

TITLE:

AVAILABLE LANGUAGE: IT

**Impianto San Giacomo III**  
**Installazione di un nuovo gruppo di pompaggio**  
**Comune di Fano Adriano (TE)**

**Progetto Definitivo**  
**RELAZIONE IDRAULICA**

File: GRE.EEC.D.99.IT.H.17170.003.00 Relazione Idraulica.docx

00	03/08/2022	<i>Prima Emissione</i>	J.Vögele/R.Arrigoni C. Piccinin	F. Maugliani	A. Balestra
REV.	DATE	DESCRIPTION	PREPARED	VERIFIED	APPROVED
<b>GRE VALIDATION</b>					
-		-		<i>P. VIGANONI</i>	
COLLABORATORS			VERIFIED BY		VALIDATED BY
<b>PROJECT / PLANT</b>		<b>GRE CODE</b>			
SAN GIACOMO III		GROUP	FUNCTION	TYPE	ISSUER
		COUNTRY	TEC	PLANT	SYSTEM
		PROGRESSIVE	REVISION		
		<b>GRE</b>	<b>EEC</b>	<b>D</b>	<b>9</b>
		<b>9</b>	<b>I</b>	<b>T</b>	<b>H</b>
		<b>1</b>	<b>7</b>	<b>1</b>	<b>7</b>
		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>0</b>
		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>CLASSIFICATION</b> PUBLIC			<b>UTILIZATION SCOPE</b> PROGETTO DEFINITIVO PER AUTORIZZAZIONE		
<p><i>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.</i></p>					

R00	03.08.2022	VJ/ARr/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	1
1.2.1	Documentazione Dataroom Enel	1
1.2.2	Completezza dei dati	1
1.2.3	Riferimenti bibliografici	2
2.	DESCRIZIONE DELLE OPERE ESISTENTI	3
2.1	Lo schema idraulico degli impianti di San Giacomo I e II	3
2.2	Diga di Provvidenza e derivazione di San Giacomo II	3
2.3	Diga di Piaganini e gallerie di scarico di S.Giacomo II	8
2.4	Centrale di San Giacomo II	10
2.5	Gruppi di produzione	12
2.5.1	gruppo Pelton, ad asse verticale (Gr. 6):	12
2.5.2	gruppo reversibile Francis, ad asse verticale (Gr. 7)	12
3.	CARATTERISTICHE DEI SERBATOI	14
3.1	Serbatoio di Provvidenza	14
3.1.1	Dati FCEM	14
3.1.2	Dati contenuti nel Piano di Gestione dei Sedimenti	18
3.1.3	Dati storici di livello	19
3.2	Serbatoio di Piaganini	20
3.2.1	Dati FCEM	20
3.2.2	Dati contenuti nel Piano di Gestione dei Sedimenti	23
3.2.3	Dati storici di livello	24
4.	DIMENSIONAMENTO IDRAULICO DEL NUOVO GRUPPO DI POMPAGGIO	25
4.1	Descrizione dell'intervento	25
4.1.1	Obiettivi del Progetto	25
4.1.2	Alternative valutate	25
4.1.3	Descrizione delle opere a progetto	26
4.2	Criteri di dimensionamento elettrico e idraulico	26

4.3	Calcolo delle Perdite di Carico	29
4.3.1	Introduzione	29
4.3.2	Perdite tipologiche distribuite	30
4.3.3	Perdite tipologiche concentrate	31
4.4	Valutazione analitica delle perdite di carico	36
4.4.1	Derivazione Provvidenza	37
4.4.2	Derivazione Piaganini	39
4.4.3	Sintesi sulle perdite calcolate	40
4.5	Analisi di sensitività sui livelli nei pozzi piezometrici	41
4.5.1	Condizioni stazionarie	41
4.5.2	Condizioni transitorie	41
4.6	Perdite idrauliche	53
4.6.1	Valutazione delle perdite di carico in fase di turbinaggio	53
4.6.2	Valutazione delle Perdite di carico in fase di pompaggio	54
4.7	Potenza della nuova pompa	54
4.8	Verifiche idrauliche e strutturali con l'impianto modificato	54
4.8.1	Introduzione	54
4.8.2	Linee piezometriche in moto stazionario	55
4.8.3	Sommergenza dell'Opera di Presa della nuova galleria forzata di alimentazione/scarico	57
4.8.4	Transitori nel pozzo piezometrico di monte (Provvidenza) nelle condizioni di progetto	58
4.8.5	Transitori nel pozzo di valle (derivazione Piaganini)	59
4.8.6	Sollecitazioni dovute al Colpo d'Ariete	60
4.8.7	Considerazioni sulla fatica strutturale nelle condotte forzate	63
5.	CONCLUSIONI	68

## INDICE DELLE FIGURE

<b>Figura 1:</b> Impianto di San Giacomo – schema idraulico. ....	3
<b>Figura 2:</b> Diga di Provvidenza – vista da valle. ....	4
<b>Figura 3:</b> Diga di Provvidenza – planimetria generale. ....	4
<b>Figura 4:</b> Derivazione Provvidenza – profilo idraulico. ....	5

<b>Figura 5:</b> Derivazione Provvidenza – pozzo piezometrico.....	6
<b>Figura 6:</b> Derivazione Provvidenza – camera valvole.....	7
<b>Figura 7:</b> Derivazione Provvidenza – biforcazione per i gruppi 6 e 7. ....	7
<b>Figura 8:</b> Diga di Piaganini – vista da valle. ....	8
<b>Figura 9:</b> Diga di Piaganini – planimetria generale. ....	8
<b>Figura 10:</b> Impianto di S.Giacomo II – scarico a pelo libero Gr.6. ....	9
<b>Figura 11:</b> Impianto di S. Giacomo II – galleria forzata di scarico Gr. 7 – profilo.....	10
<b>Figura 12:</b> Centrale di San Giacomo II - planimetria generale.....	11
<b>Figura 13:</b> Centrale di San Giacomo II – sezione longitudinale sala macchine su gruppo Pelton e reversibile.....	11
<b>Figura 14:</b> Centrale di San Giacomo II – sala macchine.....	12
<b>Figura 15:</b> Serbatoio di Provvidenza.....	14
<b>Figura 16:</b> Diga di Provvidenza- diagramma delle aree.....	16
<b>Figura 17:</b> Diga di Provvidenza- diagramma dei volumi. ....	16
<b>Figura 18:</b> Diga di Provvidenza - curva di portata dello scarico di superficie.....	17
<b>Figura 19:</b> Diga di Provvidenza - curva di portata dello scarico di fondo.....	17
<b>Figura 20:</b> Diga di Provvidenza - diagramma delle aree (2006). ....	18
<b>Figura 21:</b> Diga di Provvidenza - serie storica del livello nel serbatoio (2013-2021). ....	19
<b>Figura 22:</b> Serbatoio di Piaganini - vista aerea. ....	20
<b>Figura 23:</b> Diga di Piaganini – curve d’invaso – aree e volumi FCEM.....	22
<b>Figura 24:</b> Diga di Piaganini - curva di portata dello scarico di superficie. ....	22
<b>Figura 25:</b> Diga di Piaganini - curva di portata dello scarico di fondo.....	23
<b>Figura 26:</b> Serbatoio di Piaganini – curva di invaso da batimetria 2020.....	23
<b>Figura 27:</b> Diga di Piaganini - serie storica del livello nel serbatoio (2012-2021).....	24
<b>Figura 28:</b> Schematizzazione Alternativa 2.....	25
<b>Figura 29:</b> Schematizzazione Alternativa 3 (versione finale) con riutilizzo ed espansione dell’esistente P.P.....	26
<b>Figura 30:</b> San Giacomo II – Legame a prefissata potenza tra le portate di pompaggio e turbinaggio. ....	27
<b>Figura 31:</b> Perdita localizzata per imbocco a spigolo vivo. ....	32

<b>Figura 32:</b> Rappresentazione tipica di un restringimento di sezione. ....	32
<b>Figura 33:</b> Determinazione del coefficiente di perdita per restringimento graduale .....	32
<b>Figura 34:</b> Rappresentazione tipica di un restringimento di sezione secondo [2]. ....	33
<b>Figura 35:</b> Schematizzazione per il calcolo delle perdite in curva secondo [1]. ....	34
<b>Figura 36:</b> Rappresentazione transizione da sezione circolare a sezione quadrata [1]. ....	34
<b>Figura 37:</b> Rappresentazione transizione da sezione quadrata a sezione circolare [1]. ....	34
<b>Figura 38:</b> Determinazione del coefficiente di perdita $K$ in caso di paratoie e stoplogs secondo [3].	35
<b>Figura 39:</b> Coefficiente di forma della griglia, [1]. ....	35
<b>Figura 40:</b> Coefficiente di perdita valvola a farfalla. ....	36
<b>Figura 41:</b> Transitori dell'avviamento della nuova pompa con la configurazione geometrica dello stato di fatto. ....	42
<b>Figura 42:</b> Determinazione dei fattori di spessore e di contrazione $\alpha$ e $\beta$ per diverse forme di strozzature [6]. ....	43
<b>Figura 43:</b> Pozzo piezometrico esistente: manovra avviamento e brusco arresto turbinaggio con serbatoio alla quota di massima regolazione. ....	44
<b>Figura 44:</b> Pozzo piezometrico esistente: manovra avviamento turbinaggio fino a regime con serbatoio alla quota di minima regolazione. ....	44
<b>Figura 45:</b> Pozzo piezometrico esistente: manovra avviamento pompaggio fino a regime con serbatoio alla quota di massima regolazione. ....	45
<b>Figura 46:</b> Pozzo piezometrico esistente: manovra avviamento pompaggio e brusco arresto con serbatoio alla quota di minima regolazione. ....	45
<b>Figura 47:</b> Pozzo piezometrico esistente: commutazione pompaggio – generazione con serbatoio alla minima regolazione. ....	46
<b>Figura 48:</b> Pozzo piezometrico esistente: commutazione generazione – pompaggio con serbatoio alla massima regolazione. ....	46
<b>Figura 49:</b> Pozzo piezometrico esistente: avviamento pompaggio fino a regime con serbatoio alla quota di massima regolazione e con nuova portata di pompaggio. ....	47
<b>Figura 50:</b> Pozzo piezometrico esistente: commutazione generazione – pompaggio con serbatoio alla quota di massima regolazione e con nuova portata di pompaggio. ....	47
<b>Figura 51:</b> Pozzo piezometrico San Giacomo monte – max sopralzo $f(Q,D)$ .....	48
<b>Figura 52:</b> Pozzo piezometrico San Giacomo monte – max sopralzo $f(D, Z_{imposta})$ . Portata fissa $Q_{pomp} = 43.00 \text{ m}^3/\text{s}$ . ....	49

<b>Figura 53:</b> Pozzo piezometrico San Giacomo monte – max sopralzo $f(D, Z_{imposta})$ . Portata fissa $Q_{tot} = 41.00 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	49
<b>Figura 54:</b> Pozzo piezometrico modificato: manovra di avviamento generazione ( $60 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e commutazione da generazione a pompaggio ( $41 \text{ m}^3/\text{s}$ ). .....	50
<b>Figura 55:</b> Nuovo pozzo piezometrico di valle: manovra di avviamento pompaggio fino a regime con serbatoio di Piaganini alla quota di minima regolazione. ....	51
<b>Figura 56:</b> Nuovo pozzo piezometrico di valle: manovra di brusco arresto pompaggio con serbatoio di Piaganini alla quota di massima regolazione. ....	52
<b>Figura 57:</b> Nuovo pozzo piezometrico di valle: manovra di avviamento pompaggio fino a regime con serbatoio di Piaganini alla quota di minima regolazione. ....	52
<b>Figura 58:</b> Nuovo pozzo piezometrico di valle: manovra di brusco arresto pompaggio con serbatoio di Piaganini alla quota di massima regolazione. ....	53
<b>Figura 59:</b> Nuovo pozzo piezometrico di monte: manovra di brusco arresto pompaggio con serbatoio di Piaganini alla quota di minima regolazione. ....	59
<b>Figura 60:</b> Schematizzazione del pozzo piezometrico di valle. ....	60
<b>Figura 61:</b> Diagramma di Wohler della resistenza a fatica. ....	65

## INDICE DELLE TABELLE

<b>Tabella 1:</b> Serbatoio di Provvidenza – curva di invaso da batimetria 2020.....	18
<b>Tabella 2:</b> Volume del Serbatoio di Provvidenza.....	19
<b>Tabella 3:</b> Volume del Serbatoio di Piaganini.....	24
<b>Tabella 4:</b> Criteri di dimensionamento idraulico. ....	28
<b>Tabella 5:</b> Valori di scabrezza assoluta per il calcolo delle perdite di carico distribuite. ....	31
<b>Tabella 6:</b> Perdite di carico con l'innalzamento del pozzo - Provvidenza – Galleria – Turbinaggio..	37
<b>Tabella 7:</b> Perdite di carico con l'innalzamento del pozzo - Provvidenza - Condotta Forzata – Turbinaggio. ....	37
<b>Tabella 8:</b> Perdite di carico con l'innalzamento del pozzo - Provvidenza - Galleria – Pompaggio. ..	38
<b>Tabella 9:</b> Perdite di carico con l'innalzamento del pozzo - Provvidenza - Condotta Forzata – Pompaggio. ....	38
<b>Tabella 10:</b> Perdite di carico – Piaganini – Galleria e Condotta – Solo Gr.7 in Turbinaggio. ....	39

---

<b>Tabella 11:</b> Perdite di carico– Piaganini – Nuove Galleria e Condotta – Gr.8 Pompaggio.....	40
<b>Tabella 12:</b> Nuova pompa – Perdite di carico della derivazione Provvidenza. ....	40
<b>Tabella 13:</b> Nuova pompa – Perdite di carico della derivazione Piaganini. ....	41
<b>Tabella 14:</b> Potenze idrauliche e assorbite del nuovo gruppo pompa. ....	54
<b>Tabella 15:</b> Derivazione Provvidenza – piezometriche – pompaggio con $Q_{tot} = 41.76 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	55
<b>Tabella 16:</b> Derivazione Provvidenza – piezometriche – pompaggio con $Q_{Gr.8} = 33.47 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	56
<b>Tabella 17:</b> Galleria di adduzione – piezometriche – turbinaggio con $Q_{GR6} = 50.34 \text{ m}^3/\text{s}$ . ....	56
<b>Tabella 18:</b> Derivazione Piaganini – piezometriche. ....	57
<b>Tabella 19:</b> Tempi di manovra concordati Enel GP per le verifiche dei transitori nei pozzi piezometrici. .....	58
<b>Tabella 20:</b> Condotta Forzata Provvidenza – turbinaggio - verifica di resistenza per il Gruppo 6. ....	62
<b>Tabella 21:</b> Condotta Forzata Provvidenza – pompaggio - verifica di resistenza per la nuova pompa. .....	62
<b>Tabella 22:</b> Condotta Forzata Piaganini - verifica di resistenza. ....	63
<b>Tabella 23:</b> Riassunto delle pressioni per il nuovo sistema. ....	63

## 1. INTRODUZIONE

### 1.1 Contesto generale e scopo del lavoro

Enel SpA – HGT Design & Execution, ha affidato a Lombardi SA l'incarico professionale di ingegneria per la Progettazione Definitiva per Autorizzazione relativa ad un intervento di potenziamento in pompaggio dell'impianto idroelettrico di San Giacomo di proprietà di Enel Produzione SpA, in Comune di Fano Adriano (TE), mediante l'inserimento di un nuovo gruppo pompa.

L'impianto di San Giacomo, realizzato negli anni '50 e non oggetto di interventi, è stato ampliato negli anni '90 con una nuova centrale in caverna dotata di derivazione indipendente e denominata centrale di San Giacomo II. Questa, che deriva sempre dal serbatoio di Provvidenza restituendo nel serbatoio di Piaganini, è dotata di due gruppi di produzione: 1 turbina Pelton (Gr. 6) da 282.48 MW ed un gruppo Francis di tipo reversibile (Gr.7) da 56.30 MW: la capacità di pompaggio attuale è circa del 15% rispetto alla capacità in generazione.

L'intervento in progetto prevede la realizzazione di una nuova caverna di Centrale contenente un nuovo gruppo pompa, collegato a monte al pozzo forzato di San Giacomo II ed a valle con una nuova galleria forzata direttamente al serbatoio di Piaganini.

Il nuovo ampliamento d'impianto denominato San Giacomo III consente l'incremento della potenza in pompaggio tra i due serbatoi. L'idea del potenziamento nasce per iniziativa delle strutture Tecniche di Enel Green Power con lo scopo di sfruttare al meglio la risorsa idrica disponibile, adeguandone l'utilizzo alle nuove esigenze di regolazione e servizi ancillari di rete.

L'obiettivo della presente Relazione Idraulica è quello di descrivere, per la fase di progettazione definitiva, gli aspetti idraulici inerenti alla conversione a pompaggio dell'impianto idroelettrico di San Giacomo.

### 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 nella Dataroom di progetto.

#### 1.2.2 Completezza dei dati

Alla data di redazione della presente relazione, si riscontra che la documentazione tecnica presente in Dataroom non consente l'individuazione completa degli elementi tecnici che sono necessari allo sviluppo della progettazione.

Nel testo sono indicate in rosso oppure evidenziate in giallo tutte quelle parti che necessitano di chiarimenti o integrazioni documentali.

