

TITLE:

AVAILABLE LANGUAGE: IT

**IMPIANTO DI VALCIMARRA II**  
Installazione di un nuovo gruppo reversibile  
Centrale di Valcimarra  
Comune di Caldarola (MC)

Progetto Definitivo per Autorizzazione  
**RELAZIONE IDRAULICA**

File: GRE.EEC.D.99.IT.H.17168.00.003.00 Relazione Idraulica.docx

REV.	DATE	DESCRIPTION	PREPARED	VERIFIED	APPROVED
01	04/09/2023	Seconda Emissione	J. Vögele C. Piccinin	F. Maugliani A. Balestra	M. Braghini
00	04/03/2022	Prima Emissione	J. Vögele C. Piccinin	F. Maugliani A. Balestra	M. Braghini

**GRE VALIDATION**

	Support Team: <i>F.PODIO</i>	Project Engineer: <i>G.RIPELLINO</i>
COLLABORATORS	VERIFIED BY	VALIDATED BY

PROJECT / PLANT

**GRE CODE**

ANAPO

GROUP	FUNCIÓN	TYPE	ISSUER	COUNTRY	TEC	PLANT	SYSTEM	PROGRESSIVE	REVISION
GRE	EEC	D	9 9	I T H	1 7	1 6 8	0 0	0 0 3	0 1

CLASSIFICATION PUBLIC

UTILIZATION SCOPE PROGETTO DEFINITIVO PER AUTORIZZAZIONE

*This document is property of Enel Green Power S.p.A. It is strictly forbidden to reproduce this document, in whole or in part, and to provide to others any related information without the previous written consent by Enel Green Power S.p.A.*

R.01	04.09.2023	VJ/PCap/MFr	MFr/Bal
R.00	04.03.2022	VJ/PCap	MFr/Bal
<b>Versione</b>	<b>Data</b>	<b>Redatto</b>	<b>Verificato</b>

**Lombardi SA** Ingegneri Consulenti  
Via del Tiglio 2, C.P. 934, CH-6512 Bellinzona-Giubiasco  
Telefono +41(0)91 735 31 00  
www.lombardi.group, info@lombardi.group

## INDICE

1.	INTRODUZIONE	1
1.1	Contesto generale e scopo del lavoro	1
1.2	Documenti analizzati	2
1.2.1	Documentazione dataroom Enel	2
1.2.2	Completezza dei dati	2
1.2.3	Riferimenti bibliografici	2
2.	DESCRIZIONE DELLE OPERE ESISTENTI	3
2.1	Lo schema idraulico dell'impianto di Valcimarra	3
2.2	Diga del Fiastrone e relativa derivazione	3
2.3	Diga di Polverina e relativa derivazione	6
2.4	Centrale di Valcimarra	8
2.5	Gruppi di produzione	10
2.5.1	Derivazione Fiastrone:	10
2.5.2	Derivazione Polverina:	10
2.6	Canali di scarico	11
3.	CARATTERISTICHE DEI SERBATOI	13
3.1	Serbatoio del Fiastrone	13
3.1.1	Dati FCEM	13
3.1.2	Prescrizioni di esercizio intervenute sulle due dighe	16
3.1.3	Dati contenuti nel Piano di Gestione dei Sedimenti	17
3.1.4	Dati storici di livello	18
3.2	Serbatoio di Polverina	19
3.2.1	Dati FCEM	19
3.2.2	Prescrizioni di esercizio intervenute in seguito	22
3.2.3	Dati contenuti nel Piano di Gestione dei Sedimenti	22
3.2.4	Dati storici di livello	23
4.	DIMENSIONAMENTO IDRAULICO DEL NUOVO GRUPPO DI POMPAGGIO	25
4.1	Descrizione dell'intervento	25
4.2	Criteri di dimensionamento idraulico	25

4.3	Calcolo delle Perdite di Carico	27
4.3.1	Introduzione	27
4.3.2	Perdite distribuite	27
4.3.3	Perdite tipologiche concentrate	28
4.4	Valutazione analitica delle perdite di carico	33
4.4.1	Derivazione Fiastrone	34
4.4.2	Derivazione Polverina	37
4.4.3	Sintesi sulle perdite calcolate	39
4.5	Analisi di sensitività sui livelli nei pozzi piezometrici	40
4.5.1	Condizioni stazionarie	40
4.5.2	Condizioni transitorie	40
4.6	Perdite idrauliche e potenza del nuovo gruppo reversibile	45
4.6.1	Valutazione delle Perdite di carico in fase di turbinaggio	46
4.6.2	Valutazione delle Perdite di carico in fase di pompaggio	46
4.7	Potenza dell'impianto	46
4.8	Verifiche idrauliche e strutturali con l'impianto modificato	47
4.8.1	Introduzione	47
4.8.2	Linee piezometriche in moto stazionario	47
4.8.3	Sommergenza dell'Opera di Presa	49
4.8.4	Transitori nel pozzo sulla derivazione Fiastrone	49
4.8.5	Transitori nel pozzo piezometrico sulla derivazione Polverina	50
4.8.6	Sollecitazioni dovute al Colpo d'Ariete	51
4.8.7	Considerazioni sulla fatica strutturale nelle condotte forzate	53
4.9	Sviluppi progettuali in sede di Progetto Definitivo per appalto	57
4.9.1	Modifica del pozzo piezometrico	57
4.9.2	Affinamento del dimensionamento della macchina idraulica	58
4.9.3	Cambiamento del tipo di regolazione	59
5.	CONCLUSIONI	60

## INDICE DELLE FIGURE

<b>Figura 1:</b> Impianto di Valcimarra Chienti - Schema idraulico, corografia .....	3
--	---

<b>Figura 2:</b> Diga del Fiastrone – vista da valle .....	4
<b>Figura 3:</b> Diga del Fiastrone – planimetria generale .....	4
<b>Figura 4:</b> Derivazione Fiastrone - profilo idraulico.....	5
<b>Figura 5:</b> Derivazione Fiastrone - pozzo piezometrico.....	5
<b>Figura 6:</b> Derivazione Fiastrone - Camera Valvole .....	6
<b>Figura 7:</b> Diga di Polverina - vista da valle .....	6
<b>Figura 8:</b> Diga di Polverina - planimetria generale .....	7
<b>Figura 9:</b> Derivazione Polverina - profilo idraulico.....	7
<b>Figura 10:</b> Derivazione Polverina: Pozzo piezometrico e Camera Valvole.....	8
<b>Figura 11:</b> Centrale di Valcimarra - planimetria generale.....	9
<b>Figura 12:</b> Centrale di Valcimarra - sezione trasversale deriv. Fiastrone .....	9
<b>Figura 13:</b> Centrale di Valcimarra - Sala macchine.....	10
<b>Figura 14:</b> Centrale di Valcimarra – canali di scarico.....	11
<b>Figura 15:</b> Serbatoio del Fiastrone – vista aerea .....	13
<b>Figura 16:</b> Diga del Fiastrone - dati principali della diga .....	13
<b>Figura 17:</b> Diga del Fiastrone - dati principali del serbatoio .....	14
<b>Figura 18:</b> Diga del Fiastrone - dati principali delle opere di scarico .....	14
<b>Figura 19:</b> Diga del Fiastrone - diagramma delle aree e dei volumi (da FCEM).....	15
<b>Figura 20:</b> Diga del Fiastrone - curva di portata dello scarico di superficie (da FCEM).....	15
<b>Figura 21:</b> Diga del Fiastrone - curva di portata dello scarico di mezzo fondo (da FCEM) .....	16
<b>Figura 22:</b> Diga del Fiastrone - curva di portata dello scarico di fondo (da FCEM) .....	16
<b>Figura 23:</b> Diga del Fiastrone - diagramma delle aree e dei volumi (2020) .....	17
<b>Figura 24:</b> Diga del Fiastrone - serie storica del livello nel serbatoio (2010-2020) .....	18
<b>Figura 25:</b> Serbatoio di Polverina - vista aerea .....	19
<b>Figura 26:</b> Diga di Polverina - dati principali della diga .....	19
<b>Figura 27:</b> Diga di Polverina - dati principali del serbatoio .....	20
<b>Figura 28:</b> Diga di Polverina - dati principali delle opere di scarico .....	20
<b>Figura 29:</b> Diga di Polverina - curva di portata dello scarico di superficie (da FCEM).....	21
<b>Figura 30:</b> Diga di Polverina - curva di portata dello scarico di fondo (da FCEM) .....	21
<b>Figura 31:</b> Diga di Polverina - diagramma delle aree e dei volumi (2018) .....	22

<b>Figura 32:</b> Diga di Polverina - serie storica del livello nel serbatoio (2010-2020).....	24
<b>Figura 33:</b> Perdita localizzata per imbocco a spigolo vivo. ....	29
<b>Figura 34:</b> Rappresentazione tipica di un restringimento di sezione. ....	29
<b>Figura 35:</b> Determinazione del coefficiente di perdita per restringimento graduale.....	29
<b>Figura 36:</b> Rappresentazione tipica di un restringimento di sezione secondo [2].....	30
<b>Figura 37:</b> Schematizzazione per il calcolo delle perdite in curva secondo [1].....	31
<b>Figura 38:</b> Rappresentazione transizione da sezione circolare a sezione quadrata [1]. ....	31
<b>Figura 39:</b> Rappresentazione transizione da sezione quadrata a sezione circolare [1]. ....	31
<b>Figura 40:</b> Determinazione del coefficiente di perdita $K$ in caso di paratoie e stoplogs secondo [3].	32
<b>Figura 41:</b> Coefficiente di forma della griglia, [1]. ....	32
<b>Figura 42:</b> Coefficiente di perdita valvola a farfalla. ....	33
<b>Figura 43:</b> PP Fiastrone - avviamento pompaggio senza camera espansione.....	41
<b>Figura 44:</b> Nuovo schema PP Fiastrone .....	42
<b>Figura 45:</b> Espansione Pozzo Fiastrone - analisi di sensitività per $Q=9 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	42
<b>Figura 46:</b> PP Fiastrone ampliato – manovra di commutazione rapida turbinaggio-pompaggio a $t=1000\text{s}$ .....	43
<b>Figura 47:</b> PP Fiastrone ampliato - manovra di avvio (30s) e di arresto (10s).....	43
<b>Figura 48:</b> PP Polverina - turbinaggio differenziale - manovre di avvio (30s) ed arresto (10s) .....	44
<b>Figura 49:</b> PP Polverina – manovra rapida turbinaggio-pompaggio in 30+30s .....	45
<b>Figura 50:</b> PP Fiastrone - sovralzo manovra apertura pompaggio .....	49
<b>Figura 51:</b> PP Fiastrone - sovralzo manovra chiusura pompaggio .....	50
<b>Figura 52:</b> PP Polverina - sovralzo manovra apertura turbinaggio differenziale.....	50
<b>Figura 53:</b> PP Polverina - sovralzo manovra chiusura turbinaggio differenziale.....	51
<b>Figura 54:</b> Diagramma di Wohler della resistenza a fatica.....	55
<b>Figura 55:</b> Dettaglio della proposta di incremento del diametro del nuovo tratto di pozzo di circa 1 m. .....	58

## INDICE DELLE TABELLE

<b>Tabella 1:</b> Serbatoio del Fiastrone - dati principali .....	17
<b>Tabella 2:</b> Serbatoio del Fiastrone - dati principali autorizzati.....	18

---

<b>Tabella 3:</b> Serbatoio di Polverina - dati principali .....	23
<b>Tabella 4:</b> Serbatoio di Polverina - dati principali autorizzati .....	23
<b>Tabella 5:</b> Criteri di dimensionamento idraulico .....	26
<b>Tabella 6:</b> Valori di scabrezza assoluta per il calcolo delle perdite di carico distribuite .....	28
<b>Tabella 7:</b> Perdite di carico - Fiastrone - Galleria forzata – Turbinaggio .....	34
<b>Tabella 8:</b> Perdite di carico - Fiastrone - Galleria - Pompaggio .....	35
<b>Tabella 9:</b> Perdite di carico - Fiastrone – Condotta Forzata – Turbinaggio e Pompaggio .....	36
<b>Tabella 10:</b> Perdite di carico - Polverina - Galleria forzata – Turbinaggio .....	37
<b>Tabella 11:</b> Perdite di carico - Polverina - Galleria forzata – Pompaggio .....	38
<b>Tabella 12:</b> Perdite di carico - Polverina – Condotta Forzata – Turbinaggio e Pompaggio .....	39
<b>Tabella 13:</b> Nuovo Gruppo reversibile - Perdite di carico .....	39
<b>Tabella 14:</b> Derivazione Fiastrone - piezometriche .....	48
<b>Tabella 15:</b> Derivazione Polverina - piezometriche .....	49
<b>Tabella 16:</b> Condotta Forzata Fiastrone - verifica di resistenza .....	52
<b>Tabella 17:</b> Condotta Forzata Polverina - verifica di resistenza .....	53
<b>Tabella 18:</b> Revisione della capacità installata del gruppo reversibile dal costruttore idromeccanico. .....	59
<b>Tabella 19:</b> Dati di fornitura del costruttore idromeccanico .....	59

## 1. INTRODUZIONE

### 1.1 Contesto generale e scopo del lavoro

Enel Produzione SpA – HGT Design & Execution, ha affidato a Lombardi SA l'incarico professionale di ingegneria per la Progettazione Definitiva per Autorizzazione dell'intervento di installazione di un nuovo gruppo reversibile nell'impianto idroelettrico di Valcimarra, sito nel Comune di Caldarola (MC).

L'opera idraulica, fa parte dell'asta idroelettrica del Fiume Chienti, costituita dagli impianti idroelettrici dell'asta del fiume Chienti, comprendenti le centrali di Valcimarra Chienti, Belforte 1° salto, Belforte 2° salto, Città di Macerata, S. Maria Apparente e Molino Nuovo.

Le dighe di Fiastra e Polverina alimentano la Centrale di Valcimarra. A valle di essa sono ubicati gli impianti di Belforte 1° salto e 2° salto. La centrale di Belforte 1° salto è alimentata dal bacino di Borgiano, che è stato realizzato sbarrando il fiume Chienti poco più a valle del punto di rilascio delle acque di scarico della centrale di Valcimarra Chienti nel comune di Serrapetrona (MC). La centrale di Belforte 2° salto è alimentata dal bacino di S. Maria, realizzato sbarrando il fiume Chienti in prossimità del borgo di S. Maria nel comune di Belforte del Chienti. Proseguendo lungo l'asta idroelettrica del fiume Chienti si trovano gli impianti di Città di Macerata e, in prossimità della foce, gli impianti idroelettrici in successione di S. Maria Apparente e Molino Nuovo. Lo schema idroelettrico è interamente gestito da Enel GP.

Attualmente la centrale di Valcimarra è dotata di tre gruppi di produzione: 2 turbine Francis (Gr.1 e Gr.2) con asse verticale da 14.823 MW sulla derivazione Fiastrone ed una turbina Francis (Gr.3) con asse verticale da 14.9 MW sulla derivazione Polverina.

L'intervento prevede la parziale trasformazione dell'impianto idroelettrico di generazione esistente di Valcimarra Chienti in un impianto reversibile, di generazione e pompaggio. Il concetto dell'impianto nasce per iniziativa delle strutture tecniche di Enel Green Power con lo scopo di incrementare localmente la capacità di regolazione di rete, utilizzando una risorsa idrica già disponibile: l'obiettivo tecnico è di disporre di nuova potenza in pompaggio e della possibilità di effettuare regolazioni di rete mediante l'uso di un nuovo gruppo reversibile a velocità variabile (regolazione di frequenza, generazione di potenza reattiva, ecc.).

La presente Relazione Tecnica descrive, per la fase di progettazione definitiva, gli aspetti idraulici inerenti alla parziale conversione a pompaggio dell'impianto idroelettrico di Valcimarra Chienti.

La revisione 01 del documento viene emessa al fine dell'aggiornamento in corso di procedura autorizzativa dei dati di impianto, come esito degli affinamenti progettuali del costruttore idromeccanico in fase di progetto definitivo per appalto.

## **1.2 Documenti analizzati**

### *1.2.1 Documentazione dataroom Enel*

Per la redazione della presente relazione è stato fatto riferimento ai documenti facenti parte della documentazione d'incarico ricevuta da Enel GP e compresa nella dataroom di progetto.

### *1.2.2 Completezza dei dati*

Alla data di redazione della presente relazione, si conferma che la documentazione tecnica presente in dataroom consente l'individuazione della maggior parte degli elementi tecnici che sono necessari allo sviluppo della progettazione definitiva.

Alcuni punti di attenzione sulle principali informazioni tecniche mancanti, per le quali si prepongono ulteriori ricerche di archivio o l'esecuzione di rilievi ed indagini sono:

- Georeferenziazione della Centrale e delle condotte forzate (per questo dato Enel GP ha autorizzato una specifica campagna di rilievi mediante LiDAR su drone, di prossima esecuzione);
- Sopralluoghi ispettivi all'interno delle gallerie e condotte forzate, al fine di valutarne lo stato di conservazione in funzione delle nuove installazioni in corso di progettazione;
- Prove di rendimento o altre utili al fine di convalidare i valori assunti per la scabrezza delle condotte e la valutazione delle perdite del ciclo generazione-pompaggio.

### *1.2.3 Riferimenti bibliografici*

- [1] State Development and Reform Commission – Specification for Design of Hydraulic Tunnels, 2004.
- [2] Sinniger, Hager – Constructiones Hydrauliques, EPFL Traité de Génie civil.
- [3] D.S. Miller – Internal Flow systems, BHR Group Limited 1996.
- [4] ASCE – Civil Engineering Guidelines for Planning and Designing Hydroelectric Developments, 1989.

## 2. DESCRIZIONE DELLE OPERE ESISTENTI

### 2.1 Lo schema idraulico dell’impianto di Valcimarra

La centrale idroelettrica di Valcimarra è alimentata da due derivazioni distinte:

- la derivazione proveniente dalla Diga di Fiastra (o Fiastrone), realizzata sbarrando il torrente Fiastrone (affluente del Fiume Chienti) in prossimità di S. Lorenzo di Fiastra (MC) con una diga ad arco gravità;
- la derivazione proveniente dalla Diga di Polverina, realizzata sbarrando il Fiume Chienti in comune di Polverina (MC) con una diga in materiale sciolto.

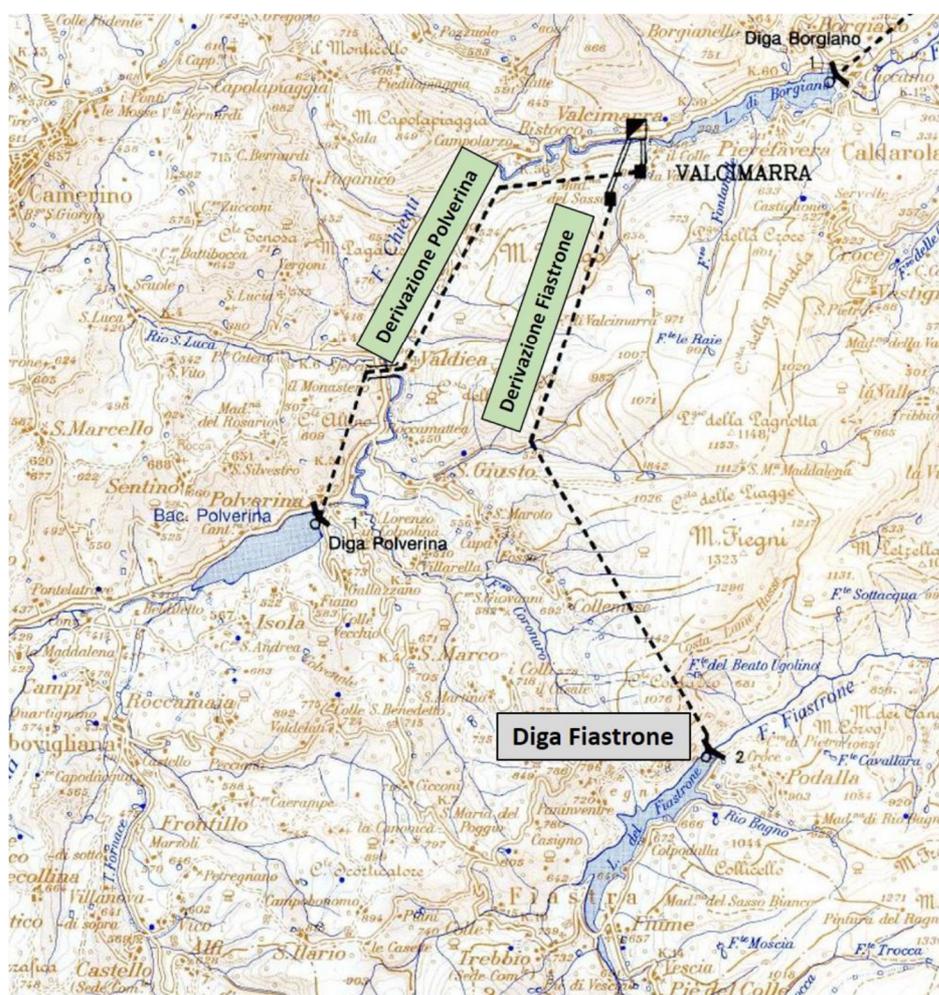
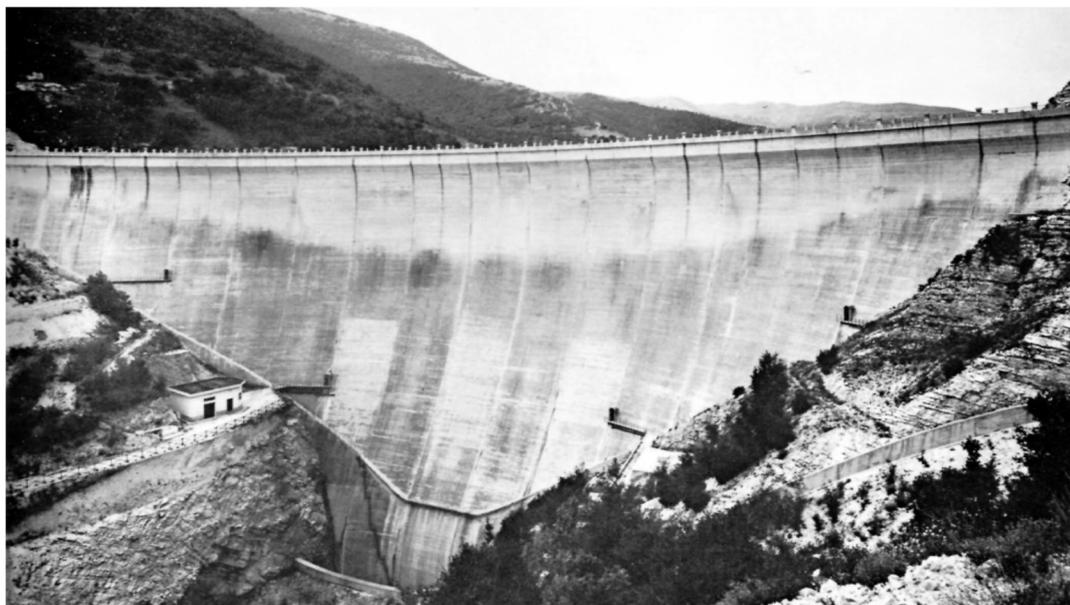


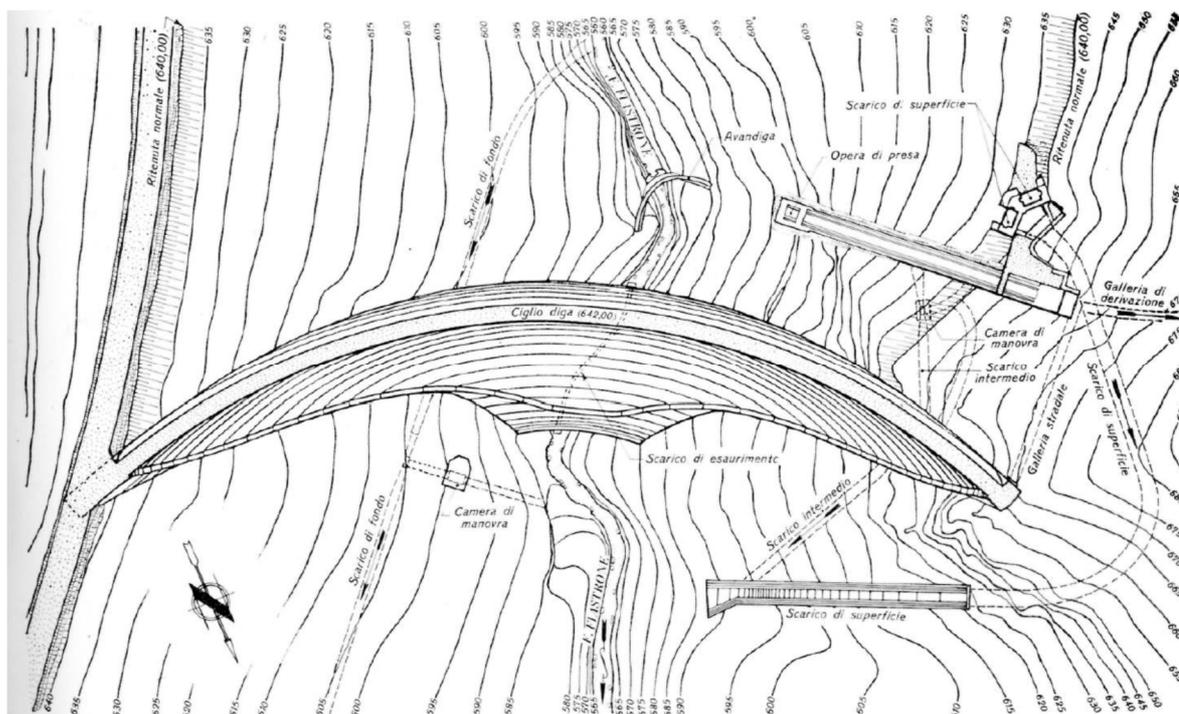
Figura 1: Impianto di Valcimarra Chienti - Schema idraulico, corografia

### 2.2 Diga del Fiastrone e relativa derivazione

La diga del Fiastrone, costruita nel periodo 1950-1954, è una diga ad arco-gravità realizzata in calcestruzzo. Il piano di coronamento si trova a quota 642.00 m s.l.m. e si sviluppa per 254.0 m. Il corpo diga ha un volume pari a 158'000 m<sup>3</sup>.



