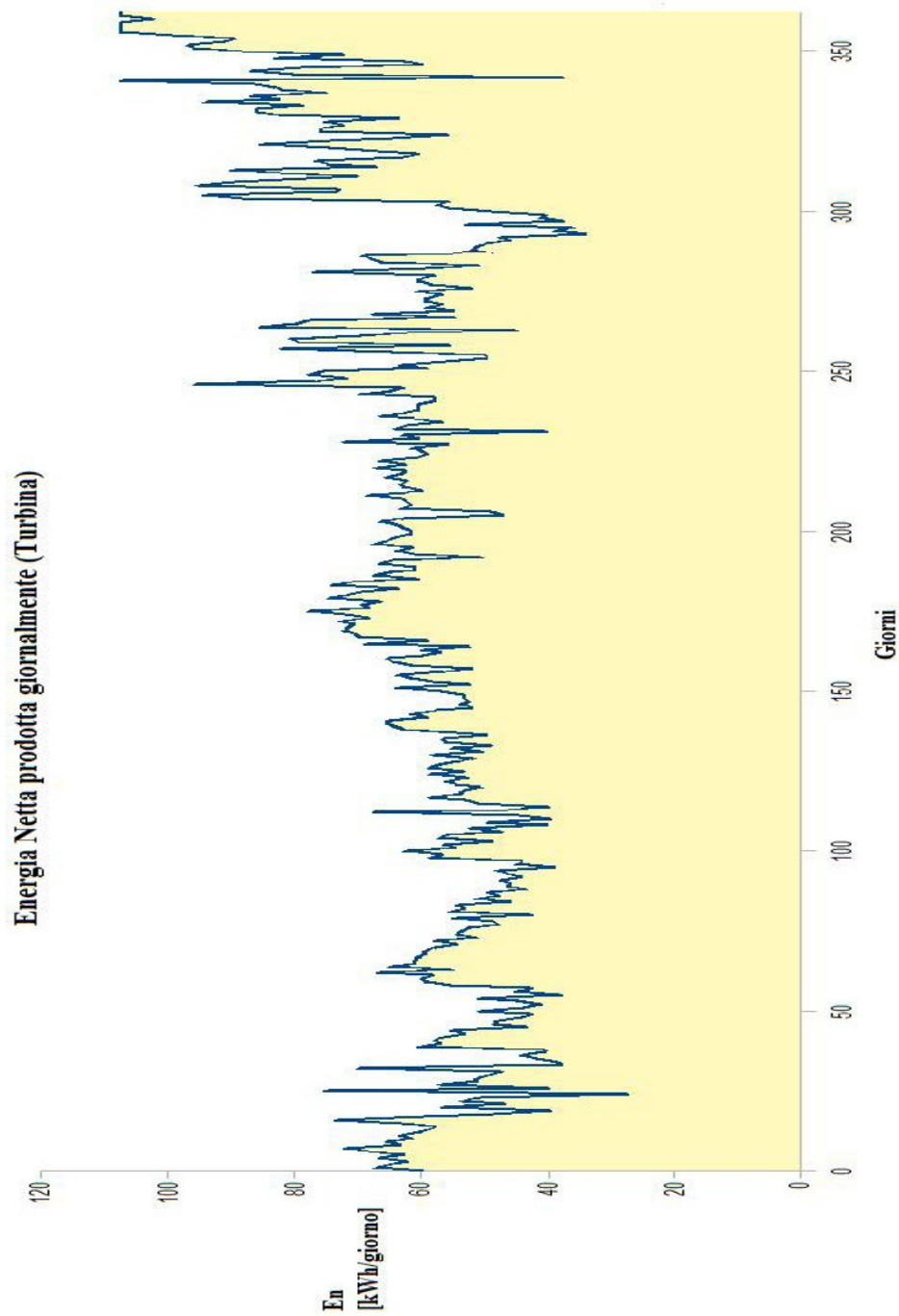


GRAFICO 35: Andamento dell'energia prodotta (Turbina)

5.3.2 Analisi economica

La TABELLA3 è relativa all'offerta di una Turbina:

Fasi di progettazione	Durata Lavoro/Tempo Attesa [giorni]	Costo della Fase [Euro]	Costo Prestazioni Esterne alla Società [Euro]	Costo Prestazioni Interne alla Società [Euro]
<i>Perfezionamento Commessa</i>	3	500,00		500,00
<i>Ingegneria di Base</i>	6	2.200,00		2.200,00
<i>Ingegneria di Dettaglio Asportazione</i>	15	8.400,00		8.400,00
<i>Ingegneria di Dettaglio Carpenteria</i>	6	3.000,00		3.000,00
<i>Ingegneria del Quadro Elettrico</i>	6	3.000,00		3.000,00
<i>Costruzione Membrature Carpenteria</i>	60	7.400,00	7.400,00	
<i>Riesame di Commessa</i>	2	1.500,00		1.500,00
<i>Costruzione per Asportazione</i>	55	3.000,00		3.000,00
<i>Modellazione</i>	30	2.000,00	2.000,00	
<i>Microfusione</i>	30	2.500,00	2.500,00	
<i>Costruzione Girante</i>	30	1.000,00	1.000,00	
<i>Verniciatura Carpenteria</i>	15	800,00	800,00	
<i>Approntamento Quadro Elettrico</i>	60	8.000,00	8.000,00	
<i>Approntamento Generatrice</i>	51	500,00	500,00	
<i>Approntamento Materiali Commerciali</i>	30	1.500,00	1.500,00	
<i>Approntamento Trasmissione</i>	3	200,00		200,00
<i>Premontaggio</i>	1	800,00		800,00
<i>Approntamento Servizi Accessori</i>	-	-		
<i>Smontaggio</i>	1	800,00		800,00
<i>Touch Up</i>	1	100,00		100,00
<i>Trasporto in Centrale</i>	1	500,00	500,00	
Totale	406	47.700,00	24.200,00	23.500,00

TABELLA 3: Offerta economica (Turbina)

La progettazione e l'installazione di una Turbina da 200 l/s viene a costare all'azienda fornitrice 47.700 Euro, dei quali 24.200 sono costi esterni, mentre 23.500 Euro sono costi dovuti a lavori interni alla società. Considerando un ricarico del 36% sulla commessa, la Turbina sarebbe stata venduta all'azienda di Mortara ad un prezzo di 64.870 Euro.

Si noti come i giorni totali di lavoro richiesti siano 406, dei quali, se si tolgono i giorni di attesa (relativi ai lavori sostenuti da altri fornitori, dunque, lavori esterni), 129 giorni di effettivo lavoro

interno. Ciò significa che, se questi 129 giorni sono rispettati e se si considera il prezzo a cui verrebbe venduta la macchina, la società guadagnerà ogni giorno 503 Euro.

La TABELLA4 riassume i dati economici relativi alla progettazione e installazione di una Turbina:

	Costo Lavoro Esterno	Costo Lavoro Interno
	€ 24.200,00	€ 23.500,00
Costo Totale	€ 47.700,00	
Prezzo presentato al Cliente (Ricarico = 36%)	€ 64.872,00	
Redditività al Giorno (Giorni del solo Lavoro Interno = 129)	€ 502,88	

TABELLA 4: Costi di produzione e prezzo presentato al cliente (Turbina)

A questi 64.872 Euro, come nel caso della PAT1, andrebbero aggiunte altre spese che il Cliente deve sostenere per quanto riguarda l'**Approntamento dei servizi accessori**. L'Azienda ASMortara avrebbe dovuto spendere 6.700 Euro per la realizzazione della platea in calcestruzzo, del basamento del quadro elettrico e dei relativi condotti; nonché per l'installazione della tuberia di collegamento della macchina alla vasca di carico e la posa del cono di scarico.

**Spesa Complessiva
del Cliente = € 71.572**

5.4 3° CASO → PAT1 + PAT2

Dal 1° CASO, relativamente all'utilizzo della sola PAT1, si può notare che una certa quantità di portata, non potendo transitare attraverso la PAT1, in quanto superiore al valore massimo cui è stata dimensionata la macchina (100 l/s), viene fatta stramazzone, scaricandola direttamente nel canale. Si tratta, dunque, di potenza non sfruttata. L'azienda ASMortara ha chiesto se sia possibile utilizzare meglio la risorsa idrica inserendo nel circuito di scarico un altro micro-gruppo, sempre azionato da una PAT.

5.4.1 Valutazione del funzionamento

Si è ipotizzato di creare una seconda condotta, che permetterebbe il collegamento tra quella già esistente, che connette la vasca di carico e la PAT1, e una seconda macchina. Questa PAT2 sfrutterebbe in parte le portate in eccesso che non possono transitare nella PAT1.

A partire dai valori di portata disponibile, relativi al 2009, la PAT2 verrebbe dimensionata per una portata pari a 40 l/s e si azionerebbe per un valore minimo pari a 20 l/s. Ciò significa che, affinché si metta in funzione la PAT2, dovranno transitare almeno 120 l/s di portata.