### 1.2.3 Riferimenti bibliografici

- [1] State Development and Reform Commission – Specification for Design of Hydraulic Tunnels, 2004.
- [2] Sinniger, Hager – Constructions 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.
- [5] Boes, R. M. (2017). Wasserbau I – Vorlesungsmanuskript, Professur für Wasserbau, Fassung FS 2017
- [6] Adam, N., (2017). Characterization of hydraulic behavior of orifices in conduits. Thèse N° 8090, École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

## 2. DESCRIZIONE DELLE OPERE ESISTENTI

### 2.1 Lo schema idraulico degli impianti di San Giacomo I e II

Le centrale idroelettrica di San Giacomo I e II collegano idraulicamente, con derivazioni e restituzioni distinte, i serbatoi di:

- Provvidenza, realizzato sbarrando il Fiume Vomano in prossimità di Ortolano (AQ) con una diga ad arco;
- Piaganini, realizzato sbarrando il Fiume Vomano in comune di Fano Adriano (TE) con una diga ad arco gravità.

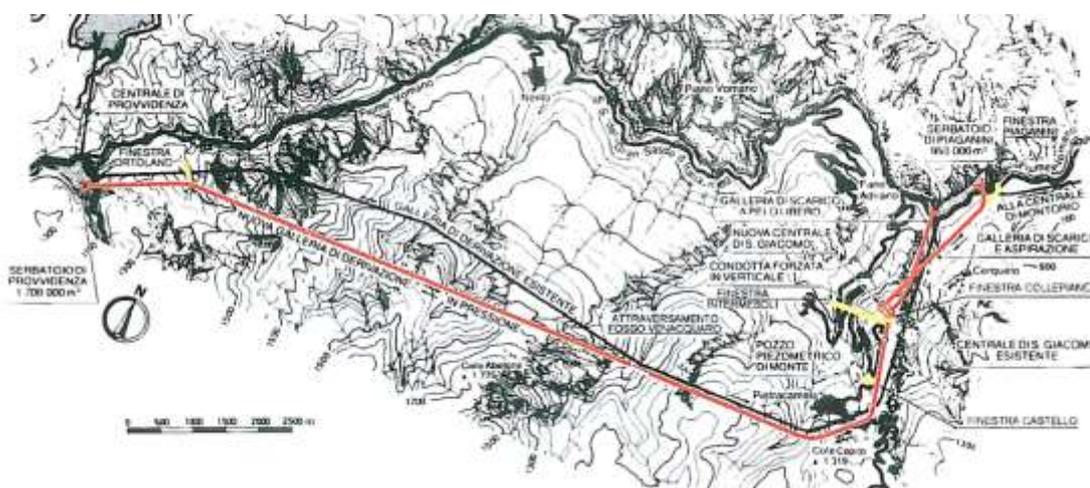


Figura 1: Impianto di San Giacomo – schema idraulico.

### 2.2 Diga di Provvidenza e derivazione di San Giacomo II

La diga di Provvidenza, costruita nel periodo 1939-1947, è una diga muraria ad arco. Il piano di Coronamento si trova a quota 1063.20 m slm e si sviluppa per 237.70 m. Il corpo diga ha un volume pari a 70'800 m³.



Figura 2: Diga di Provvidenza – vista da valle.

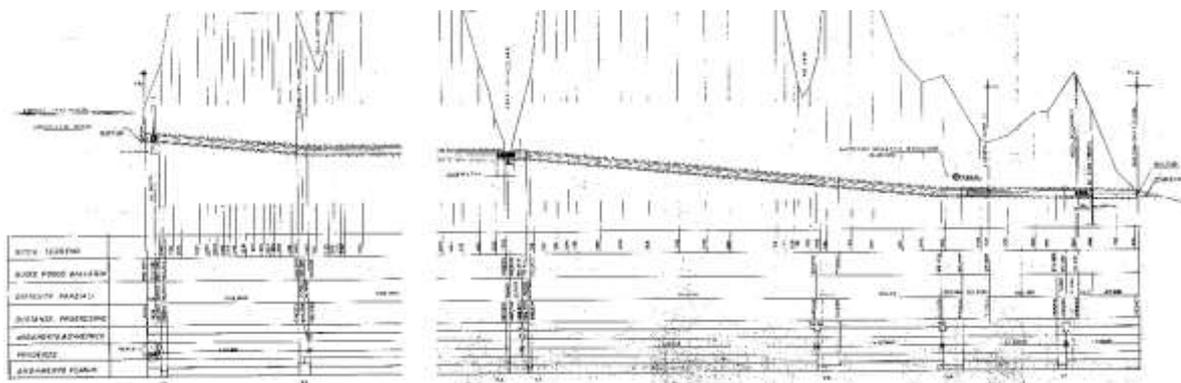


Figura 3: Diga di Provvidenza – planimetria generale.

Lo sbarramento dispone di due opere di scarico: uno scarico di superficie (sei luci a stramazzo libero dello sviluppo di 8 m con soglia ad elev. 1060.00 m slm e portata massima di 335 m<sup>3</sup>/s) ed uno scarico di fondo (galleria con DI 2.5 m e lunga 180 m, dotata di una paratoia a rulli, piana di 2.0x2.0 m e portata massima di 20 m<sup>3</sup>/s).

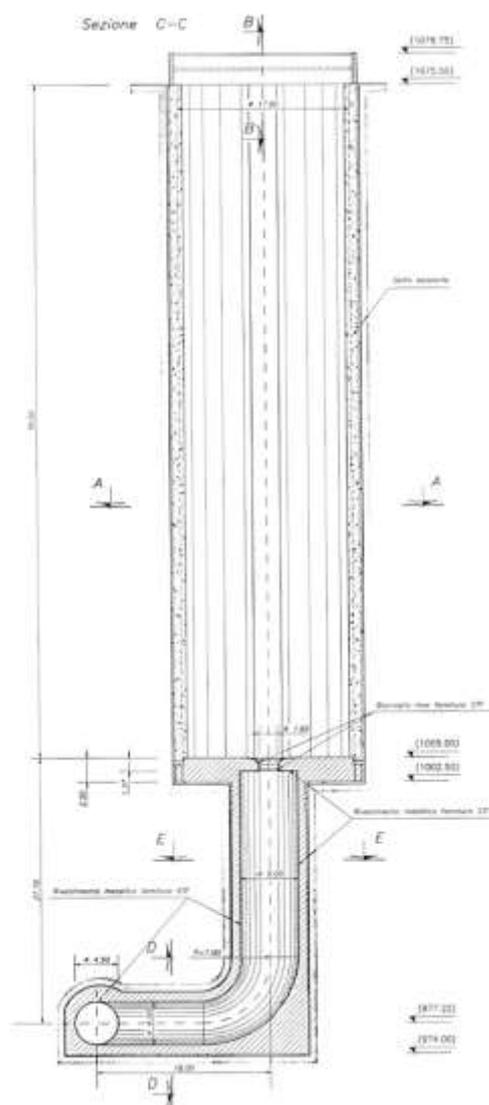
L'opera di presa, ubicata in destra idraulica, è costituita da quattro luci di 5.0x5.0m e dotata di griglie. Dopo le griglie la galleria ha un primo tratto maggiormente pendente fino alla galleria di adduzione. 90 m sotto l'entrata alla galleria esiste una paratoia di 3.5x4.5 m.

La galleria di derivazione, realizzata in calcestruzzo con DI 4.5 m, ha uno sviluppo di circa 14'000 m fino al pozzo piezometrico.



**Figura 4:** Derivazione Provvidenza – profilo idraulico.

Il pozzo piezometrico ha un diametro interno di 6.0 m per i primi 27.8 m di altezza, per poi allargarsi a un diametro di 17.80 m per i successivi 70.50 m.



**Figura 5:** Derivazione Provvidenza – pozzo piezometrico.

La camera valvole (30 m x 8 m x 13 m) accoglie una valvola a farfalla, una valvola di rientrata d'aria e un passo d'uomo aventi asse ad elev. 976.67, alla quale si raccorda la condotta forzata avente DI 3600 mm, la quale ha un primo tratto orizzontale di circa 120 m per poi scendere verticalmente in sotterraneo per circa 525 m. In seguito, la condotta si biforca per alimentare il gruppo Pelton e la reversibile, ad elev. 403.25 m slm (Gr.6 - 282.45 MW) rispettivamente 359.70 m slm (Gr.7 - 56.30 MW). Il diametro nel tratto terminale della condotta ad elev. 359.70 m slm è pari a 1'400 mm.

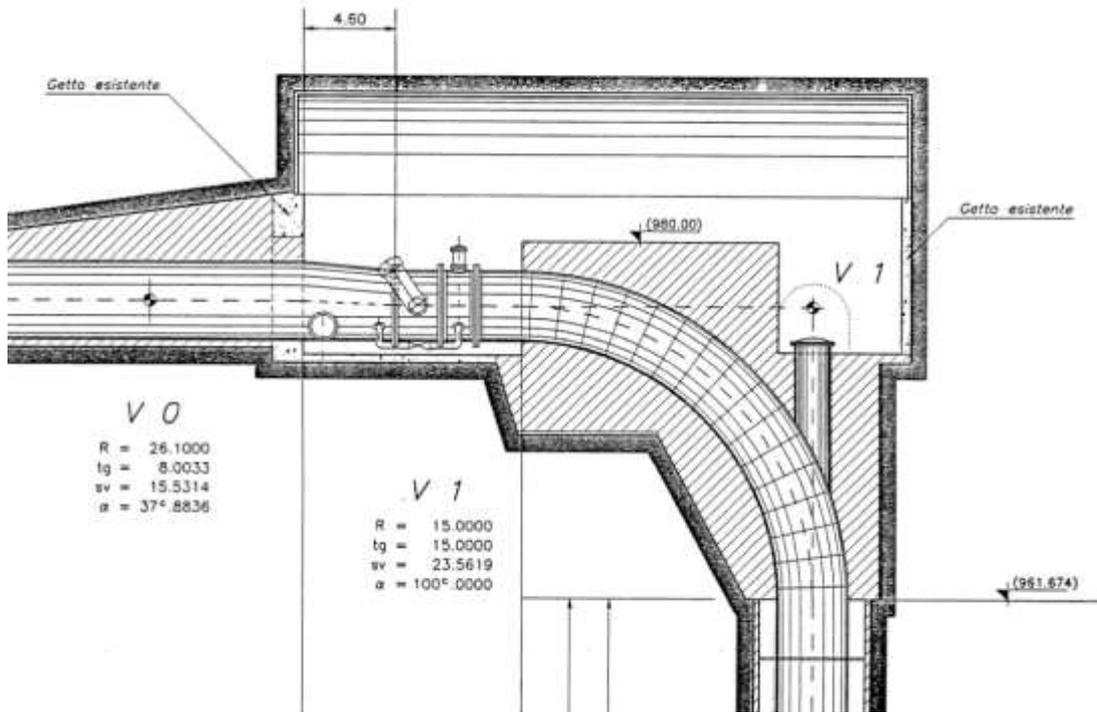


Figura 6: Derivazione Provvidenza – camera valvole.

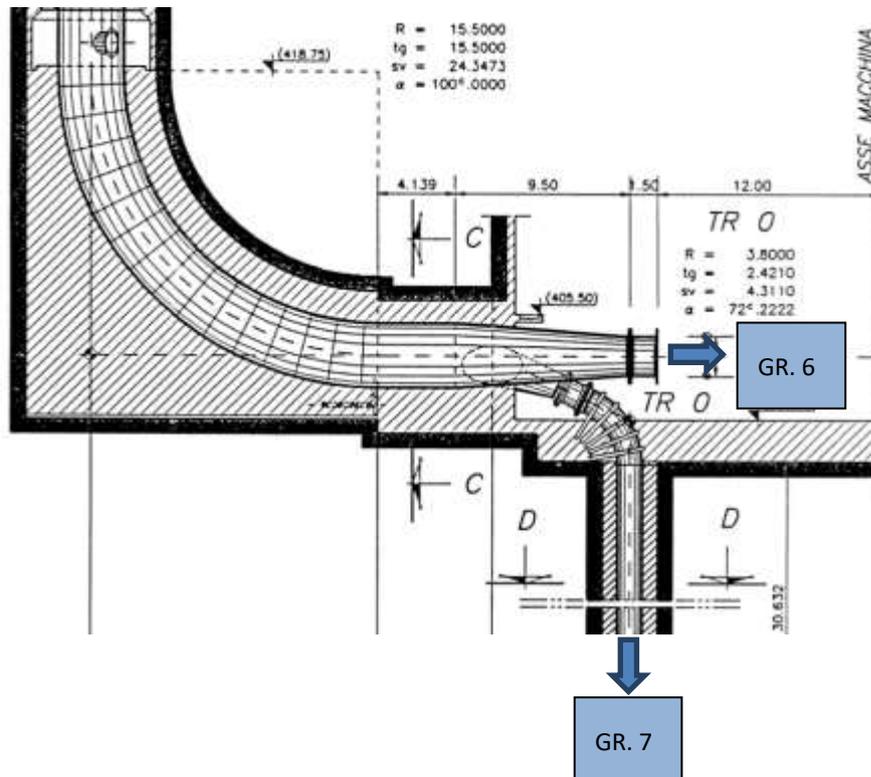


Figura 7: Derivazione Provvidenza – biforcazione per i gruppi 6 e 7.

### 2.3 Diga di Piaganini e gallerie di scarico di S.Giacomo II

La diga di Piaganini, costruita nel periodo 1953-1955, è una diga muraria ad arco-gravità. Il piano di Coronamento si trova a quota 398.50 m slm e si sviluppa per 113.0 m. Il corpo diga ha un volume pari a 26'000 m<sup>3</sup>.



Figura 8: Diga di Piaganini – vista da valle.

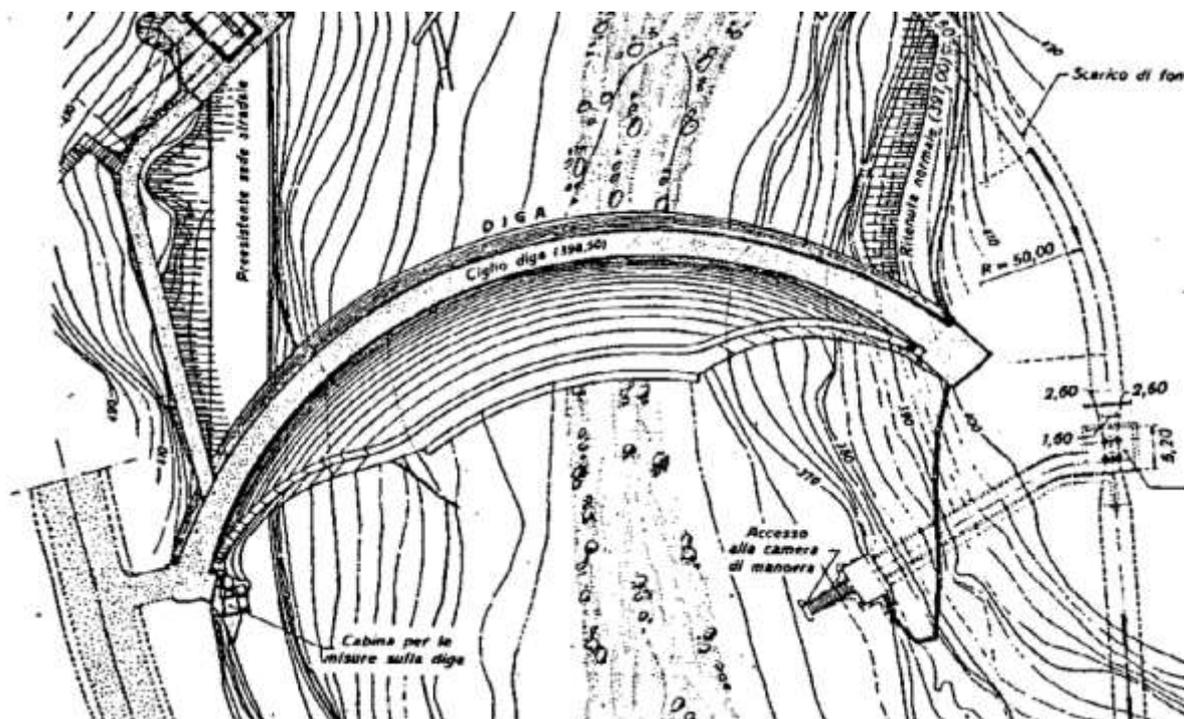
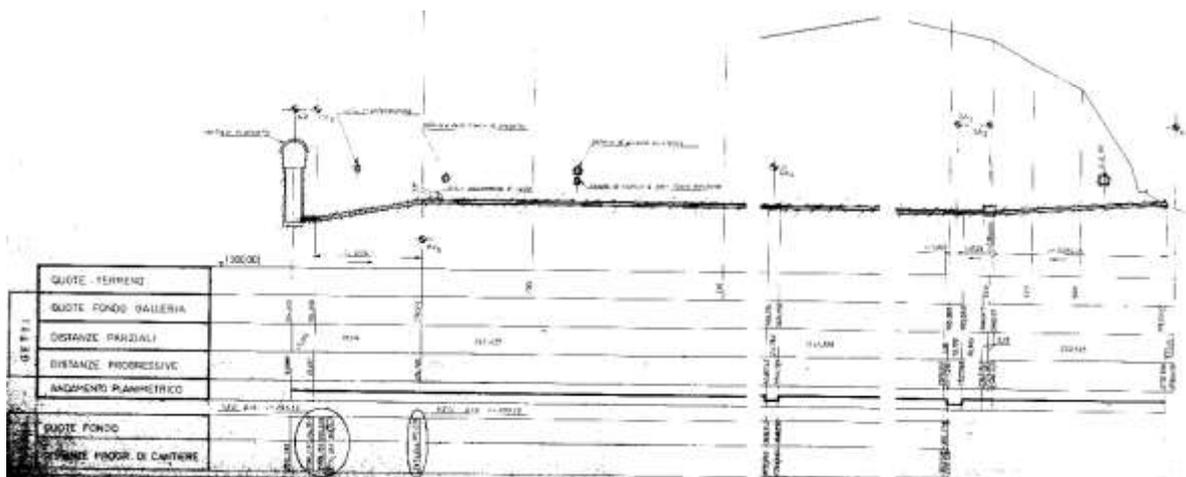


Figura 9: Diga di Piaganini – planimetria generale.