**Figura 2:** Diga del Fiastrone – vista da valle



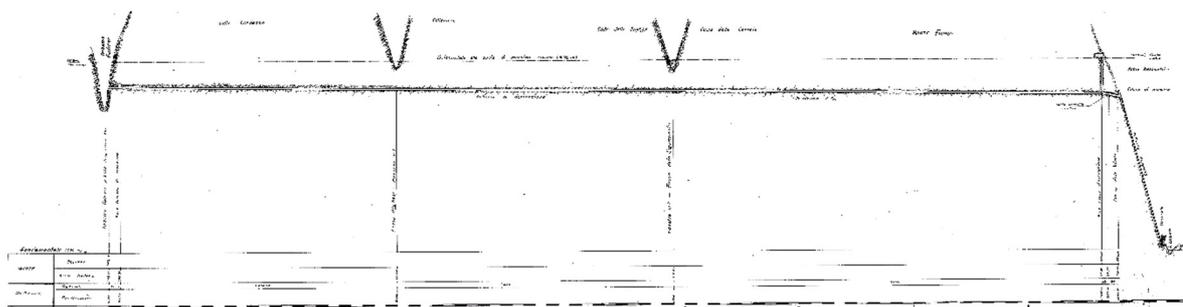
**Figura 3:** Diga del Fiastrone – planimetria generale

Lo sbarramento dispone di diverse opere di scarico: uno scarico di superficie (due luci B 4.50 m con soglia ad el. 637.00 m slm dotate ciascuna di paratoia piana 4.5x2.5 m sormontata da ventola 4.5x1.5 m), uno scarico intermedio (è derivato dalla galleria di derivazione, che nel primo tratto ha diametro  $d=3.1$  m ed è costituito da una galleria con  $d=2.4$  m lunga 99 m, con pendenza 2% e dotata di 2 paratoie piane in serie 1.4x1.1m), uno scarico di fondo (galleria  $d=2.0$  m lunga 291m con

soglia imbocco ad el. 563.14 m slm e dotata di 2 paratoie piane in serie 1.4x1.1m) ed uno scarico di esaurimento (tubazione metallica d=0.8 m con imbocco ad el. 561.33 e saracinesche a valle).

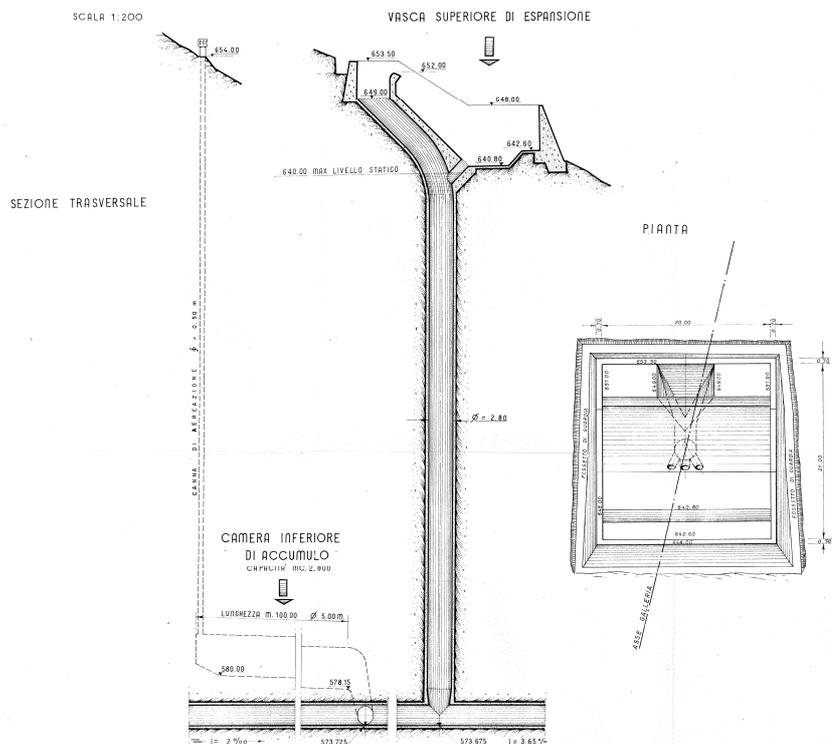
L'opera di presa, ubicata in sinistra idraulica, è costituita da una luce rettangolare inclinata 3.21x4.80m dotata di griglia. Dopo la griglia vi è un breve tratto di galleria con d=3.1 m dalla quale si stacca lo scarico intermedio. Immediatamente a valle la derivazione è intercettata con una paratoia piana 1.4x1.6m ed una valvola a farfalla d=1.6 m.

La galleria di derivazione, realizzata in calcestruzzo con d=2.4 m, ha uno sviluppo di circa 8'600 m fino al pozzo piezometrico ed ha pendenza costante pari a 2.0 m/km (0.2%).



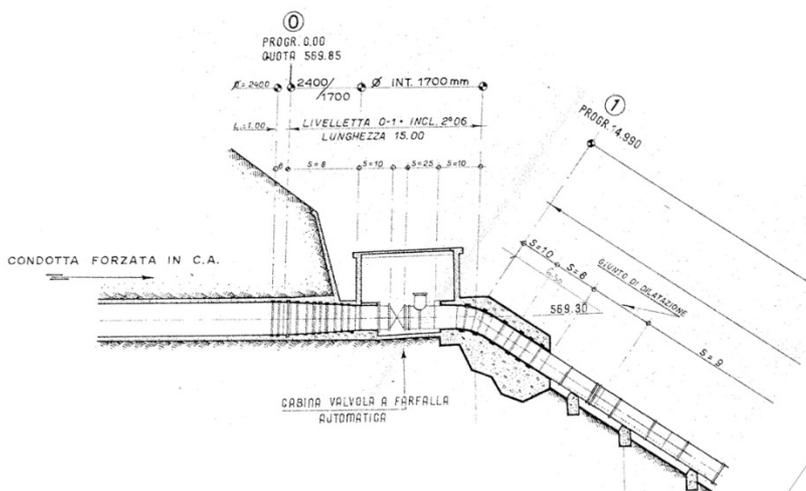
**Figura 4:** Derivazione Fiastrone - profilo idraulico

Il pozzo piezometrico ha diametro interno 2.80 m ed è dotato sia di camera di espansione superiore all'esterno, con quota d'imposta ad el.640.80 m slm, altezza di circa 8.0 m e superficie pari a circa 210 m<sup>2</sup>, sia una camera di alimentazione inferiore con quota d'imposta ad el.578.20 m e capacità di circa 2'000 m<sup>3</sup>.



**Figura 5:** Derivazione Fiastrone - pozzo piezometrico

La camera valvole avente asse ad el. 569.30 accoglie una valvola a farfalla ed una valvola di rientrata d'aria con passo d'uomo, alla quale si raccorda la condotta forzata con un tratto conico  $d=1700-1500$  mm, quindi questa si sviluppa lungo un piano inclinato parte in galleria e parte all'aperto per circa 460 m assumendo andamento orizzontale prima dell'ingresso in casa macchine ad el.297.90 m slm.



**Figura 6:** Derivazione Fiastrone - Camera Valvole

La condotta poi si biforca per alimentare due gruppi Francis ad asse verticale da 14.823 MW.

### 2.3 Diga di Polverina e relativa derivazione

La diga di Polverina, costruita nel periodo 1963-1967, è una diga in terra con nucleo centrale impermeabile. Il piano di Coronamento si trova a quota 402.00 m slm e si sviluppa per 375.0 m. Il corpo diga ha un volume pari a 321000 m<sup>3</sup>.

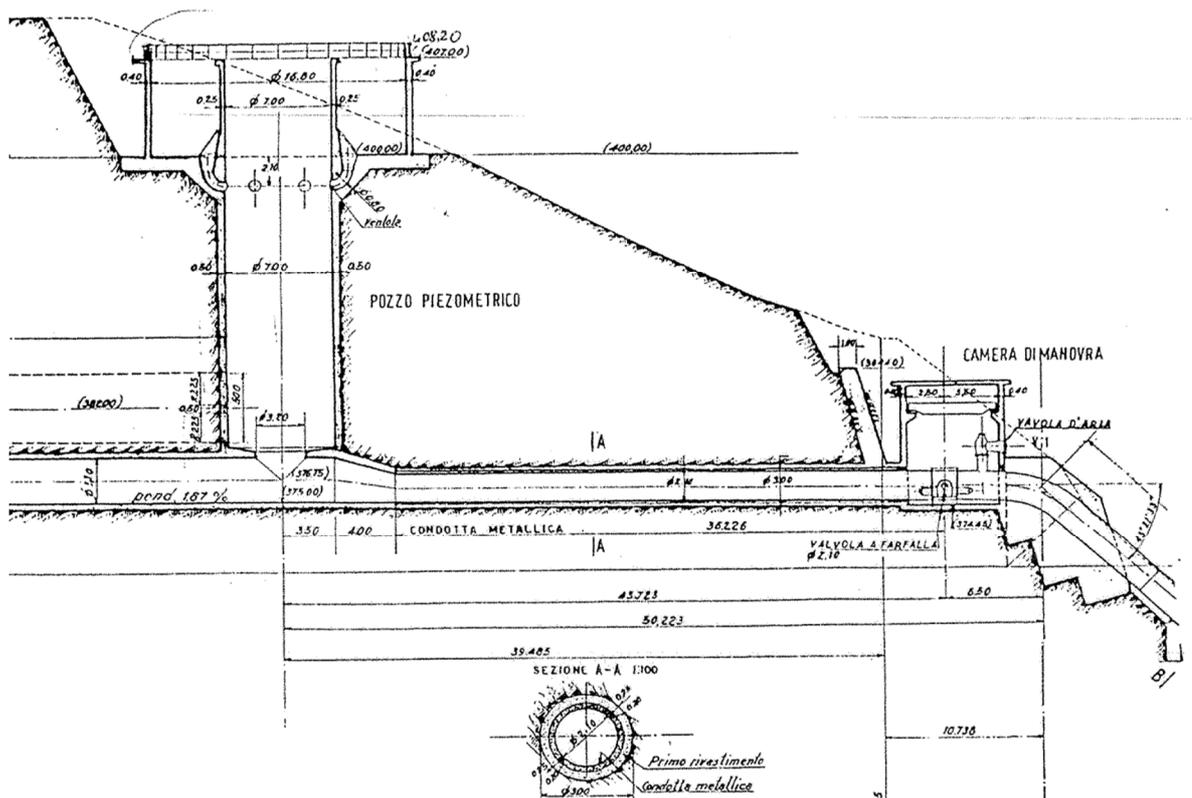


**Figura 7:** Diga di Polverina - vista da valle



mediante un ponte sifone lungo circa 177 m. Prosegue poi a valle per circa 4'800 m in galleria con  $d=3.3$  m fino al pozzo piezometrico.

Il pozzo piezometrico ha diametro netto di 7.0 m ed è dotato di una camera di espansione superiore con quota d'imposta ad el.400.00 m slm ed una superficie pari a circa 220 m<sup>2</sup>. L'originale bordo superiore è stato sopralzato di 1.20 m con lamiera metallica, in modo da raggiungere un'altezza interna di 8.20 m.



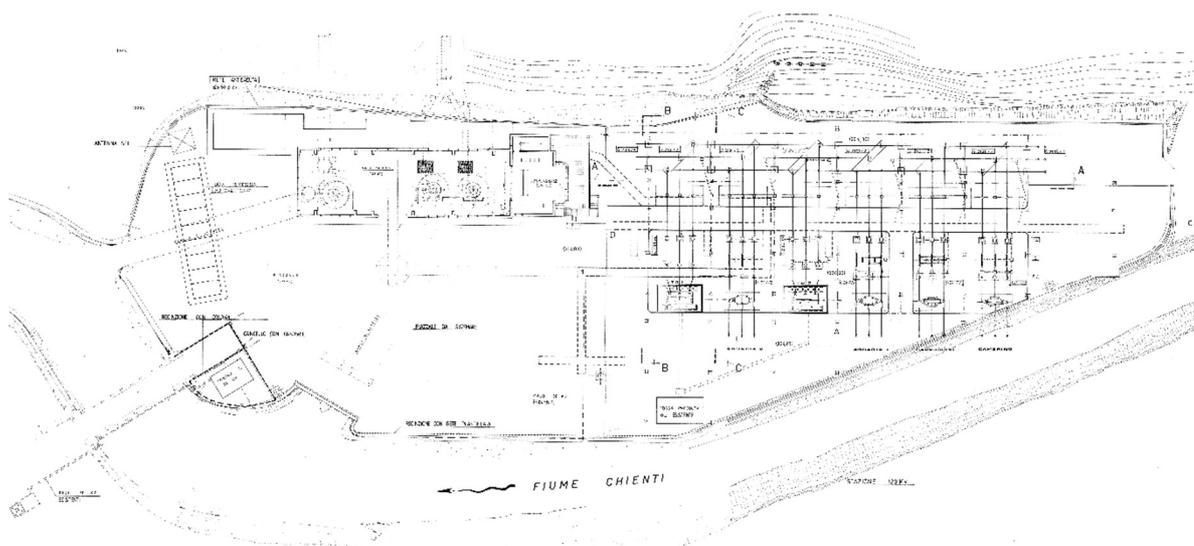
**Figura 10:** Derivazione Polverina: Pozzo piezometrico e Camera Valvole

La camera valvole con asse ad el. 375.96 accoglie una valvola a farfalla ed una valvola di rientrata d'aria con passo d'uomo, alla quale si raccorda la condotta forzata,  $d= 2100$  mm, che si sviluppa all'aperto per circa 155 m assumendo andamento orizzontale prima dell'ingresso in casa macchine ad el.299.00 m slm.

La condotta alimenta un gruppo Francis ad asse verticale da 14.9 MW.

## 2.4 Centrale di Valcimarra

La centrale di Valcimarra, sita in comune di Caldarola (MC), è stata costruita in tempi diversi, seguendo le fasi costruttive delle due derivazioni, di cui in prima fase la derivazione Fiastrone e successivamente quella di Polverina.

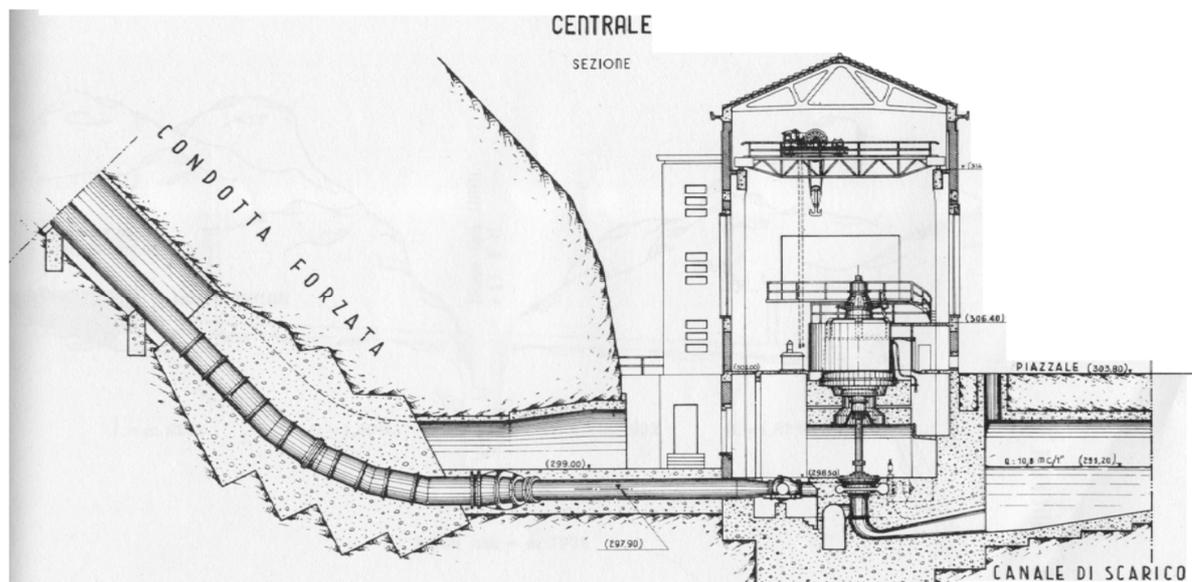


**Figura 11:** Centrale di Valcimarra - planimetria generale

La superficie complessiva è di circa 8'000 m<sup>2</sup>- posti alla 303.70 m slm, così suddivisa:

- Sottostazione elettrica di circa 4000 m<sup>2</sup>;
- Edificio centrale ed annessa officina, di circa 900 m<sup>2</sup>;
- Fabbricato Box con superficie occupata di circa 110 m<sup>2</sup>;
- Fabbricato Cabina 20kV per circa 25 m<sup>2</sup>

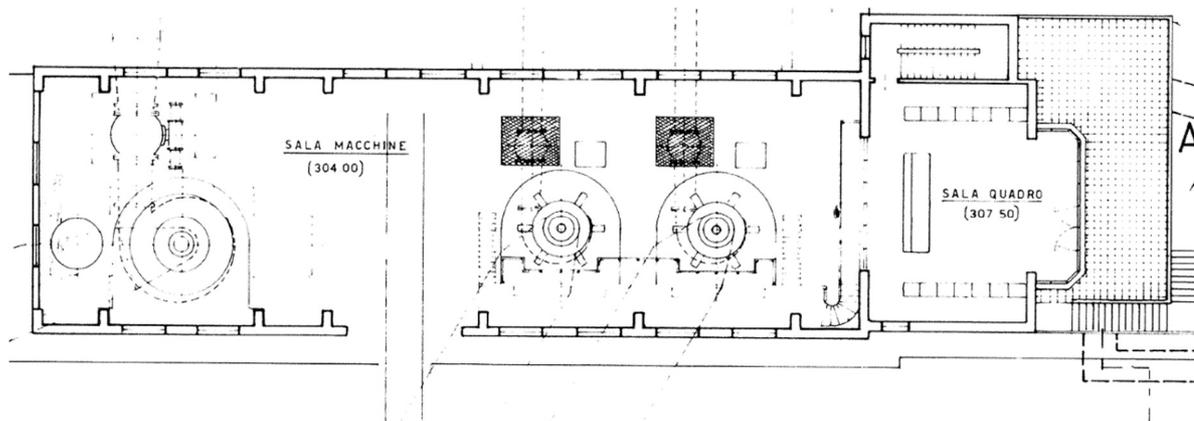
oltre agli spazi esterni del piazzale per la movimentazione dei mezzi ed aree a verde.



**Figura 12:** Centrale di Valcimarra - sezione trasversale deriv. Fiastrone

La sala macchine ha dimensione interna pari a circa 37.0x11.0 m e si estende in elevazione di circa 20 m, con piano a quota 304.00 m slm e piano binari carroponete a quota 314.00.

Secondo gli elaborati tecnici disponibili, il piano delle giranti delle turbine si trova rispettivamente ad elevazione 298.50 m s.l.m. (der. Fiastrone) e ad elevazione 300.15 m s.l.m. (der. Polverina).



**Figura 13:** Centrale di Valcimarra - Sala macchine

La sala comando e controllo con la sala quadri sono site sul lato est rispetto all'ingresso carraio della sala macchine.