Per meglio comprendere la situazione si esamina la curva di durata (GRAFICO36):

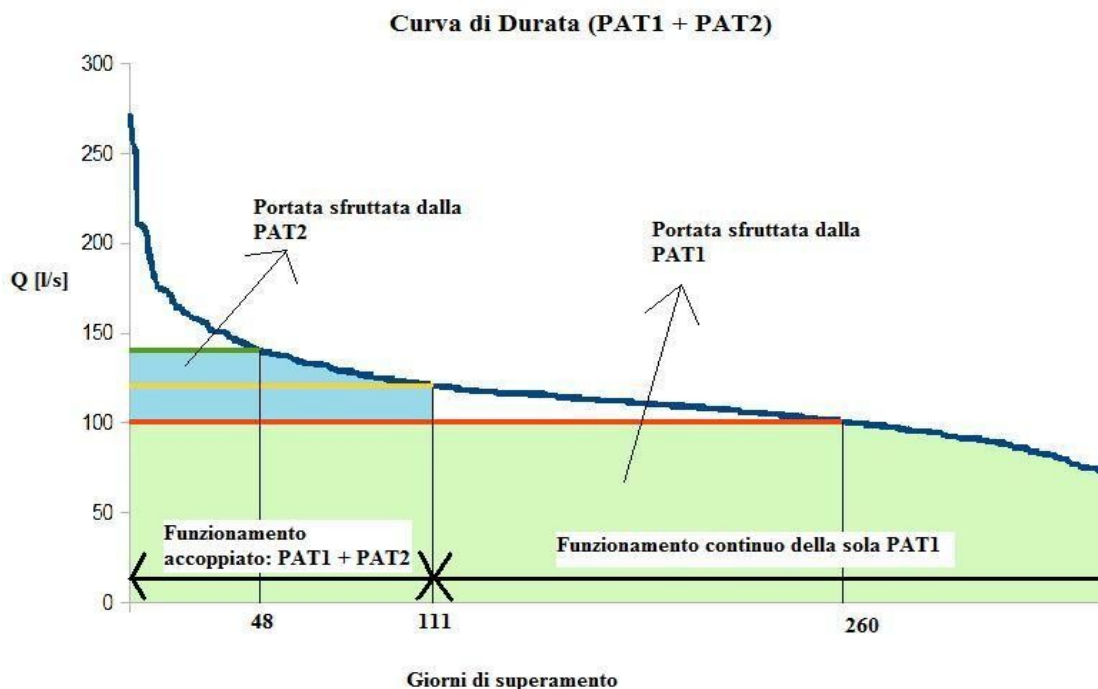


GRAFICO 36: Curva di durata (PAT1+PAT2)

Dallo studio della curva di durata, costruita a partire dai dati acquisiti durante il 2009, si può osservare che le due macchine funzionano contemporaneamente per 111 giorni nell'arco del 2009, lavorano entrambe a regime per il 43% di questo periodo.

Per i restanti 254 giorni dell'anno, invece, la PAT2 non opera, in quanto la portata che transita non è sufficiente a garantire il suo azionamento (soglia minima di funzionamento della PAT2 pari a 120 l/s). Dunque, per questi 254 giorni lavora solo la PAT1 senza interruzioni.

A partire da questi valori di portata, e utilizzando nuovamente le formule per determinare potenza netta ed energia netta, si ottiene:

$$P_N = \frac{\gamma \times g \times H}{1000} \times (Q_{PAT1} \times \eta_{PAT1} + Q_{PAT2} \times \eta_{PAT2})$$

$$E_N = P_N \times 24$$

dove γ è la densità dell'acqua pari a 1000 kg/m³, g è l'accelerazione di gravità pari a 9,81 m/s², H è il salto disponibile pari a 2,85 m, Q_{PAT1} e Q_{PAT2} sono rispettivamente le portate transitanti nelle macchine 1 e 2 espresse in [m³/s] e η_{PAT1} e η_{PAT2} sono i rendimenti delle due macchine, sono rispettivamente del 68% e del 66%.

Quest'ultima assunzione riguardante il rendimento delle due PAT è realistico, in quanto la PAT2 è dimensionata per una portata massima transitabile pari a 40 l/s (molto inferiore al valore cui è stata dimensionata la PAT1: 100 l/s); in conformità con i diagrammi presentati nel capitolo relativo alla selezione della pompa da utilizzare come PAT, la scelta sarebbe ricaduta su di una macchina con velocità specifica V_s più bassa e quindi con un rendimento inferiore; i fattori di conversione, necessari per trasformare i dati relativi al funzionamento della macchina come “pompa” ai dati caratteristici del suo funzionamento come “turbina”, sono in questa analisi preliminare i seguenti :

- fattore conversione salto = 1,3;
- fattore di conversione della portata 1,25;

ciò significa che la pompa da selezionare è contraddistinta dalla portata di 32 l/s e salto di 2,19 m.

Con l'utilizzo del programma di selezione già impiegato per la PAT1 viene individuata la pompa tipo CombiBloc 150-125 da 950 giri/min. Questa macchina sarà installata in parallelo.

I risultati di energia netta prodotta giornalmente durante il 2009, mediante l'utilizzo accoppiato di PAT1 e PAT2, sono riportati nel GRAFICO 37:

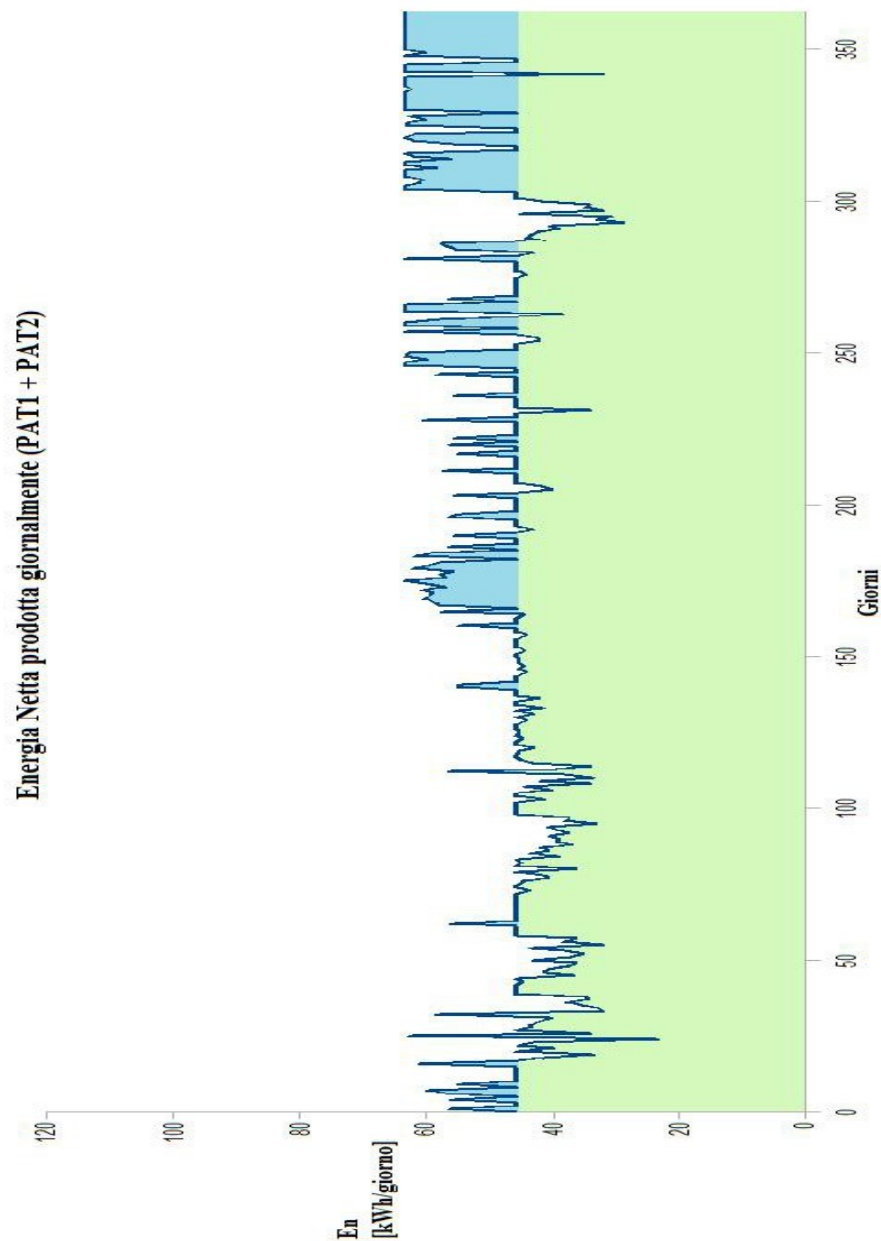


GRAFICO 37: Andamento dell'energia prodotta (PAT1+PAT2)

Come si può notare dal grafico dell'andamento annuale dell'energia netta prodotta, mentre la PAT1 funziona tutto l'anno, la PAT2 si spegnerebbe e riaccenderebbe per ben 20 volte nell'arco del 2009. Questo funzionamento intermittente, come nel caso dell'installazione della Turbina, potrebbe provocare nel tempo dei danni, richiedendo, dunque, maggiori interventi di manutenzione e di controllo.