**Figura 11:** Impianto di S. Giacomo II – galleria forzata di scarico Gr. 7 – profilo.

Circa 200 m a monte della presa, in una camera apposita è collocata due valvole di intercettazione a farfalla ( $D=2.2$  m), munite di bypass. Nella stessa camera è presente una valvola di rientrata/uscita d'aria.

Il pozzo piezometrico della galleria forzata di valle ha DI 4.80 m e si sviluppa per circa 280 m con un percorso a spirale, raggiungendo un'altezza di circa 30 m.

La camera valvole di macchina accoglie una valvola a farfalla ( $D=2.2$  m), una valvola di rientrata d'aria e un passo d'uomo.

La condotta poi alimenta un gruppo Francis reversibile da 56.30 MW.

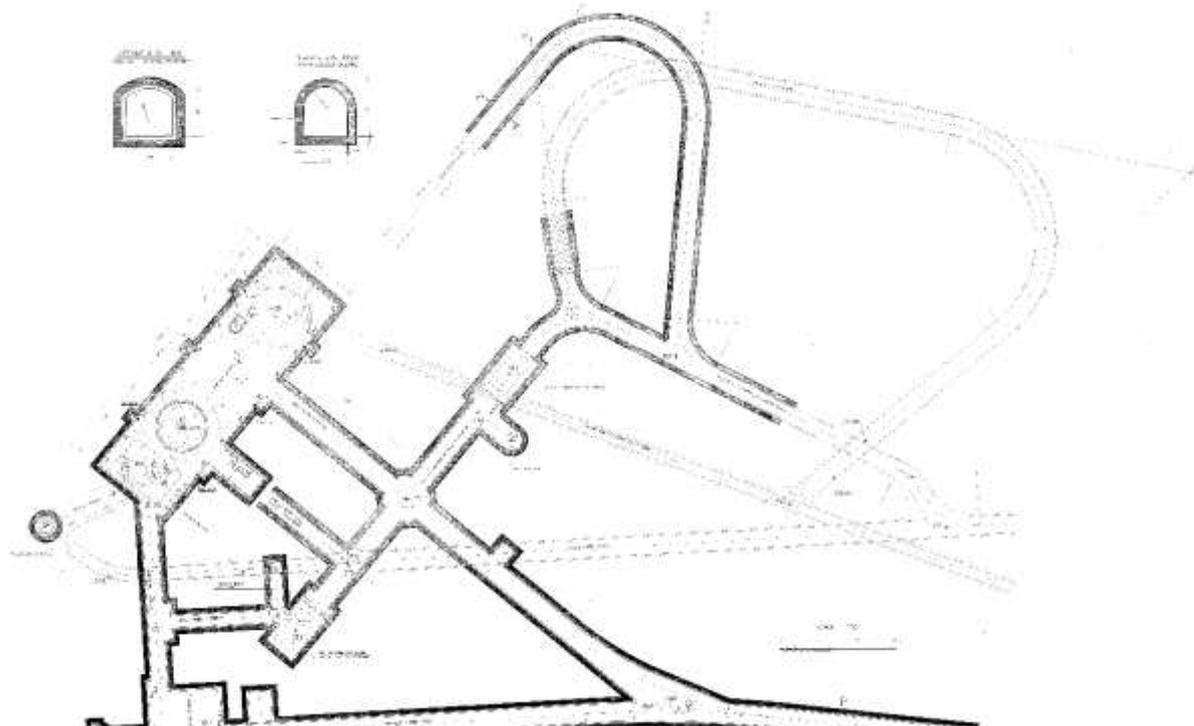
## 2.4 Centrale di San Giacomo II

La centrale di San Giacomo II, sita in comune di Fano Adriano (TE), è stata costruita negli anni '90 come ampliamento della centrale esistente di San Giacomo I.

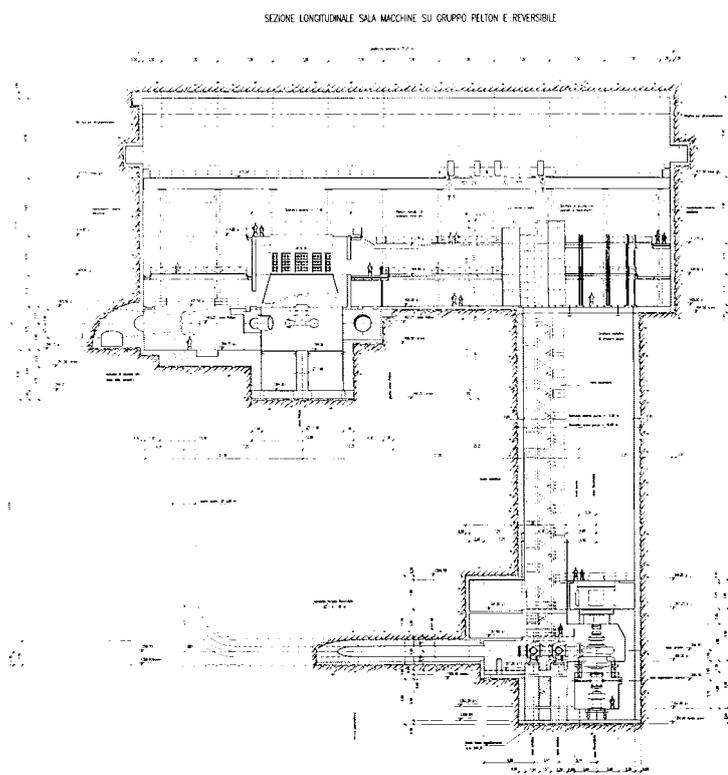
L'accesso avviene dal portale sito in riva al serbatoio Piaganini, tramite l'esistente galleria lunga circa 2 km, dalla quale si stacca la nuova galleria di accesso lunga circa 145 m.

Entrando in centrale, dapprima si incontra la galleria trasformatori, dove sono ubicati su lati opposti i due trasformatori che servono sia la centrale esistente che quella nuova.

Proseguendo si raggiunge la sala macchine di San Giacomo II, che è costituita da una caverna di centrale nella quale sono collocati su lati opposti il gruppo Pelton (Gr. 6) e un pozzo verticale circolare profondo 45.8 m in cui è stato installato il gruppo Francis reversibile (Gr. 7).



**Figura 12:** Centrale di San Giacomo II - planimetria generale.



**Figura 13:** Centrale di San Giacomo II – sezione longitudinale sala macchine su gruppo Pelton e reversibile.

La sala macchine risulta pertanto suddivisa in due settori che hanno dimensione interna pari a circa 30.0x21.1 m e 37.0x21.1 m, estendendosi in elevazione per circa 28 e 19 m.

I piani giranti turbine si trovano rispettivamente ad elev. 403.25 m slm (Gr. 6) e ad elev. 359.70 m slm (Gr. 7)

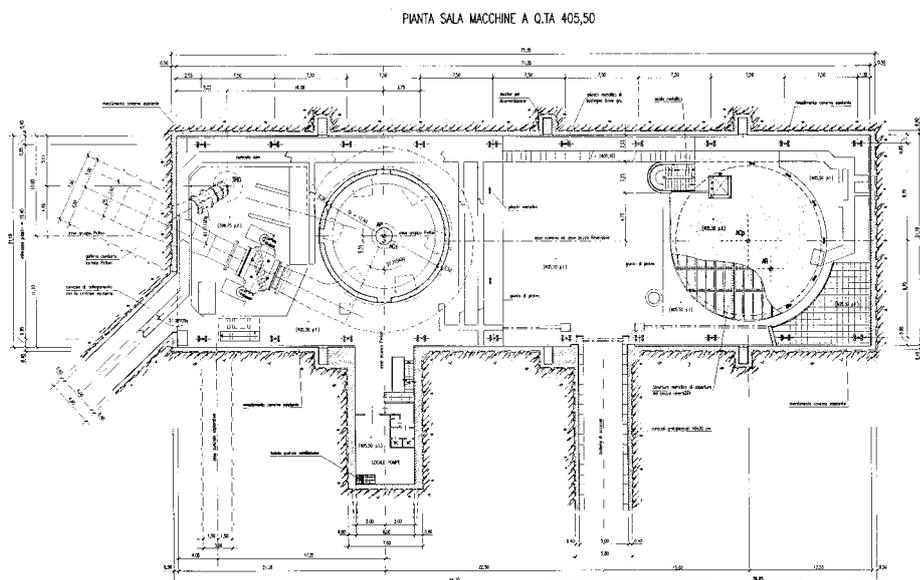


Figura 14: Centrale di San Giacomo II – sala macchine.

## 2.5 Gruppi di produzione

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

### 2.5.1 gruppo Pelton, ad asse verticale (Gr. 6):

- Salto lordo max: 656.75 m
- Salto lordo min: 642.75 m
- Asse gruppo: 403.25 m slm
- Dati targa turbina:
  - Portata: 50.34 m<sup>3</sup>/s
  - Potenza: 282.45 MW
- Dati targa generatore:
  - Tipo: sincro trifase
  - Potenza: 310 MVA      Cos  $\phi$ : 0.9      Freq: 50 Hz

### 2.5.2 gruppo reversibile Francis, ad asse verticale (Gr. 7)

- Salto lordo max: 675.60 m
- Salto lordo min: 661.60 m

- Asse gruppo: 359.70 m slm
- Dati targa turbina:
  - Portata: 9.81 m<sup>3</sup>/s
  - Potenza: 56.29 MW
- Dati targa pompa:
  - Portata: 8.29 m<sup>3</sup>/s
  - Potenza: 60.64 MW
- Dati targa generatore:
  - Tipo: sincro trífase
  - Potenza: 65 MVA      Cos  $\phi$ : 0.9      Freq: 50 Hz

### 3. CARATTERISTICHE DEI SERBATOI

#### 3.1 Serbatoio di Provvidenza



Figura 15: Serbatoio di Provvidenza.

##### 3.1.1 Dati FCEM

###### Dati principali della diga desunti dal Progetto approvato:

Altezza della diga (ai sensi del D.M. 24.03.'82)	52.20 m
Altezza della diga (ai sensi della L. 584/'94)	46.20 m
Altezza di massima ritenuta	45.20 m
Quota coronamento	1'063.20 m slm
Franco (ai sensi del D.M. n° 44 del 24.03.'82)	1.00 m
Franco netto (ai sensi del D.M. n°44 del 24.03.'82)	0.70 m
Sviluppo del coronamento	237.70 m
Volume della diga	70'800 m <sup>3</sup>
Grado di sismicità assunto nel Progetto	S=9
Classifica ai sensi del D.M: 24.03.'82	diga muraria ad arco (AbI)

Dati principali del serbatoio desunti dal Progetto approvato

Quota di massimo invaso	1'062.20 m slm
Quota massima di regolazione	1'060.00 m slm
Quota minima di regolazione	1'045.00 m slm
Superficie dello specchio liquido:	
• Alla quota di massimo invaso	0.171 km <sup>2</sup>
• Alla quota massima di regolazione	0.157 km <sup>2</sup>
• Alla quota minima di regolazione	0.072 km <sup>2</sup>
Volume totale di invaso (ai sensi del D.M. 24.03.'82)	2.76x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
Volume di invaso (ai sensi della L.584/1994)	2.40x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
Volume utile di regolazione	1.68x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
Volume di laminazione	0.36x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
Superficie del bacino imbrifero direttamente sotteso	54 km <sup>2</sup>
Superficie del bacino allacciato	234 km <sup>2</sup>
Portata di massima piena di Progetto	350 m <sup>3</sup> /s
Tempo di ritorno (ultimo anno di riferimento dei dati ...)	non disponibile

Dati principali delle opere di scarico

Portata esitata con livello nel serbatoio alla quota 1062,20 m slm. (sopralzo del pelo liquido m 2,20)	
Dallo scarico di superficie	335.00 m <sup>3</sup> /s
Dallo scarico di fondo	20.00 m <sup>3</sup> /s

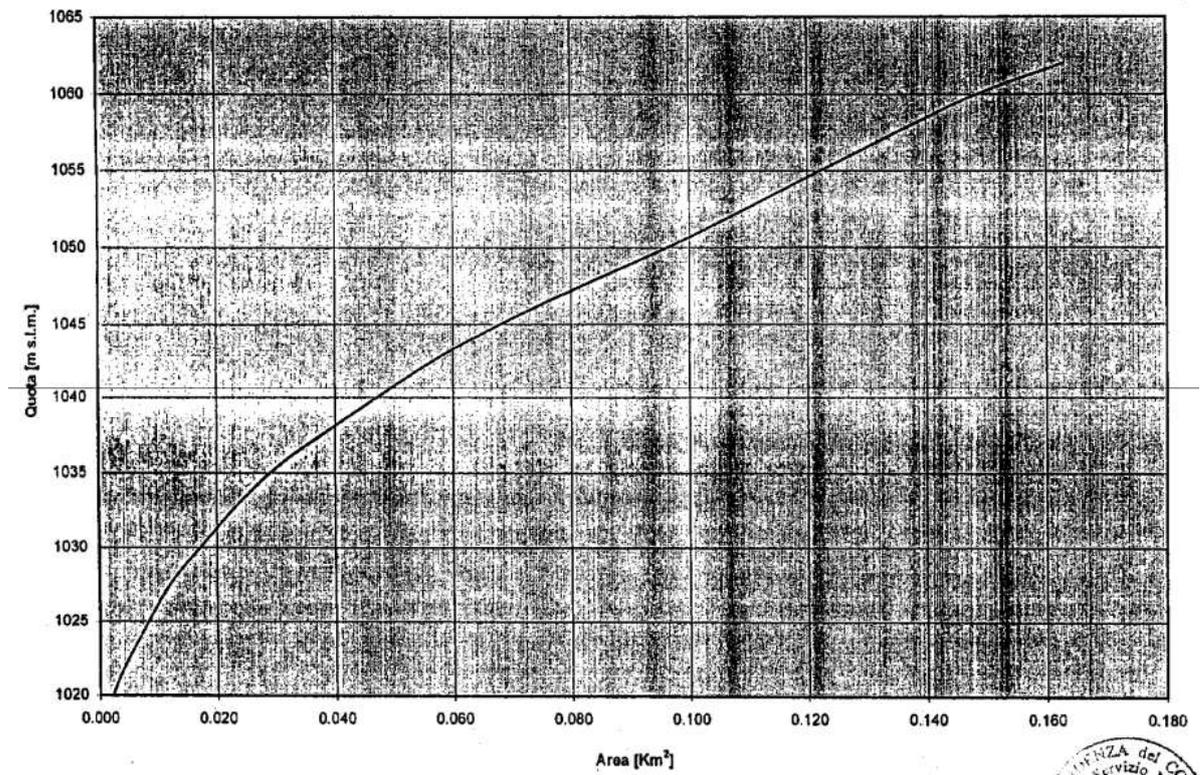


Figura 16: Diga di Provvidenza- diagramma delle aree.