## 2.5 Gruppi di produzione

Qui di seguito si riassumono le principali caratteristiche dei gruppi di produzione:

### 2.5.1 Derivazione Fiastrone:

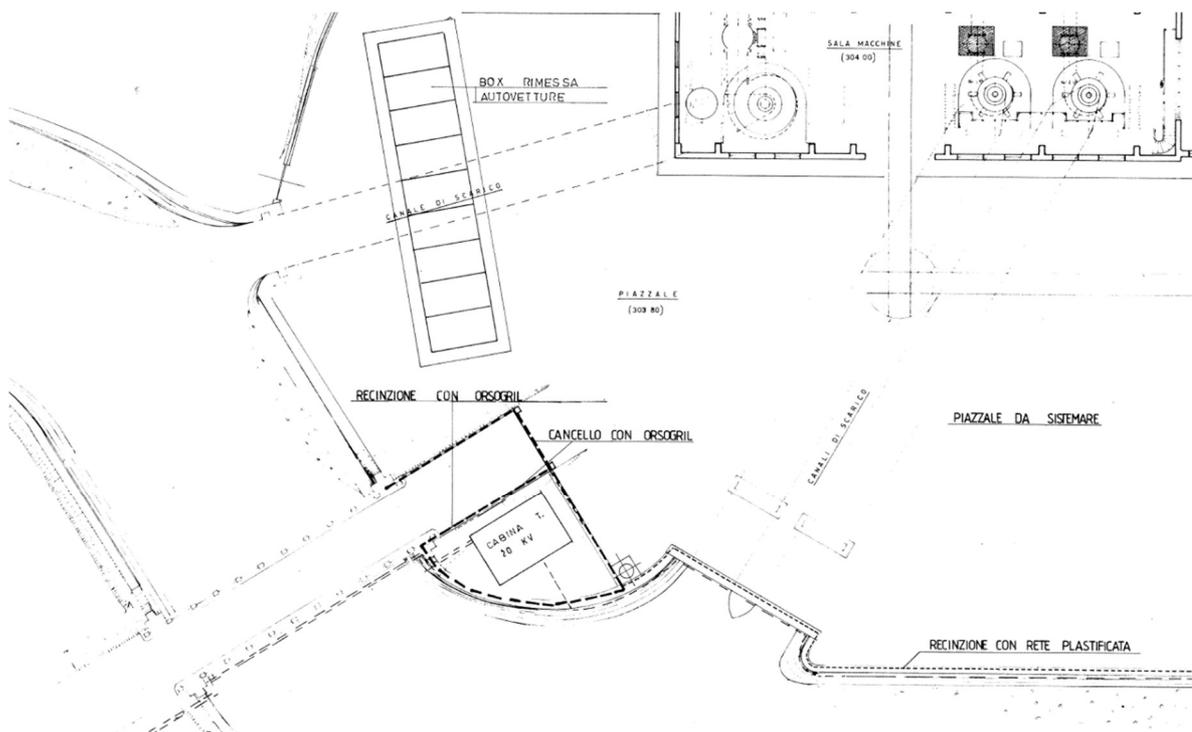
- 2 gruppi Francis, ad asse verticale (Gr.1 e Gr.2)
- Salto lordo max: 340.8 m (ante 2016)
- Salto lordo max: 334.8 m (post 2016)
- Salto lordo min: 298.5 m
- Asse gruppo: 297.90 m s.l.m
- Quota pelo libero scarico alla portata nominale: 299.20 m s.l.m @ 10.8 m<sup>3</sup>/s
- Dati targa turbina:
  - Portata: 5.40 m<sup>3</sup>/s
  - Potenza: 14.823 MW (con salto originale)
- Dati targa generatore:
  - Tipo: sincro trifase
  - Potenza: 20 MVA      Cos  $\phi$ : 0.7      Freq: 50 Hz

### 2.5.2 Derivazione Polverina:

- 1 gruppo Francis, ad asse verticale (Gr. 3)
- Salto lordo max: 101.5 m (ante 2016)

- Salto lordo max: 97.5 m (post 2016)
- Salto lordo min: 93.5 m
- Asse gruppo: 299.00 m slm
- Quota pelo libero scarico alla portata nominale: 298.50 m slm @ 18.0 m<sup>3</sup>/s
- Dati targa turbina:
  - Portata: 18.0 m<sup>3</sup>/s
  - Potenza: 14.9 MW (con salto originale)
- Dati targa generatore:
  - Tipo: sincro trifase
  - Potenza: 18 MVA      Cos  $\phi$ : 0.8      Freq: 50 Hz

## 2.6 Canali di scarico



**Figura 14:** Centrale di Valcimarra – canali di scarico

I canali di scarico sono entrambi a pelo libero e scorrono tombati al di sotto del piazzale verso due punti diversi del corso del Chienti. Prima dell'immissione nell'alveo fluviale nei due canali sono presenti paratoie rettangolari di intercettazione o gargami per panconcelli.

Lo scarico di ciascuna turbina della derivazione Fiastrone è largo circa 3.78 m, lungo circa 40/45 m con quote del fondo che ad oggi non risultano disponibili (non rappresentate nei disegni di consistenza).

Lo scarico della turbina della derivazione Polverina è largo circa 4.00 m, lungo circa 40 m con quote del fondo che ad oggi non risultano disponibili (non rappresentate nei disegni di consistenza).

### 3. CARATTERISTICHE DEI SERBATOI

#### 3.1 Serbatoio del Fiastrone



Figura 15: Serbatoio del Fiastrone – vista aerea

##### 3.1.1 Dati FCEM

#### **ART. 2 - DATI PRINCIPALI DELLA DIGA DESUNTI DAL PROGETTO APPROVATO**

- altezza della diga (ai sensi del D.M. 24.3.1982)	87,00 m
- altezza della diga (ai sensi della L. 584/1994)	81,50 m
- altezza di massima ritenuta	79,50 m
- quota coronamento	642,00 m s.m.
- franco ai sensi del D.M. n° 44 del 24/03/1982	1,00 m
- franco netto ai sensi del D.M. n° 44 del 24/03/1982	0,45 m
- sviluppo del coronamento	254,14 m
- larghezza del coronamento	4,70 m
- volume della diga	158.000 m <sup>3</sup>
- grado di sismicità assunto nel progetto	nullo
- classifica ai sensi del D.M. 24.03.82	diga ad arco gravità (Ab2)

Figura 16: Diga del Fiastrone - dati principali della diga

**ART. 3 - DATI PRINCIPALI DEL SERBATOIO DESUNTI DAL PROGETTO APPROVATO**

- quota di massimo invaso	641,00 m s.m.
- quota massima di regolazione	640,00 m s.m.
- quota minima di regolazione	598,00 m s.m.
- superficie dello specchio liquido	
- alla quota di massimo invaso	0,926 Km <sup>2</sup>
- alla quota massima di regolazione	0,886 Km <sup>2</sup>
- alla quota minima di regolazione	0,112 Km <sup>2</sup>
- volume totale di invaso ai sensi del D.M. 24.03.82	21,70x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
- volume di invaso ai sensi della L. 584/1994	20,40x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
- volume utile di regolazione	19,20x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
- volume di laminazione	1,30x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
- superficie del bacino imbrifero direttamente sotteso	80,80 Km <sup>2</sup>
- portata di progetto	243,00 m <sup>3</sup> /s
- tempo di ritorno (anno di determinazione)	----- anni

Figura 17: Diga del Fiastrone - dati principali del serbatoio

**ART. 4 - DATI PRINCIPALI DELLE OPERE DI SCARICO**

Portata esitata con livello nel serbatoio alla quota: 641,00 m s.m.:

- dallo scarico di superficie	140 00 m <sup>3</sup> /s
- dallo scarico di mezzo fondo	43 00 m <sup>3</sup> /s
- dallo scarico di fondo	60 00 m <sup>3</sup> /s
- totale dagli scarichi	243 00 m <sup>3</sup> /s

Figura 18: Diga del Fiastrone - dati principali delle opere di scarico

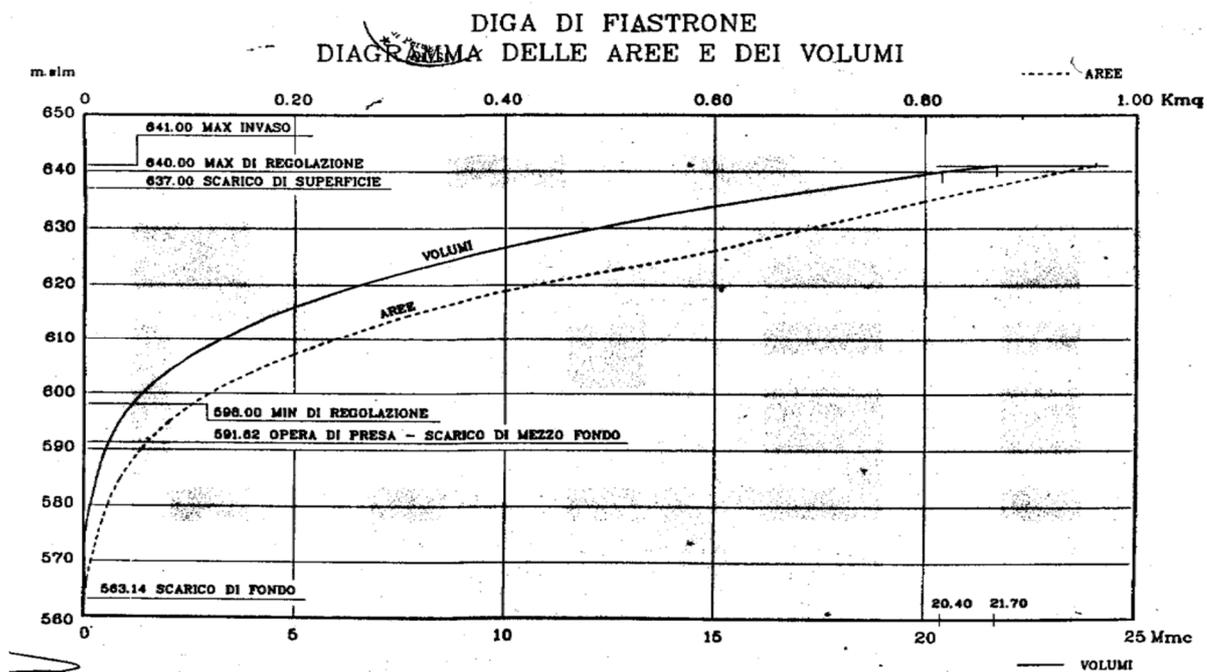


Figura 19: Diga del Fiastrone - diagramma delle aree e dei volumi (da FCEM)

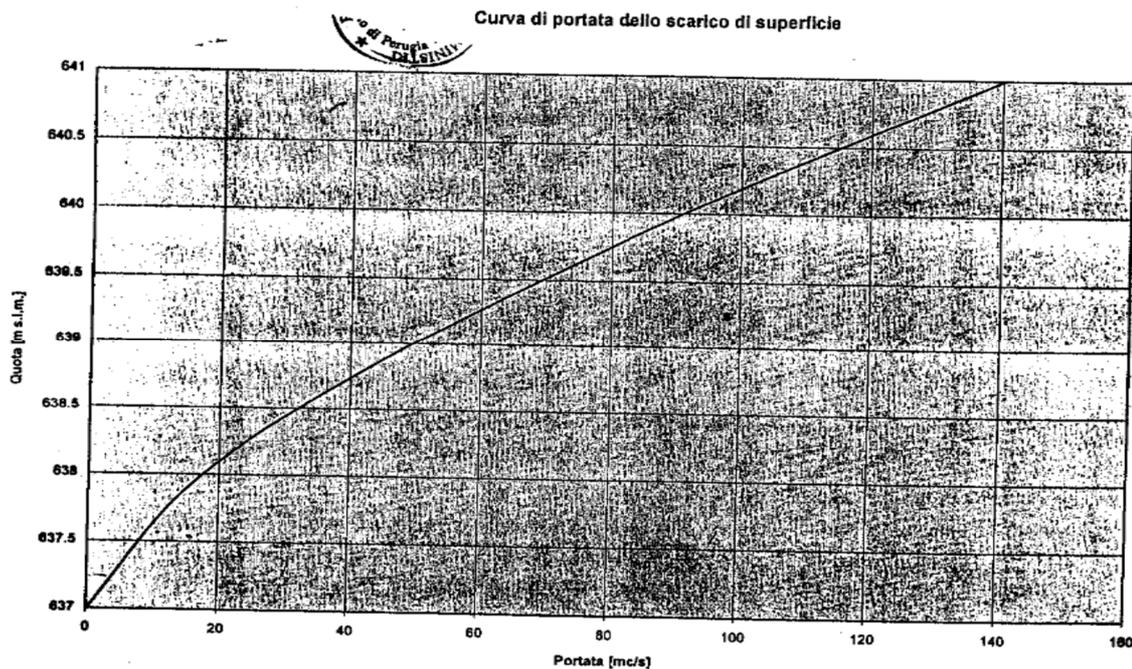


Figura 20: Diga del Fiastrone - curva di portata dello scarico di superficie (da FCEM)

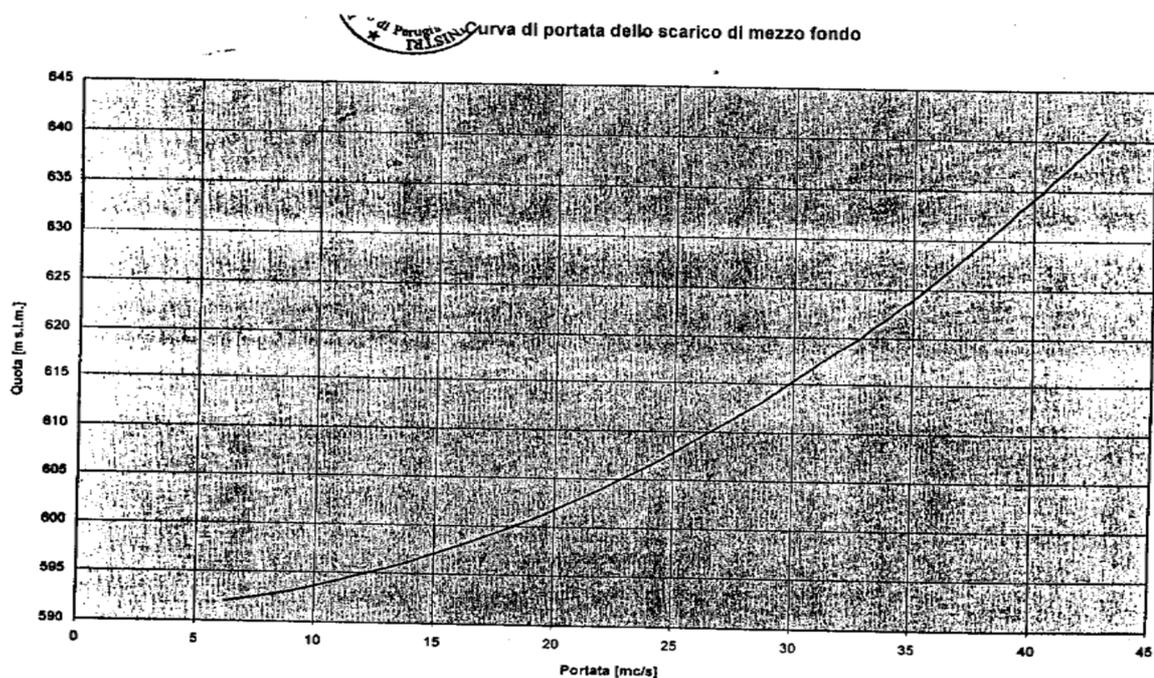


Figura 21: Diga del Fiastrone - curva di portata dello scarico di mezzo fondo (da FCEM)

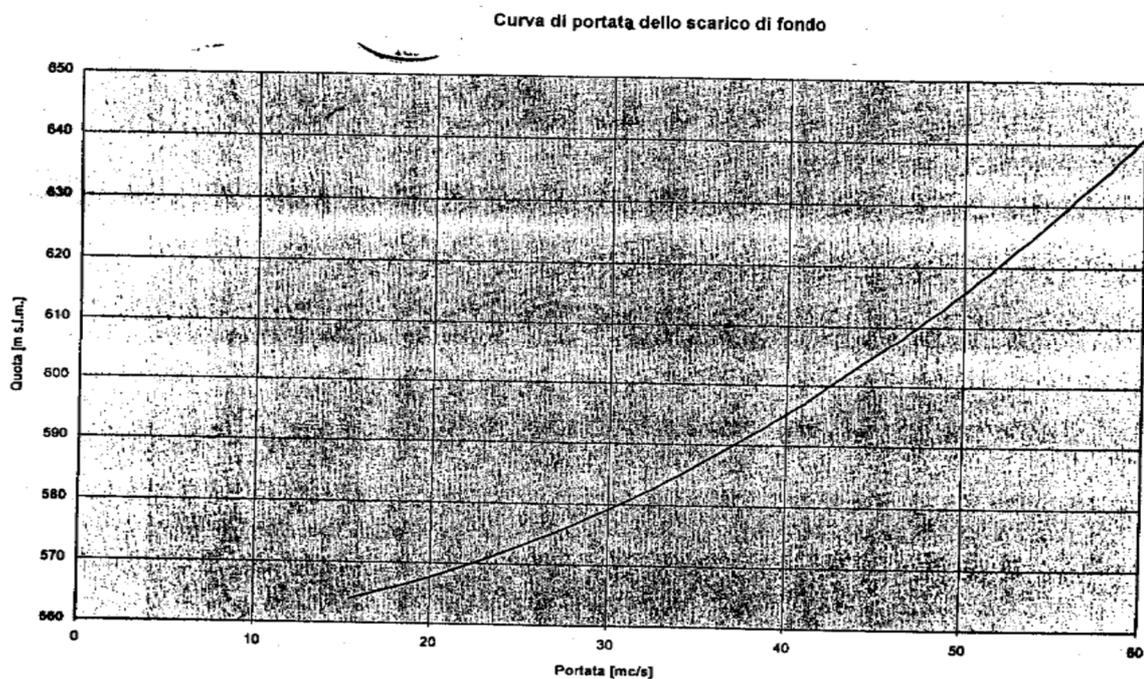


Figura 22: Diga del Fiastrone - curva di portata dello scarico di fondo (da FCEM)

### 3.1.2 Prescrizioni di esercizio intervenute sulle due dighe

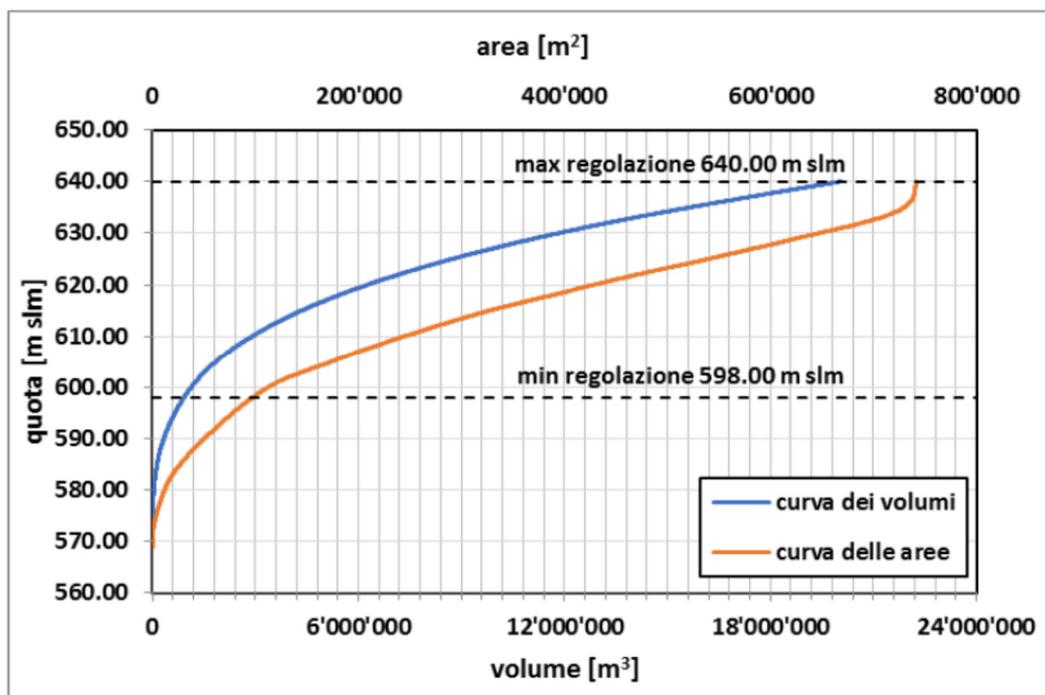
Con Nota della Direzione Dighe prot. 16774 del 18/07/2018 l'esercizio della diga del Fiastrone è stato limitato alle seguenti quote Autorizzate:

- massima regolazione: 634.00 m s.l.m.;

- massimo invaso: 637.00 m slm;

### 3.1.3 Dati contenuti nel Piano di Gestione dei Sedimenti

Nel 2020 è stata effettuato un rilievo batimetrico del serbatoio che ha aggiornato le curve caratteristiche rispetto a quelle originali:



**Figura 23:** Diga del Fiastrone - diagramma delle aree e dei volumi (2020)

L'invaso ha un basso tasso di interrimento, nell'ordine dei 4'500 m3/anno, e la capacità utile rispetto a quella originale di costruzione si è ridotta di circa di un punto percentuale.

Tuttavia, le limitazioni di esercizio hanno comportato una cospicua ulteriore riduzione del volume utile, schematizzato nelle seguenti tabelle:

Livelli	FCEM originale m slm	Volume originale Mm <sup>3</sup>	Volume 2020 Mm <sup>3</sup>	V. utile 2020 Mm <sup>3</sup>
MAX.INVASO	641.00	21.7	21.41	20.33
MAX.REG.	640.00	20.4	20.11	19.03
MIN.REG.	598.00	1.2	1.08	-
FONDO	563.14	-	-	-

**Tabella 1:** Serbatoio del Fiastrone - dati principali

Livelli	QUOTE AUT. 2016 m slm	Volume 2018 Mm <sup>3</sup>	V. utile 2018 Mm <sup>3</sup>
MAX.INVASO	637.00	17.32 (*)	16.24 (-20%)
MAX.REG.	634.00	14.78 (*)	13.7 (-28%)
MIN.REG.	598.00	1.08	-
FONDO	563.14	-	-

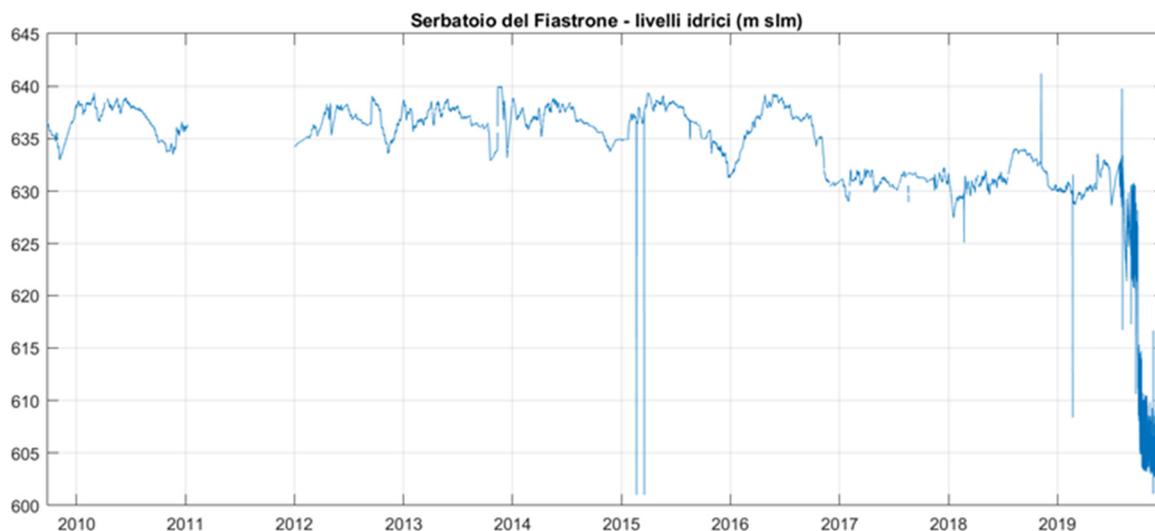
**Tabella 2:** Serbatoio del Fiastrone - dati principali autorizzati

Sulla base degli ultimi rilievi batimetrici effettuati nell'invaso (anno 2020), dall'esame dei valori di profondità misurati in prossimità delle opere di scarico e di derivazione, è risultato che le quote dei sedimenti sono prossime o superiori alle quote di soglia dei manufatti.