5.4.2 Analisi economica

La TABELLA5 è relativa all'offerta della PAT2:

Fasi di progettazione	Durata Lavoro/Tempo Attesa [giorni]	Costo della Fase [Euro]	Costo Prestazioni Esterne alla Società [Euro]	Costo Prestazioni Interne alla Società [Euro]
<i>Perfezionamento Commessa</i>	-	-		-
<i>Ingegneria di Base</i>	6	1.320,00		1.320,00
<i>Ingegneria di Dettaglio Asportazione</i>	-	-		
<i>Ingegneria di Dettaglio Carpenteria</i>	6	1.800,00		1.800,00
<i>Ingegneria del Quadro Elettrico</i>	6	210,00		210,00
<i>Costruzione Membrature Carpenteria</i>	60	2.640,00	2.640,00	
<i>Riesame di Commessa</i>	-	-		-
<i>Costruzione per Asportazione</i>	-	-		
<i>Acquisto Pompa</i>	45	1.260,00	1.260,00	
<i>Microfusione</i>	-	-		
<i>Costruzione Girante</i>	-	-		
<i>Verniciatura Carpenteria</i>	15	480,00	480,00	
<i>Integrazione Quadro Elettrico</i>	60	1.000,00	1.000,00	
<i>Approntamento Generatrice</i>	51	250,00	250,00	
<i>Approntamento Materiali Commerciali</i>	30	1.500,00	1.500,00	
<i>Approntamento Trasmissione</i>	3	200,00		200,00
<i>Premontaggio</i>	1	800,00		800,00
<i>Approntamento Servizi Accessori</i>	-	-		
<i>Smontaggio</i>	1	800,00		800,00
<i>Touch Up</i>	1	100,00		100,00
<i>Trasporto in Centrale</i>	1	500,00	500,00	
Totale	286	12.860,00	7.630,00	5.230,00

TABELLA 5: Offerta economica (PAT2)

La progettazione e l'installazione di una PAT2 da 40 l/s viene a costare all'azienda fornitrice 12.860 Euro, dei quali 7.630 sono costi esterni, mentre 5.230 Euro sono costi dovuti a lavori interni alla società. Considerando un ricarico del 36% sulla commessa, la PAT2 verrebbe venduta al cliente a 17.500 Euro.

Si noti come i giorni totali di lavoro richiesti siano 286, dei quali, se si tolgono i giorni di attesa (relativi ai lavori sostenuti da altri fornitori, dunque, lavori esterni), si ottengono 24 giorni di effettivo lavoro interno. Ciò significa che, se i 24 giorni sono rispettati e se si considera il prezzo a cui verrebbe venduta la macchina, la società guadagnerà ogni giorno 730 Euro.

Considerando, dunque, solo l'installazione della PAT2, i costi di lavorazione e il prezzo di vendita sono riassunti nella TABELLA6:

	Costo Lavoro Esterno	Costo Lavoro Interno
	€ 7.630,00	€ 5.230,00
Costo Totale	€ 12.860,00	
Prezzo presentato al Cliente (Ricarico = 36%)	€ 17.489,60	
Redditività al Giorno (Giorni del solo Lavoro Interno = 24)	€ 728,73	

TABELLA 6: Costi di produzione e prezzo presentato al cliente (PAT2)

La situazione in esame però riguarda l'installazione accoppiata di due pompe da usare come PAT. Ai costi relativi alla PAT2 andrebbero quindi aggiunti quelli riguardanti la progettazione della PAT1, già studiati in precedenza.

Per lavorare sul progetto di due PAT, una dimensionata per 100 l/s e l'altra per 40 l/s, l'azienda fornitrice dovrà sostenere spese pari a 39.000 Euro; il prezzo presentato al cliente, sempre assumendo un ricarico del 36%, sarà uguale a 53.120 Euro. Al fine di valutare la redditività giornaliera dell'azienda produttrice, si considera la somma dei giorni di lavoro interno necessari per la PAT1 e per la PAT2: 52 giorni.

Riepilogo economico relativo all'installazione del gruppo PAT1+PAT2 (TABELLA7):

	Costo Lavoro Esterno	Costo Lavoro Interno
	€ 22.430,00	€ 16.630,00
Costo Totale	€ 39.060,00	
Prezzo presentato al Cliente (Ricarico = 36%)	€ 53.121,60	
Redditività al Giorno (Giorni del solo Lavoro Interno = 52)	€ 1.021,57	

TABELLA 7: Costi di produzione e prezzo presentato al cliente (PAT1+PAT2)

Al prezzo di 53.121 Euro che il cliente dovrebbe pagare all'Azienda fornitrice vanno aggiunti i costi relativi alla fase di **Approntamento dei servizi accessori**.

Nel caso dell'accoppiamento PAT1+PAT2 si deve considerare la realizzazione di uno stacco del diametro 150 mm sulla esistente condotta che alimenta la PAT1, l'inserimento di una valvola automatica con azionamento ad aria compressa e l'installazione di un piccolo compressore ad aria per detta valvola. Dal punto di vista dei lavori civili, l'accoppiamento PAT1+PAT2 prevede un'estensione di circa 2 m² della platea. Dal punto di vista del lavoro elettrico e di controllo è necessario inserire una sonda di livello per l'azionamento della valvola pneumatica appena al di sotto del livello di stramazzo dal troppopieno. Ed approntare l'allacciamento elettrico della generatrice di PAT2 in parallelo a quella di PAT1; quindi disponendo nel quadro un nuovo teleruttore ed un nuovo interruttore automatico di sicurezza. Anche il pannello di interfaccia con l'operatore deve essere opportunamente aggiornato con nuove spie per la segnalazione della messa in servizio del secondo gruppo di produzione.

Alla spesa di 53.121 Euro andrebbero dunque aggiunti 9.700 Euro relativamente alla fase di **Approntamento dei servizi accessori**.

**Spesa Complessiva
del Cliente = € 62.821**

5.5 Confronto tra le tipologie di impianto studiate

5.5.1 Funzionamento dell'impianto

Nel “CASO 1” l'impianto è caratterizzato dall'installazione di una PAT dimensionata per portate massime di 100 l/s, e che si aziona quando l'acqua in arrivo è superiore a 60 l/s. Nell'arco del 2009 non ci sono valori giornalieri di portata inferiori a questa soglia minima; ciò significa che la PAT funziona in continuo senza un giorno di spegnimento.

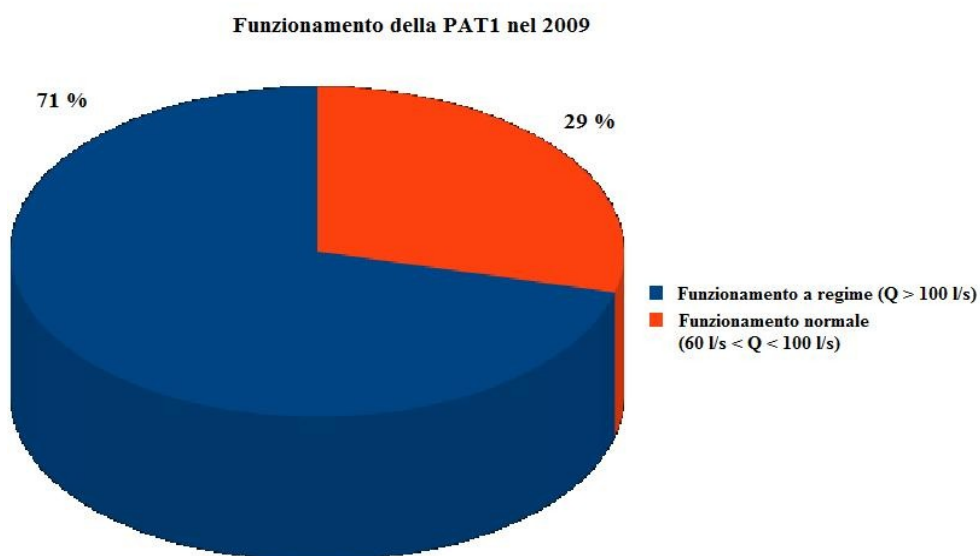


GRAFICO 38: Funzionamento della PAT1 durante l'anno

Nel “CASO 2” la Turbina che si ipotizza di installare presso l'azienda ASMortara è dimensionata per portate di 200 l/s e si aziona per valori superiori a 40 l/s. Come si vede dalla figura seguente, la Turbina, allo stesso modo della PAT1, funziona tutto l'anno.