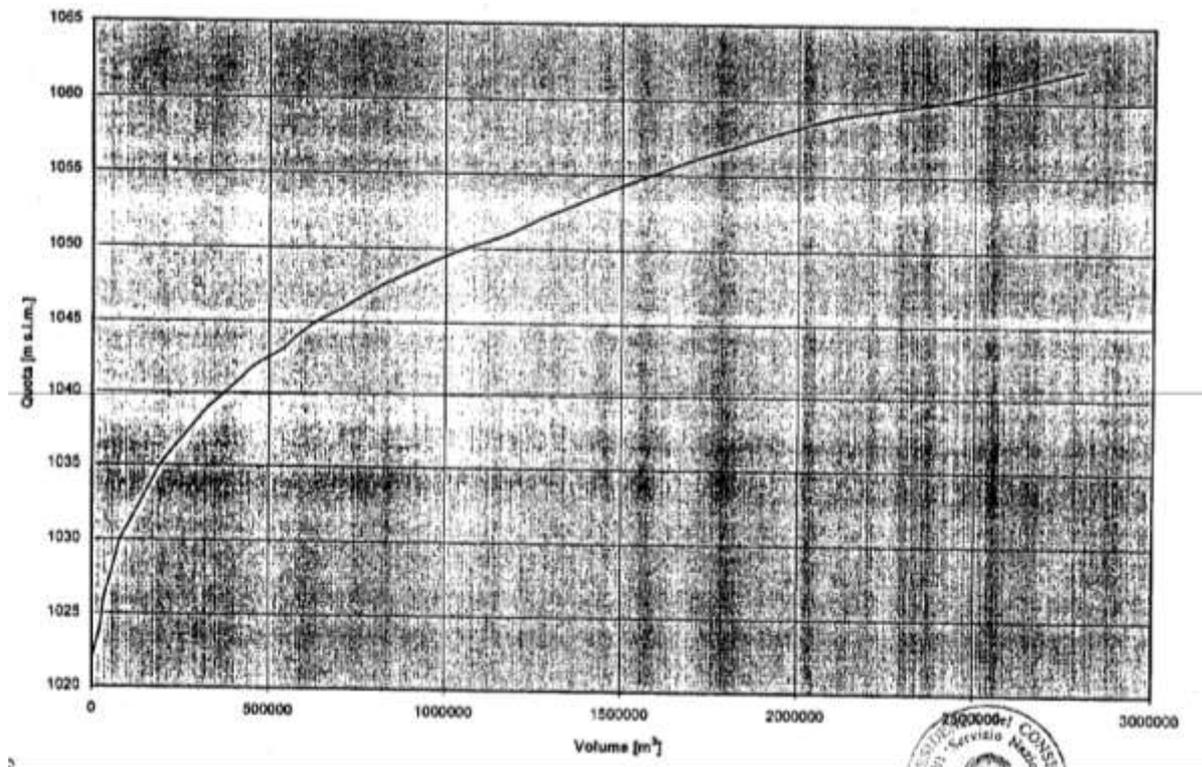
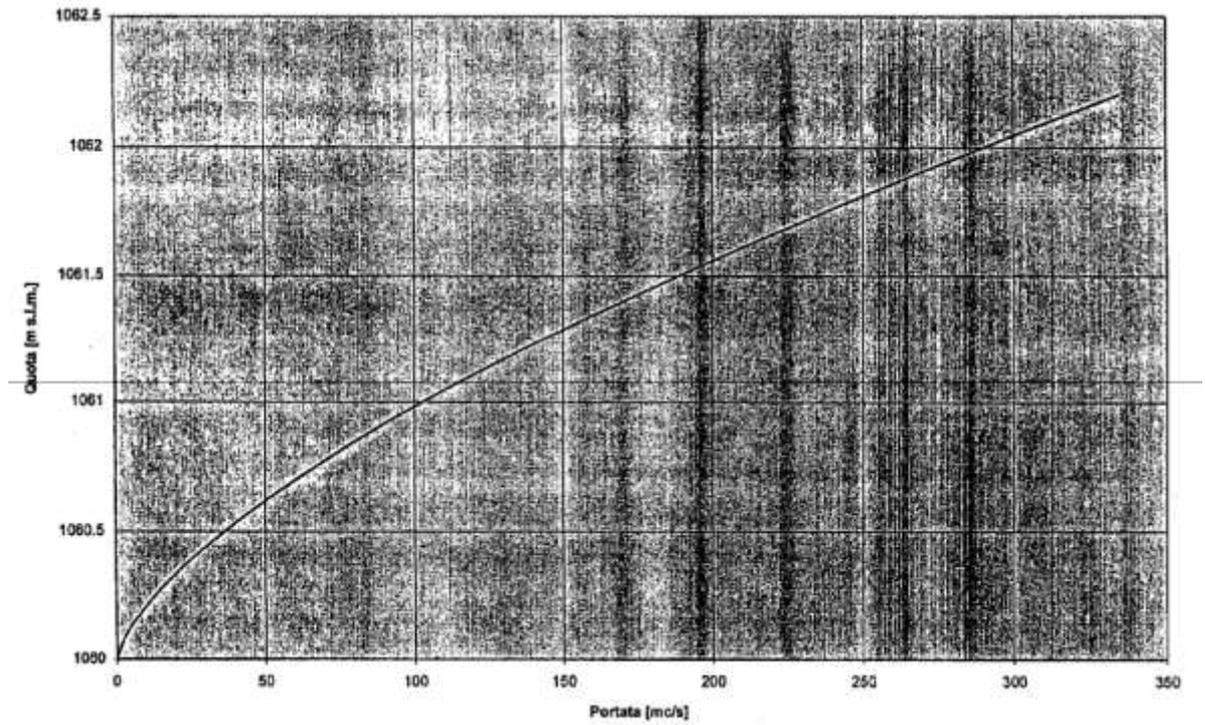
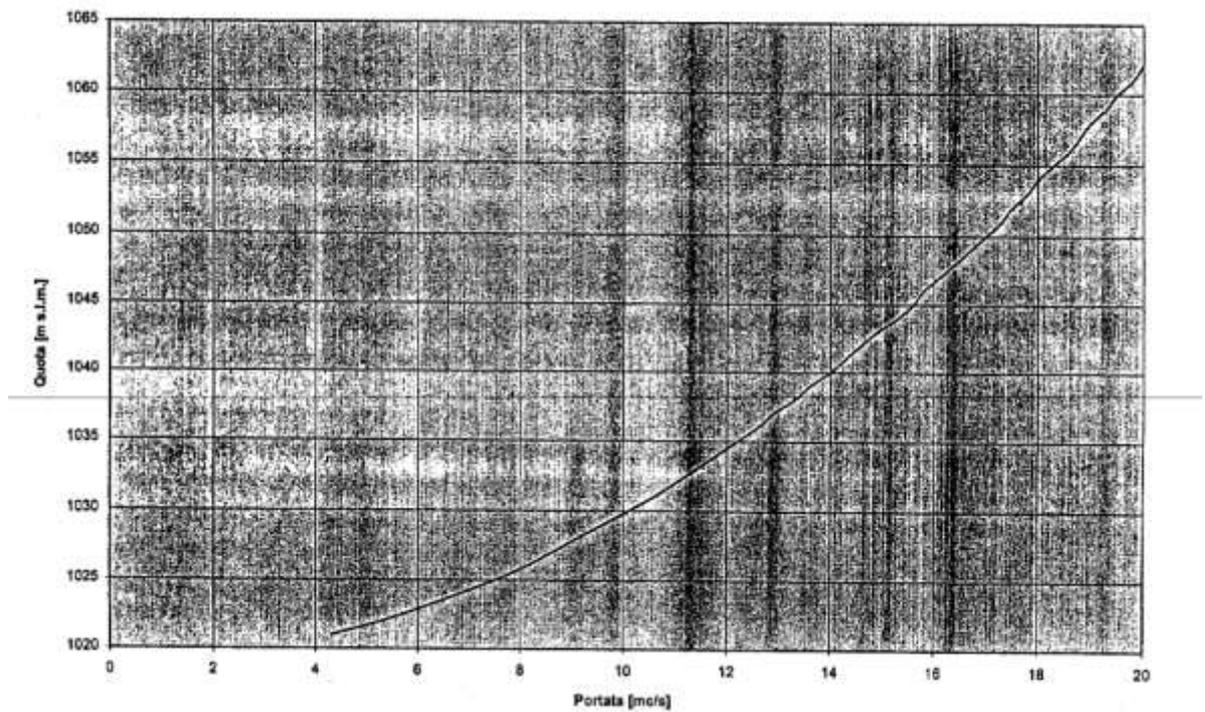


Figura 17: Diga di Provvidenza- diagramma dei volumi.



**Figura 18:** Diga di Provvidenza - curva di portata dello scarico di superficie.



**Figura 19:** Diga di Provvidenza - curva di portata dello scarico di fondo.

3.1.2 Dati contenuti nel Piano di Gestione dei Sedimenti

Nel 2006 è stata effettuato un rilievo topo-batimetrico del serbatoio che ha aggiornato le curve caratteristiche rispetto a quelle originali:

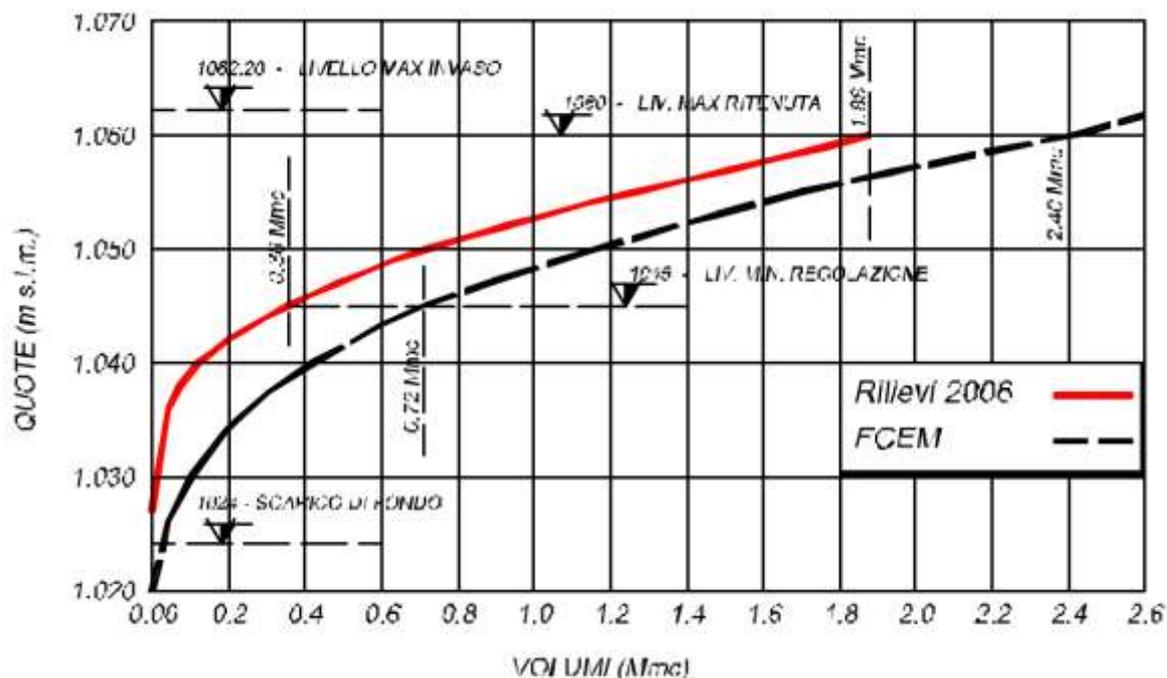


Figura 20: Diga di Provvidenza - diagramma delle aree (2006).

Nel 2020 è stato effettuato nuovo rilievo batimetrico, che mostra la seguente curva d'invaso, espressa in forma tabellare:

DIGA DI PROVVIDENZA - ENEL GREEN POWER			
Descrizione	LIVELLO ACQUA (m s.l.m.)	Superficie specchio (mq)	Volume invaso (mc)
massimo invaso	1062.00	131300.00	2020928.00
massima regolazione	1060.00	124981.00	1765406.00
	1058.00	118270.00	1523012.00
	1056.00	112461.00	1293083.00
	1054.00	106730.00	1074774.00
	1052.00	100150.00	868604.00
	1050.00	88767.00	680926.00
	1048.00	73419.00	521568.00
	1046.00	59764.00	394105.00
minima regolazione	1045.00	56533.00	336726.00

Tabella 1: Serbatoio di Provvidenza – curva di invaso da batimetria 2020

La cronistoria delle variazioni di volume nel serbatoio di Provvidenza è riassunta nella seguente tabella:

	Dati originali FCEM			Batimetria 2006		Batimetria 2020	
	livelli m slm	Volume Mm <sup>3</sup>	V. utile Mm <sup>3</sup>	Volume Mm <sup>3</sup>	V. utile Mm <sup>3</sup>	Volume Mm <sup>3</sup>	V. utile Mm <sup>3</sup>
MAX.INVASO	1'062.20	2.76		No info		2.02	
MAX.REG.	1'060.00	2.40	1.68	1.88	1.52	1.77	1.43
MIN.REG.	1'045.00	0.72	-	0.36	-	0.34	-
FONDO	1'013.80	-	-	-	-		

**Tabella 2:** Volume del Serbatoio di Provvidenza.

Come si può notare confrontando le batimetrie più recenti, la capacità utile d'invaso rispetto a quella originale si è ridotta di circa di 26 punti percentuali ed il tasso di interrimento dell'ultimo periodo risulta essere pari a  $0.11 \text{ Mm}^3/14 \text{ anni} = \text{circa } 8'000 \text{ m}^3/\text{anno}$ .

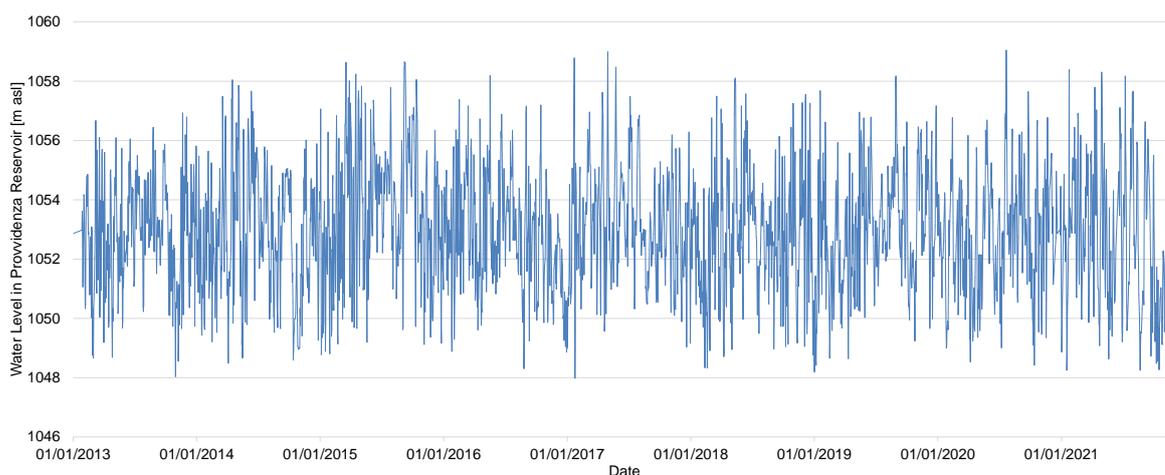
Già con i rilievi batimetrici effettuati nel 2006, dall'esame dei valori di profondità misurati in prossimità delle opere di scarico e di derivazione, è risultato che le quote dei sedimenti sono prossime o superiori alle quote di soglia dei manufatti esistenti.

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.

Infine, è richiesta la riserva dei volumi fino a 1'047.50 m slm, per black-start per San Giacomo.

### 3.1.3 Dati storici di livello

Enel GP ha fornito i dati storici disponibili del livello nel serbatoio, per il periodo 2013-2021.



**Figura 21:** Diga di Provvidenza - serie storica del livello nel serbatoio (2013-2021).

### 3.2 Serbatoio di Piaganini



**Figura 22:** Serbatoio di Piaganini - vista aerea.

#### 3.2.1 Dati FCEM

Dati principali della diga desunti dal Progetto approvato:

Altezza della diga (ai sensi del D.M. 24.03.'82)	45.05 m
Altezza della diga (ai sensi della L. 584/'94)	43.50 m
Altezza di massima ritenuta	34.50 m
Quota coronamento	398.50 m slm
Franco (ai sensi del D.M. n° 44 del 24.03.'82)	1.00 m
Franco netto (ai sensi del D.M. n°44 del 24.03.'82)	-
Sviluppo del coronamento	113.02 m
Volume della diga	26'000 m <sup>3</sup>
Grado di sismicità assunto nel Progetto	S=0
Classifica ai sensi del D.M: 24.03.'82	muraria, ad arco gravità (Ab2)

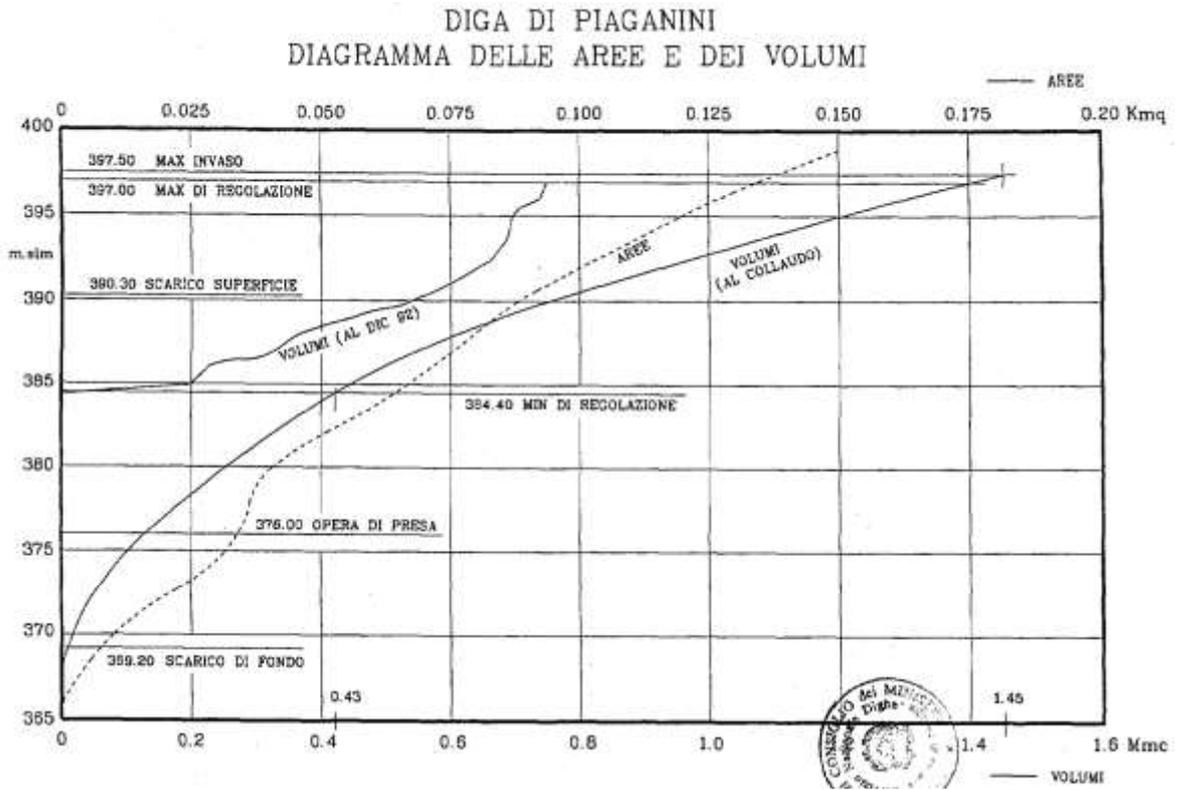
Dati principali del serbatoio desunti dal Progetto approvato