Tuttavia, si deve considerare che i moti idraulici dovuti alla captazione dell'acqua o alle aperture periodiche degli organi di manovra mantengono generalmente libero da materiale un volume di forma conica ubicato in prossimità delle opere stesse.

### 3.1.4 Dati storici di livello

Enel GP ha fornito i dati storici disponibili del livello nel serbatoio, per il periodo 2010-2020.



**Figura 24:** Diga del Fiastrone - serie storica del livello nel serbatoio (2010-2020)

Si nota la modifica nell'operazione del serbatoio a seguito della limitazione nei livelli di invaso del luglio 2018.

### 3.2 Serbatoio di Polverina

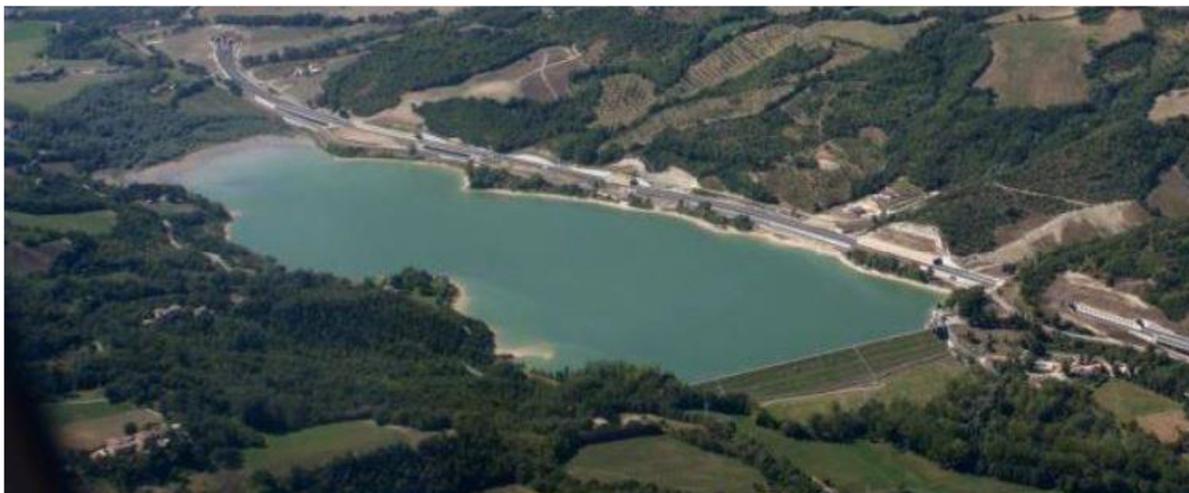


Figura 25: Serbatoio di Polverina - vista aerea

#### 3.2.1 Dati FCEM

#### **ART. 2 - DATI PRINCIPALI DELLA DIGA DESUNTI DAL PROGETTO APPROVATO**

- altezza della diga (ai sensi del D.M. 24.3.1982)	27,50 m
- altezza della diga (ai sensi della L. 584/1994)	24,00 m
- altezza di massima ritenuta	23,00 m
- quota coronamento	402,00 m s.m.
- franco ai sensi del D.M. n° 44 del 24/03/1982	2,00 m
- franco netto ai sensi del D.M. n° 44 del 24/03/1982	1,45 m
- sviluppo del coronamento	375,15 m
- larghezza del coronamento	5,00 m
- volume della diga	321.000 m <sup>3</sup>
- grado di sismicità assunto nel progetto	nullo
- classifica ai sensi del D.M. 24.03.82	diga in materiali sciolti zonata con nucleo in terra (Bb)

Figura 26: Diga di Polverina - dati principali della diga

**ART. 3 - DATI PRINCIPALI DEL SERBATOIO DESUNTI DAL PROGETTO APPROVATO**

- quota di massimo invaso	400,00 m s.m.
- quota massima di regolazione	400,00 m s.m.
- quota minima di regolazione	392,00 m s.m.
superficie dello specchio liquido	
- alla quota di massimo invaso	0,736 km <sup>2</sup>
- alla quota massima di regolazione	0,736 km <sup>2</sup>
- alla quota minima di regolazione	0,325 km <sup>2</sup>
- volume totale di invaso ai sensi del D.M. 24.03.82	5,80x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
- volume di invaso ai sensi della L. 584/1994	5,80x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
- volume utile di regolazione	4,82x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
- volume di laminazione	0,0 m <sup>3</sup>
- superficie del bacino imbrifero direttamente sotteso	296,00 km <sup>2</sup>
- portata di progetto	421,00 m <sup>3</sup> /s
- tempo di ritorno (anno di determinazione)	——— anni

Figura 27: Diga di Polverina - dati principali del serbatoio

**ART. 4 - DATI PRINCIPALI DELLE OPERE DI SCARICO**

Portata esitata con livello nel serbatoio alla quota 400,00 m s.m.:

- dallo scarico di superficie	346,00 m <sup>3</sup> /s
- dallo scarico di fondo	75,00 m <sup>3</sup> /s
- totale dagli scarichi	421,00 m <sup>3</sup> /s

Figura 28: Diga di Polverina - dati principali delle opere di scarico

Si segnala che i diagrammi caratteristici delle aree e dei volumi dell'invaso non risulterebbero riportati all'interno del FCEM.

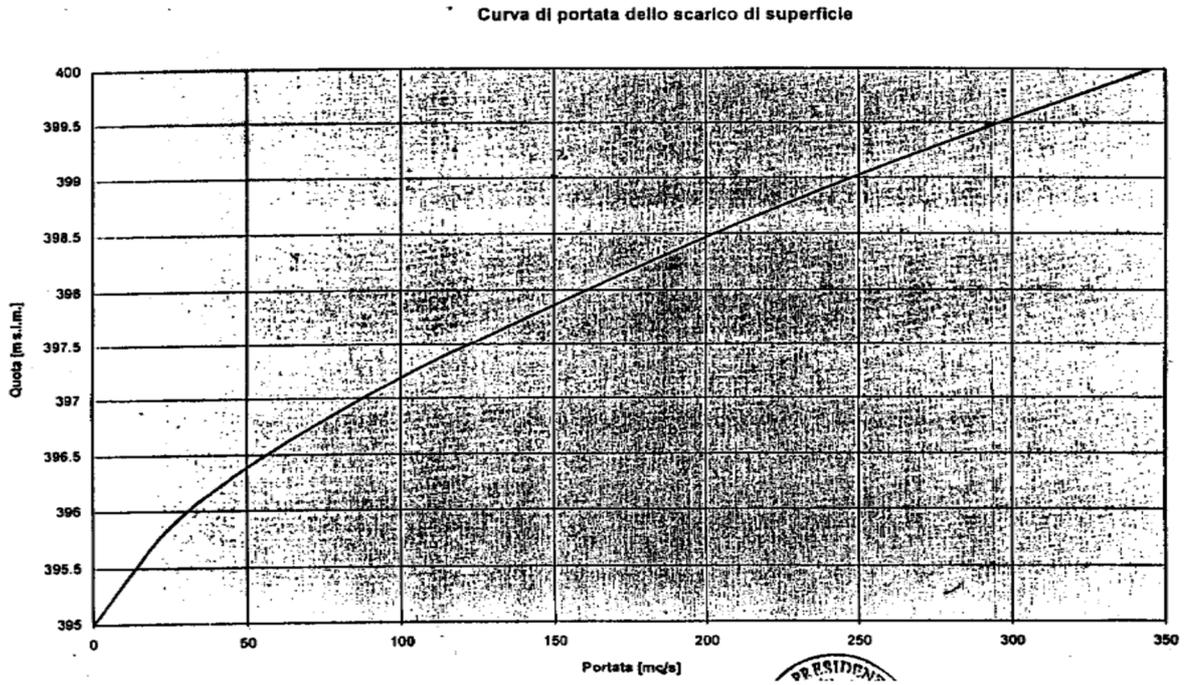


Figura 29: Diga di Polverina - curva di portata dello scarico di superficie (da FCEM)

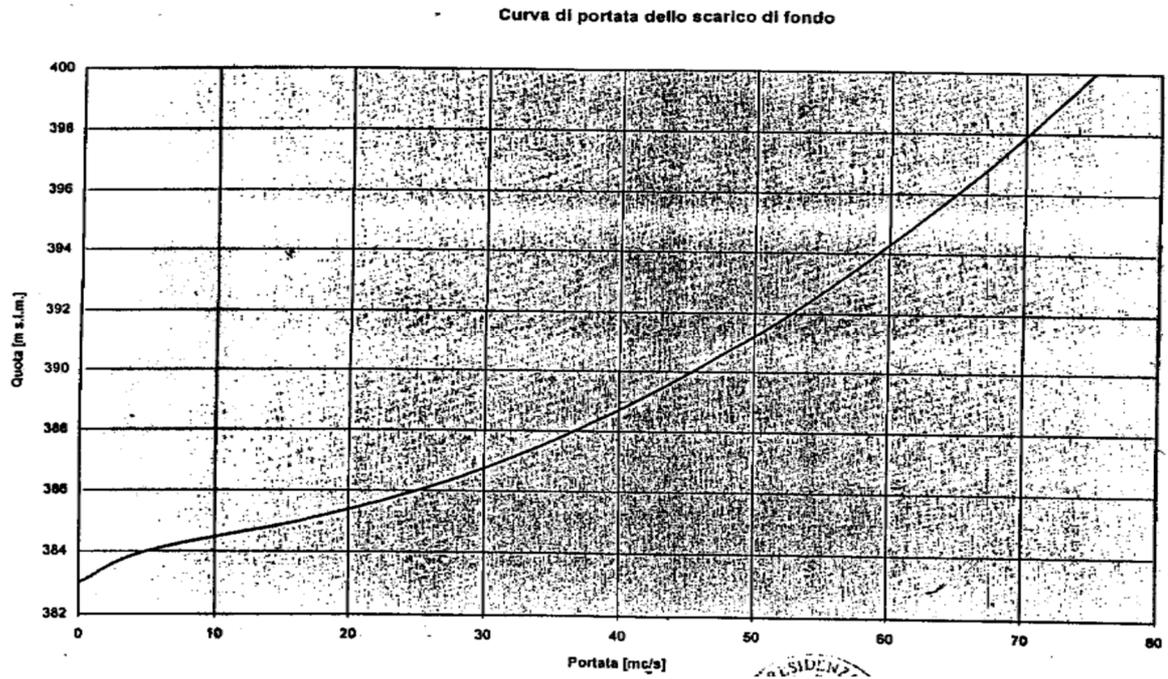


Figura 30: Diga di Polverina - curva di portata dello scarico di fondo (da FCEM)

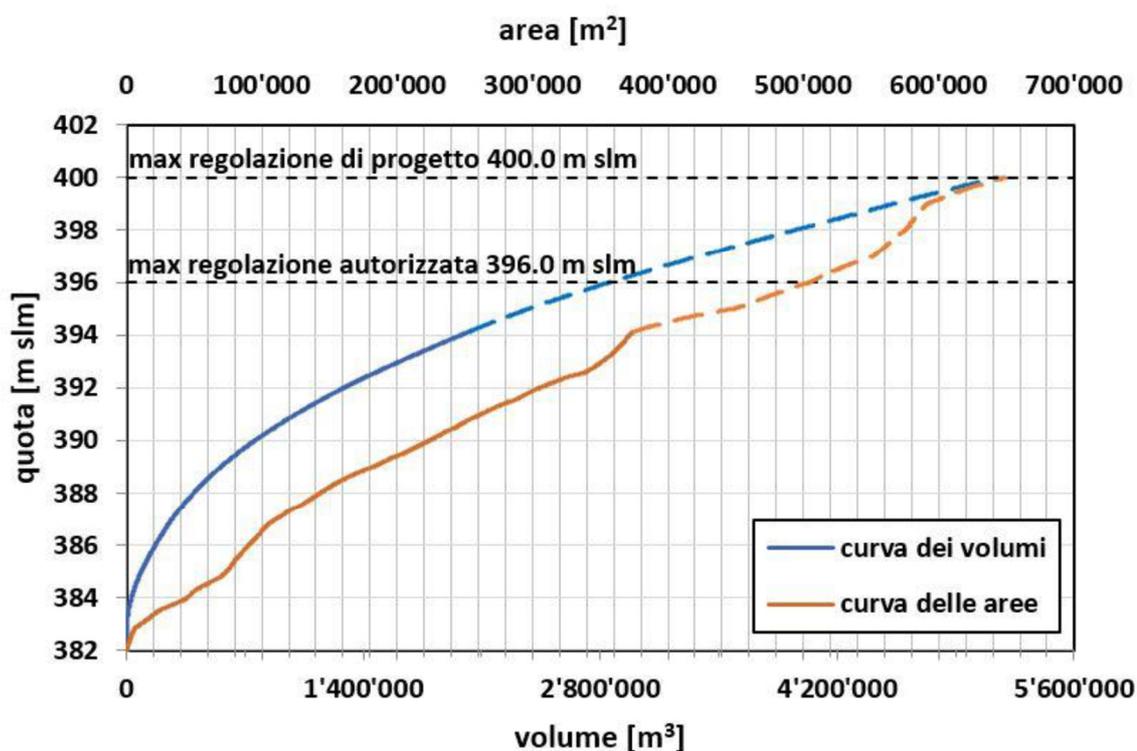
### 3.2.2 Prescrizioni di esercizio intervenute in seguito

Con Nota della Direzione Dighe prot. 24065 del 04/11/2016 l'esercizio è stato limitato alle seguenti quote Autorizzate:

- massima regolazione: 396.00 m slm;
- massimo invaso: 638.20 m slm;

### 3.2.3 Dati contenuti nel Piano di Gestione dei Sedimenti

Nel 2020 è stata effettuato un rilievo batimetrico del serbatoio che ha aggiornato le curve caratteristiche rispetto a quelle originali:



**Figura 31:** Diga di Polverina - diagramma delle aree e dei volumi (2018)

L'invaso ha un tasso di interrimento relativamente basso, nell'ordine dei 35'000 m<sup>3</sup>/anno, quasi tutti a ridurre la capacità utile del serbatoio, che rispetto a quella originale si è ridotta di circa dieci punti percentuali.

Tuttavia, le limitazioni di esercizio hanno comportato una cospicua ulteriore riduzione del volume utile, schematizzato nelle seguenti tabelle:

Livelli	FCEM originale m slm	Volume originale Mm <sup>3</sup>	Volume 2018 Mm <sup>3</sup>	V. utile 2018 Mm <sup>3</sup>
MAX.INVASO	400.00	5.80	5.151	3.865
MAX.REG.	400.00	5.80	5.151	3.865
MIN.REG.	392.00	1.58	1.286	-
FONDO	563.14	-	-	-

**Tabella 3:** Serbatoio di Polverina - dati principali

Livelli	QUOTE AUT. 2016 m slm	Volume 2018 Mm <sup>3</sup>	V. utile 2018 Mm <sup>3</sup>
MAX.INVASO	398.20	4.009 <sup>1</sup>	2.723 (-30%)
MAX.REG.	396.00	2.86	1.574 (-60%)
MIN.REG.	392.00	1.286	-
FONDO	383.00	-	-

**Tabella 4:** Serbatoio di Polverina - dati principali autorizzati

Sulla base degli ultimi rilievi batimetrici effettuati nell'invaso (anno 2018), dall'esame dei valori di profondità misurati in prossimità delle opere di scarico e di derivazione, è risultato che le quote dei sedimenti sono prossime o superiori alle quote di soglia dei manufatti.

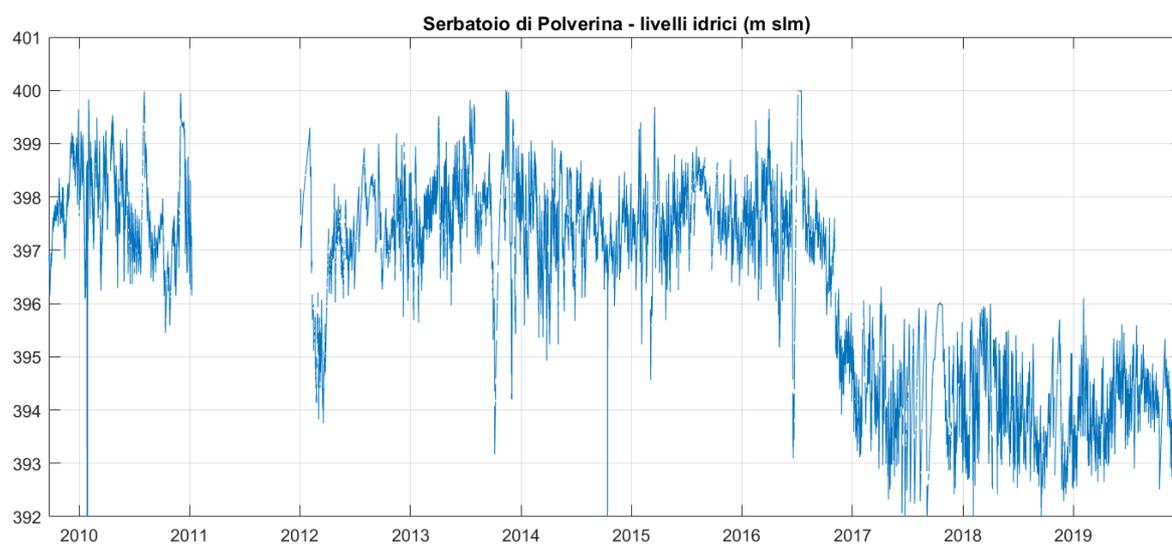
In particolare, le aree prospicienti l'imbocco dello scarico di fondo presentano sedimenti accumulati a circa 383.00-384.00 m s.l.m. di poco superiori alla quota della soglia d'imbocco dell'opera (383.00 m s.l.m.), che risulta quindi marginalmente interessata dalla loro presenza.

Tuttavia, si deve considerare che i moti idraulici dovuti alla captazione dell'acqua o alle aperture periodiche degli organi di manovra mantengono generalmente libero da materiale un volume a forma conica ubicato in prossimità delle opere stesse.

### 3.2.4 Dati storici di livello

Enel GP ha fornito i dati storici disponibili del livello nel serbatoio, per il periodo 2010-2020.

<sup>1</sup> Valore dedotto dal grafico



**Figura 32:** Diga di Polverina - serie storica del livello nel serbatoio (2010-2020)

Si nota la modifica nell'operazione del serbatoio a seguito della limitazione nei livelli di invaso del novembre 2016.

## **4. DIMENSIONAMENTO IDRAULICO DEL NUOVO GRUPPO DI POMPAGGIO**

### **4.1 Descrizione dell'intervento**

Enel GP HGT Design & Execution intende incrementare la potenza complessiva disponibile in pompaggio per i propri impianti siti in centro e sud Italia, ed incrementare contemporaneamente la capacità di fornire servizi ancillari di rete alla rete elettrica nazionale.

In particolare, Enel GP ritiene opportuno potenziare l'impianto di Valcimarra Chienti con l'installazione di un nuovo gruppo reversibile.

Il progetto realizzerà un collegamento idraulico diretto tra i serbatoi di Polverina e Fiastrone, con l'inserimento in questo di un gruppo pompa-turbina reversibile, massimizzando la portata disponibile in pompaggio ed utilizzando con il minore impatto esterno possibile le vie d'acqua esistenti.

Le attuali limitazioni imposte dalla Direzione Dighe sui livelli di esercizio del serbatoio di Polverina ne riducono marcatamente la capacità di invaso e l'installazione di un nuovo gruppo reversibile potrebbe razionalizzare la gestione delle acque in eccesso rispetto a questi limiti.

### **4.2 Criteri di dimensionamento idraulico**

I principali criteri di dimensionamento idraulico del nuovo gruppo sono legati alle caratteristiche dei serbatoi e del sistema idraulico dell'impianto esistente:

IMPIANTO DI VALCIMARRA - CRITERI DI DIMENSIONAMENTO IDRAULICO					
<b>CRITERIO N.1</b>	<b>CONSIDERANDO I VOLUMI ATTUALMENTE TURBINABILI E IL POMPAGGIO SOLO CON LA NUOVA POMPA</b>				
	Portata massima derivabile - Polverina:	18 m3/s			
	Portata massima derivabile - Fiastrone:	10.8 m3/s			
	Portata massima pompabile:	10.8 m3/s			
<b>CRITERIO N.2</b>	<b>CONSIDERANDO I VOLUMI UTILI NETTI DEI SERBATOI</b>				
	SERBATOIO DI FIASTRONE:	teorico	teorico 2020	limitato	limitato 2020
	V utile di regolazione (m3):	21700000	20330000	17320000	16240000
	Utilizzi diversi (irrig+pot):	0	0	0	0
	V utile netto di regolazione (m3):	21700000	20330000	17320000	16240000
	SERBATOIO DI POLVERINA:	teorico	teorico 2020	limitato	limitato 2020
	V utile di regolazione (m3):	5800000	3865000	2860000	1574000
	Utilizzi diversi (irrig+pot):	0	0	0	0
	V utile netto di regolazione (m3):	5800000	3865000	2860000	1574000
	VOLUME UTILE MINIMO VINCOLANTE:	teorico	teorico 2020	limitato	limitato 2020
		5800000	3865000	2860000	1574000
	<b>VOLUME UTILIZZABILE:</b>	<b>5800000</b>	<b>3865000</b>	<b>2860000</b>	<b>1574000</b>
	<b>VALUTAZIONE PORTATE NUOVO GR.4 IN BASE AL VOLUME UTILE</b>				
	Durata turbinaggio	8	8	9	10 ore
	Portata massima turbinabile (GR6+GR7):	201.39	134.20	88.27	43.72 m3/s
	Durata pompaggio	10	10	10	10 ore
	<b>Portata massima pompabile (nuovo GR7+GR8)</b>	<b>161.11</b>	<b>107.36</b>	<b>79.44</b>	<b>43.72 m3/s</b>

**Tabella 5:** Criteri di dimensionamento idraulico

Come si può notare, il Criterio 1 (10.8 m<sup>3</sup>/s in turbinaggio differenziale e 18.0 m<sup>3</sup>/s in pompaggio differenziale) risulta essere quello più limitante, e va confrontato con le eventuali ulteriori limitazioni dovute principalmente al sistema elettrico, ai transitori idraulici o a limitazioni di carattere strutturale (tasso di lavoro delle condotte nelle nuove condizioni e fenomeni di fatica).

Per quanto concerne la parte elettrica, in questo caso non vi sono limitazioni in quanto il nuovo gruppo sarà collegato a nuovo convertitore statico e nuovo trasformatore installato in sottostazione.

Nei paragrafi successivi, dopo aver caratterizzato le perdite di carico del sistema, si valuterà se i transitori idraulici o considerazioni strutturali possano costituire una limitazione ulteriore alle portate trasferibili tramite il nuovo gruppo.

### 4.3 Calcolo delle Perdite di Carico

#### 4.3.1 Introduzione

L'obiettivo del presente capitolo è quello di illustrare la metodologia utilizzata per la stima delle perdite di carico lungo il sistema idraulico, sia in fase di generazione che di pompaggio.

I calcoli effettuati considerano le perdite di carico distribuite che si sviluppano, per effetto dell'attrito, lungo la galleria di derivazione, la condotta forzata e la galleria di restituzione e quelle concentrate legate a variazioni nella geometria e a singolarità del sistema. Queste ultime si manifestano in corrispondenza dei seguenti elementi:

- imbocco dell'opera di presa;
- griglie;
- paratoie e panconi (stoplogs)
- curve;
- allargamenti;
- restringimenti;
- sbocco dell'opera di scarico.