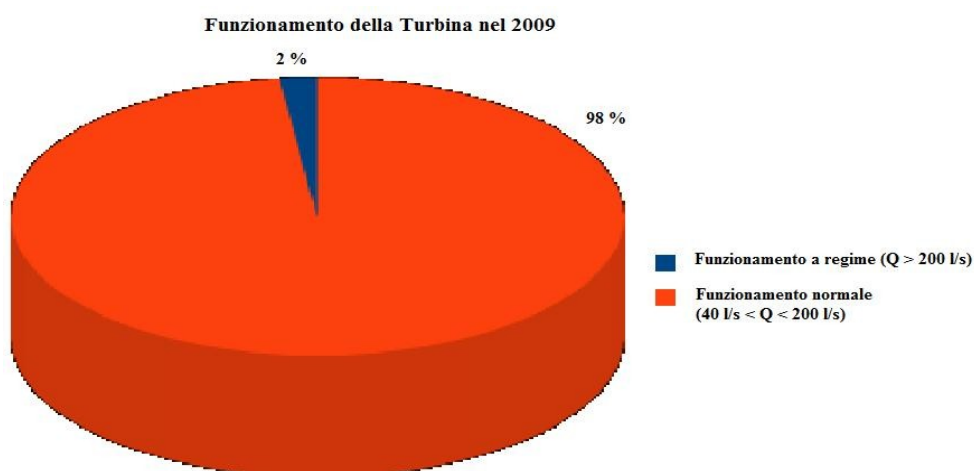


GRAFICO 39: Funzionamento della Turbina durante l'anno

Nel “CASO 3” è stata invece considerata la possibilità di installare, in accoppiamento con la PAT1 descritta nel “CASO1”, una seconda pompa operante come turbina. Questa PAT2, che si ipotizza posizionata a valle dello stramazzo, nel tentativo di sfruttare anche parte di quelle portate cui non è permesso l'ingresso nella PAT1, viene dimensionata per portate massime di 40 l/s e inizia a funzionare quando transitano almeno 20 l/s.

Dunque, affinché sia garantito il funzionamento della PAT2, la portata in arrivo deve essere almeno pari a 120 l/s.

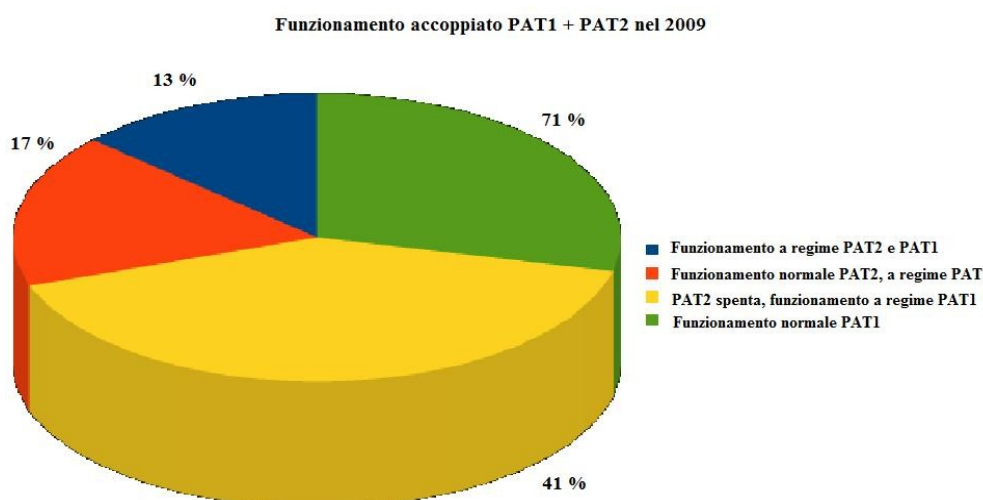


GRAFICO 40: Funzionamento di PAT1+PAT2 durante l'anno

5.5.2 Energia prodotta

I valori di dell'Energia Netta prodotta in un anno sono i seguenti:

1. CASO 1: la PAT1 è in grado di produrre 16.000 kWh di Energia in un anno;
2. CASO 2: la Turbina sarebbe in grado di produrre 22.292 kWh di Energia in un anno;
3. CASO 3: il funzionamento di PAT1 e PAT2 in parallelo garantirebbe la produzione di 17.667 kWh di Energia in un anno.

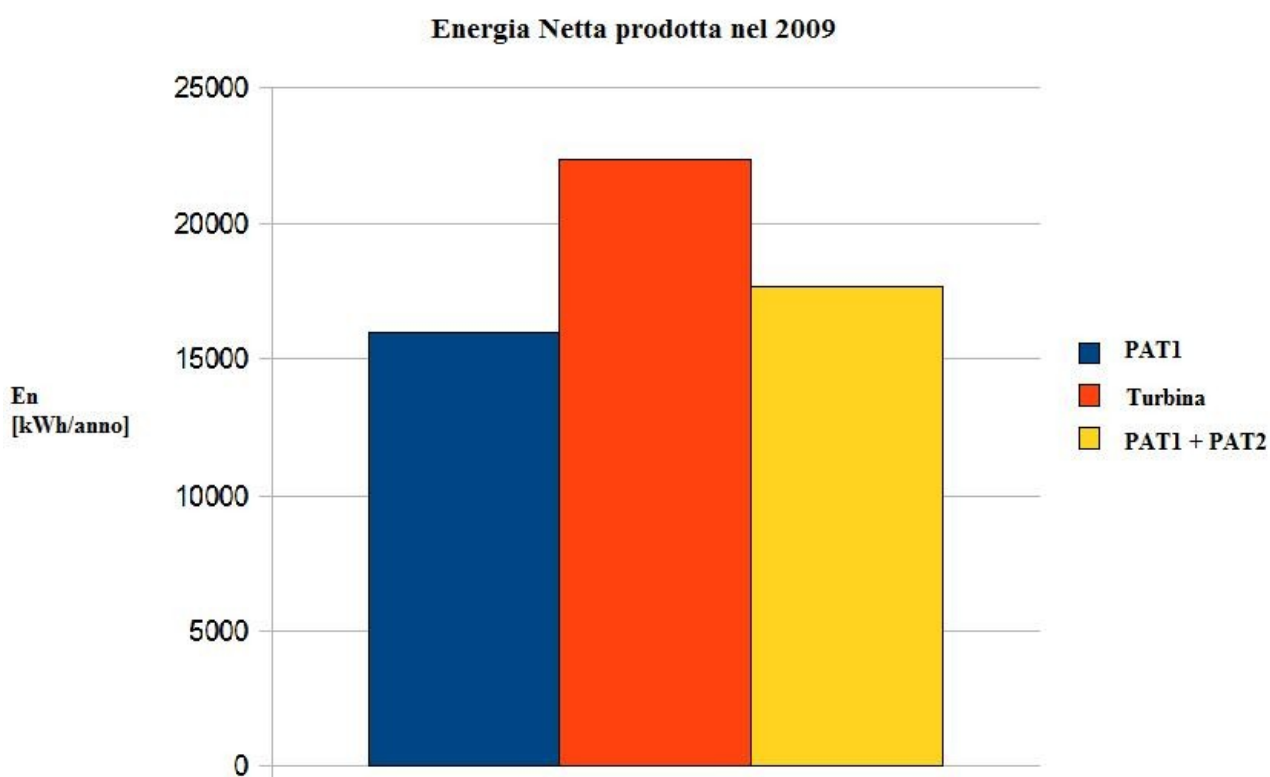


GRAFICO 41: Energia prodotta in un anno dalle diverse tipologie di installazione

5.5.3 Confronto Economico

Nella TABELLA8 si riassumono gli aspetti prettamente economici delle tre installazioni studiate:

	PAT1	Turbina	PAT1 + PAT2
<i>Costo di Produzione relativo solo al Lavoro Interno [Euro]</i>	€ 11.400	€ 23.500	€ 16.630
<i>Costo di Produzione relativo al Lavoro Esterno [Euro]</i>	€ 14.800	€ 24.200	€ 22.430
<i>Costo Totale di Produzione [Euro]</i>	€ 26.200	€ 47.700	€ 39.060
<i>Tempo impiegato per il Lavoro Interno [giorni/uomo]</i>	28	129	52
<i>Prezzo presentato al Cliente [Euro]</i>	€ 35.632	€ 64.872	€ 53.121
<i>Redditività [Euro/giorni di Lavoro Interno]</i>	€ 1.272	€ 503	€ 1.021
<i>Costo Totale sostenuto dal Cliente [Euro]</i>	€ 42.333	€ 71.572	€ 62.821

TABELLA 8: Confronto economico tra le tre tipologie di installazione

Si effettua anche un confronto per quanto riguarda i tempi che impiegherebbe l'azienda ASMortara ad ammortizzare l'investimento fatto. Le informazioni necessarie per effettuare questo tipo di valutazione sono:

- **Periodo di Riferimento.** E' il numero di anni preso in considerazione. Lo studio viene effettuato per un periodo di 30;
- **Energia Netta prodotta in un anno;**
- **Costo di 1 kWh.** Prezzo che il gestore dell'energia paga all'azienda ASMortara per ogni kWh prodotto;
- **Investimento iniziale;**
- **Spese annuali di Gestione e di Manutenzione.** In base all'esperienza relativa ad impianti simili a quelli studiati, si assume un incidenza pari all'1% dell'investimento totale;
- **Tasso di Attualizzazione.** Parametro che tiene conto del fatto che ogni anno c'è il rischio che venga prodotta meno energia rispetto all'anno precedente. Si tratta di un dato a favore di sicurezza. I calcoli sono stati effettuati per due valori di questo Tasso: 2% e 5%.