Quota di massimo invaso	397.50 m slm
Quota massima di regolazione	397.00 m slm
Quota minima di regolazione	384.40 m slm
Superficie dello specchio liquido	
• Alla quota di massimo invaso	0.1125 km <sup>2</sup>
• Alla quota massima di regolazione	0.110 km <sup>2</sup>
• Alla quota minima di regolazione	0.0425 km <sup>2</sup>
Volume totale di invaso (ai sensi del D.M. 24.03.'82)	1.45x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
Volume di invaso (ai sensi della L.584/1994)	1.40x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
Volume utile di regolazione	0.95x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
Volume di laminazione	0.05x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
Superficie del bacino imbrifero direttamente sotteso	198 km <sup>2</sup>
Superficie del bacino allacciato	495 km <sup>2</sup>
Portata di massima piena di Progetto	609.00 m <sup>3</sup> /s
Tempo di ritorno (ultimo anno di riferimento dei dati ...)	.... anni

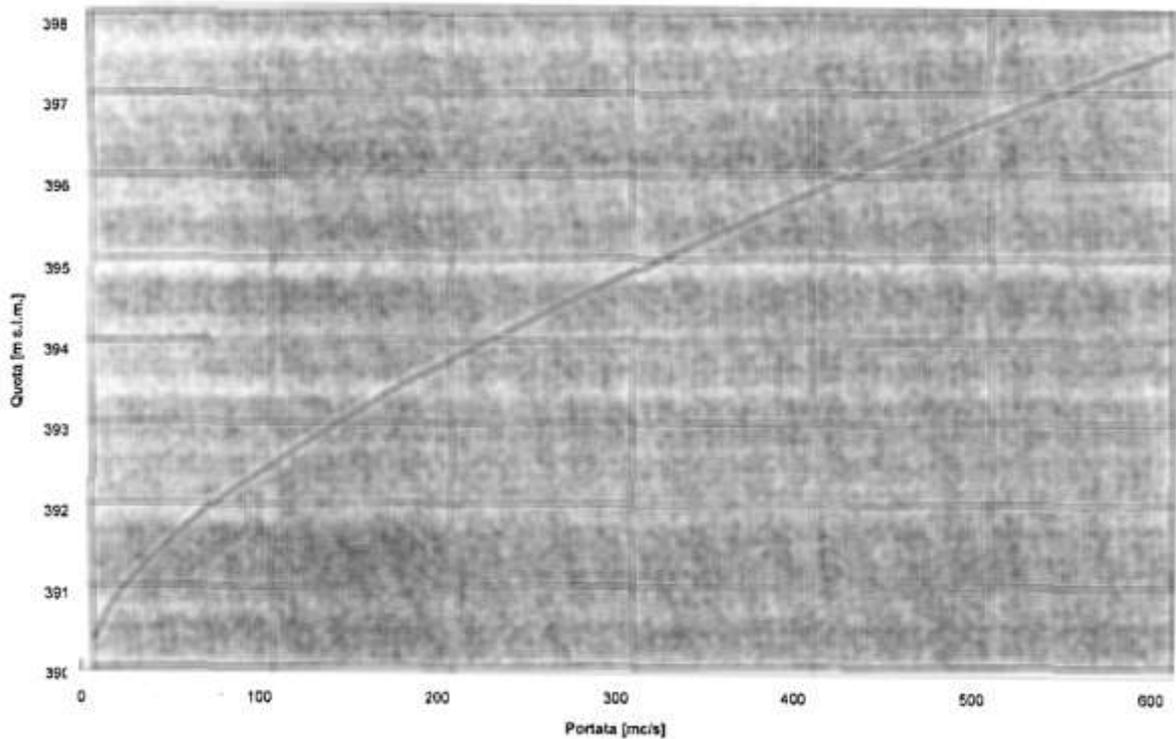
Dati principali delle opere di scarico

Portata esitata con livello nel serbatoio alla quota 397,50 m slm.

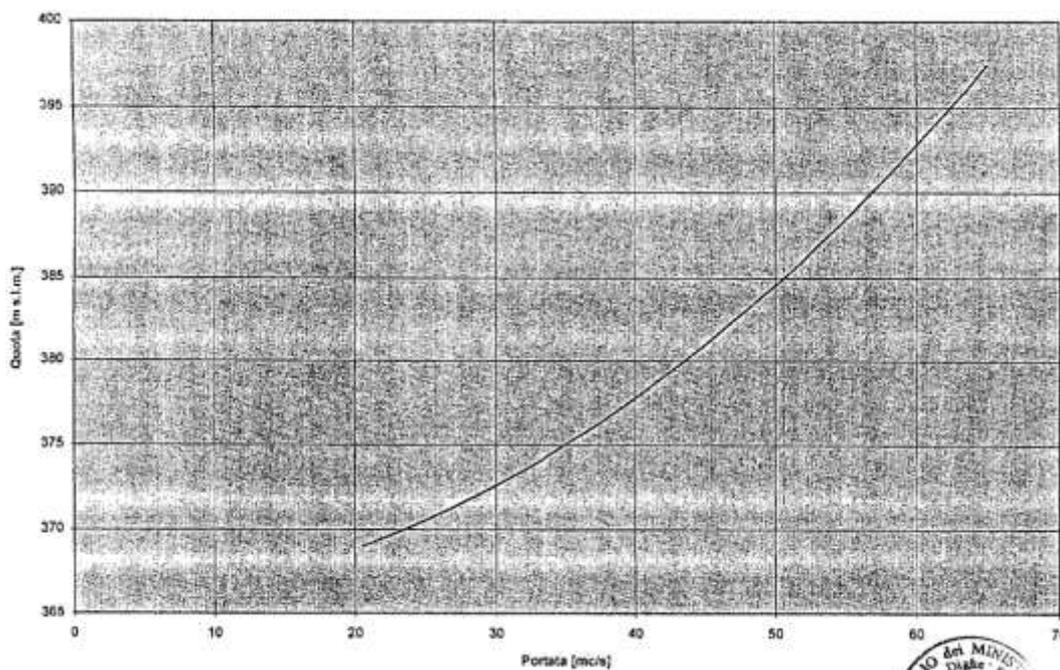
Dallo scarico di superficie	600.00 m <sup>3</sup> /s
Dallo scarico di fondo	65.00 m <sup>3</sup> /s



**Figura 23:** Diga di Piaganini – curve d’invaso – aree e volumi FCEM



**Figura 24:** Diga di Piaganini - curva di portata dello scarico di superficie.

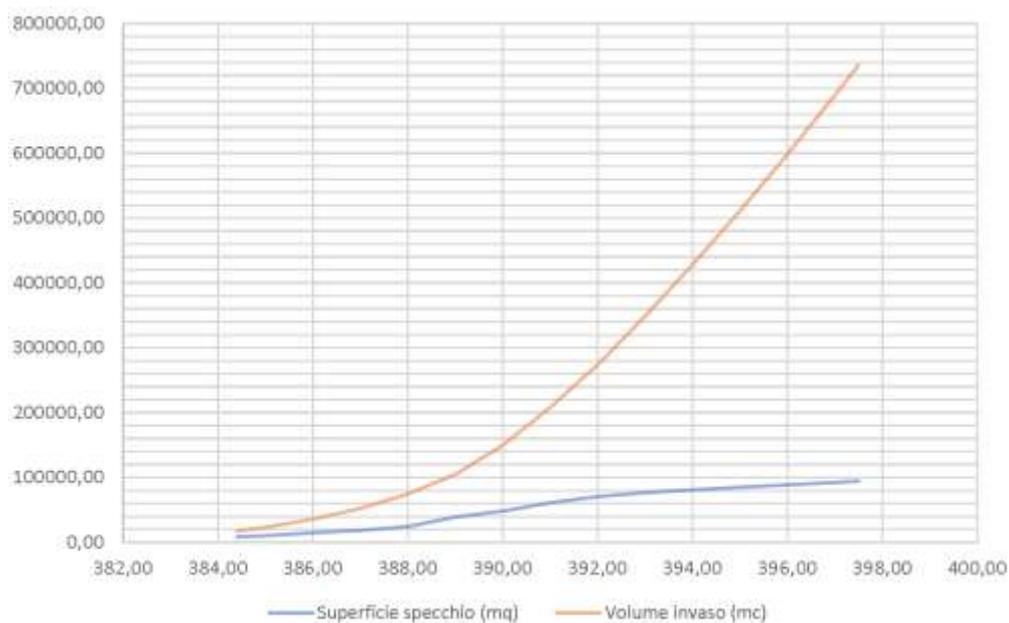


**Figura 25:** Diga di Piaganini - curva di portata dello scarico di fondo.

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

Nel 2015 è stata effettuato un rilievo topo-batimetrico del serbatoio che ha aggiornato le curve batimetriche rispetto a quelle originali. Il rilievo ha mostrato una diminuzione della capacità utile di circa il 44%.

Nel 2020 è stato effettuato nuovo rilievo batimetrico, che mostra la seguente curva d'invaso, espressa in forma grafica:



**Figura 26:** Serbatoio di Piaganini – curva di invaso da batimetria 2020

La cronistoria delle variazioni di volume nel serbatoio di Provvidenza è riassunta nella seguente tabella:

	FCEM			Batimetria 2015		Batimetria 2020	
	Livelli m slm	Volume Mm <sup>3</sup>	V. Utile Mm <sup>3</sup>	Volume Mm <sup>3</sup>	V. utile Mm <sup>3</sup>	Volume Mm <sup>3</sup>	V. utile Mm <sup>3</sup>
MAX.INVASO	397.50	1.45					
MAX.REG.	397.00	1.40	0.95	0.779	0.741	0.689	0.672
MIN.REG.	384.40	0.45		0.376		0.017	
FONDO	353.50	-		-	-		

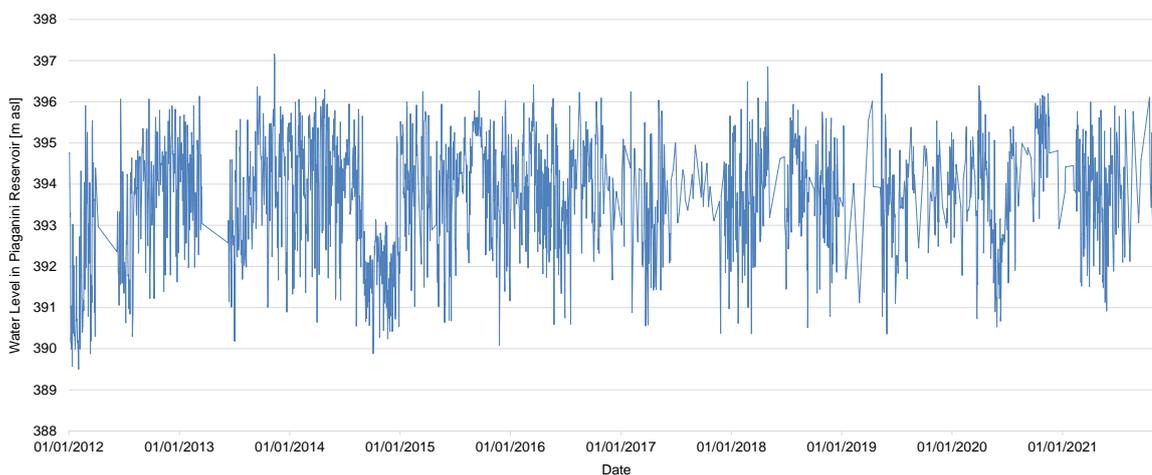
**Tabella 3:** Volume del Serbatoio di Piaganini.

L'invaso ha un tasso di interrimento medio su lungo periodo nell'ordine dei 15'000 m<sup>3</sup>/anno, quasi tutti a ridurre la capacità utile del serbatoio.

Già sulla base dei rilievi batimetrici effettuati nel 2015, dall'esame dei valori di profondità misurati in prossimità delle opere di scarico e di derivazione (Montorio), è risultato che le quote dei sedimenti sono prossime o superiori alle quote di soglia dei manufatti.

### 3.2.3 Dati storici di livello

Enel GP ha fornito i dati storici disponibili del livello nel serbatoio, per il periodo 2012-2021.



**Figura 27:** Diga di Piaganini - serie storica del livello nel serbatoio (2012-2021)

Si segnala i dati della serie risultano incompleti.

## 4. DIMENSIONAMENTO IDRAULICO DEL NUOVO GRUPPO DI POMPAGGIO

### 4.1 Descrizione dell'intervento

#### 4.1.1 Obiettivi del Progetto

Enel GP ritiene opportuno potenziare l'impianto di San Giacomo con l'installazione di una nuova pompa per potenziare l'impianto anche alla luce della maggiore flessibilità operativa.

#### 4.1.2 Alternative valutate

Considerato che la portata pompata viene incrementata in modo sostanziale, è necessario garantire il corretto funzionamento dell'impianto nei transitori. A tale scopo, sono state individuate tre alternative progettuali inerenti alle modifiche al pozzo piezometrico:

- Modifica del pozzo piezometrico esistente: Lo schema idraulico rimane lo stesso e solo il pozzo esistente viene sopraelevato;
- Spostamento di circa 1'300 m verso monte del pozzo piezometrico esistente: Il pozzo viene spostato 1'300 m verso monte, dove c'è una copertura sufficiente delle montagne (vedasi **Figura 28**). Conseguentemente, la condotta forzata si allunga. Si verifica se è sufficiente utilizzare il tratto della galleria esistente come condotta forzata o se dev'essere realizzata una nuova condotta blindata inclinata tra il pozzo ed il vertice di inizio del pozzo forzato verticale della condotta esistente;

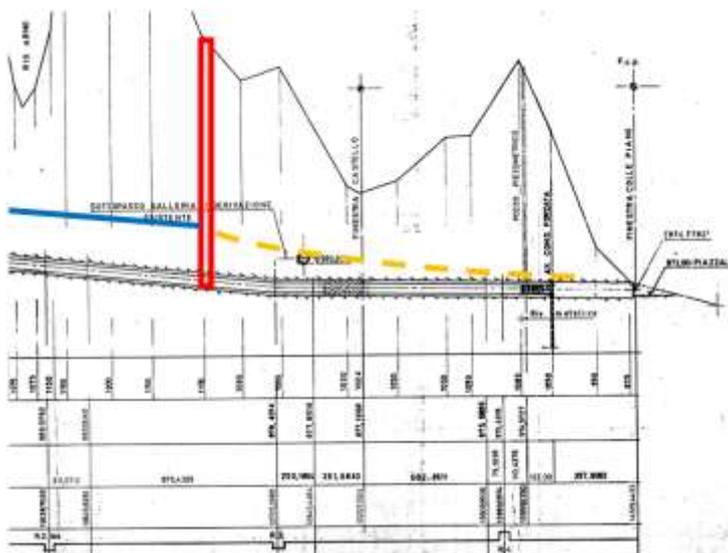
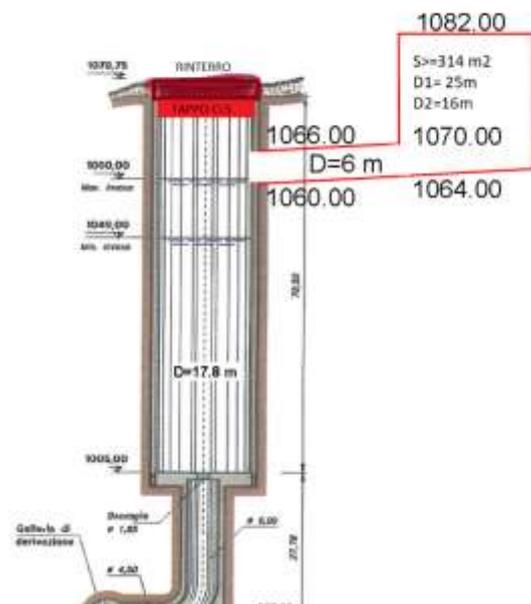


Figura 28: Schematizzazione Alternativa 2.

- Soluzione con espansione superiore: Soluzione con modifica della parte superiore del pozzo inserendo una vasca di espansione realizzata con lo scavo di un pozzo aggiuntivo

(D=20 m con fondo a quota 1'064 m slm), collegamento (D=6 m) al pozzo esistente (D=17.8 m) e loro innalzamento fino a quota 1'082 m slm, vedasi **Figura 29**.



**Figura 29:** Schematizzazione Alternativa 3 (versione finale) con riutilizzo ed espansione dell'esistente P.P.

L'alternativa prescelta è l'Alternativa 3, sulla base di considerazioni tecnico-economiche.

#### 4.1.3 Descrizione delle opere a progetto

Il nuovo gruppo di pompaggio Gr.8 sarà installato in caverna sotto le centrali esistenti e con piano macchina a quota inferiore (elev. 333 m slm), in modo da interferire il minimo possibile con le strutture esistenti e consentire un agevole collegamento con gli elementi d'impianto più significativi, ovvero con l'esistente condotta forzata e con la caverna trasformatori.