Ai fini dell'analisi, sono state assunte ipotesi di calcolo (scelta della scabrezza, coefficienti di perdita locale, ecc.) tendenzialmente conservative. In questa fase, non disponendo di rapporti di ispezione e prove di rendimento da cui poter risalire alle perdite di carico, queste sono state valutate in base all'esperienza e sulla base delle indicazioni della bibliografia tecnica di riferimento.

#### 4.3.2 Perdite distribuite

Le perdite distribuite o per attrito si verificano in modo uniforme in tutto il sistema idraulico e si devono principalmente alla rugosità dell'elemento (tubo, tunnel con o senza rivestimento, etc.) e alla viscosità dell'acqua.

Il calcolo delle perdite distribuite prevede l'applicazione dell'equazione di Darcy-Weisbach:

$$\Delta H_d = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{u^2}{2g}$$

dove:

$f$	coefficiente di attrito secondo Colebrook-White [-]
$L$	larghezza del tratto del sistema idraulico [m]
$g$	accelerazione di gravità [m/s <sup>2</sup> ]
$D$	diametro della sezione considerata [m]
$v$	velocità media dell'acqua [m/s]

Il coefficiente di attrito si calcola mediante la seguente formula di Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log_{10} \left( \frac{\varepsilon}{3.71 D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

dove:

$\varepsilon$	Scabrezza assoluta, riportata in <b>Tabella 6</b>
$Re$	Numero di Reynolds [-], calcolato come $(V \cdot D)/\nu$
$V$	Velocità media dell'acqua
$D$	Diametro della sezione
$\nu$	Viscosità cinematica dell'acqua (1.31 E-06 Pa s)

I valori di scabrezza assoluta considerati per i materiali costituenti il sistema sono riportati nella successiva tabella:

Materiale	Scabrezza assoluta $\varepsilon$ [mm]
Acciaio	0.30
Calcestruzzo	3.00

**Tabella 6:** Valori di scabrezza assoluta per il calcolo delle perdite di carico distribuite.

#### 4.3.3 Perdite tipologiche concentrate

Le perdite concentrate si verificano nei raccordi e nelle singolarità del sistema idraulico e sono proporzionali all'altezza cinetica secondo la seguente equazione:

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

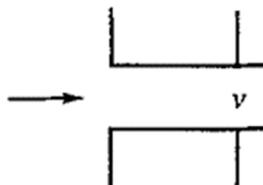
dove:

$\Delta H$	perdita di carico [m]
$K$	coefficiente di perdita [-]
$v$	velocità media dell'acqua nella sezione [m/s]
$g$	accelerazione di gravità [m/s <sup>2</sup> ]

Il coefficiente di perdita  $K$  è stimato, caso per caso, come descritto nei successivi paragrafi.

#### 4.3.4 Perdite all'imbocco

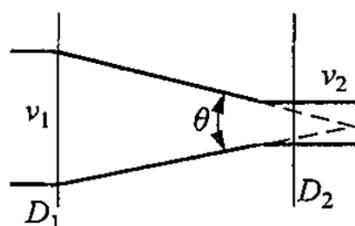
Le perdite localizzate all'imbocco sono calcolate considerando che l'ingresso avvenga con un angolo di 90°, si adotta pertanto un coefficiente di perdita  $K = 0,5$  come suggerito da [1].



**Figura 33:** Perdita localizzata per imbuco a spigolo vivo.

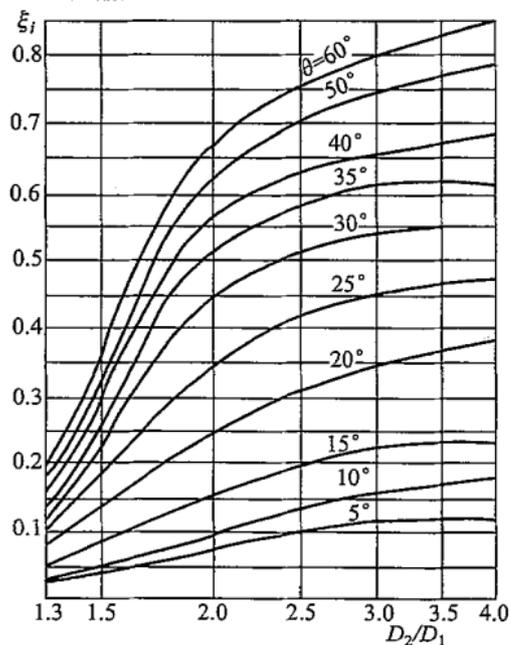
4.3.5 Perdita per restringimento o allargamento di sezione

In caso di restringimento di sezione il coefficiente di perdita, come suggerito da [1], è calcolato in funzione del diametro di ingresso  $D_1$ , del diametro di uscita  $D_2$  e dell'angolo di deviazione  $\theta$  come osservabile nella figura successiva:



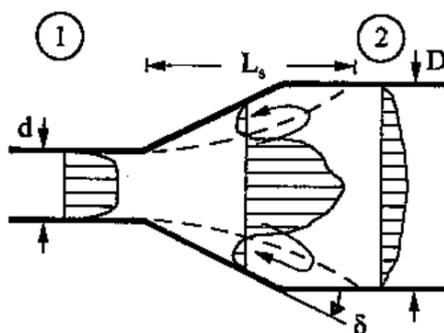
**Figura 34:** Rappresentazione tipica di un restringimento di sezione.

Noti i parametri appena descritti è possibile ricavare il coefficiente di perdita  $K$  attraverso l'abaco di **Figura 35:**



**Figura 35:** Determinazione del coefficiente di perdita per restringimento graduale.

Gli allargamenti di sezione sono definiti, secondo [2], in funzione del diametro di ingresso  $D_1$ , del diametro di uscita  $D_2$  e dell'angolo di apertura  $\delta$  come rappresentato nella figura successiva:



**Figura 36:**Rappresentazione tipica di un restringimento di sezione secondo [2].

La transizione tra le due sezioni genera una ripartizione non uniforme delle velocità con conseguente distacco della vena fluida per una lunghezza  $L_s$ . Di conseguenza, il coefficiente di perdita può essere calcolato analiticamente con la seguente formula:

$$K = \phi_e \left(1 - \frac{A_e}{A_s}\right)^2$$

dove:

$$\phi_e = E \left(\frac{2\delta}{\pi} + \text{sen}(2\delta)\right) \quad , \text{ per } \delta < 30^\circ$$

$$\phi_e = E \left(\frac{5}{\pi} - \frac{\delta}{2\pi}\right), \text{ per } 30^\circ < \delta < 90^\circ$$

$\delta$                       angolo di amplificazione

$E$                         coefficiente adimensionale pari a 0.75

#### 4.3.6 Perdite in curva

Nel caso di curve circolari il coefficiente di perdita, sempre secondo [1], si calcola con la seguente formula:

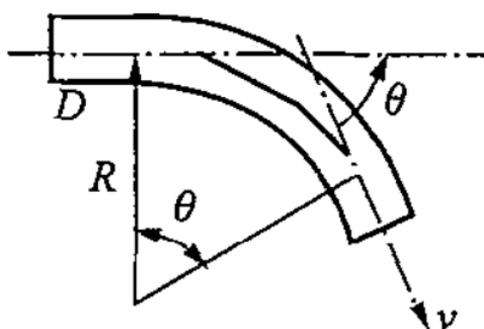
$$K = \left(0.131 + 0.1632 \cdot \left(\frac{D}{R}\right)^{7/2}\right) \cdot \frac{\theta}{90^\circ}$$

dove:

$\theta$                         angolo di curvatura [°]

$R$                         raggio di curvatura [m]

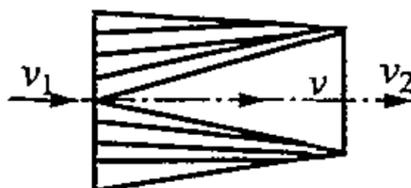
$D$                         diametro della sezione considerata [m]



**Figura 37:** Schematizzazione per il calcolo delle perdite in curva secondo [1].

#### 4.3.7 Perdita per transizione da sezione circolare a quadrata

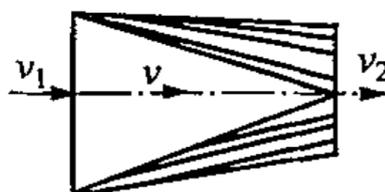
In caso di transizione da sezione circolare a quadrata si assume che la velocità tra i due tratti sia pari alla media delle velocità in ingresso e in uscita. Il coefficiente di perdita è assunto pari a 0.10 [1]:



**Figura 38:** Rappresentazione transizione da sezione circolare a sezione quadrata [1].

#### 4.3.8 Perdita per transizione da sezione quadrata a circolare

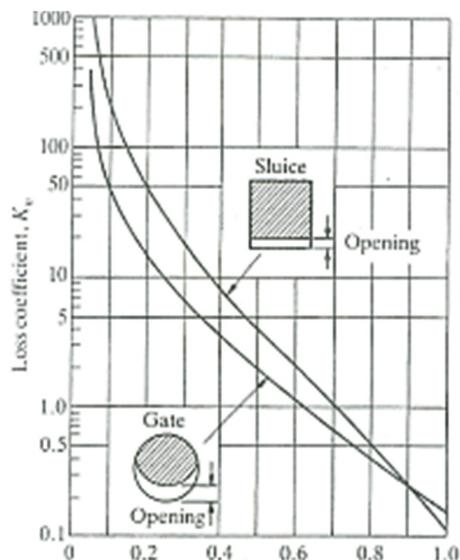
In caso di transizione da sezione quadrata a circolare, analogamente a quanto esposto al paragrafo precedente, si assume che la velocità tra i due tratti sia pari alla media delle velocità in ingresso e in uscita. Il coefficiente di perdita è assunto pari a 0.05 [1]:



**Figura 39:** Rappresentazione transizione da sezione quadrata a sezione circolare [1].

#### 4.3.9 Perdita in corrispondenza di paratoie e stoplogs

Le perdite localizzate in corrispondenza di paratoie e stoplogs dipendono dalla forma e dal grado d'apertura delle stesse. Il coefficiente di perdita  $K$  si calcola attraverso l'abaco riportato nell'immagine successiva [3]:



**Figura 40:** Determinazione del coefficiente di perdita  $K$  in caso di paratoie e stoplogs secondo [3].

#### 4.3.10 Perdita dovuta alla presenza di griglie

Per il calcolo delle perdite in corrispondenza delle griglie viene adottata la formula semplificata che consente il calcolo del coefficiente di perdita  $K$  attraverso la seguente formula [1]:

$$K = \beta \cdot \left(\frac{s}{b}\right)^{\frac{4}{3}} \cdot \text{sen}(\alpha)$$

dove:

- $s$  spessore della griglia [m]
- $b$  spaziatura della griglia [m]
- $\alpha$  angolo di inclinazione della griglia [rad]
- $\beta$  coefficiente di forma della griglia [-], (v. **Figura 41**)

Rack shape							
$\beta$	2.42	1.83	1.67	1.035	0.92	0.76	1.79

**Figura 41:** Coefficiente di forma della griglia, [1].

#### 4.3.11 Perdita in corrispondenza di valvole

Le perdite localizzate in presenza di valvole dipendono dalla natura della valvola e dal grado di apertura delle stessa.

Nel caso di valvole a farfalla, il coefficiente di perdita  $K$  è dato dalla seguente tabella [1]:

$t/D$	0.10	0.15	0.20	0.25
$\xi$	0.05–0.10	0.10–0.16	0.17–0.24	0.25–0.35

**Figura 42:** Coefficiente di perdita valvola a farfalla.

Non essendo disponibili dati precisi sulle valvole a farfalla si assume  $K=0.15$ .

Nel caso invece delle valvole rotative si assume, conservativamente, un coefficiente di perdita  $K=0.15$ .

#### 4.4 Valutazione analitica delle perdite di carico

Le perdite di carico sono calcolate considerando la presenza del nuovo gruppo reversibile ed i tratti di collegamento alle condotte forzate esistenti.

Le perdite sono calcolate in base all'esperienza con assunzioni conservative. I valori potranno essere rivalutati nelle fasi progettuali successive in base ai rapporti di ispezione o da prove di rendimento resi disponibili dal Cliente oppure tramite nuovi rilievi ed ispezioni.

Per ciascuna derivazione si calcola il coefficiente  $DH/Q^2$  prendendo a riferimento la perdita di carico alla portata nominale.

Le tabelle mostrano i valori calcolati per le gallerie forzate di adduzione e per le condotte forzate, sia in fase di turbinaggio (da Fiastrone verso Polverina) che di pompaggio (da Polverina verso Fiastrone).

4.4.1 Derivazione Fiastrone

DERIVAZIONE FIASTRONE						
VALUTAZIONE DELLE PERDITE IN TURBINAGGIO						
<b>GALLERIA FORZATA</b>						
<b>PERDITE DISTRIBUITE - tratto in CLS</b>						
Length (m)	8695	Q=	10.8			
diameter (m)	2.4	A=	4.52			
		V=	2.39			
roughness (m)	0.0030	V <sup>2</sup> /2G=	0.291			
eps/d	0.00125					
lambda	0.020733114			DH=J*L	DH TOTALI	
J=lam*V <sup>2</sup> /2gD	0.002509589			21.82	21.821	
<b>PERDITE CONCENTRATE</b>						
		K	V <sup>2</sup> /2G	DH		
BOCCA DI PRESA		0.5	0.291	0.14531		
VALVOLA FARFALLA MONTE		0.15	0.291	0.043593		
DERIVAZIONE POZZO PIEZO		0.05	0.291	0.014531	0.203	
<b>PERDITE DISTRIBUITE - tratto in ACCIAIO</b>						
Length (m)	85	Q=	10.8			
diameter (m)	2.4	A=	4.52			
		V=	2.39			
roughness (m)	0.0003	V <sup>2</sup> /2G=	0.291			
eps/d	0.000125					
lambda	0.012498167			DH=J*L		
J=lam*V <sup>2</sup> /2gD	0.00151281			0.13	0.129	
<b>PERDITE CONCENTRATE</b>						
diameter (m)	1.7	D2/D1=	1.41			
A=	2.27					
V=	4.76					
		K	V <sup>2</sup> /2G	DH		QUOTA
RIDUZIONE CONICA		0.05	1.154	0.057723		
VALVOLA A FARFALLA		0.15	1.154	0.173168	0.231	569.3
					DH	DH/Q <sup>2</sup>
<b>PERDITE TRA SERBATOIO E POZZO:</b>					22.024	0.18882
<b>PERDITE TRA POZZO E CAMERA VALVOLE</b>					0.359	0.003081955
<b>PERDITE TOTALI TRA SERBATOIO E CAMERA VALVOLE</b>					22.384	0.19190

Tabella 7: Perdite di carico - Fiastrone - Galleria forzata – Turbinaggio



CONDOTTA FORZATA FIASTRONE - STACCO IN ALTO (QUOTA PONTICELLO ESISTENTE @397.90)														
VALUTAZIONE DELLE PERDITE IN TURBINAGGIO														
CONDOTTA ESISTENTE														
TRATTO	L	DI	A	V	V <sup>2</sup> /2G	eps/D	lam	J	Dhdist	tipo	Kconc	Dhconc	Dhtot (m)	DH cummul (m)
						scabrezza								
						Q=	10.8 m <sup>3</sup> /s							
						scabrezza	0.0003 m							
1	0	1.7	2.27	4.758	1.154	0.0002	0.0134	0.0091	0.000	C45	0.05	0.058	0.058	0.058
1	100.88	1.7	2.27	4.758	1.154	0.0002	0.0134	0.0091	0.916			0.000	0.916	0.974
1	6	1.6	2.01	5.372	1.471	0.0002	0.0135	0.0124	0.075	CONV	0.001	0.001	0.076	1.050
2	137.53	1.6	2.01	5.372	1.471	0.0002	0.0135	0.0124	1.712			0.000	1.712	2.762
2	6	1.5	1.77	6.112	1.905	0.0002	0.0137	0.0174	0.104	CONV	0.001	0.002	0.106	2.869
2	3	1.5	1.77	6.112	1.905	0.0002	0.0137	0.0174	0.052	C45	0.05	0.095	0.147	3.016
3	40	1.5	1.77	6.112	1.905	0.0002	0.0137	0.0174	0.697			0.000	0.697	3.713
3	0	1.5	1.77	6.112	1.905	0.0002	0.0137	0.0174	0.000	DER45	0.3	0.571	0.571	4.284
5	87.9	1.5	1.77	6.112	1.905	0.0002	0.0137	0.0174	1.531			0.000	1.531	5.815
5	0	1.5	1.77	6.112	1.905	0.0002	0.0137	0.0174	0.000	C90	0.1	0.190	0.190	6.005
6	50	1.5	1.77	6.112	1.905	0.0002	0.0137	0.0174	0.871			0.000	0.871	6.876
6	0	1.5	1.77	6.112	1.905	0.0002	0.0137	0.0174	0.000	2xVALV ROT	0.3	0.571	0.571	7.448
														DH/Q <sup>2</sup>
														0.06385
VALUTAZIONE DELLE PERDITE IN POMPAGGIO														
CONDOTTA ESISTENTE														
TRATTO	L	DI	A	V	V <sup>2</sup> /2G	eps/D	lam	J	Dhdist	tipo	Kconc	Dhconc	Dhtot (m)	DH cummul (m)
						scabrezza								
						Q=	10.8 m <sup>3</sup> /s							
						scabrezza	0.0003 m							
1	0	1.7	2.27	4.758	1.154	0.0002	0.0134	0.0091	0.000	C45	0.05	0.058	0.058	0.058
1	100.88	1.7	2.27	4.758	1.154	0.0002	0.0134	0.0091	0.916			0.000	0.916	0.974
1	6	1.6	2.01	5.372	1.471	0.0002	0.0135	0.0124	0.075	DIV	0.005	0.007	0.082	1.056
2	137.53	1.6	2.01	5.372	1.471	0.0002	0.0135	0.0124	1.712			0.000	1.712	2.768
2	6	1.5	1.77	6.112	1.905	0.0002	0.0137	0.0174	0.104	DIV	0.005	0.010	0.114	2.882
2	3	1.5	1.77	6.112	1.905	0.0002	0.0137	0.0174	0.052	C45	0.05	0.095	0.147	3.030
3	40	1.5	1.77	6.112	1.905	0.0002	0.0137	0.0174	0.697			0.000	0.697	3.726
3	0	1.5	1.77	6.112	1.905	0.0002	0.0137	0.0174	0.000	DER45	0.3	0.571	0.571	4.298
5	87.9	1.5	1.77	6.112	1.905	0.0002	0.0137	0.0174	1.531			0.000	1.531	5.829
5	0	1.5	1.77	6.112	1.905	0.0002	0.0137	0.0174	0.000	C90	0.1	0.190	0.190	6.019
6	50	1.5	1.77	6.112	1.905	0.0002	0.0137	0.0174	0.871			0.000	0.871	6.890
6	0	1.5	1.77	6.112	1.905	0.0002	0.0137	0.0174	0.000	2xVALV ROT	0.3	0.571	0.571	7.461
														DH/Q <sup>2</sup>
														0.06397

Tabella 9: Perdite di carico - Fiastrone – Condotta Forzata – Turbinaggio e Pompaggio

4.4.2 Derivazione Polverina

DERIVAZIONE POLVERINA						
VALUTAZIONE DELLE PERDITE IN TURBINAGGIO						
<b>GALLERIA FORZATA</b>						
<b>PERDITE DISTRIBUITE - tratto in CLS</b>						
Length (m)	2200	Q=	18			
diameter (m)	3.3	A=	8.55			
		V=	2.10			
roughness (m)	0.0030	V <sup>2</sup> /2G=	0.226			
eps/d	0.000909091					
lambda	0.019175256			DH=J*L	DH TOTALI	
J=lam*V <sup>2</sup> /2gD	0.001311787			2.89	2.886	
<b>PERDITE CONCENTRATE - tratto in CLS</b>						
		K	V <sup>2</sup> /2G	DH		
BOCCA DI PRESA		0.5	0.226	0.112923		
CAMERA PARATOIE		0.15	0.226	0.033877	0.147	
<b>PERDITE DISTRIBUITE - tratto SIFONE in ACCIAIO</b>						
Length (m)	520	Q=	18			
diameter (m)	3	A=	7.07			
		V=	2.55			
roughness (m)	0.0003	V <sup>2</sup> /2G=	0.331			
eps/d	0.0001					
lambda	0.011973651			DH=J*L		
J=lam*V <sup>2</sup> /2gD	0.001319205			0.69	0.686	
<b>PERDITE CONCENTRATE - tratto SIFONE in ACCIAIO</b>						
		K	V <sup>2</sup> /2G	DH		
RIDUZIONE CONICA	0.005	0.331	0.001653		punto depresso sifone	
2 CURVE MONTE A 30°	0.08966	0.331	0.029647		QUOTA	368.8
2 CURVE VALLE A 30°	0.08966	0.331	0.029647			
ESPANSIONE CONICA 10°	0.010237	0.331	0.003385			
<b>PERDITE DISTRIBUITE - tratto in CLS</b>						
Length (m)	4593	Q=	18			
diameter (m)	3.3	A=	8.55			
		V=	2.10			
roughness (m)	0.0030	V <sup>2</sup> /2G=	0.226			
eps/d	0.000909091					
lambda	0.019175256			DH=J*L	DH TOTALI	
J=lam*V <sup>2</sup> /2gD	0.001311787			6.03	6.025	
<b>PERDITE CONCENTRATE - tratto in CLS</b>						
		K	V <sup>2</sup> /2G	DH		
DERIVAZIONE POZZO PIEZO		0.05	0.226	0.011292	0.011	
diameter (m)	2.1	D2/D1=	1.57			
A=	3.46					
V=	5.20					
		K	V <sup>2</sup> /2G	DH		
RIDUZIONE CONICA	0.1	1.377	0.137718			
VALVOLA A FARFALLA	0.15	1.377	0.206578	0.344	QUOTA	375.96
					DH	DH/Q <sup>2</sup>
<b>PERDITE TRA SERBATOIO E POZZO:</b>					9.755	0.03011
<b>PERDITE TRA POZZO E CAMERA VALVOLE</b>					0.344	0.001062642
<b>PERDITE TOTALI TRA SERBATOIO E CAMERA VALVOLE</b>					10.099	0.03117