	PAT1	Turbina	PAT1 + PAT2
Periodo di Riferimento [anni]	30	30	30
Energia Netta prodotta in 1 anno [kWh]	16.000	22.292	17.667
Costo di 1 kWh [Euro] (primi 15 anni)	0,22	0,22	0,22
Costo di 1 kWh [Euro] (dal 16° anno)	0,06	0,06	0,06
Investimento iniziale [Euro]	42.333	71.572	62.821
Spese annuali di Gestione e Manutenzione [Euro]	423,33	715,72	628,21
Tasso di Attualizzazione	0,02 – 0,05	0,02 – 0,05	0,02 – 0,05

TABELLA 9: Dati utilizzati per valutare il tempo di ritorno dell'investimento

Il flusso attualizzato dell'anno j-esimo è dato dalla seguente formula:

$$F_j = \frac{(B_j - C_j)}{(1 + i)^j}$$

dove B_j e C_j sono rispettivamente il beneficio e la spesa che si sono avuti nell'anno j -esimo, i è il tasso di attualizzazione. Il flusso attualizzato, cumulato anno per anno, presenta l'andamento visualizzato nel GRAFICO42 e nel GRAFICO 43.

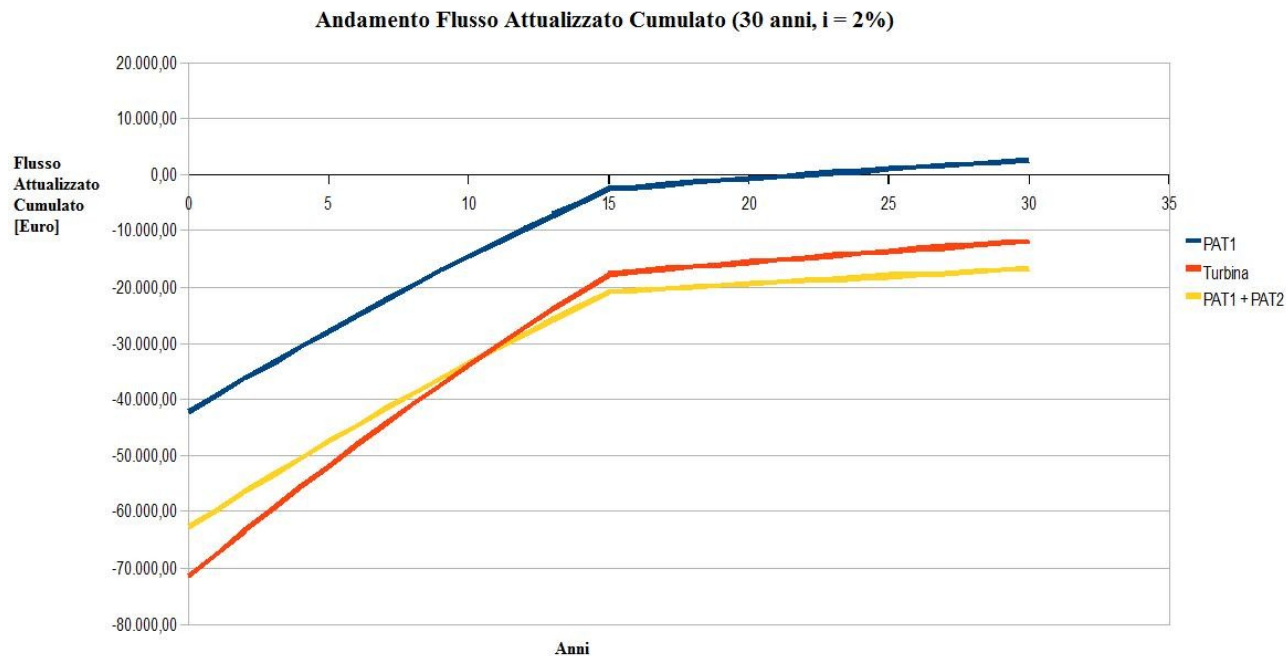


GRAFICO 42: Andamento del flusso attualizzato cumulato (30 anni, $i=2\%$)

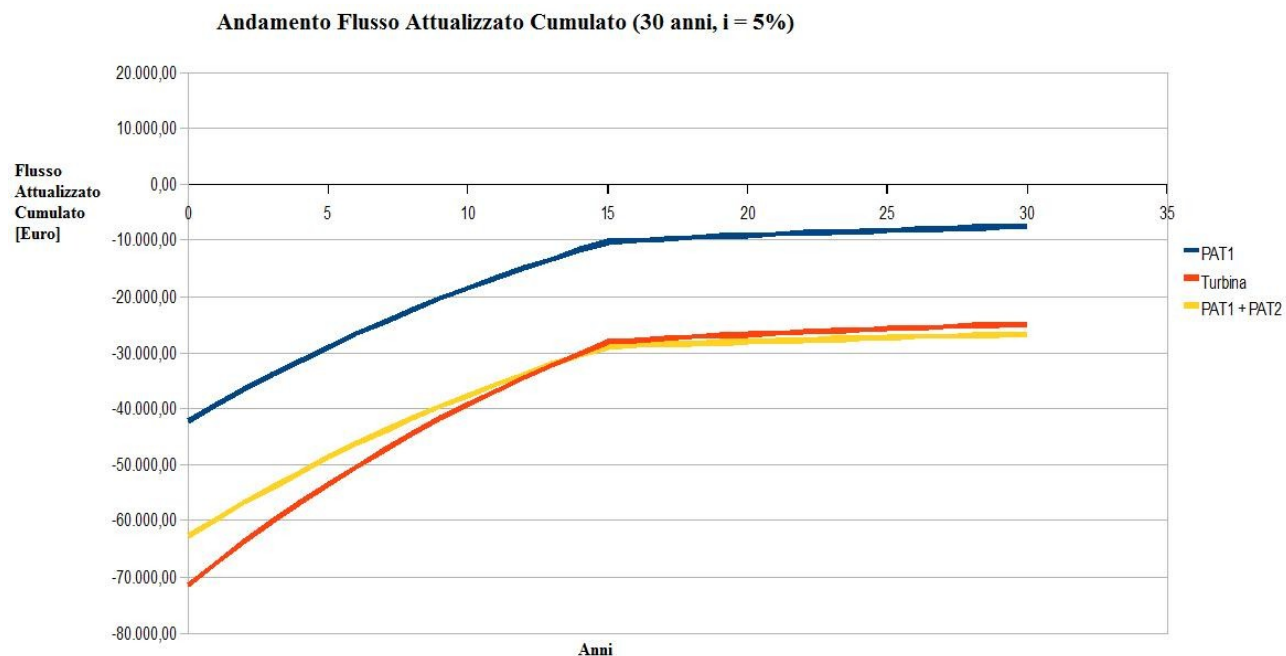


GRAFICO 43: Andamento del flusso attualizzato cumulato (30 anni, $i=5\%$)

Il valore del Flusso Attualizzato Cumulato alla fine del periodo di tempo prende il nome di Valore Attuale Netto (VAN). Questo parametro indica qual'è il guadagno dell'azienda ASMortara dopo 30 anni dall'investimento. In TABELLA10 sono riportati i valori del VAN.

	PAT1	Turbina	PAT1 + PAT2
VAN (i = 2%) [Euro]	2.580,62	-11.816,16	-16.828,72
VAN (i = 5%) [Euro]	-7.511,14	-24.992,08	-26.842,63

TABELLA 10: Valore attuale netto

Se invece si vuole sapere dopo quanti anni è stato recuperato l'investimento, occorre osservare nel grafico precedente in quale anno il Flusso Attualizzato Cumulato si annulla, trovando i seguenti risultati (considerando un Tasso di Attualizzazione del 2%):

- PAT1: l'investimento iniziale verrà recuperato dopo 21 anni;
- Turbina: il recupero dell'investimento avviene dopo 88 anni;
- PAT1+PAT2: per questa situazione il tempo necessario per recuperare la spesa iniziale sostenuta dal cliente sarebbe troppo elevato. Al fine di ottenere un tempo di ritorno accettabile, si potrebbe effettuare nuovamente tutti i calcoli assumendo un Tasso di Attualizzazione di molto inferiore al 2%; ma, operare in questo modo significa dare praticamente per scontato che il micro-impianto idroelettrico, che si andrebbe ad installare, funzionerà senza particolari problemi e produrrà sempre la stessa quantità di energia (assunzione troppo a sfavore di sicurezza).