Inoltre sarà realizzata una nuova galleria forzata di alimentazione verso il serbatoio Piaganini, sia per via del maggiore diametro in funzione della nuova portata convogliata, sia per ridurre i possibili tempi di fuori servizio.

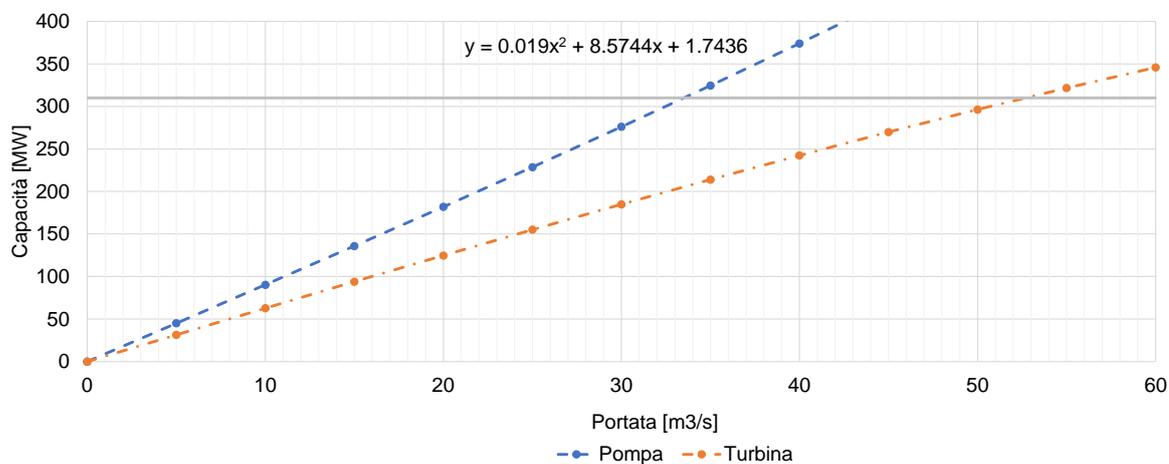
La galleria sarà dotata di valvole di macchina, di un pozzo piezometrico e di valvole di intercettazione in prossimità della restituzione nel serbatoio Piaganini.

Per quanto concerne il nuovo assetto idraulico, sulla base delle assunzioni e delle verifiche effettuate, al fine di consentire l'inversione della piezometrica in fase di pompaggio e la gestione del relativo transitorio idraulico, occorre effettuare modifiche all'esistente pozzo piezometrico.

#### 4.2 Criteri di dimensionamento elettrico e idraulico

Dal punto di vista elettrico, la nuova macchina sarà collegata tramite un pozzo verticale lungo circa una cinquantina di metri al trasformatore esistente da 310 MVA, riducendo così al minimo la lunghezza dei collegamenti. Non si prevedono modifiche in sottostazione.

Dalle valutazioni effettuate, il limite tecnico al valore della portata pompata risulta essere quello elettrico e non quello idraulico. La potenza massima impiegabile dal trasformatore è pari a 310 MW. Con il salto disponibile, la massima potenza pompabile corrisponde ad una portata massima pompata pari a 33.47 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 30:** San Giacomo II – Legame a prefissata potenza tra le portate di pompaggio e turbinaggio.

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

IMPIANTO DI SAN GIACOMO - CRITERI DI DIMENSIONAMENTO IDRAULICO			
<b>CRITERIO N.1</b>	<b>CONSIDERANDO I VOLUMI ATTUALMENTE TURBINABILI E IL CONTRIBUTO IN POMPAGGIO DELLA POMPA ESISTENTE</b>		
	<b>Portata massima turbinabile (GR6+GR7):</b>	<b>60.15</b>	<b>m3/s</b>
	Durata turbinaggio	8	ore
	Volume giornaliero turbinato	1732320	m3
	<b>Portata minima pompabile (GR7):</b>	<b>7.73</b>	<b>m3/s</b>
		10	ore
		278280	m3
	Volume da pompare per chiudere il bilancio:	1454040	m3
	<b>Portata da pompare (nuovo GR8) su 10 ore:</b>	<b>40.39</b>	<b>m3/s</b>
	<b>Portata totale in pompaggio (GR7+GR8):</b>	<b>48.12</b>	<b>m3/s</b>
<b>CRITERIO N.2</b>	<b>CONSIDERANDO I VOLUMI ATTUALMENTE TURBINABILI E IL POMPAGGIO SOLO CON LA NUOVA POMPA</b>		
	<b>Portata massima turbinabile (GR6+GR7):</b>	<b>60.15</b>	<b>m3/s</b>
	Durata turbinaggio	8	ore
	Volume giornaliero turbinato	1732320	m3
	Volume da pompare per chiudere il bilancio:	1732320	m3
	Durata pompaggio	10	ore
	<b>Portata da pompare (nuovo GR8) su 10 ore:</b>	<b>48.12</b>	<b>m3/s</b>
<b>CRITERIO N.3</b>	<b>CONSIDERANDO I VOLUMI UTILI NETTI DEI SERBATOI</b>		
	SERBATOIO DI PROVVIDENZA:	teorico	attuale
	V utile di regolazione (m3):	1680000	1520000
	Utilizzi diversi (irrig+pot):	0	0
	V utile netto di regolazione (m3):	1680000	1520000
	SERBATOIO DI PIAGANINI:	teorico	attuale
	V utile di regolazione (m3):	950000	741000
	Utilizzi diversi (irrig+pot):	40000	40000
	V utile netto di regolazione (m3):	910000	701000
		teorico	attuale
	VOLUME UTILE MINIMO VINCOLANTE:	910000	701000
	<b>VOLUME UTILIZZABILE:</b>	<b>910000</b>	<b>701000</b>
	<b>VALUTAZIONE PORTATE IN BASE AL VOLUME UTILE</b>		
	Durata turbinaggio	8	8 ore
	Portata massima turbinabile (GR6+GR7):	31.60	24.34 m3/s
	Durata pompaggio	8	8 ore
	<b>Portata massima pompabile (GR7+GR8):</b>	<b>31.60</b>	<b>24.34 m3/s</b>
	Durata pompaggio	6	6 ore
	<b>Portata massima pompabile (GR7+GR8):</b>	<b>42.13</b>	<b>32.45 m3/s</b>
	Durata pompaggio	4	4 ore
	<b>Portata massima pompabile (GR7+GR8):</b>	<b>63.19</b>	<b>48.68 m3/s</b>
	<b>VALUTAZIONE DURATA DEL POMPAGGIO CON GR 7 (8.29 m3/s) E GR.8 (33.47 m3/s) IN BASE AL VOLUME UTILE</b>		
	Durata pompaggio	6.1	4.7 ore
	<b>Portata massima pompabile (GR7+GR8):</b>	<b>41.76</b>	<b>41.76 m3/s</b>

**Tabella 4:** Criteri di dimensionamento idraulico.

Con riferimento al rilascio del Deflusso Minimo Vitale i valori di portata minima da rilasciare a valle degli sbarramenti sono i seguenti:

Riferiti all'attuazione della fase di sperimentazione <sup>1</sup>:

- Dal serbatoio di Provvidenza: 0.179 m<sup>3</sup>/s;
- Dalla Presa Mavone sul canale di gronda 400 Dx: 0.175 m<sup>3</sup>/s;
- Dalla Presa Ruzzo sul canale di gronda 400 Dx: 0.096 m<sup>3</sup>/s;

Riferiti ai Disciplinari di Concessione <sup>2</sup>:

- Dalla Presa Tordino sul canale di gronda 400 Sx: 0.280 m<sup>3</sup>/s;
- A valle dell'abitato di Montorio al Vomano, alimentata dal serbatoio Piaganini e/o dai due canali di gronda 400: 1.350 m<sup>3</sup>/s.

Pertanto, per quanto concerne i volumi direttamente rilasciate dalla diga di Piaganini durante il ciclo di pompaggio, indicati nella **Tabella 4** sopra in verde, è stato ipotizzato un volume medio corrispondente alla portata DMV pari a 1350 l/s su 8 ore, corrispondente a circa 38'000 m<sup>3</sup>.

Pertanto, ai fini dei conteggi idraulici, il volume riservato per utilizzi diversi corrisponderebbe a circa **40'000 m<sup>3</sup> su 8 ore** ovvero sulla presunta durata del pompaggio, che in ogni caso non verrà superata.

Essendo i dati dei rilasci al momento non consolidati, in quanto il DMV è ancora in fase sperimentale e la quantificazione delle necessità del Ruzzo sono variabili, ai fini della presente relazione si considera disponibile l'intero volume originale del serbatoio, pari a 0.95 Mm<sup>3</sup>. Lo spostamento di tale volume sulle 8 ore corrisponde ad una portata di pompaggio pari a circa 33 m<sup>3</sup>/s, valore molto vicino ai 33.47 m<sup>3</sup>/s che derivano dal limite elettrico sulla potenza disponibile per il nuovo gruppo di pompaggio.

I calcoli idraulici saranno pertanto sviluppati con una portata di 33.47 m<sup>3</sup>/s per la nuova pompa (Gr. 8) e l'eventuale contributo dell'esistente Gr.7 per ulteriori 8.29 m<sup>3</sup>/s ed un totale teorico di 41.76 m<sup>3</sup>/s.

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 la nuova pompa.

### 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.

<sup>1</sup> Convenzione con Regione Abruzzo in data 5/8/2014 (Convenzione per l'esecuzione della sperimentazione sui rilasci dalle opere di presa delle derivazioni d'acqua ad uso idroelettrico site nel bacino idrografico del fiume Vomano)

<sup>2</sup> Note del Genio Civile di Teramo prot. 841 del 5/6/1954 e del Ministero dei LL.PP: Servizio Idrografico del 5/4/1957

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 altri termini, ci si aspetta che le perdite di carico descritte e stimate nel presente rapporto siano leggermente superiori rispetto alle perdite reali del sistema in operazione.

In questa fase, non disponendo di tutte le necessarie informazioni utili alla ricostruzione delle perdite di carico, ed in particolare la mancanza di prove di rendimento che comprendessero anche valutazioni eseguite sulla galleria di adduzione lunga ben 14 km circa, queste sono state valutate in base all'esperienza su impianti analoghi.

#### 4.3.2 Perdite tipologiche 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:

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

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:

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

dove:

$\varepsilon$	Scabrezza assoluta, riportata in <b>Tabella 5</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	2.00

**Tabella 5:** 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:

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

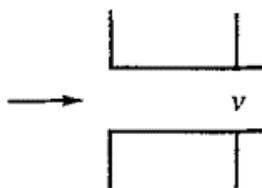
dove:

$\Delta H$	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

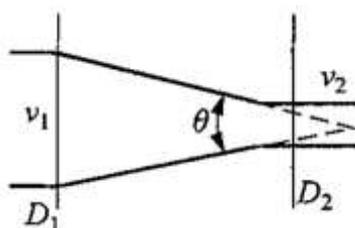
Le perdite localizzate all'imbocco sono calcolate considerando che l'ingresso avvenga con un angolo di 90°, si adotta pertanto un coefficiente di perdita  $K = 0,5$  come suggerito da [1].



**Figura 31:** Perdita localizzata per imbuco a spigolo vivo.

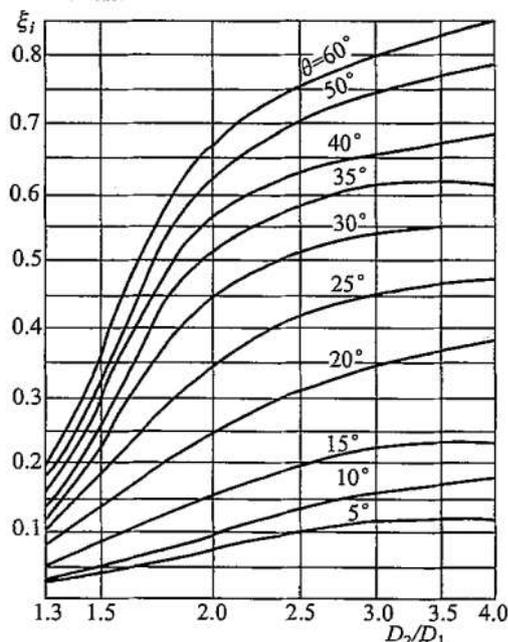
4.3.5 Perdita per restringimento o allargamento di sezione

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:



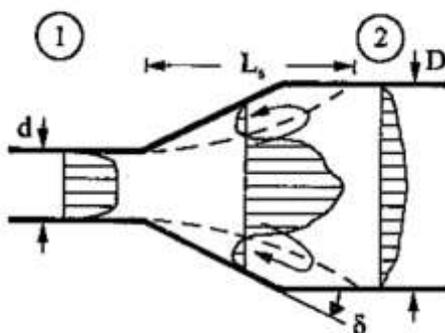
**Figura 32:** Rappresentazione tipica di un restringimento di sezione.

Noti i parametri appena descritti è possibile ricavare il coefficiente di perdita  $K$  attraverso l'abaco di **Figura 33:**



**Figura 33:** 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 34:** 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:

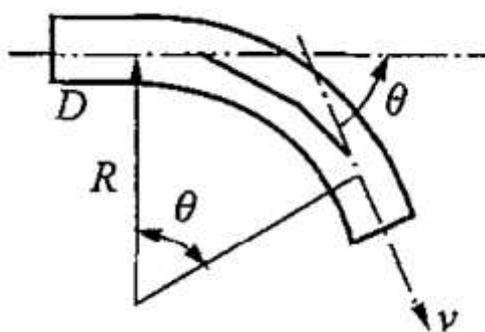
$$K = \left( 0.131 + 0.1632 \cdot \left( \frac{D}{R} \right)^{7/2} \right) \cdot \frac{\theta}{90^\circ}$$

dove:

$\theta$                         angolo di curvatura [°]

$R$                         raggio di curvatura [m]

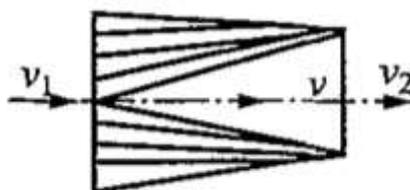
$D$                         diametro della sezione considerata [m]



**Figura 35:** Schematizzazione per il calcolo delle perdite in curva secondo [1].

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

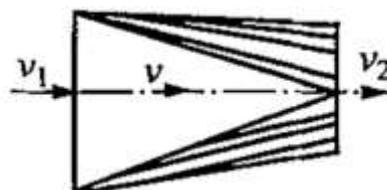
In caso di transizione da sezione circolare a quadrata si assume che la velocità tra i due tratti sia pari alla media delle velocità in ingresso e in uscita. Il coefficiente di perdita è assunto pari a 0.10 [1]:



**Figura 36:** Rappresentazione transizione da sezione circolare a sezione quadrata [1].

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

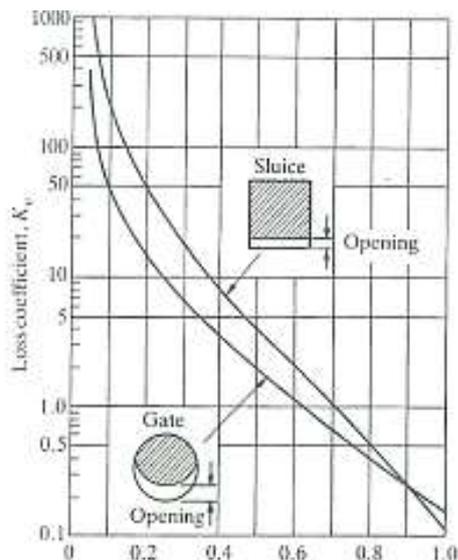
In caso di transizione da sezione quadrata a circolare, analogamente a quanto esposto al paragrafo precedente, si assume che la velocità tra i due tratti sia pari alla media delle velocità in ingresso e in uscita. Il coefficiente di perdita è assunto pari a 0.05 [1]:



**Figura 37:** 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 38:** 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 39**)

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

**Figura 39:** 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 della stessa.

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

$v/D$	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 40:** Coefficiente di perdita valvola a farfalla.

Non essendo disponibili dati precisi sulle valvole a farfalla si assume  $K=0.20$ .

Nel caso invece delle valvole rotative si assume, conservativamente, un coefficiente di perdita  $K=0.10$ .

#### 4.4 Valutazione analitica delle perdite di carico

Le perdite di carico sono calcolate considerando la presenza della nuova pompa 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  $K=DH/Q^2$  prendendo a riferimento la perdita di carico alla portata nominale.

Le tabelle qui di seguito riportate, relative alla soluzione progettuale prescelta, mostrano i valori calcolati per le gallerie di adduzione e per le condotte forzate, sia in fase di turbinaggio (da Provvidenza verso Piaganini) che di pompaggio (da Piaganini verso Provvidenza).