Tabella 10: Perdite di carico - Polverina - Galleria forzata – Turbinaggio

DERIVAZIONE POLVERINA						
VALUTAZIONE DELLE PERDITE IN POMPAGGIO						
<b>GALLERIA FORZATA</b>						
<b>PERDITE DISTRIBUITE - tratto in CLS</b>						
Length (m)	2200	Q=	18			
diameter (m)	3.3	A=	8.55			
		V=	2.10			
roughness (m)	0.0030	V <sup>2</sup> /2G=	0.226			
eps/d	0.000909091					
lambda	0.019175256			DH=J*L	DH TOTALI	
J=lam*V <sup>2</sup> /2gD	0.001311787			2.89	2.886	
<b>PERDITE CONCENTRATE - tratto in CLS</b>						
		K	V <sup>2</sup> /2G	DH		
BOCCA DI PRESA		1	0.226	0.225846		
CAMERA PARATOIE		0.15	0.226	0.033877	0.260	
<b>PERDITE DISTRIBUITE - tratto SIFONE in ACCIAIO</b>						
Length (m)	520	Q=	18			
diameter (m)	3	A=	7.07			
		V=	2.55			
roughness (m)	0.0003	V <sup>2</sup> /2G=	0.331			
eps/d	0.0001					
lambda	0.011973651			DH=J*L		
J=lam*V <sup>2</sup> /2gD	0.001319205			0.69	0.686	
<b>PERDITE CONCENTRATE - tratto SIFONE in ACCIAIO</b>						
		K	V <sup>2</sup> /2G	DH		
RIDUZIONE CONICA	0.005	0.331	0.001653		punto depresso sifone	
2 CURVE MONTE A 30°	0.08966	0.331	0.029647		QUOTA	368.8
2 CURVE VALLE A 30°	0.08966	0.331	0.029647			
ESPANSIONE CONICA 10°	0.010237	0.331	0.003385			
<b>PERDITE DISTRIBUITE - tratto in CLS</b>						
Length (m)	4593	Q=	18			
diameter (m)	3.3	A=	8.55			
		V=	2.10			
roughness (m)	0.0030	V <sup>2</sup> /2G=	0.226			
eps/d	0.000909091					
lambda	0.019175256			DH=J*L	DH TOTALI	
J=lam*V <sup>2</sup> /2gD	0.001311787			6.03	6.025	
<b>PERDITE CONCENTRATE - tratto in CLS</b>						
		K	V <sup>2</sup> /2G	DH		
DERIVAZIONE POZZO PIEZO		0.05	0.226	0.011292	0.011	
diameter (m)	2.1	D2/D1=	alfa			
A=	3.46	0.00	10			
V=	5.20					
		K	V <sup>2</sup> /2G	DH	QUOTA	
ESPANSIONE CONICA	0.120332	1.377	0.16572			
VALVOLA A FARFALLA	0.15	1.377	0.206578	0.372	569.3	
					DH	DH/Q <sup>2</sup>
<b>PERDITE TRA SERBATOIO E POZZO:</b>					9.868	0.03046
<b>PERDITE TRA POZZO E CAMERA VALVOLE</b>					0.384	0.001183919
<b>PERDITE TOTALI TRA SERBATOIO E CAMERA VALVOLE</b>					10.252	0.03164

Tabella 11: Perdite di carico - Polverina - Galleria forzata – Pompaggio

CONDOTTA FORZATA POLVERINA - STACCO IN ALTO A VALLE VALVOLA (QUOTA CAMERA VALVOLE @375.96)																
<b>VALUTAZIONE DELLE PERDITE IN TURBINAGGIO</b>																
Q= 10.8 m <sup>3</sup> /s																
scabrezza 0.0003 m																
<b>CONDOTTA</b>																
NUOVA	TRATTO	L	DI	A	V	V <sup>2</sup> /2G	eps/D	lam	J	Dhdist	tipo	Kconc	Dhconc	Dhtot (m)	DH cumul (m)	
	1	0	2.1	3.46	3.118	0.496	0.0001	0.0128	0.0030	0.000	DER90	0.5	0.248	0.248	0.248	
	2	0	1.8	2.54	4.244	0.919	0.0002	0.0132	0.0067	0.000	CONV	0.001	0.001	0.001	0.249	
	2	85.96	1.8	2.54	4.244	0.919	0.0002	0.0132	0.0067	0.580	C90	0.1	0.092	0.672	0.921	
	3	76	1.8	2.54	4.244	0.919	0.0002	0.0132	0.0067	0.513			0.000	0.513	1.433	
	3	0	1.8	2.54	4.244	0.919	0.0002	0.0132	0.0067	0.000	2xVALV ROT	0.3	0.276	0.276	1.709	
																DH/Q <sup>2</sup>
																0.01465
<b>VALUTAZIONE DELLE PERDITE IN POMPAGGIO</b>																
Q= 10.8 m <sup>3</sup> /s																
scabrezza 0.0003 m																
<b>CONDOTTA</b>																
NUOVA	TRATTO	L	DI	A	V	V <sup>2</sup> /2G	eps/D	lam	J	Dhdist	tipo	Kconc	Dhconc	Dhtot (m)	DH cumul (m)	
	1	0	2.1	3.46	3.118	0.496	0.0001	0.0128	0.0030	0.000	DER90	0.5	0.248	0.248	0.248	
	2	0	1.8	2.54	4.244	0.919	0.0002	0.0132	0.0067	0.000	DIV	0.005	0.005	0.005	0.252	
	2	85.96	1.8	2.54	4.244	0.919	0.0002	0.0132	0.0067	0.580	C90	0.1	0.092	0.672	0.924	
	3	76	1.8	2.54	4.244	0.919	0.0002	0.0132	0.0067	0.513			0.000	0.513	1.437	
	3	0	1.8	2.54	4.244	0.919	0.0002	0.0132	0.0067	0.000	2xVALV ROT	0.3	0.276	0.276	1.713	
																DH/Q <sup>2</sup>
																0.01468

**Tabella 12:** Perdite di carico - Polverina – Condotta Forzata – Turbinaggio e Pompaggio

#### 4.4.3 Sintesi sulle perdite calcolate

Considerato che tra la condizione di turbinaggio e pompaggio la differenza riscontrata tra i valori delle perdite di carico è modestissima, si ritiene di utilizzare ai fini dei calcoli successivi la seguente tabella unica delle perdite di carico:

	DERIVAZIONE FIASTRONE			DERIVAZIONE POLVERINA		
	Galleria	Condotta forzata	Totale	Galleria	Condotta forzata	Totale
DH/Q <sup>2</sup> (m/(m <sup>3</sup> /s) <sup>2</sup> )	0.1935	0.0640	0.2575	0.0316	0.0147	0.0463

**Tabella 13:** Nuovo Gruppo reversibile - Perdite di carico

I valori sono utilizzati nelle verifiche idrauliche effettuate nei paragrafi successivi.

#### 4.5 Analisi di sensitività sui livelli nei pozzi piezometrici

È stata eseguita una analisi di sensitività sui livelli nei pozzi piezometrici (PP), al fine di valutare le modifiche delle condizioni operative d'impianto dovute all'inserimento del nuovo gruppo rispetto a quelle originarie.

Le condizioni operative che generano i maggiori sovralzi del pelo libero nei pozzi esistenti sono: per la derivazione Fiastrone, la condizione di pompaggio differenziale e per la derivazione Polverina quella di turbinaggio differenziale.

##### 4.5.1 Condizioni stazionarie

Il PP Fiastrone ha quota di coronamento ad el.648.80 m slm. Considerando il serbatoio alla quota di massima regolazione (640.00 m slm senza le attuali limitazioni), la massima portata pompabile risulterebbe pari a  $Q = [(648.80-640.00)/0.1935]^{0.5} = 6.7 \text{ m}^3/\text{s}$ , valore che si ritiene assai limitante rispetto agli obiettivi progettuali.

Con modifiche al PP si ritiene di poter raggiungere portate in pompaggio nell'ordine di quelle attualmente turbinate dalla derivazione. Come valore massimo di portata pompabile, si ritiene di non dover superare il valore della portata massima derivabile pari a  $10.8 \text{ m}^3/\text{s}$ , ottenendo perdite di carico dell'ordine di 22.5 m e quindi una piezometrica statica in corrispondenza del PP pari a 662.6 m slm, con necessità di modifica della quota di ritenuta del pozzo.

Il PP Polverina ha invece quota di coronamento ad el.408.20 m slm. Considerando il serbatoio alla quota di massima regolazione (400.00 m slm senza le attuali limitazioni), la massima portata turbinabile risulterebbe pari a  $Q = [(408.20-400.00)/0.0316]^{0.5} = 16.1 \text{ m}^3/\text{s}$ , valore superiore al limite di  $10.8 \text{ m}^3/\text{s}$  sulla derivazione Fiastrone. Pertanto, in condizioni stazionarie il PP Polverina non richiederebbe modifiche.

##### 4.5.2 Condizioni transitorie

Le quote piezometriche che vanno ad instaurarsi nei pozzi piezometrici durante i transitori possono costituire un vincolo progettuale e pertanto viene effettuata una analisi di sensitività rispetto alle diverse portate convogliabili dal nuovo gruppo.

In particolare, si valutano le seguenti manovre:

- Fiastrone: avviamento pompaggio (30s)
- Fiastrone: brusca interruzione pompaggio (10s).
- Fiastrone: casi di avvio/arresto turbinaggio differenziale

Risultando la portata in questa derivazione inferiore a quella massima derivabile, l'impianto esistente dovrebbe già essere dimensionato nei confronti di tali transitori, che qui non vengono dunque considerati.

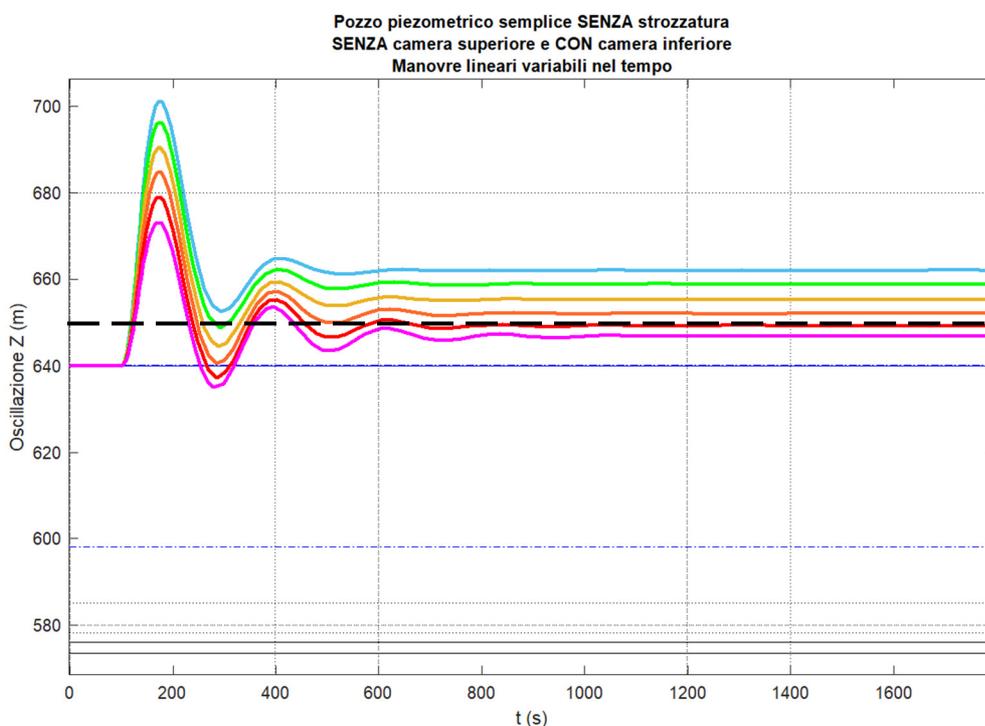
- Polverina: avviamento turbinaggio differenziale (30s)

- Polverina: brusca interruzione turbinaggio differenziale (10s)
- Polverina: casi di avvio/arresto pompaggio differenziale

Risultando la portata limitata a valori pari a quella massima derivabile sulla derivazione Fiastrone, l'impianto esistente è già essere dimensionato nei confronti di tali transitori, di entità inferiore a quelli di progetto, che qui non vengono dunque considerati.

Per quanto riguarda il **pozzo piezometrico Fiastrone**, si è considerata la configurazione esistente e si sono effettuate simulazioni in avviamento e brusco arresto, con valori di portata variabili tra 6.0 e 10.8 m<sup>3</sup>/s.

Come primo caso si considera l'avviamento e l'assenza della camera superiore attualmente costruita in quanto non adeguata al contenimento per le quote raggiunte (la linea nera tratteggiata rappresenta la quota di coronamento del pozzo esistente):



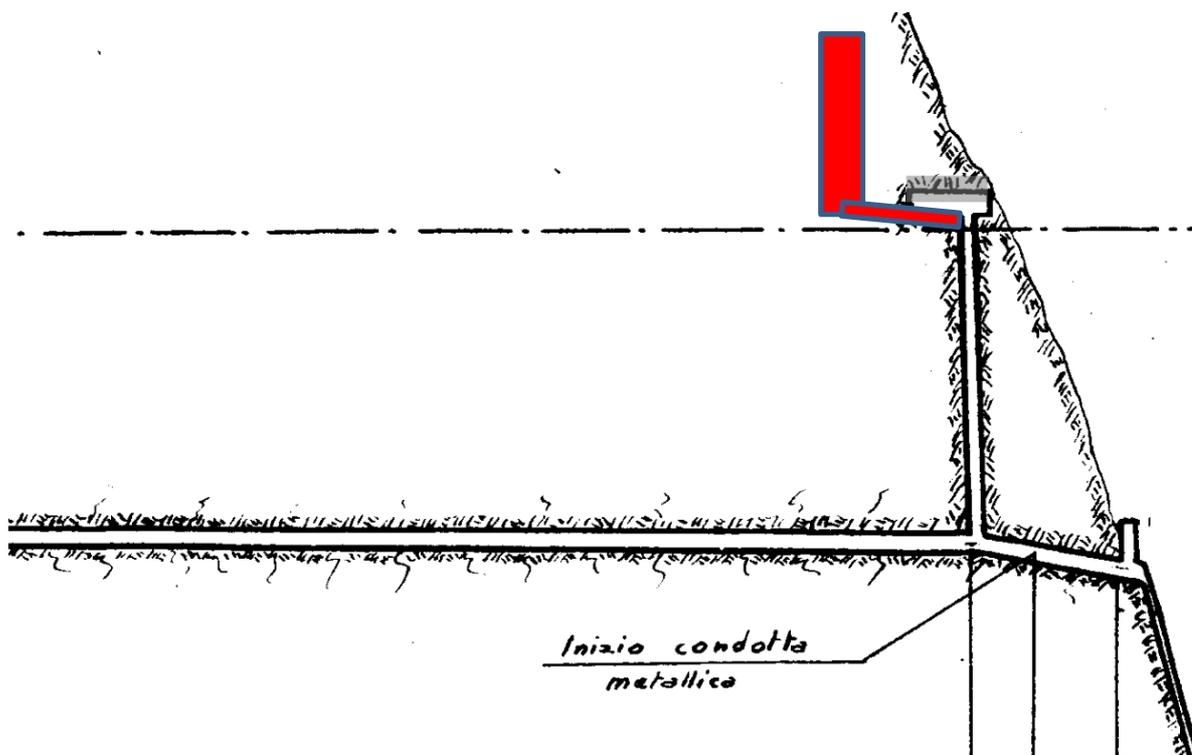
**Figura 43:** PP Fiastrone - avviamento pompaggio senza camera espansione

Come si può notare, qualsiasi manovra di apertura comporta un sovrizzo superiore alla quota di coronamento del PP.

Occorre pertanto ripensare il layout del pozzo esistente, in modo da consentire il contenimento del transitorio di avviamento. Considerati i livelli dei sopralzi, si propone la realizzazione dell'estensione del pozzo mediante la disconnessione dell'attuale vasca di espansione e la realizzazione di un tratto sub-orizzontale di collegamento e poi di un nuovo pozzo con diametro maggiorato (vedi figura qui sotto), che:

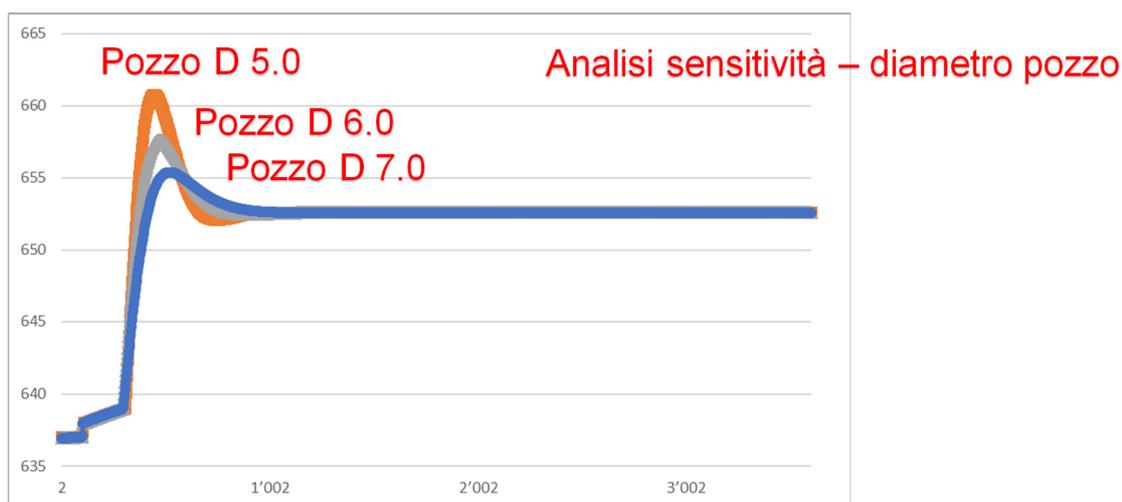
- consenta di ridurre il sopralzo entro limiti accettabili;

- possa essere realizzato in modo da minimizzarne l'impatto ambientale.



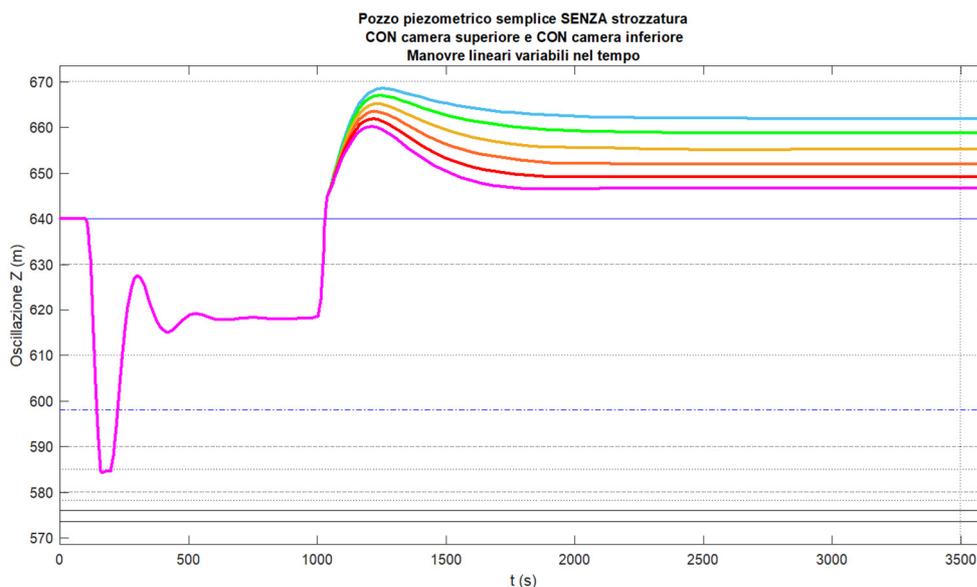
**Figura 44:** Nuovo schema PP Fiastrone

Si prevede un tratto di collegamento di circa 100 m avente diametro minimo 3.0 m e poi una nuova camera di espansione cilindrica verticale con diametro orientativamente tra 5.0 e 7.0 m, oltre che la modifica della camera esistente.



**Figura 45:** Espansione Pozzo Fiastrone - analisi di sensitività per  $Q=9 \text{ m}^3/\text{s}$

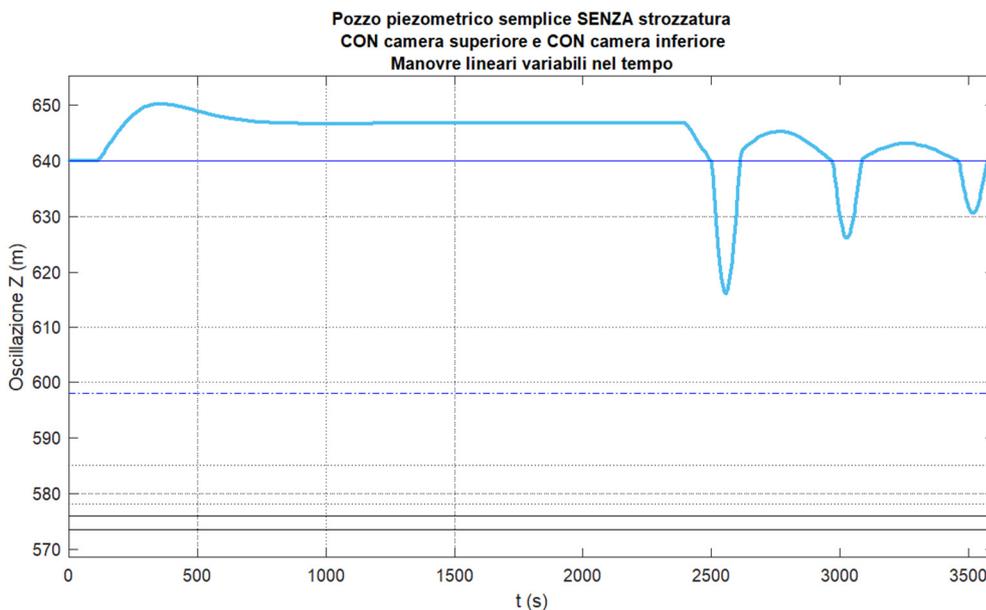
Oltre alla manovra di espansione, è da considerare come dimensionante la manovra di variazione rapida da turbinaggio a pompaggio in 30+30s.



**Figura 46:** PP Fiastrone ampliato – manovra di commutazione rapida turbinaggio-pompaggio a t=1000s

Sempre al fine di contenere i sovralti, il tratto verticale in ampliamento dovrà avere un diametro minimo di 10 m, ed una quota di sommità pari ad el. 670 m slm.

Con il nuovo assetto, le escursioni di piezometrica dovute altre manovre (avviamento in 30s ed arresto in 10s) qui di seguito illustrate possono essere tranquillamente controllate dal pozzo.



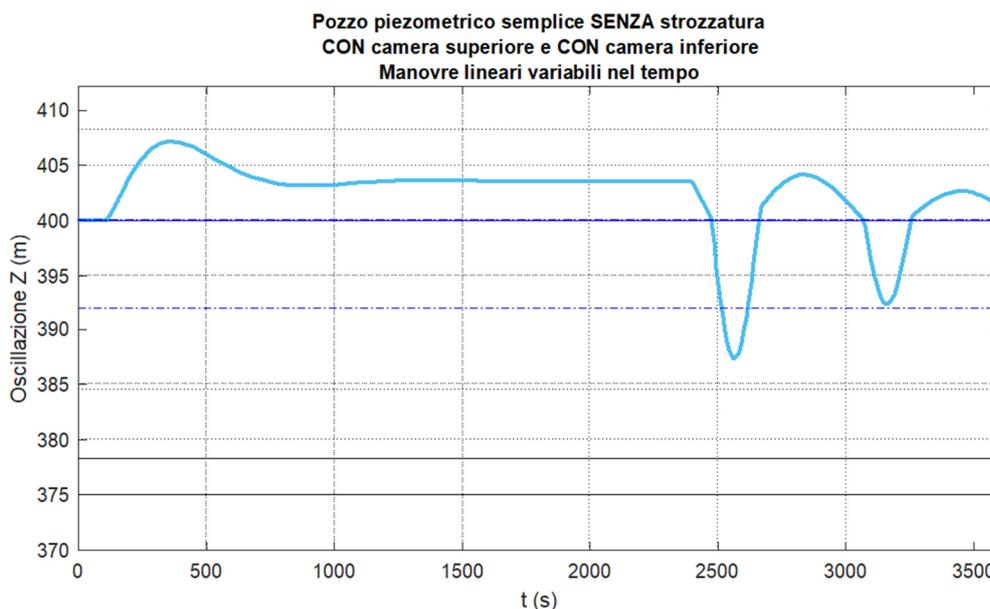
**Figura 47:** PP Fiastrone ampliato - manovra di avvio (30s) e di arresto (10s)

Concludendo, il PP Fiastrone ampliato è in grado di garantire tutte le manovre prevedibili per portate tra 6 e 10.8 m<sup>3</sup>/s con variazioni del livello piezometrico contenute all'interno dei limiti fisici del pozzo.