5.6 *Riflessioni conclusive*

L'installazione della **PAT1**, che funziona da quasi un anno presso l'impianto di depurazione ASMortara, ha richiesto un investimento da parte del cliente di **42.333 Euro**. La macchina è in grado di **funzionare per tutto l'anno**, senza interruzioni, le quali, spesso possono causare il progressivo logoramento della pompa; in tal caso sarebbero necessari maggiori livelli di manutenzione e di controllo, con conseguente aumento dei costi di gestione.

Questa pompa è stata dimensionata per portate massime di 100 l/s; si tratta di un dato a sfavore di questo tipo di installazione, in quanto tutte le portate che non riescono ad entrare nella macchina risultano in eccesso, venendo dunque scaricate direttamente nel canale, e, come già detto, ciò accade per 260 giorni all'anno. Si tratta, dunque, di Energia non sfruttata.

Facendo riferimento ai dati di portata disponibile relativi al 2009, si ha che la PAT1 garantisce la produzione di **16.000 kWh di Energia** all'anno. Questo valore di recupero energetico può essere monetizzato, trasformandolo in guadagno per l'azienda ASMortara; considerando che il costo di 1 kWh è pari a 0,22 Euro per i primi 15 anni e 0,06 Euro per quelli successivi, e che le spese di manutenzione e di gestione si assumono annualmente pari all'1% della spesa iniziale, risulta che l'investimento di 42.333 Euro che la Società ha sostenuto viene recuperato dopo **21 anni** (con **Tasso di Attualizzazione pari al 2%**) e, proseguendo questo tipo di analisi è stato osservato che, al termine di un periodo pari a **30 anni**, l'Azienda ASMortara avrebbe inoltre guadagnato **2.580 Euro**.

L'analisi di convenienza, per quanto riguarda l'installazione della PAT1, può essere effettuata anche dal punto di vista del fornitore. Il periodo di tempo impiegato dalla Società per progettare e mettere in funzione un impianto di questo tipo è pari a **290 giorni**, dei quali **28 di lavoro interno** (inteso come lavoro compiuto da un solo uomo); sulla base di questa durata del lavoro interno viene valutata la Redditività giornaliera, cioè il guadagno netto ottenuto dalla Società per ogni giorno lavorativo, ottenendo un valore pari a **1.272 Euro**.

Relativamente all'installazione di una **Turbina** da 200 l/s, il cliente avrebbe dovuto investire inizialmente **71.572 Euro**. Come per la PAT1, anche questa macchina **funzionerebbe tutto l'anno**, considerando sempre i dati raccolti durante il 2009, in quanto si azionerebbe per portate superiori alla soglia di 40 l/s (questo valore di portata disponibile è sempre garantito).

Questa Turbina, che garantirebbe lo sfruttamento della Potenza di portate fino a 200 l/s, sarebbe in grado di produrre **22.292 kWh di Energia** all'anno. Questo valore, superiore a ciò che viene

prodotto dalle PAT1, è dovuto al fatto che si tratta di una macchina che lavora ad elevato rendimento, pari all'80%.

Seguendo l'analisi effettuata per la PAT1, si conclude che la spesa iniziale del cliente verrebbe recuperata dopo **88 anni** (Tasso di Attualizzazione pari a 2%); infatti, dopo un periodo di **30 anni**, la Società dovrebbe ancora recuperare **11.816 Euro**.

Questa seconda tipologia di installazione avrebbe richiesto, da parte della Società fornitrice, un periodo di tempo di lavoro pari a **406 giorni**, dei quali **129 di lavoro effettivo interno**. A partire da questo valore di durata, e considerando il prezzo a cui sarebbe stato venduto al cliente l'impianto progettato, si ottiene una Redditività giornaliera pari a **503 Euro**.

La progettazione di una **PAT2** da accoppiare in parallelo alla PAT1, già in funzione, richiederebbe un investimento da parte del cliente di **62.821 Euro**. Ma, mentre la PAT1, come sostenuto in precedenza, funziona tutto l'anno, la seconda macchina, che sarebbe dimensionata per un massimo di 40 l/s, si azionerebbe per un periodo molto limitato, pari a **111 giorni** nell'arco dell'anno. Nelle analisi fatte in questo capitolo, si è osservato, che la PAT2 **si azionerebbe/spegnerebbe per 20 volte** durante l'anno. Ciò comporterebbe un aumento dei costi di manutenzione, in quanto una macchina che funziona ad intermittenza risulterebbe maggiormente soggetta a danni.

Il funzionamento accoppiato PAT1 + PAT2 permetterebbe la produzione di **17.667 kWh di Energia** all'anno. Un valore non molto più elevato rispetto a quello ottenuto dalla sola PAT1; questo perché la PAT2, essendo una macchina piccola, sarebbe caratterizzata da un rendimento del 66%, poco più basso del 68% della PAT1.

Come si può osservare dai calcoli effettuati, la spesa sostenuta inizialmente dal cliente per la progettazione e l'installazione di un impianto caratterizzato dal funzionamento in parallelo delle due macchine PAT1 + PAT2, non verrebbe recuperata nell'arco di **30 anni**, periodo al termine del quale l'Azienda, per tornare al pari col bilancio economico, dovrebbe ancora guadagnare **16.828 Euro**. Ciò è indice della non convenienza di questa tipologia di installazione: alta spesa iniziale e bassi guadagni futuri.

Come già visto, per la progettazione della PAT1 sono stati necessari 28 giorni di lavoro interno; a questo periodo vanno aggiunti altri 24 giorni di lavoro interno, che sarebbero richiesti per l'installazione del secondo micro-gruppo (PAT2) in parallelo al primo, ottenendo un totale di **52 giorni di effettivo lavoro interno**. Ciò determinerebbe una Redditività giornaliera pari a **1.021 Euro**.

	PAT1	Turbina	PAT1 + PAT2
Costo del Lavoro Interno [Euro]	11.400	23.500	16.630
Durata del Lavoro Interno [giorni]	28	129	52
Investimento Iniziale [Euro]	42.333	71.572	62.821
Redditività Giornaliera [Euro]	1.272	503	1.021
Funzionamento nell'Anno [giorni]	365	365	PAT1 → 365 PAT2 → 111
Energia prodotta all'Anno [kWh]	16.000	22.292	17.667
Tr dell'Investimento (i = 2%) [anni]	21	88	-
Guadagno dopo 30 anni (i = 2%) [Euro]	2.580	-11.816	-16.828

TABELLA 11: Riassunto dei risultati ottenuti

Nella TABELLA11 è posto in evidenza che, dal punto di vista economico, sia per il cliente che per la Società fornitrice, risulta più conveniente procedere con la progettazione di un micro-impianto idroelettrico che preveda l'utilizzo di una PAT1, come effettivamente è stato fatto.

La Turbina garantisce un'elevata produzione di Energia, ma non abbastanza per permettere ad ASMortara di recuperare in tempi contenuti l'investimento iniziale.

Per quanto riguarda la progettazione delle due macchine accoppiate PAT1+PAT2, non può essere riportato alcun dato in favore di tale tipologia di installazione. L'investimento iniziale è troppo elevato rispetto alla quantità di energia prodotta. Situazione non accettabile.