4.4.1 Derivazione Provvidenza

VALUTAZIONE DELLE PERDITE IN TURBINAGGIO						
<b>GALLERIA FORZATA</b>						
<b>PERDITE DISTRIBUITE - tratto in CLS</b>						
Length (m)	13900	Q=	60.15			
diameter (m)	4.5	A=	15.90			
		V=	3.78			
roughness (m)	0.0030	V <sup>2</sup> /2G=	0.729			
eps/d	0.0007					
lambda	0.0178			DH=J*L	DH TOTALI	
J=lam*V <sup>2</sup> /2gD	0.0029			40.13	40.133	
<b>PERDITE CONCENTRATE</b>						
		K	V <sup>2</sup> /2G	DH		
BOCCA DI PRESA		0.5	0.729	0.364683		
CAMERA PARATOIE		0.15	0.729	0.109405		0.474
<b>PERDITE DISTRIBUITE - tratto in ACCIAIO</b>						
Length (m)	100	Q=	60.15			
diameter (m)	4.5	A=	15.90			
		V=	3.78			
roughness (m)	0.0003	V <sup>2</sup> /2G=	0.729			
eps/d	6.66667E-05					
lambda	0.01110152			DH=J*L		
J=lam*V <sup>2</sup> /2gD	0.001798614			0.18	0.180	
<b>PERDITE CONCENTRATE</b>						
diameter (m)	3.6	D2/D1=	1.25			
A=	10.18					
V=	5.91					
		K	V <sup>2</sup> /2G	DH		QUOTA
RIDUZIONE CONICA		0.05	1.781	0.089034		
VALVOLA A FARFALLA		0.15	1.781	0.267102		0.356 569.3
				DH		DH/Q <sup>2</sup>
<b>PERDITE TRA SERBATOIO E POZZO:</b>				40.607		0.01122
<b>PERDITE TRA POZZO E CAMERA VALVOLE</b>				0.536		0.000148146
<b>PERDITE TOTALI TRA SERBATOIO E CAMERA VALVOLE</b>				41.143		0.01137

Tabella 6: Perdite di carico con l'innalzamento del pozzo - Provvidenza – Galleria – Turbinaggio.

VALUTAZIONE DELLE PERDITE IN TURBINAGGIO																	
Q <sub>GR1</sub> = 60.15 m <sup>3</sup> /s																	
Q <sub>GR2</sub> = 9.81																	
scabrezza 0.0003 m																	
<b>CONDOTTA 1.2 (GR7)</b>																	
ESISTENTE	TRATTO	L	DI	A	V	V <sup>2</sup> /2G	eps/D	lam	J	Dhdist	tipo	Kconc	Dhconc	Dhtot (m)	DH cumul (m)	L PROGR	QUOTA
	1	0	3.6	10.18	5.910	1.781	0.0001	0.0116	0.0057	0.000	PARATOIE	0.1	0.178	0.178	0.178	0	977.22
	1	0	3.6	10.18	5.910	1.781	0.0001	0.0116	0.0057	0.000	C90	0.1	0.178	0.178	0.356	0	977.22
curve	1	24	3.6	10.18	5.910	1.781	0.0001	0.0116	0.0057	0.137			0.000	0.137	0.493	24	961.674
	2	570	3.6	10.18	5.910	1.781	0.0001	0.0116	0.0057	3.261			0.000	3.261	3.754	594	403.25
bifor	3	0	1.4	1.54	6.373	2.071	0.0002	0.0139	0.0206	0.000	BIFORC	0.3	0.621	0.621	4.375	594	403.25
	3	0	1.4	1.54	6.373	2.071	0.0002	0.0139	0.0206	0.000	C90	0.1	0.207	0.207	4.582	594	403.25
	3	75	1.4	1.54	6.373	2.071	0.0002	0.0139	0.0206	1.543			0.000	1.543	6.126	669	359.7
	3	0	1.4	1.54	6.373	2.071	0.0002	0.0139	0.0206	0.000	C90	0.1	0.207	0.207	6.333	669	359.7
	4	0	1.1	0.95	10.323	5.434	0.0003	0.0146	0.0722	0.000	CONV	0.005	0.027	0.027	6.360	669	359.7
	5	0	1.1	0.95	10.323	5.434	0.0003	0.0146	0.0722	0.000	2xVALV ROT	0.3	1.630	1.630	7.990	669	359.7
		594															
		75															
DH/Q <sup>2</sup>																	
0.00221																	

Tabella 7: Perdite di carico con l'innalzamento del pozzo - Provvidenza - Condotta Forzata – Turbinaggio.

VALUTAZIONE DELLE PERDITE IN POMPAGGIO						
<b>GALLERIA FORZATA</b>						
<b>PERDITE DISTRIBUITE - tratto in CLS</b>						
Length (m)	13900	Q=	41.76			
diameter (m)	4.5	A=	15.90			
		V=	2.63			
roughness (m)	0.0030	V <sup>2</sup> /2G=	0.352			
eps/d	0.00066667					
lambda	0.017820853			DH=J*L	DH TOTALI	
J=lam*V <sup>2</sup> /2gD	0.001391662			19.34	19.344	
<b>PERDITE CONCENTRATE</b>						
		K	V <sup>2</sup> /2G	DH		
BOCCA DI PRESA		1	0.352	0.351556		
CAMERA PARATOIE		0.15	0.352	0.052733		0.404
<b>PERDITE DISTRIBUITE - tratto in ACCIAIO</b>						
Length (m)	100	Q=	41.76			
diameter (m)	4.5	A=	15.90			
		V=	2.63			
roughness (m)	0.0003	V <sup>2</sup> /2G=	0.352			
eps/d	6.66667E-05					
lambda	0.01110152			DH=J*L		
J=lam*V <sup>2</sup> /2gD	0.000866937			0.09	0.087	
<b>PERDITE CONCENTRATE</b>						
diameter (m)	3.6	D2/D1=	alfa			
A=	10.18	1.25	10			
V=	4.10					
		K	V <sup>2</sup> /2G	DH		QUOTA
ESPANSIONE CONICA		0.044045	0.858	0.037803		
VALVOLA A FARFALLA		0.15	0.858	0.128744		0.167
				DH		DH/Q <sup>2</sup>
<b>PERDITE TRA SERBATOIO E POZZO:</b>				19.748		0.00546
<b>PERDITE TRA POZZO E CAMERA VALVOLE</b>				0.253		6.9994E-05
<b>PERDITE TOTALI TRA SERBATOIO E CAMERA VALVOLE</b>				20.002		0.01147

**Tabella 8:** Perdite di carico con l'innalzamento del pozzo - Provvidenza - Galleria – Pompaggio.

VALUTAZIONE DELLE PERDITE IN POMPAGGIO										Q <sub>tot</sub>	41.76	Espansione						
										Q <sub>GR8</sub> =	33.47	m <sup>3</sup> /s						
										scabrezza	0.0003	m	Alpha	20				
<b>CONDOTTA 1.3 (GR8)</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)	L PROGR	QUOTA	
	1	0	3.6	10.18	4.103	0.858	0.0001	0.0116	0.0028	0.000	PARATCIE	0.1	0.086	0.086	0.086	0	977.22	
	1	0	3.6	10.18	4.103	0.858	0.0001	0.0116	0.0028	0.000	C90	0.1	0.086	0.086	0.172	0	977.22	
curve	1	24	3.6	10.18	4.103	0.858	0.0001	0.0116	0.0028	0.066			0.000	0.066	0.238	24	961.674	
	2	560	3.6	10.18	4.103	0.858	0.0001	0.0116	0.0028	1.544			0.000	1.544	1.782	584	403.25	
bifor	3	0	3	7.07	4.735	1.143	0.0001	0.0120	0.0046	0.000	BIFORC	0.3	0.343	0.343	2.125	584	403.25	
	3	0	3	7.07	4.735	1.143	0.0001	0.0120	0.0046	0.000	C90	0.1	0.114	0.114	2.239	584	403.25	
	3	140	3	7.07	4.735	1.143	0.0001	0.0120	0.0046	0.639			0.000	0.639	2.878	724	325	
	3	0	3	7.07	4.735	1.143	0.0001	0.0120	0.0046	0.000	C90	0.1	0.114	0.114	2.992	724	325	
	4	0	2.8	6.16	5.436	1.507	0.0001	0.0121	0.0065	0.000	DIV	0.01	0.021	0.021	3.013	724	325	
	5	0	2.8	6.16	5.436	1.507	0.0001	0.0121	0.0065	0.000	2xVALV ROT	0.3	0.452	0.452	3.465	724	325	
														DH/Q <sup>2</sup>	0.00309			

**Tabella 9:** Perdite di carico con l'innalzamento del pozzo - Provvidenza - Condotta Forzata – Pompaggio.

4.4.2 Derivazione Piaganini

DERIVAZIONE PIAGANINI GR7						
<b>VALUTAZIONE DELLE PERDITE IN TURBINAGGIO</b>						
<b>GALLERIA FORZATA</b>						
<b>PERDITE DISTRIBUITE - tratto in CLS</b>						
(galleria esistente)	Length (m)	2700	Q=	9.81		
	diameter (m)	2.6	A=	5.31		
			V=	1.85		
	roughness (m)	0.0030	V <sup>2</sup> /2G=	0.174		
	eps/d	0.001153846				
	lambda	0.020324155			DH=J*L	DH TOTALI
	J=lam*V <sup>2</sup> /2gD	0.001360287			3.67	3.673
<b>PERDITE CONCENTRATE</b>						
			K	V <sup>2</sup> /2G	DH	
	BOCCA DI PRESA		1	0.174	0.174088	
	CAMERA PARATOIE		0.15	0.174	0.026113	
	RIDUZIONE CONICA		0.1	0.174	0.017409	0.218
<b>CONDOTTA FORZATA</b>						
<b>PERDITE DISTRIBUITE - tratto in ACCIAIO</b>						
	Length (m)	105	Q=	9.81		
	diameter (m)	1.4	A=	1.54		
			V=	6.37		
	roughness (m)	0.0003	V <sup>2</sup> /2G=	2.071		
	eps/d	0.000214286				
	lambda	0.013916822			DH=J*L	DH TOTALI
	J=lam*V <sup>2</sup> /2gD	0.020577129			2.16	2.161
<b>PERDITE CONCENTRATE</b>						
			K	V <sup>2</sup> /2G	DH	
	DERIVAZIONE POZZO PIEZO		0.05	0.174	0.008704	0.009
	diameter (m)	1.4	D2/D1=	1.00		
	A=	1.54	1.00	10		
	V=	6.37				
			K	V <sup>2</sup> /2G	DH	
	C90		0.1	2.071	0.207086	
	EXPANSIONE CONICA		0.17	2.071	0.354836	
	2X VALVOLE ROT		0.3	2.071	0.621257	1.183 QUOTA
					DH	DH/Q <sup>2</sup>
	<b>PERDITE GALLERIA</b>				<b>3.890</b>	<b>0.04043</b>
	<b>PERDITE CONDOTTA</b>				<b>3.352</b>	<b>0.034836001</b>
	<b>PERDITE TOTALI</b>				<b>7.243</b>	<b>0.07526</b>

Tabella 10: Perdite di carico – Piaganini – Galleria e Condotta – Solo Gr.7 in Turbinaggio.



	ESISTENTE DERIVAZIONE PIAGANINI PER GR. 7			NUOVA DERIVAZIONE PIAGANINI PER GR. 8		
	Galleria	Condotta forzata	Galleria	Galleria	Condotta forzata	Totale
DH/Q <sup>2</sup> (m/(m <sup>3</sup> /s) <sup>2</sup> )	0.0404	0.0348	0.0753	0.0025	0.0003	0.0028

**Tabella 13:** Nuova pompa – Perdite di carico della derivazione Piaganini.

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 della nuova pompa rispetto a quelle originarie.

##### 4.5.1 Condizioni stazionarie

Il PP Provvidenza ha quota di coronamento ad elev.1075.50 m slm. Considerando il serbatoio alla quota di massima regolazione (1060.00 m slm), la massima portata pompabile per l’alternativa 1 risulterebbe pari a  $Q_1 = [(1075.5-1060.0)/0.0115]^{0.5} = 36.7 \text{ m}^3/\text{s}$  e per l’alternativa 2 pari a  $Q_2 = [(1075.5 -1060.0)/0.0104]^{0.5} = 38.6 \text{ m}^3/\text{s}$ , valori che non si ritengono limitante rispetto agli obiettivi progettuali.

Il PP Piaganini ha invece quota di massima ad elev.410.10 m slm. Considerando il serbatoio alla quota di massima regolazione (397.00 m slm), la massima portata in modo turbinaggio risulterebbe pari a  $Q = [(410.1 -397.0)/0.0025]^{0.5} = 72.39 \text{ m}^3/\text{s}$ , valore superiore al limite sulla derivazione Provvidenza.

##### 4.5.2 Condizioni transitorie

###### 4.5.2.1 Pozzo piezometrico di monte

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.

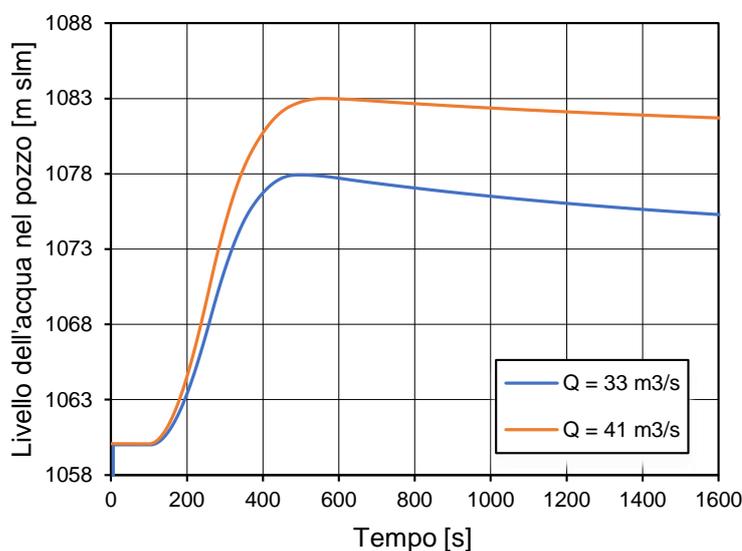
In particolare, si valutano le seguenti manovre:

- PP Provvidenza: avviamento pompaggio (160 s)
- PP Provvidenza: brusca interruzione pompaggio (20 s)

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.

- PP Piaganini: avviamento turbinaggio (70 s)
- PP Piaganini: brusca interruzione turbinaggio (20 s)

Per quanto riguarda il pozzo piezometrico Provvidenza, si è considerata la configurazione esistente e si sono effettuate simulazioni in avviamento di pompaggio e brusco arresto, con valori di portata per la pompa variabili tra 25 e 33.47 m<sup>3</sup>/s. La portata del Gruppo 7 è costante a 8.29 m<sup>3</sup>/s (portata massima pompabile). **Come si evince dalla Figura 41, il pozzo non ha una altezza sufficiente per contenere i transitori delle portate di progetto e mantenere un franco sufficiente.**



**Figura 41:** Transitori dell'avviamento della nuova pompa con la configurazione geometrica dello stato di fatto.

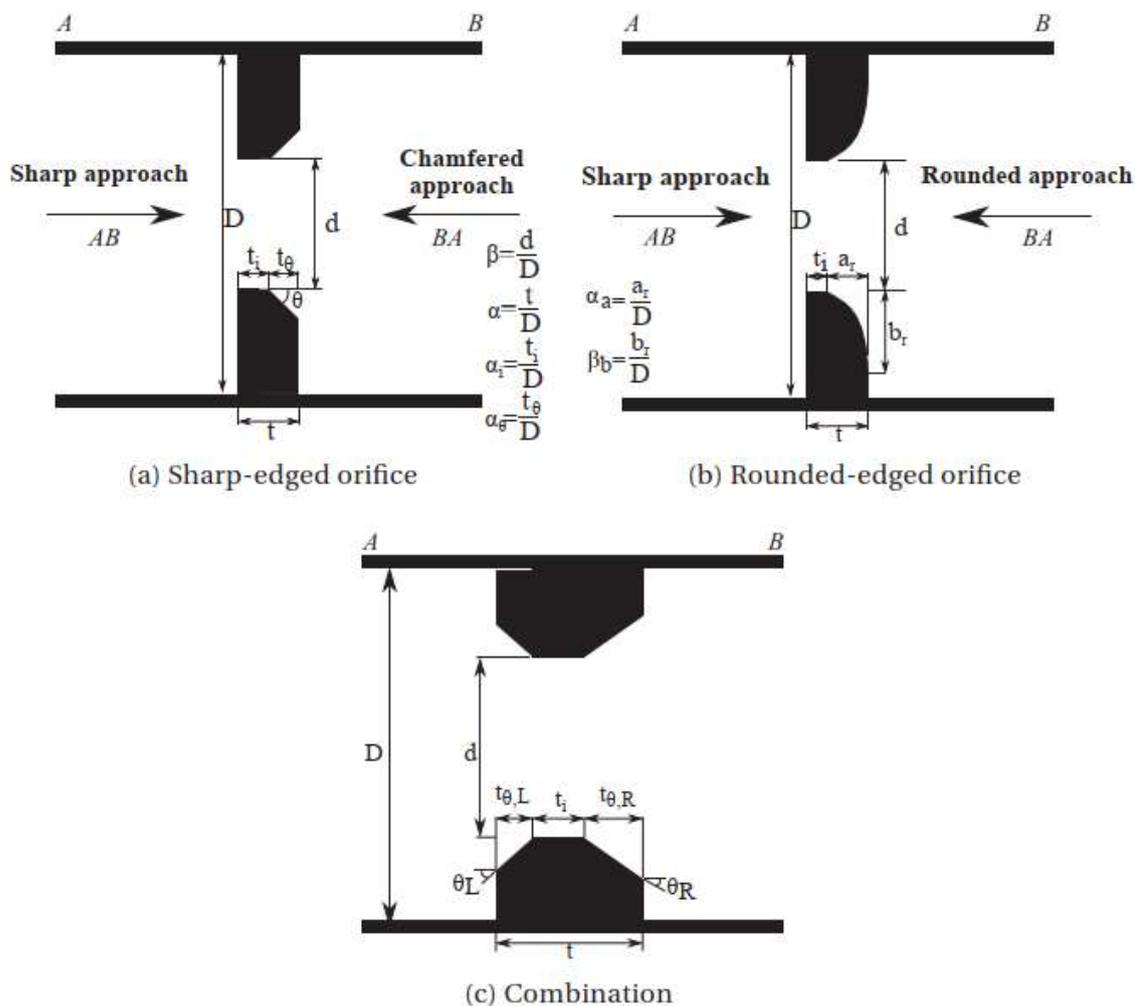
Mantenendo l'impronta cilindrica del PP esistente, occorrerebbe innalzare fuori terra il coronamento di alcuni metri (circa 8 rispetto al p.c. medio), con l'inserimento di un elemento di evidenza ambientale.