Per quanto riguarda il **PP Polverina**, il discorso è sostanzialmente diverso, in quanto la portata massima è di 18.0 m<sup>3</sup>/s, superiore rispetto ai massimi 10.8 m<sup>3</sup>/s eventualmente trasferibili da/verso l'altra derivazione.

Si esegue una verifica delle diverse condizioni di transitorio indotte dal nuovo turbinaggio differenziale, immaginando di convogliare la massima portata turbinabile dal nuovo gruppo differenziale, pari a 10.8 m<sup>3</sup>/s.

Il grafico qui sotto rappresenta il solo avviamento del turbinaggio in 30s seguito da un brusco arresto in 10s. I livelli piezometrici sono contenuti entro i limiti fisici del pozzo.

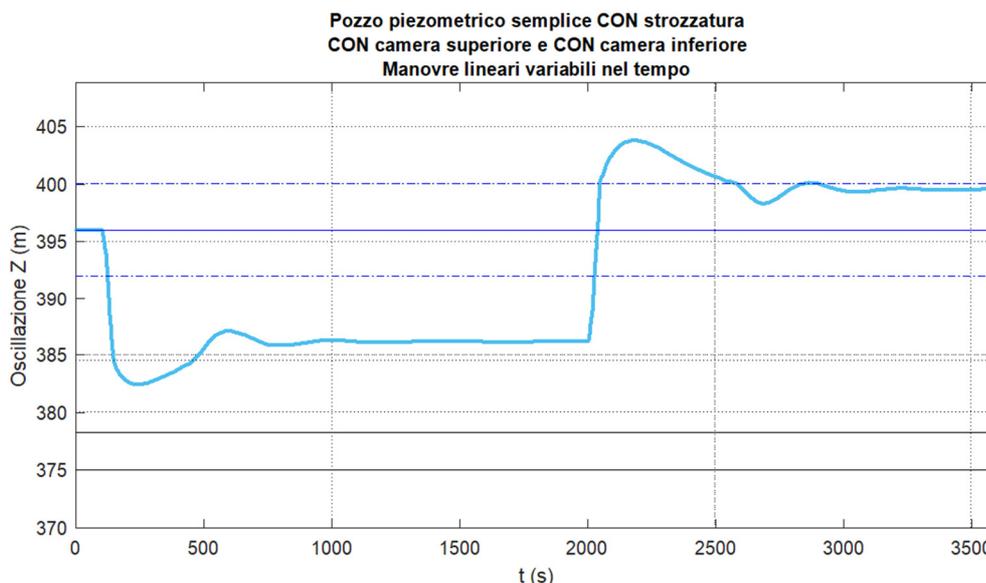


**Figura 48:** PP Polverina - turbinaggio differenziale - manovre di avvio (30s) ed arresto (10s)

Nel caso di manovra di variazione rapida da turbinaggio a pompaggio in 30+30s i livelli non risulterebbero gestibili dal PP esistente. È tuttavia da considerare che una richiesta di regolazione che preveda di produrre energia può essere sempre gestibile con le macchine esistenti.

Nel caso di volere comunque gestire il PP Polverina in modalità di manovra rapida, occorre modificare il pozzo esistente, ad esempio inserendo una strozzatura per una regolazione ottimale.

La figura seguente illustra l'inserimento di una strozzatura con diametro  $d= 1.2\text{m}$ , coefficiente di deflusso pari a 0.6, che consentirebbe di riportare le piezometriche entro i limiti necessari:



**Figura 49:** PP Polverina – manovra rapida turbinaggio-pompaggio in 30+30s

Concludendo, il PP Polverina con lievi modifiche sarebbe in grado di effettuare oltre alle normali manovre anche manovre di rapida commutazione tra pompaggio e turbinaggio con variazioni del livello piezometrico contenute entro i limiti fisici del pozzo.

#### 4.6 Perdite idrauliche e potenza del nuovo gruppo reversibile

Considerati tutti i limiti tecnici espressi dalle precedenti valutazioni, le massime portate di progetto del nuovo gruppo differenziale che si intendono proporre sono le seguenti:

- **Turbinaggio da Fiastrone verso Polverina: 10.8 m<sup>3</sup>/s**
- **Pompaggio da Fiastrone verso Polverina: 9.0 m<sup>3</sup>/s**

In funzione delle valutazioni del macchinista, nelle successive fasi progettuali verranno utilizzati i dati ottimizzati dal punto di vista elettromeccanico.

Il progetto prevede la possibilità di:

- pompaggio differenziale da Polverina verso Fiastrone in contemporanea con la produzione del Gruppo 3, nel rispetto della massima portata derivabile sul ramo Polverina, pari a 18.0 m<sup>3</sup>/s, considerando non attivi i Gruppi 1 e 2 afferenti alla derivazione Fiastrone;
- turbinaggio differenziale da Fiastrone verso Polverina in contemporanea con la produzione dei Gruppi 1 e 2, nel rispetto della massima portata derivabile sul ramo Fiastrone, pari a 10.8 m<sup>3</sup>/s, considerando non attivo il Gruppo 3 afferente alla derivazione Polverina;
- vi è infine la possibilità di operare alcune ulteriori combinazioni di utilizzo contemporaneo tra nuovo gruppo differenziale ed i gruppi turbina esistenti, che potrebbero tuttavia non risultare premianti.

#### 4.6.1 Valutazione delle Perdite di carico in fase di turbinaggio

Il gruppo reversibile in fase di turbinaggio funziona in sostituzione dei gruppi esistenti, e pertanto considerando il massimo salto lordo pari a circa 240 m, si ottiene un salto netto pari a:

$$S_{\text{netto}} = S_{\text{lordo}} - K \cdot Q_{\text{turbinata}}^2 = 240 - 0.2575 \cdot 10.8^2 = 210.0 \text{ m};$$

viceversa, con il minimo salto lordo pari a 200 m circa, si ottiene:

$$S_{\text{netto}} = S_{\text{lordo}} - K \cdot Q_{\text{turbinata}}^2 = 200 - 0.2575 \cdot 10.8^2 = 170.0 \text{ m};$$

#### 4.6.2 Valutazione delle Perdite di carico in fase di pompaggio

Il gruppo reversibile in fase di pompaggio può funzionare sia da solo che contemporaneamente al Gr.3, dovendo comunque rispettare il limite dei 18.0 m<sup>3</sup>/s massimi convogliabili dalla derivazione Polverina.

Nella condizione di massimo convogliamento da Polverina, considerando il massimo salto lordo pari a circa 240 m, si ottiene un salto netto pari a:

$$\begin{aligned} S_{\text{netto}} &= S_{\text{lordo}} + K_{\text{Polverina}} \cdot Q_{t,\text{Polverina}}^2 + K_{\text{Fiastrone}} \cdot Q_{t,\text{Fiastrone}}^2 = \\ &= 240 + 0.0463 \cdot 18.0^2 + 0.2575 \cdot 9.0^2 = 240 + 30.8 + 29.4 = 275.9 \text{ m}; \end{aligned}$$

viceversa, con il minimo salto lordo pari a 200 m circa, si ottiene:

$$\begin{aligned} S_{\text{netto}} &= S_{\text{lordo}} + K_{\text{Polverina}} \cdot Q_{t,\text{Polverina}}^2 + K_{\text{Fiastrone}} \cdot Q_{t,\text{Fiastrone}}^2 = \\ &= 200 + 0.0463 \cdot 18.0^2 + 0.2575 \cdot 9.0^2 = 200 + 30.8 + 29.4 = 235.9 \text{ m}; \end{aligned}$$

### 4.7 Potenza dell'impianto

Le massime potenze idrauliche che il gruppo reversibile deve gestire nel processo di trasferimento dell'acqua tra i due serbatoi sono le seguenti:

- in turbinaggio:  $P_{\text{max, idraulica}} = \gamma Q \Delta H = 9.806 \cdot 10.8 \cdot 210.0 / 1000 = 22.2 \text{ MW};$
- in pompaggio:  $P_{\text{max, idraulica}} = \gamma Q \Delta H = 9.806 \cdot 9.00 \cdot 275.9 / 1000 = 24.3 \text{ MW};$

Assumendo preliminarmente i seguenti valori di rendimento alla massima potenza

- girante in turbinaggio: 0.90
- girante in pompaggio: 0.80
- alternatore/motore: 0.97
- trasformatore: 0.995

si ottengono i seguenti rendimenti di gruppo alla massima potenza:

- gruppo in turbinaggio: 0.867
- gruppo in pompaggio: 0.772

Le massime potenze erogate/richieste sono pertanto pari a:

- gruppo in turbinaggio:  $22.2 * 0.867 = 19.2$  MW
- gruppo in pompaggio:  $24.3 / 0.772 = 31.5$  MW

Considerando la presenza del convertitore statico avente  $\cos(\phi) = 1.0$  ed un margine operativo del 10%, il trasformatore dovrà avere una capacità minima pari a circa 35 MVA.

#### 4.8 Verifiche idrauliche e strutturali con l'impianto modificato

##### 4.8.1 Introduzione

Nei seguenti paragrafi si effettuano le principali verifiche di tipo idraulico e strutturale, considerando lo schema idraulico nelle varie possibilità di operazione indicate in precedenza.

##### 4.8.2 Linee piezometriche in moto stazionario

Lo scopo di questo paragrafo è quello di valutare in termini di incremento di carico statico l'effetto dell'inversione della piezometrica lungo i rami "di mandata" causata dall'operazione del gruppo reversibile.

Nello schema di pompaggio differenziale, il ramo lungo il quale si inverte la piezometrica è la derivazione Fiastrone. Viceversa, nello schema di turbinaggio differenziale, lo è quello della derivazione Polverina.

Il massimo incremento di piezometrica si ha:

- Per la condotta forzata, nei pressi delle valvole di macchina;
- Per la galleria forzata di derivazione, in corrispondenza del Pozzo Piezometrico.

Il valore di confronto è dato dalla piezometrica statica, ovvero ad impianto fermo, dove il massimo si ha quando il serbatoio di competenza raggiunge il livello di massimo invaso.

Si considera che l'impianto resti in operazione fino al raggiungimento o della quota di minima regolazione nel serbatoio di monte o della quota di massima regolazione nel serbatoio di valle.

##### **Inversione di piezometrica lungo la derivazione Fiastrone (fase di pompaggio differenziale)**

Serbatoio Fiastrone: Quota di massimo invaso originario: 641.00 m slm;<sup>2</sup>

Quota di massima regolazione: 640.00 m slm;

Portata del pompaggio: 9.0 m<sup>3</sup>/s;

Perdite di carico: Galleria forzata:  $0.1935 * 9.0^2 = 15.67$  m

Condotta forzata:  $0.0640 * 9.0^2 = 5.18$  m

Quote piezometriche: Pozzo piezom.:  $640.00 + 15.67 = 655.67$  m slm

---

<sup>2</sup> Il livello di massimo invaso ante 2016 era pari ad el. 640.00; in seguito al sisma, tale livello è stato ridotto ad el. 637.00. Ai fini di queste verifiche si adotta come valore di riferimento il primo dei due.

Base C.F.:	655.67 + 5.18 = 660.85 m slm
Quote asse condotta: Galleria @pozzo:	574.94 m slm
C.F.@ base:	305.60 m slm (asse spirale nuovo gruppo)

Le sovrappressioni dovute all'inversione della piezometrica vengono espresse in metri di colonna d'acqua e confrontate con i rispettivi valori statici:

Oggetto	Pressione Statica (mH2O) @ max. invaso originario	Pressione in moto stazionario con piezometrica invertita (mH2O)
Galleria, al pozzo piezometrico	65.06	80.73 (+24%)
Condotta Forzata, alla base	335.40	356.25 (+6%)

**Tabella 14:** Derivazione Fiastrone - piezometriche

Si ritiene, in assenza di rapporti di ispezione e/o prove di laboratorio, che sulla base dell'esperienza tali valori di incremento possano essere compatibili con le caratteristiche meccaniche dei materiali.

**Inversione di piezometrica lungo la derivazione Polverina (fase di turbinaggio differenziale)**

Serbatoio Polverina:	Quota di massimo invaso originario:	400.00 m slm; <sup>3</sup>
	Quota di massima regolazione:	396.00 m slm; <sup>4</sup>
Portata del turbinaggio:		10.8 m <sup>3</sup> /s;
Perdite di carico:	Galleria forzata:	$0.0316 \cdot 10.8^2 = 3.69$ m
	Condotta forzata:	$0.0147 \cdot 10.8^2 = 1.71$ m
Quote piezometriche:	Pozzo piezom.:	396.00 + 3.69 = 399.69 m slm
	Base C.F.:	399.69 + 1.71 = 401.60 m slm
Quote asse condotta:	Galleria @pozzo:	376.65 m slm
	C.F.@ base:	301.00 m slm

Le sovrappressioni dovute all'inversione della piezometrica vengono espresse in metri di colonna d'acqua e confrontate con i rispettivi valori statici:

<sup>3</sup> Il livello di massimo invaso ante 2016 era pari ad el. 400.00 m slm; in seguito al sisma, tale livello è stato ridotto ad el. 398.00 m slm. Ai fini di queste verifiche si adotta come valore di riferimento il primo dei due.

<sup>4</sup> Il livello di massima regolazione ante 2016 era pari ad el. 400.00 m slm; in seguito al sisma, tale livello è stato ridotto ad el. 396.00 m slm. Ai fini di queste verifiche si adotta come valore di riferimento il secondo dei due.

Oggetto	Pressione Statica (mH <sub>2</sub> O) @ max. invaso originario	Pressione in moto stazionario con piezometrica invertita (mH <sub>2</sub> O)
Galleria, al pozzo piezometrico	23.35	23.04 (-0.8%)
Condotta Forzata, alla base	101.00	100.60 (+7%)

**Tabella 15:** Derivazione Polverina - piezometriche

Si ritiene, in assenza di rapporti di ispezione e/o prove di laboratorio, che sulla base dell'esperienza i valori di incremento possano essere compatibili con le caratteristiche meccaniche dei materiali.

#### 4.8.3 Sommergenza dell'Opera di Presa

Dato che nella soluzione progettuale adottata entrambe le adduzioni esistenti operano all'interno dei rispettivi limiti di portata massima, non si ritiene necessario approfondire tale argomento.

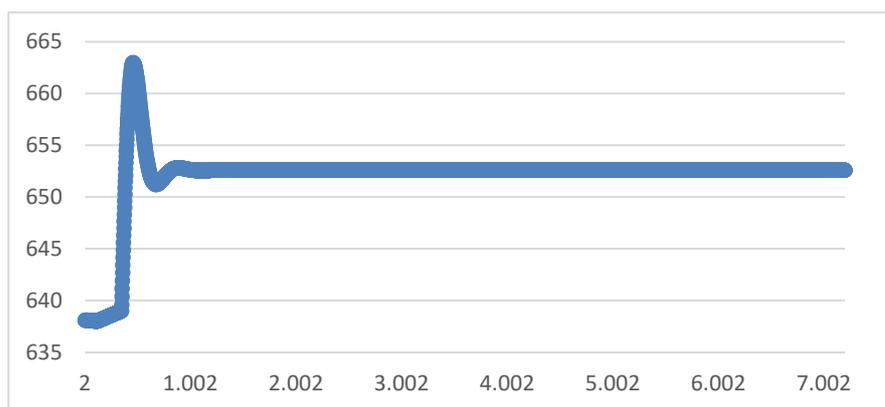
#### 4.8.4 Transitori nel pozzo sulla derivazione Fiastrone

Sono state effettuate nei paragrafi precedenti alcune simulazioni delle principali manovre previste specificatamente per il nuovo gruppo reversibile.

##### Manovra di apertura

Il tempo di apertura adottato è di 30 s, in cui la portata raggiunge il valore di 9.0 m<sup>3</sup>/s. Si considera la piezometrica di partenza pari alla quota di massima regolazione nel serbatoio, ovvero ad el. 634.00 m slm.

I risultati della manovra di apertura mostrano che il transitorio ha andamento con presenza di sovralzo fino a quota 662.5 m slm, come mostrato nel seguente grafico:



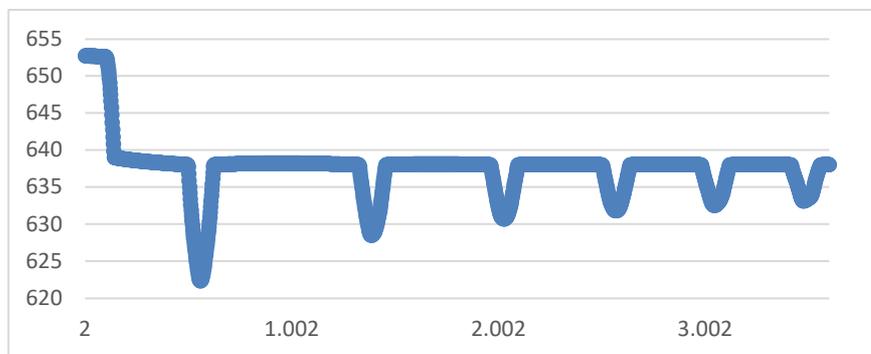
**Figura 50:** PP Fiastrone - sovralzo manovra apertura pompaggio

##### Manovra di chiusura

Il tempo di chiusura adottato è di 10 s.

Si considera la piezometrica di partenza pari alla quota di minima regolazione nel serbatoio, ovvero ad el. 598.00 m slm.

I risultati della manovra di chiusura mostrano che la piezometrica nella prima oscillazione negativa NON TAGLIA la generatrice superiore della condotta (el.576.17 m slm):



**Figura 51:** PP Fiastrone - sovralzo manovra chiusura pompaggio

#### 4.8.5 *Transitori nel pozzo piezometrico sulla derivazione Polverina*

In fase di pompaggio differenziale verso Fiastrone, le manovre di apertura e chiusura possono ritenersi identiche a quelle esistenti e pertanto non vengono effettuate ulteriori valutazioni.

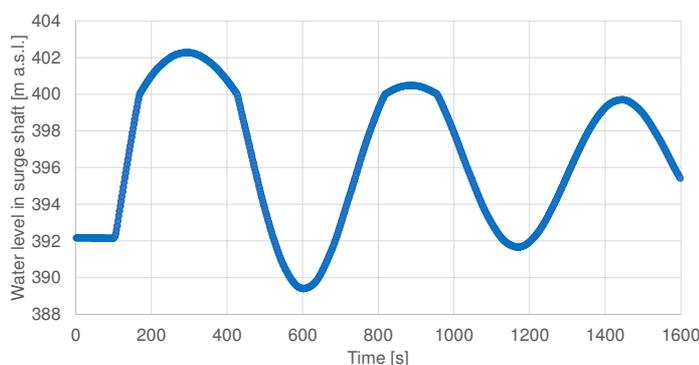
Diversamente, In fase di turbinaggio differenziale verso Polverina, occorre studiare i transitori nel pozzo piezometrico dovuti alle manovre di avvio e fermata del gruppo reversibile.

Considerata la lunghezza della galleria forzata di adduzione, il tempo di manovra influenza relativamente poco il livello del sovralzo nel pozzo.

#### Manovra di apertura

Il tempo di apertura adottato è di 10 s, in cui la portata raggiunge il valore di 10.80 m<sup>3</sup>/s. Si considera la piezometrica di partenza pari alla quota di massima regolazione nel serbatoio, ovvero ad el. 396.00 m slm.

I risultati della manovra di apertura mostrano che il transitorio ha massimo sovralzo inferiore alla quota di coronamento (el.407 m slm) della camera di espansione:



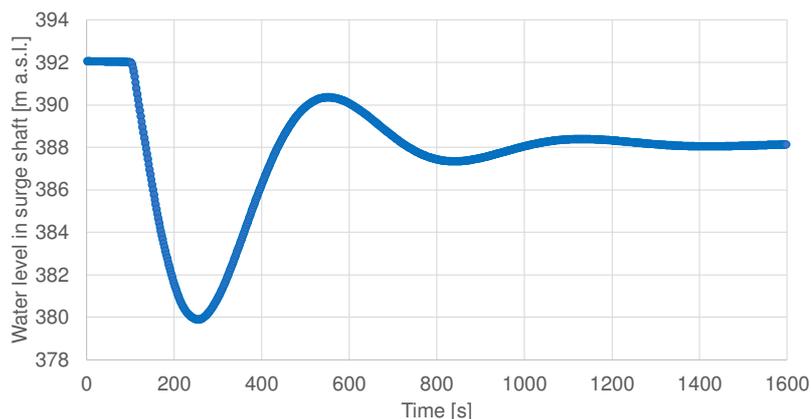
**Figura 52:** PP Polverina - sovralzo manovra apertura turbinaggio differenziale

### Manovra di chiusura

Il tempo di chiusura adottato è di 10 s.

Si considera la piezometrica di partenza pari alla quota di minima regolazione nel serbatoio, ovvero ad el. 392.00 m slm.

I risultati della manovra di chiusura mostrano che la piezometrica nella prima oscillazione negativa NON TAGLIA la generatrice superiore della galleria (el.378.30):



**Figura 53:** PP Polverina - sovralzo manovra chiusura turbinaggio differenziale

#### 4.8.6 Sollecitazioni dovute al Colpo d'Ariete

Si considerano gli effetti indotti dall'introduzione del nuovo gruppo reversibile.

Le massime sovrappressioni e sottopressioni causate dal colpo d'ariete vengono in questa fase calcolate con la formula semplificata di Allievi-Michaud, che a seconda del tipo di manovra, definisce le massime sovrappressioni riscontrabili all'otturatore:

Per manovre brusche ( $T_M \leq T_{CR}$ ) si ha:

$$\Delta h = c \cdot \frac{\Delta V}{g}$$

Per manovre lente ( $T_M > T_{CR}$ ) si ha:

$$\Delta h = \frac{2L}{T_M} \cdot \frac{\Delta V}{g}$$

dove:

- $\Delta V$  la variazione di velocità in condotta (m/s)
- $L$  lunghezza della condotta (m)
- $c$  celerità di propagazione delle onde (m/s)
- $g$  accelerazione di gravità (m/s<sup>2</sup>)
- $T_M$  tempo di manovra (s)
- $T_{CR}$  tempo critico della condotta forzata, pari a  $T_{cr} = 2L/c$ .

### CF Fiastrone

Alla base, la C.F. esistente lunga circa 460 m ha diametro interno 1500 mm e spessore 29 mm (ai fini delle verifiche si considera uno spessore ridotto per effetto della corrosione pari a 27 mm).

Non sono note le caratteristiche del materiale impiegato per la costruzione. Sulla base delle informazioni tecniche note per gli acciai commerciali disponibili all'epoca della costruzione si ipotizza che la resistenza di design sia pari a 156 N/mm<sup>2</sup>.