ALLEGATO A

Schema dell'Impianto

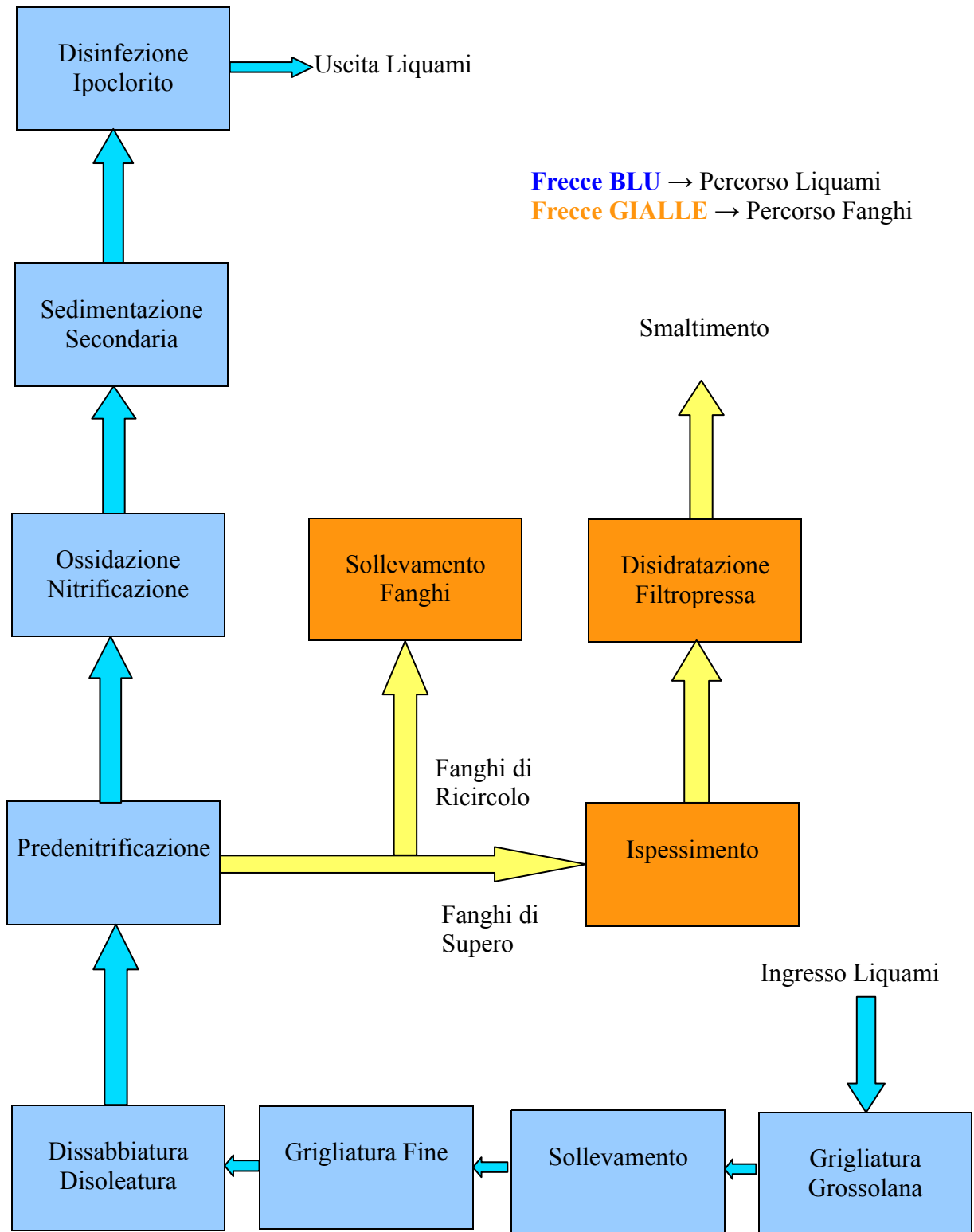




FIGURA 15: Disegno dell'impianto di depurazione di Mortara visto dall'alto

ALLEGATO B

Immagini della PAT installata presso l'Impianto di Depurazione ASMortara

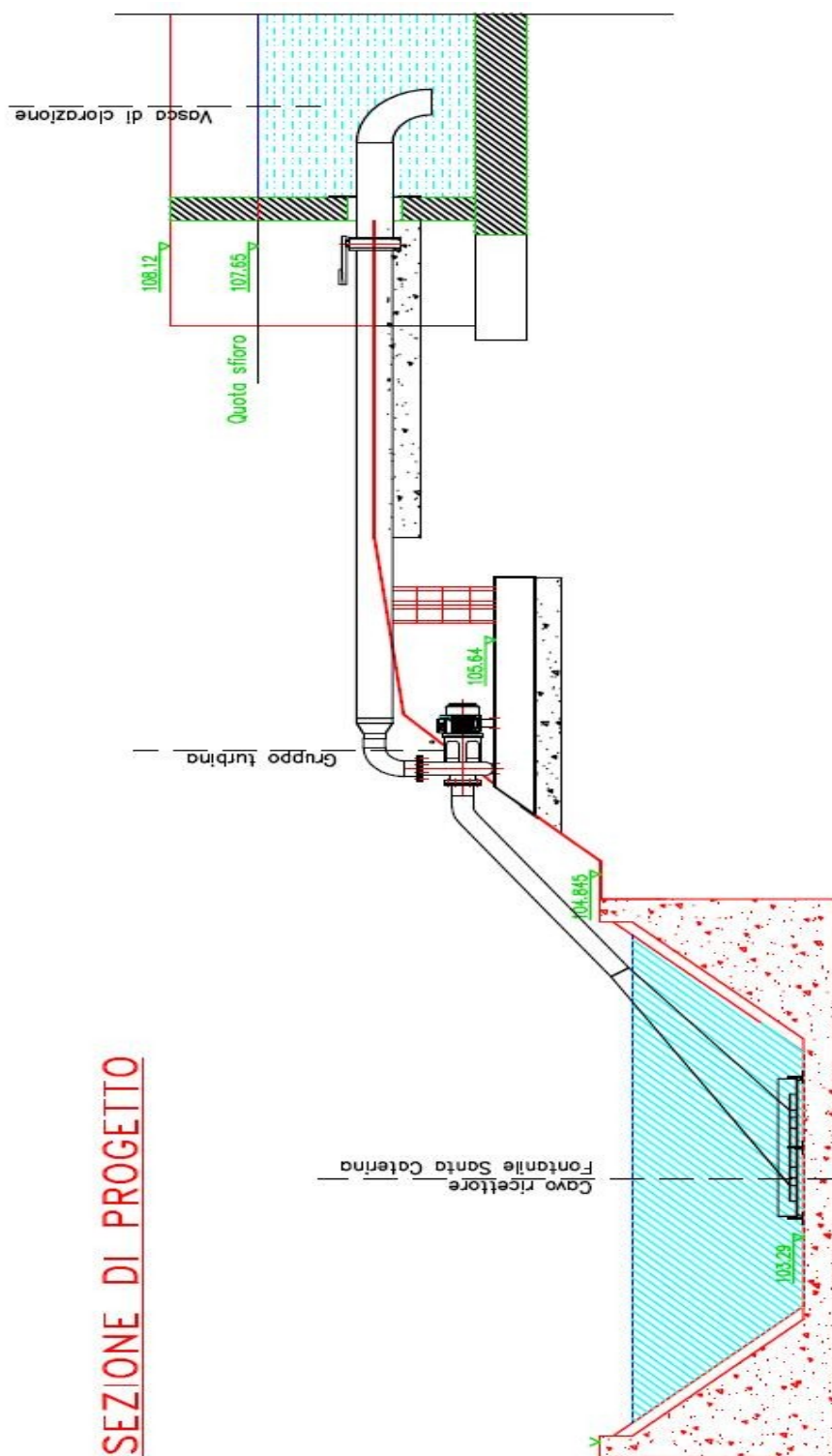


FIGURA 16: Sezione di progetto del micro-impianto idroelettrico installato a Mortara



FOTO 10: La pompa durante la lavorazione in officina



FOTO 11: La pompa durante la lavorazione in officina



FOTO 12: PAT installata presso l'impianto di Mortara



FOTO 13: PAT installata presso l'impianto di Mortara



FOTO 14: PAT installata presso l'impianto di Mortara



FOTO 15: Quadro elettrico della PAT installata presso l'impianto di Mortara

ALLEGATO C

Valori di Portata disponibile acquisiti nel 2009

Gorno	Q _{regatura} [l/s]	Gorno	Q _{regatura} [l/s]	Gorno	Q _{regatura} [l/s]
01/01/2009	109,66	03/03/2009	107,73	03/05/2009	103,61
02/01/2009	123,55	04/03/2009	123,23	04/05/2009	98,13
03/01/2009	119,99	05/03/2009	102,04	05/05/2009	108,21
04/01/2009	114,58	06/03/2009	119,39	06/05/2009	98,98
05/01/2009	122,95	07/03/2009	112,88	07/05/2009	108,70
06/01/2009	115,86	08/03/2009	112,81	08/05/2009	106,00
07/01/2009	125,76	09/03/2009	111,86	09/05/2009	100,42
08/01/2009	132,12	10/03/2009	110,10	10/05/2009	96,31
09/01/2009	116,49	11/03/2009	109,79	11/05/2009	107,50
10/01/2009	120,66	12/03/2009	107,60	12/05/2009	94,11
11/01/2009	113,44	13/03/2009	100,91	13/05/2009	102,33
12/01/2009	116,84	14/03/2009	107,06	14/05/2009	91,02
13/01/2009	111,63	15/03/2009	95,43	15/05/2009	104,02
14/01/2009	108,66	16/03/2009	100,94	16/05/2009	104,87
15/01/2009	106,88	17/03/2009	99,83	17/05/2009	92,14
16/01/2009	116,03	18/03/2009	97,89	18/05/2009	101,15
17/01/2009	134,83	19/03/2009	88,98	19/05/2009	116,04
18/01/2009	110,29	20/03/2009	90,59	20/05/2009	118,14
19/01/2009	90,90	21/03/2009	101,61	21/05/2009	120,03
20/01/2009	73,65	22/03/2009	79,27	22/05/2009	120,01
21/01/2009	105,23	23/03/2009	102,71	23/05/2009	109,48
22/01/2009	87,43	24/03/2009	98,75	24/05/2009	113,36
23/01/2009	99,70	25/03/2009	101,20	25/05/2009	107,26
24/01/2009	94,80	26/03/2009	85,56	26/05/2009	96,48
25/01/2009	51,22	27/03/2009	95,39	27/05/2009	99,61
26/01/2009	137,64	28/03/2009	88,78	28/05/2009	97,75
27/01/2009	74,25	29/03/2009	91,83	29/05/2009	99,27
28/01/2009	105,54	30/03/2009	80,76	30/05/2009	99,11
29/01/2009	94,95	31/03/2009	85,53	31/05/2009	105,31
30/01/2009	94,95	01/04/2009	85,69	01/06/2009	117,56
31/01/2009	90,98	02/04/2009	88,43	02/06/2009	97,27
01/02/2009	88,21	03/04/2009	81,89	03/06/2009	107,92
02/02/2009	128,34	04/04/2009	85,98	04/06/2009	113,85
03/02/2009	70,29	05/04/2009	89,35	05/06/2009	117,36
04/02/2009	71,48	06/04/2009	72,44	06/06/2009	104,20
05/02/2009	77,58	07/04/2009	83,44	07/06/2009	96,38
06/02/2009	82,19	08/04/2009	81,82	08/06/2009	113,88
07/02/2009	75,90	09/04/2009	108,28	09/06/2009	118,53
08/02/2009	75,22	10/04/2009	104,80	10/06/2009	120,49
09/02/2009	111,24	11/04/2009	115,32	11/06/2009	110,72
10/02/2009	105,42	12/04/2009	101,55	12/06/2009	105,59
11/02/2009	107,43	13/04/2009	104,64	13/06/2009	110,54
12/02/2009	105,09	14/04/2009	90,58	14/06/2009	97,58
13/02/2009	98,55	15/04/2009	106,06	15/06/2009	126,55
14/02/2009	102,31	16/04/2009	103,98	16/06/2009	109,18
15/02/2009	80,56	17/04/2009	88,25	17/06/2009	127,96
16/02/2009	89,88	18/04/2009	97,29	18/06/2009	129,27
17/02/2009	89,57	19/04/2009	74,57	19/06/2009	132,56
18/02/2009	82,42	20/04/2009	91,98	20/06/2009	131,28
19/02/2009	79,17	21/04/2009	73,77	21/06/2009	129,97
20/02/2009	94,49	22/04/2009	82,92	22/06/2009	133,55
21/02/2009	82,01	23/04/2009	124,12	23/06/2009	125,89
22/02/2009	76,70	24/04/2009	86,79	24/06/2009	132,07
23/02/2009	83,23	25/04/2009	74,06	25/06/2009	142,19
24/02/2009	94,77	26/04/2009	94,97	26/06/2009	125,81
25/02/2009	70,61	27/04/2009	98,47	27/06/2009	127,48
26/02/2009	83,52	28/04/2009	108,48	28/06/2009	122,62
27/02/2009	79,20	29/04/2009	99,81	29/06/2009	136,69
28/02/2009	102,63	30/04/2009	99,40	30/06/2009	131,69
01/03/2009	109,13	01/05/2009	94,03	01/07/2009	127,93
02/03/2009	110,74	02/05/2009	101,33	02/07/2009	117,70

TABELLA 12: Dati di portata disponibile acquisiti nel 2009 (parte 1)

Giorno	Q _{fognatura} [l/s]	Giorno	Q _{fognatura} [l/s]	Giorno	Q _{fognatura} [l/s]
03/07/2009	135,81	02/09/2009	119,62	02/11/2009	171,59
04/07/2009	130,74	03/09/2009	116,16	03/11/2009	135,10
05/07/2009	111,91	04/09/2009	173,94	04/11/2009	133,87
06/07/2009	123,90	05/09/2009	140,19	05/11/2009	173,43
07/07/2009	119,88	06/09/2009	132,01	06/11/2009	163,68
08/07/2009	112,59	07/09/2009	142,38	07/11/2009	143,97
09/07/2009	112,36	08/09/2009	138,65	08/11/2009	128,70
10/07/2009	122,50	09/09/2009	109,05	09/11/2009	150,02
11/07/2009	119,59	10/09/2009	117,00	10/11/2009	164,03
12/07/2009	94,09	11/09/2009	104,20	11/11/2009	123,67
13/07/2009	112,65	12/09/2009	91,99	12/11/2009	137,08
14/07/2009	117,56	13/09/2009	92,73	13/11/2009	140,65
15/07/2009	113,15	14/09/2009	119,27	14/11/2009	116,15
16/07/2009	124,20	15/09/2009	150,03	15/11/2009	111,74
17/07/2009	120,56	16/09/2009	102,74	16/11/2009	123,07
18/07/2009	118,48	17/09/2009	145,63	17/11/2009	136,60
19/07/2009	114,03	18/09/2009	147,65	18/11/2009	155,79
20/07/2009	113,69	19/09/2009	128,32	19/11/2009	137,18
21/07/2009	115,74	20/09/2009	115,22	20/11/2009	119,57
22/07/2009	117,93	21/09/2009	83,82	21/11/2009	103,39
23/07/2009	122,12	22/09/2009	155,87	22/11/2009	138,82
24/07/2009	116,00	23/09/2009	146,26	23/11/2009	138,97
25/07/2009	87,80	24/09/2009	142,78	24/11/2009	132,75
26/07/2009	90,97	25/09/2009	101,48	25/11/2009	137,70
27/07/2009	116,93	26/09/2009	124,20	26/11/2009	117,15
28/07/2009	113,80	27/09/2009	101,94	27/11/2009	150,32
29/07/2009	115,10	28/09/2009	109,09	28/11/2009	156,75
30/07/2009	116,13	29/09/2009	104,70	29/11/2009	157,29
31/07/2009	126,00	30/09/2009	109,40	30/11/2009	144,62
01/08/2009	115,31	01/10/2009	109,05	01/12/2009	171,27
02/08/2009	110,52	02/10/2009	105,19	02/12/2009	150,51
03/08/2009	115,37	03/10/2009	111,92	03/12/2009	158,31
04/08/2009	116,61	04/10/2009	96,92	04/12/2009	137,41
05/08/2009	115,05	05/10/2009	107,94	05/12/2009	149,95
06/08/2009	120,76	06/10/2009	111,20	06/12/2009	151,68
07/08/2009	116,67	07/10/2009	111,16	07/12/2009	157,64
08/08/2009	115,50	08/10/2009	107,20	08/12/2009	210,42
09/08/2009	123,67	09/10/2009	141,38	09/12/2009	69,79
10/08/2009	115,53	10/10/2009	110,09	10/12/2009	146,93
11/08/2009	122,44	11/10/2009	94,53	11/12/2009	158,66
12/08/2009	112,15	12/10/2009	121,70	12/12/2009	145,15
13/08/2009	109,31	13/10/2009	124,79	13/12/2009	110,19
14/08/2009	110,57	14/10/2009	126,97	14/12/2009	115,73
15/08/2009	113,21	15/10/2009	90,43	15/12/2009	151,53
16/08/2009	103,32	16/10/2009	96,90	16/12/2009	132,81
17/08/2009	132,69	17/10/2009	95,42	17/12/2009	160,97
18/08/2009	111,84	18/10/2009	93,09	18/12/2009	174,42
19/08/2009	116,06	19/10/2009	85,64	19/12/2009	176,17
20/08/2009	74,64	20/10/2009	88,50	20/12/2009	166,03
21/08/2009	118,08	21/10/2009	63,11	21/12/2009	163,48
22/08/2009	115,24	22/10/2009	72,14	22/12/2009	180,36
23/08/2009	105,30	23/10/2009	67,20	23/12/2009	209,19
24/08/2009	112,59	24/10/2009	98,39	24/12/2009	209,59
25/08/2009	122,33	25/10/2009	70,15	25/12/2009	194,54
26/08/2009	115,74	26/10/2009	76,59	26/12/2009	204,48
27/08/2009	111,94	27/10/2009	74,75	27/12/2009	186,09
28/08/2009	111,59	28/10/2009	91,12	28/12/2009	271,90
29/08/2009	111,60	29/10/2009	103,24	29/12/2009	250,31
30/08/2009	106,85	30/10/2009	106,81	30/12/2009	257,18
31/08/2009	107,12	31/10/2009	103,22		
01/09/2009	128,04	01/11/2009	160,96		

TABELLA 13: Dati di portata disponibile acquisiti nel 2009 (parte 2)

BIBLIOGRAFIA

Chapallaz J. M., *Manual on pumps used as turbine*, Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien GATE, Eschborn 1992.

Medici M., *LE POMPE – descrizione, teoria, progettazione, costruzione, montaggio, installazione, collaudo, regolazione, utilizzazioni – Pompe a funzionamento reversibile, le pompe-turbine*, Padova 1967.

Zappa G., *Le pompe centrifughe – calcolo e costruzione*, Milano 1931.

Casci C., *Macchine a fluido incomprimibile*, Milano 1983.

Bianchi A., Sanfilippo U., *Pompe e impianti di sollevamento – manuale di progettazione e realizzazione*, Milano 2001.

Pagani E., *Studio preliminare tecnico-economico degli impianti idroelettrici in serie sul canale Codogna*, Tesi di Laurea 2005.

Rossi C., *Valutazione della trattabilità biologica dei rifiuti liquidi alimentati all'impianto di Mortara (PV)*, Tesi di Laurea 2009.