Massima portata transitante: 10.8 m<sup>3</sup>/s (fase di turbinaggio differenziale);

Massima velocità in C.F. 6.11 m/s;

Tempo di manovra T<sub>m</sub> = 10 s;

Celerità onde: c = 1000 m/s (stima);

T<sub>cr</sub> = 2L/c = 2\*460/1000 = 0.92 secondi.

Dato che T<sub>cr</sub> < T<sub>m</sub>, la manovra è lenta.

La massima sovrappressione per effetto del colpo d'ariete risulta:

$$\Delta H_{\max} = \pm 2*460/10*6.11/9.81 = \pm 57 \text{ mH}_2\text{O}$$

e quindi pari a circa il 16% della massima pressione idrostatica.

La seguente tabella riassume la verifica dello stato tensionale nella condotta:

Carico Statico +Pozzo +Colpo Ariete (mH <sub>2</sub> O)	Pressione (Mpa)	Diametro (mm)	Spessore (mm)	σ (N/mm <sup>2</sup> )	σ ammissibile (N/mm <sup>2</sup> )
356.25+57=413.25	4.05	1500	27	112.5	156.0

**Tabella 16:** Condotta Forzata Fiastrone - verifica di resistenza

### CF Polverina

Alla base, la C.F. lunga circa 160 m ha diametro interno 2100 mm. Non è dettagliato nei disegni disponibili lo spessore della condotta. Si assume che la condotta abbia spessore 22 mm (ai fini delle verifiche si considera uno spessore ridotto per effetto della corrosione pari a 20 mm).

Non sono note le caratteristiche del materiale impiegato per la costruzione. Sulla base delle informazioni tecniche note per gli acciai commerciali disponibili all'epoca della costruzione si ipotizza che la resistenza di design sia pari a 156 N/mm<sup>2</sup>.

Massima portata transitante: 10.8 m<sup>3</sup>/s (fase di turbinaggio differenziale);

Massima velocità in C.F. 3.11 m/s;

Tempo di manovra  $T_m = 10$  s;

Celerità onde:  $c = 1000$  m/s (stima);

$T_{cr} = 2L/c = 2 \cdot 160/1000 = 0.32$  secondi.

Dato che  $T_{cr} < T_m$ , la manovra è lenta.

La massima sovrappressione per effetto del colpo d'ariete risulta:

$$\Delta H_{max} = \pm 2 \cdot 160/10 \cdot 3.11/9.81 = \pm 10 \text{ mH}_2\text{O}$$

e quindi pari a circa il 10% della massima pressione idrostatica.

La seguente tabella riassume la verifica dello stato tensionale nella condotta:

Carico Statico +Pozzo +Colpo Ariete (mH <sub>2</sub> O)	Pressione (Mpa)	Diametro (mm)	Spessore (mm)	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma$ ammissibile (N/mm <sup>2</sup> )
101.0+10.0=111.0	1.09	2100	20	57.0	156.0

**Tabella 17:** Condotta Forzata Polverina - verifica di resistenza

Considerando cautelativamente la contemporaneità del massimo sovrizzo nel pozzo piezometrico e la massima sovrappressione di colpo d'ariete, si ottengono le massime sollecitazioni nelle condotte forzate, all'otturatore:

	Max Sovralzo transitorio (mH <sub>2</sub> O)	Sovrappressione dinamica colpo d'ariete (mH <sub>2</sub> O)	Massima pressione totale (mH <sub>2</sub> O)
C.F. Fiastrone	356.3	57.0	413.3
C.F. Polverina	100.6	10.0	110.6

Considerato che le portate circolanti sono pari o inferiori a quelle massime di progetto dell'impianto esistente, **non si ritiene che le sovrappressioni di colpo d'ariete indotte dal nuovo gruppo reversibile costituiscano un aggravio rispetto a quelle dovute all'impianto esistente.**

#### 4.8.7 Considerazioni sulla fatica strutturale nelle condotte forzate

Durante l'intera vita utile, le condotte forzate sono soggette a fenomeni ciclici di variazioni di tensione, che possono essere a grandi linee classificabili come segue:

- Variazioni dovute alle oscillazioni stagionali di livello nel serbatoio, che dipendono sia dal regime idrologico, dalla capacità propria di regolazione e dalle modalità di gestione in funzione delle necessità di produzione;
- Variazioni dovute ai transitori idraulici, con particolare riferimento:
  - Alle oscillazioni nel pozzo piezometrico a seguito di manovre;

- Alle sovrappressioni generate dal colpo d'ariete.

Storicamente, la resistenza a fatica dei materiali e dei collegamenti non veniva valutata, in quanto le tensioni ammissibili nella sezione venivano calcolate utilizzando le pressioni di collaudo, del 150% superiori a quelle massime di esercizio, verifica ritenuta in generale sufficiente a garantire l'integrità strutturale delle opere nel corso della vita utile dell'impianto.

Inoltre, le sezioni venivano poi dotate di uno sovrasspessore di corrosione generalmente pari ad un paio di millimetri.

Molteplici studi hanno dimostrato che, al superamento dello stato tensionale minimo al di sotto del quale il fenomeno non si presenta, la resistenza a fatica non dipende dallo stato tensionale in cui il materiale si trova, ma dalla frequenza dei cicli di variazione.

L'introduzione all'interno di uno schema esistente di un nuovo gruppo di pompaggio o di un gruppo reversibile modifica tale frequenza, incrementandola e riducendo conseguentemente il campo delle variazioni di tensione ammissibili.

Qui di seguito si considera un approccio semplificato, al fine di ottenere una sensibilità sulla problematica per l'impianto oggetto di studio.

Si assume che le azioni taglianti siano trascurabili rispetto a quelle flessionali.

Secondo l'EC3 Parte 9, deve valere la disuguaglianza:

$$\gamma_F \cdot \Delta\sigma_{NOM} \leq \Delta\sigma_{RES} / \gamma_M$$

Dove

- $\Delta\sigma_{NOM}$  sono le variazioni cicliche applicate, moltiplicate per un eventuale fattore di sicurezza  $\gamma_F$ , che può assumersi pari ad 1.0;
- $\Delta\sigma_{RES}$  sono le variazioni cicliche ammissibili, divise per il fattore di sicurezza  $\gamma_M$ , che in caso di collegamenti importanti può assumersi pari ad 1.25;

Considerando tubazioni circolari con giunzioni saldate (cfr. EC3 Parte 9 tabella 8.3 fig. 14), viene definita la cosiddetta "categoria di dettaglio", pari a

$$\Delta\sigma_C = k_s \cdot 71 \quad \text{N/mm}^2, \text{ con } k_s = \left(25/t\right)^{0.2} \quad \text{e "t" spessore in mm del tubo,}$$

dove  $k_s$  è un fattore di riduzione legato allo spessore, da applicare per spessori maggiori di 25 mm.

La categoria di dettaglio in pratica definisce la curva di riferimento in base alla quale calcolare  $\Delta\sigma_{RES}$ , detta anche curva di Wohler, che nell'EC viene espressa come curva segmentata in scala bilogarithmica:

$$\log(N) = \log(a) - m \cdot \log(\Delta\sigma_{RES})$$

Dove

N è il numero di cicli

$a = 2 \cdot 10^6 \cdot (\Delta\sigma_C)^m$  è una costante che dipende dalla “detail category”  
 $m$  è la pendenza dei tratti, avente valore 3 e/o 5  
 $\Delta\sigma_{RES}$  è la risultante resistenza a fatica, funzione del N. cicli

Sono inoltre definiti i seguenti  $\Delta\sigma$  notevoli:

per  $N=2 \cdot 10^6$   $\Delta\sigma_C$   
 per  $N=5 \cdot 10^6$   $\Delta\sigma_D = 0.737 \cdot \Delta\sigma_C$  rappresenta il punto di cambio pendenza  
 per  $N=1 \cdot 10^8$   $\Delta\sigma_L = 0.549 \cdot \Delta\sigma_D$  rappresenta il punto di “cutoff”

Nel caso in esame si ottengono dunque la curva caratteristica di riferimento della resistenza a fatica, quella caratteristica ridotta e quella di progetto:

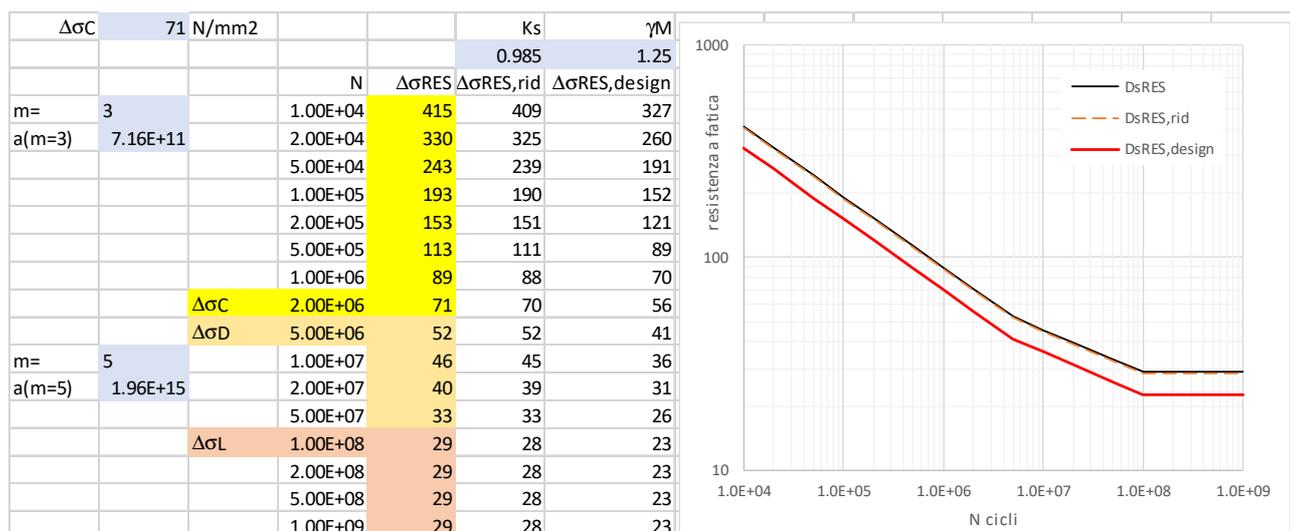


Figura 54: Diagramma di Wohler della resistenza a fatica

**Definizione delle azioni di progetto**

Derivazione Fiastrone:

La condotta forzata, alla base, ha diametro 1500 mm e spessore 29 mm circa ad el. 304.00 m slm.

Non sono note le caratteristiche del materiale impiegato per la costruzione. Sulla base delle informazioni tecniche note per gli acciai commerciali disponibili all’epoca della costruzione si ipotizza che la resistenza di design sia pari a 156 N/mm<sup>2</sup>.

Si considera lo spessore effettivo, dedotto il sovrappessore di corrosione, pari a 27 mm.

La quota di massimo invaso si pone ad el. 640.00, esercitando sulla condotta una pressione statica pari a 3.29 Mpa, a cui corrisponde, utilizzando la formula di Mariotte, una tensione pari a  $s = 91.5 \text{ N/mm}^2$ .

Considerando contemporaneamente:

- il massimo sovrizzo nel pozzo piezometrico durante le manovre pari a  $\pm 15 \text{ m}$ , si ottiene una variazione di pressione pari a  $\Delta p_{NOM,PP} = 0.147 \text{ MPa}$ .
- la sovrappressione del colpo d'ariete pari al massimo consentito dalla normativa vigente ovvero  $\Delta p_{NOM,CA} = 6 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} = 0.588 \text{ MPa}$ .

Si ottiene la massima  $\Delta p_{NOM} = 0.735 \text{ MPa}$ , a cui corrisponde il valore di progetto dell'ampiezza di un ciclo, pari a:

$$\Delta \sigma_{NOM} = 20.0 \text{ N/mm}^2$$

Occorre ora individuare il numero di cicli a cui tale valore si riferisce.

Nel caso di impianto "di punta" tradizionale con sola generazione, si ipotizza che vengano effettuate 4 manovre al giorno e che all'interno di ciascuna manovra il valore di massima ampiezza sopra calcolato si ripresenti per almeno 10 volte.

Supponendo la vita passata pari a 70 anni, il numero di cicli già effettuato risulta pari a:

$$N(70) = 70 \cdot 365 \cdot 4 \cdot 10 \approx 1.0 \cdot 10^6 \quad \text{cicli.}$$

La resistenza a fatica di design corrisponde a  $70.0 \text{ N/mm}^2$ , e pertanto risulta verificata la disuguaglianza, con un fattore di sicurezza pari a  $70/20 = 3.5$ .

Introducendo il nuovo gruppo di pompaggio, e supponendo una vita utile di 30 anni, si effettueranno almeno 40 manovre al giorno, e pertanto il numero di cicli aggiuntivo risulterebbe essere:

$$\Delta N(30) = 30 \cdot 365 \cdot 40 \cdot 10 \approx 4.4 \cdot 10^6 \quad \text{cicli.}$$

Pertanto, al nuovo traguardo di vita si avrà un numero di cicli pari a:

$$N'(100) = N + \Delta N \approx 5.4 \cdot 10^6 \quad \text{cicli.}$$

La resistenza a fatica di design corrisponderà dunque a  $41.0 \text{ N/mm}^2$ , e pertanto risulta verificata la disuguaglianza, con un fattore di sicurezza pari a  $41/20 = 2.05$ .

#### Derivazione Polverina:

La condotta forzata, alla base, ha diametro 2100 mm e spessore 22 mm (da confermare per rilievo in fase esecutiva) circa ad el. 299.00 m slm.

Non sono note le caratteristiche del materiale impiegato per la costruzione. Sulla base delle informazioni tecniche note per gli acciai commerciali disponibili all'epoca della costruzione si ipotizza che la resistenza di design sia pari a  $156 \text{ N/mm}^2$ .

Si considera lo spessore effettivo, dedotto il sovrappessore di corrosione, pari a 20 mm.

La quota di massimo invaso si pone ad el. 400.00, esercitando sulla condotta una pressione statica pari a 1.01 Mpa, a cui corrisponde, utilizzando la formula di Mariotte, una tensione pari a  $s = 118 \text{ N/mm}^2$ .

Considerando contemporaneamente:

- il massimo sovrizzo nel pozzo piezometrico durante le manovre pari a  $\pm 10 \text{ m}$ , si ottiene una variazione di pressione pari a  $\Delta p_{NOM,PP} = 0.098 \text{ MPa}$ .
- la sovrappressione del colpo d'ariete pari al massimo consentito dalla normativa vigente ovvero  $\Delta p_{NOM,CA} = 4 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} = 0.392 \text{ MPa}$ .

Si ottiene la massima  $\Delta p_{NOM} = 0.500 \text{ MPa}$ , a cui corrisponde il valore di progetto dell'ampiezza di un ciclo, pari a:

$$\Delta \sigma_{NOM} = 27.0 \text{ N/mm}^2$$

La resistenza a fatica è la medesima calcolata sopra, dato che il numero di cicli sarà lo stesso, e pertanto risulta verificata la disuguaglianza, con un fattore di sicurezza pari a  $41/26 = 1.58$ .

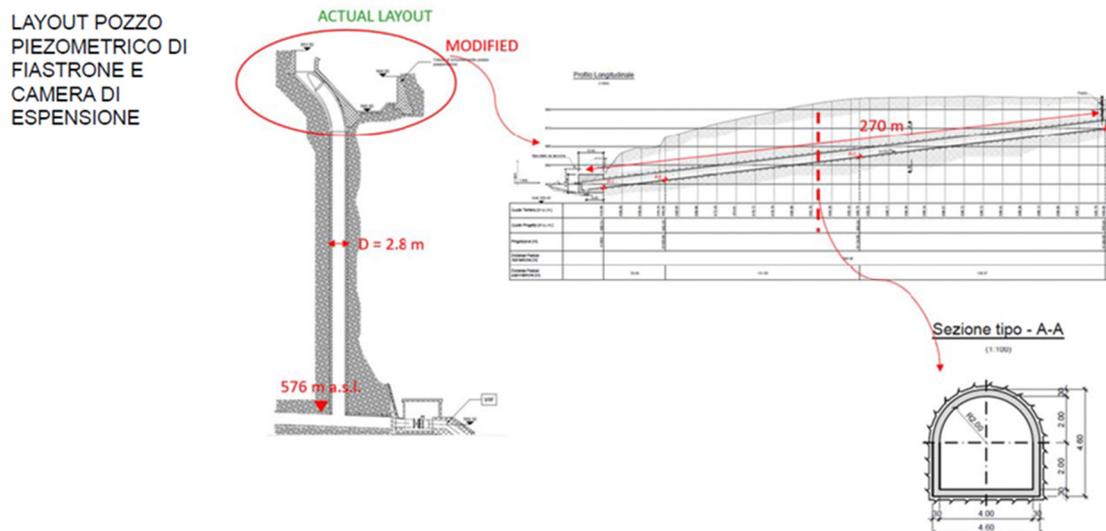
Concludendo, con questo approccio semplificato si è voluto acquisire la sensibilità rispetto alla resistenza a fatica, concludendo che per l'impianto in oggetto l'aggravio dovuto alle modificate condizioni di funzionamento resterebbe al di sotto dei valori ammissibili.

## 4.9 Sviluppi progettuali in sede di Progetto Definitivo per appalto

### 4.9.1 Modifica del pozzo piezometrico

Nell'affinamento del modello di calcolo delle sollecitazioni da transitorio, è stato identificato come possibile miglioramento in fase di esercizio per una migliore flessibilità dell'impiego dell'impianto, la possibilità di un incremento del diametro del pozzo di circa 1 m.

L'opzione è in corso di valutazione secondo il rapporto costi/benefici stimato in sede tecnica.



**Figura 55:** Dettaglio della proposta di incremento del diametro del nuovo tratto di pozzo di circa 1 m.

La proposta è relativa esclusivamente a modifiche di geometrie di opere sotterranee, ed il suo effetto tecnico più rilevante è un limitato incremento dei volumi di scavo (circa 1'000 m<sup>3</sup>, compensati da una possibile riduzione del volume della camera di espansione).

Trattandosi di modifiche dimensionali in lieve aumento di opere già proposte, non si ritiene che la proposta tecnica modifichi gli elaborati ambientali già presentati ai fini autorizzativi.

#### 4.9.2 Affinamento del dimensionamento della macchina idraulica

Il produttore idromeccanico ha potuto, mediante la messa a punto di un modello numeri di costruzione dell'insieme macchina idraulica ed elettrica, migliorare il dimensionamento del gruppo reversibile, a parità di dati idraulici e di dimensioni, come rappresentato nelle seguenti tabelle.

Power in Turbine and Pump Mode	New Group 4 Power at Turbine/Pump Shaft [kW]	New Group 4 Power at Generator/Motor Terminal [kVA]	New Group 4 Power at Main Transformer TR3 High Voltage Side (TERNA Grid Interconnection Point) [MVA] * "Circa"
Turbine Rated Power Output (= max. guaranteed power at turbine shaft and at 50 Hz) cos phi 0.85	19137	21813	21.013
Max. Turbine Power Output (=informative expected power at turbine shaft and 50 Hz). cos phi 0.85	20094	22925	22.125
Pump Rated Input Power (=max. expected pump input at shaft and 50 Hz) cos phi 0.95	23277	25128	25.928
Max. Pump Input Power = 23,975 MW (=max. guaranteed pump input at shaft including safety margin and 50 Hz). cos phi 0.95	23975	25871	26.671

Note: \* A station service auxiliary power consumption of appr. 800 kVA has been taken into consideration.

**Tabella 18:** Revisione della capacità installata del gruppo reversibile dal costruttore idromeccanico.

Potenza dei gruppi in pompa MW Power of the unit in pump mode MW	Potenza dei gruppi in generazione MW Power of the unit in generation mode MW	Potenza motor./gener. MVA Rated Power Motor Generator MVA
Max. Pump Input 23,277 MW	Max. Turbine Output 19,137 MW	25,3 MVA

**Tabella 19:** Dati di fornitura del costruttore idromeccanico.

#### 4.9.3 Cambiamento del tipo di regolazione

In fase di progetto definitivo per appalto, il proprietario Enel GP, esaminate le esigenze locali di regolazione, e considerata la ridotta potenza in gioco, al fine di ridurre i costi generali del progetto, ha infine optato per passare da un gruppo reversibile a giri variabili con full size converter ad un gruppo a giri fissi.

La nuova soluzione tecnica consentirebbe di eliminare il fabbricato esterno in precedenza necessario per l'inverter, con semplificazione delle installazioni esterne: il fabbricato al momento viene mantenuto per alloggiare alcuni servizi ausiliari da definire in fase esecutiva (generatore di soccorso ed altri).

## 5. CONCLUSIONI

Enel Produzione SpA – HGT Design & Execution, ha affidato a Lombardi SA l'incarico professionale di ingegneria per la Progettazione Definitiva dell'intervento di potenziamento dell'impianto idroelettrico di Valcimarra Chienti, sito nel Comune di Caldarola (MC).

L'intervento in progetto prevede il potenziamento in pompaggio dell'impianto di generazione esistente (per complessivi  $P = 43.836$  MW,  $Q = 28.8$  m<sup>3</sup>/s) con l'aggiunta di un gruppo reversibile di generazione/pompaggio così caratterizzato:

- Portata pompata pari a 9.0 m<sup>3</sup>/s;           Potenza assorbita:    19.1 MW
- Portata turbinata pari a 10.8 m<sup>3</sup>/s;       Potenza erogata:     23.3 MW

Livelli di riferimento dei bacini di esercizio macchina:

- Lago di Fiastra:            quota min 620 m slm / quota max 640 m slm
- Lago di Polverina:         quota min 392 m slm / quota max 400 m slm

Lo schema progettuale è stato sviluppato cercando di minimizzare l'impatto ambientale e preservando, per quanto possibile, le strutture esistenti.

Nel presente rapporto si sono valutati tutti gli aspetti idraulici più significativi quali il calcolo delle perdite di carico, la verifica della sommergenza e le sovrappressioni (positive e negative) generate dal colpo d'ariete.

Sono state eseguite inoltre delle simulazioni idrauliche per la verifica dei fenomeni transitori all'interno della galleria di derivazione e di scarico.

I valori di scabrezza delle condotte sono stati valutati sulla base dell'esperienza, non essendo al momento disponibili resoconti di visite ispettive delle condotte e gallerie o prove di rendimento delle macchine, dati che sono stati richiesti al Cliente.

La soluzione individuata ed idraulicamente verificata prevede:

- realizzazione di una nuova caverna in cui installare il nuovo gruppo reversibile, dotata di galleria accesso carrabile e galleria di via di fuga;
- connessione alle condotte forzate esistenti;
- modifiche al pozzo piezometrico Fiastrone;
- possibili modifiche al pozzo piezometrico Polverina, valutabili nella fase progettuale successiva;
- connessione alla sottostazione esistente.

I risultati ottenuti, in termini generali, dimostrano che il sistema idraulico esistente con le modifiche previste a progetto risulta correttamente dimensionato dal punto di vista idraulico e tale da favorire lo smorzamento delle oscillazioni di massa durante le manovre ipotizzate.

È importante sottolineare, comunque sia, che uno studio più approfondito del moto transitorio potrà essere effettuato solo una volta completamente note le caratteristiche esatte della turbina reversibile. La valutazione dei tempi di inversione del flusso nella condotta forzata, specialmente nella fase di pompaggio, dipende oltre che dagli effetti inerziali dell'acqua e dalle oscillazioni nella camera di espansione anche e soprattutto dalle proprietà della macchina installata.