La soluzione progettuale prescelta (cfr. **Figura 29**) prevede il riutilizzo nella sua parte inferiore e mediana del pozzo piezometrico esistente, che è dotato di una flangia tarata di strozzatura avente DI 1.85 m.

Per quantificare le perdite nella strozzatura "asimmetrica" del pozzo si fa riferimento in particolare al procedimento riportato in [6]. Nello specifico, la strozzatura viene caratterizzata da due fattori principali:

- $\alpha = t/D = 1.37/6.0 = 0.228$ ;
- $\beta = d/D = 1.85/6.0 = 0.308$ .

Questi fattori sono schematizzati in **Figura 42**.



**Figura 42:** Determinazione dei fattori di spessore e di contrazione  $\alpha$  e  $\beta$  per diverse forme di strozzature [6]

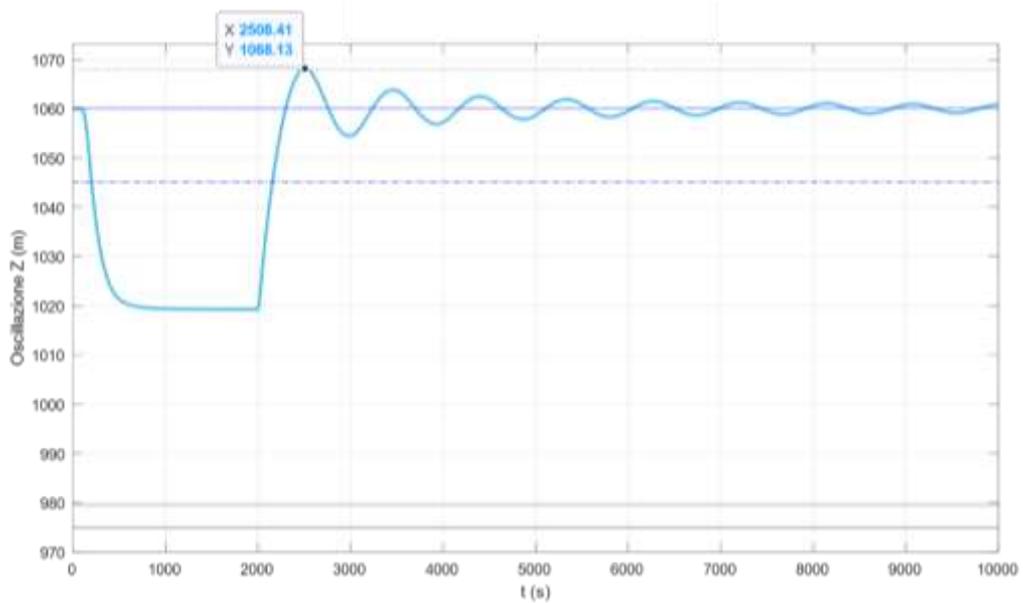
Con questi parametri si ottengono i valori della perdita espressa in termini di  $DH/Q^2$ :

- per l'ingresso nel pozzo (spigolo vivo) 0.0109;
- per l'uscita dal pozzo (spigolo arrotondato) 0.0035.

Le perdite del tratto di collegamento tra galleria e pozzo possono ritenersi trascurabili. L'entità di stacco, curva e allargamento genera delle perdite concentrate quantificabili in  $DH/Q^2 = 0.0001$ , e che risulta trascurabile rispetto alla perdita della strozzatura stessa. Inoltre, si trascurano a favore di sicurezza in prima battuta le perdite dinamiche attraverso la strozzatura, dovute alle accelerazioni nel pozzo, perdite che smorzerebbero ancora maggiormente le oscillazioni.

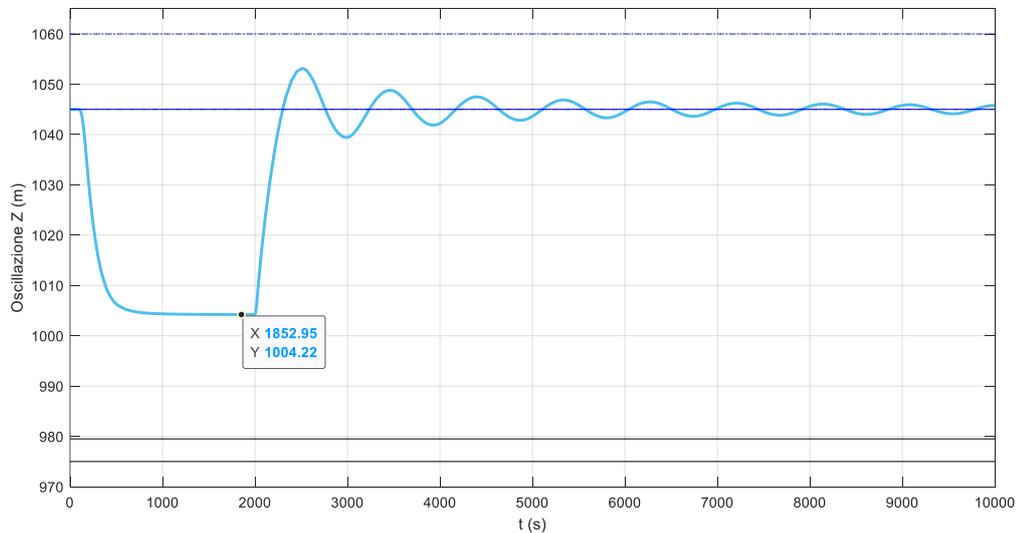
Vengono nel seguito presentate le verifiche con le portate esistenti e con l'assetto geometrico attuale. Nei calcoli la massima portata turbinata è stata cautelativamente assunta pari a circa  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  mentre quella pompata a circa  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Avviamento generazione (70 s) fino a regime e successivo brusco arresto (20 s), alla massima regolazione



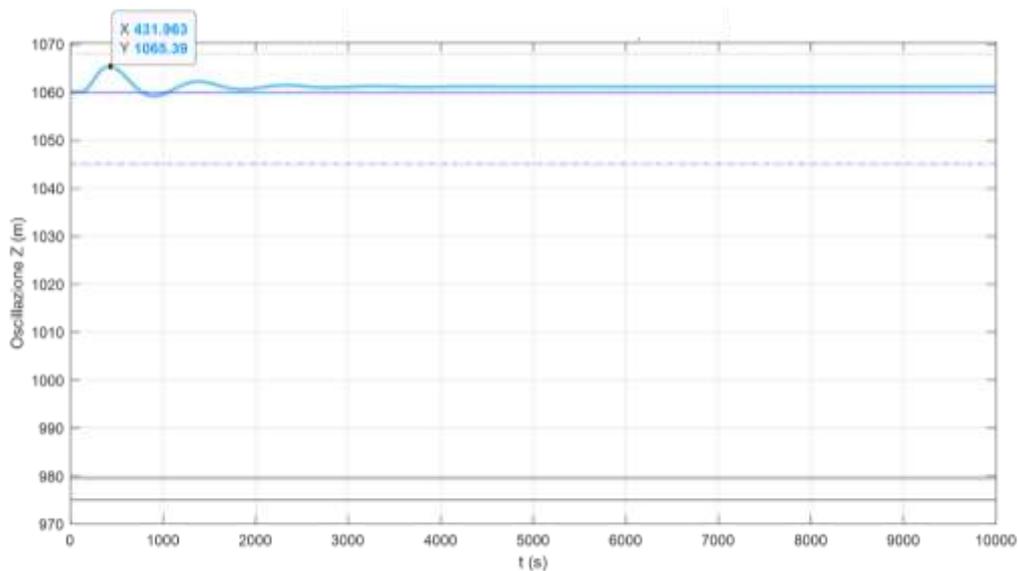
**Figura 43:** Pozzo piezometrico esistente: manovra avviamento e brusco arresto turbinaggio con serbatoio alla quota di massima regolazione.

Avviamento generazione (70 s) fino a regime alla minima regolazione



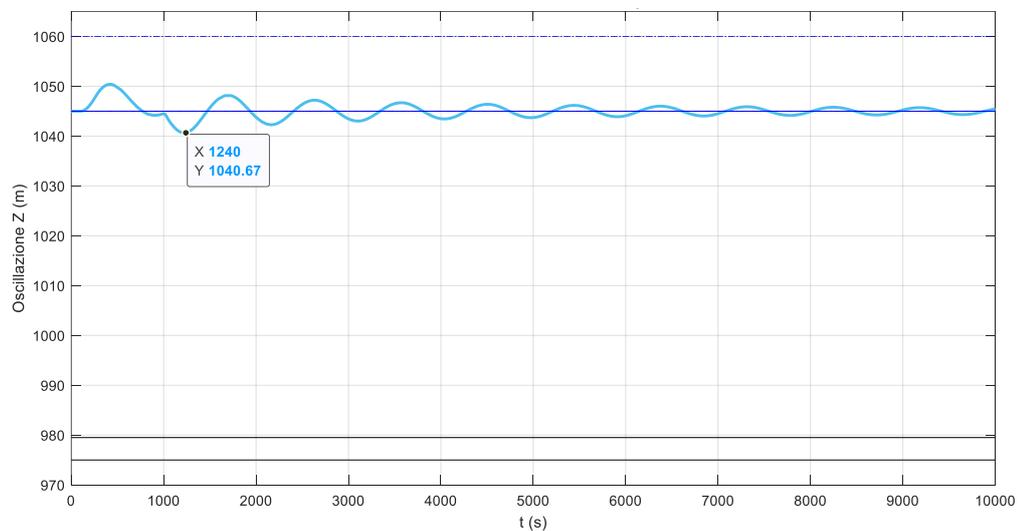
**Figura 44:** Pozzo piezometrico esistente: manovra avviamento turbinaggio fino a regime con serbatoio alla quota di minima regolazione.

Avviamento pompaggio (160 s) fino a regime, alla massima regolazione



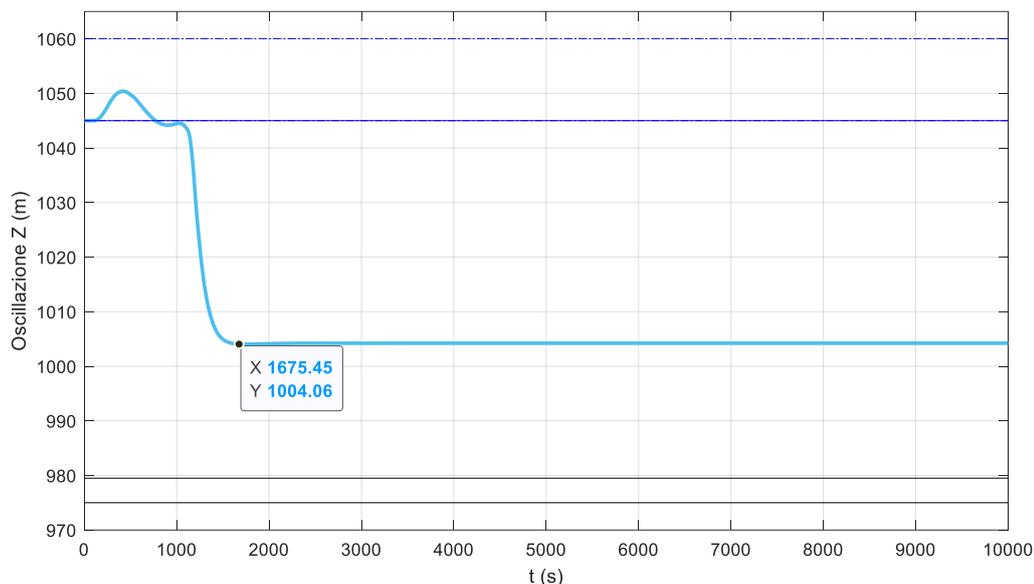
**Figura 45:** Pozzo piezometrico esistente: manovra avviamento pompaggio fino a regime con serbatoio alla quota di massima regolazione.

Avviamento pompaggio (160 s) fino a regime e successivo brusco arresto (20 s), alla minima regolazione



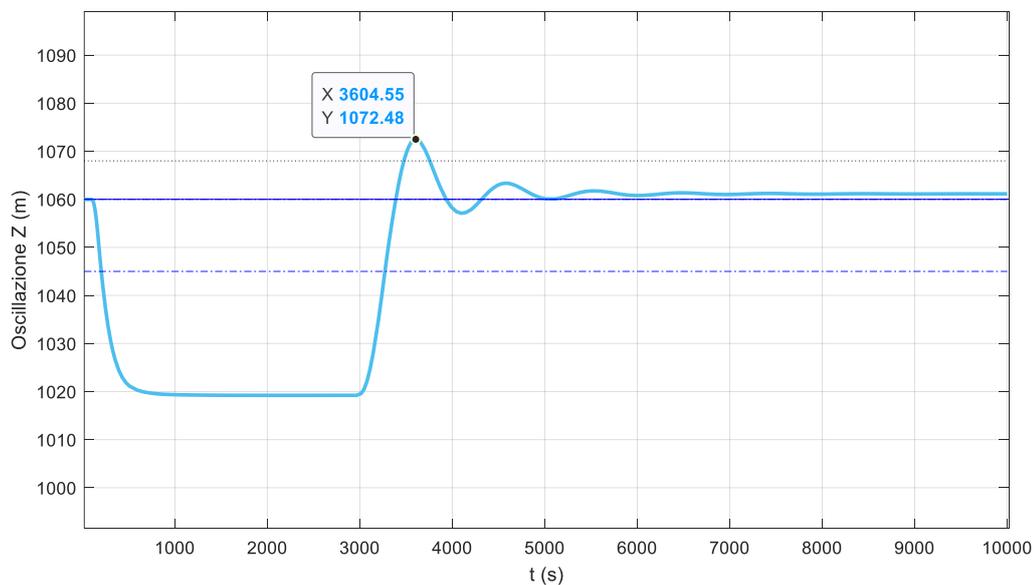
**Figura 46:** Pozzo piezometrico esistente: manovra avviamento pompaggio e brusco arresto con serbatoio alla quota di minima regolazione.

Commutazione pompaggio → generazione (190 s), alla minima regolazione



**Figura 47:** Pozzo piezometrico esistente: commutazione pompaggio – generazione con serbatoio alla minima regolazione.

Commutazione generazione → pompaggio (420 s), alla massima regolazione



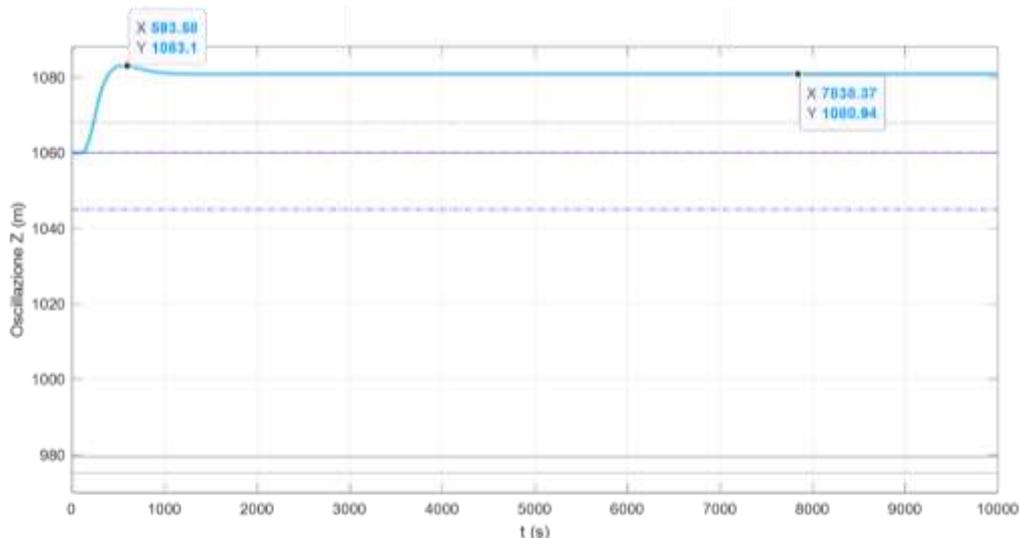
**Figura 48:** Pozzo piezometrico esistente: commutazione generazione – pompaggio con serbatoio alla massima regolazione.

Come si può notare, è questa la situazione maggiormente critica per la verifica del franco rispetto alla sommità interna del pozzo, posta ad el. 1075.50, ovvero a quella esterna, posta ad el. 1078.75.

Nella configurazione attuale, è possibile convogliare circa 10 m<sup>3</sup>/s **con un franco di circa 3 metri** rispetto all'interno del pozzo.

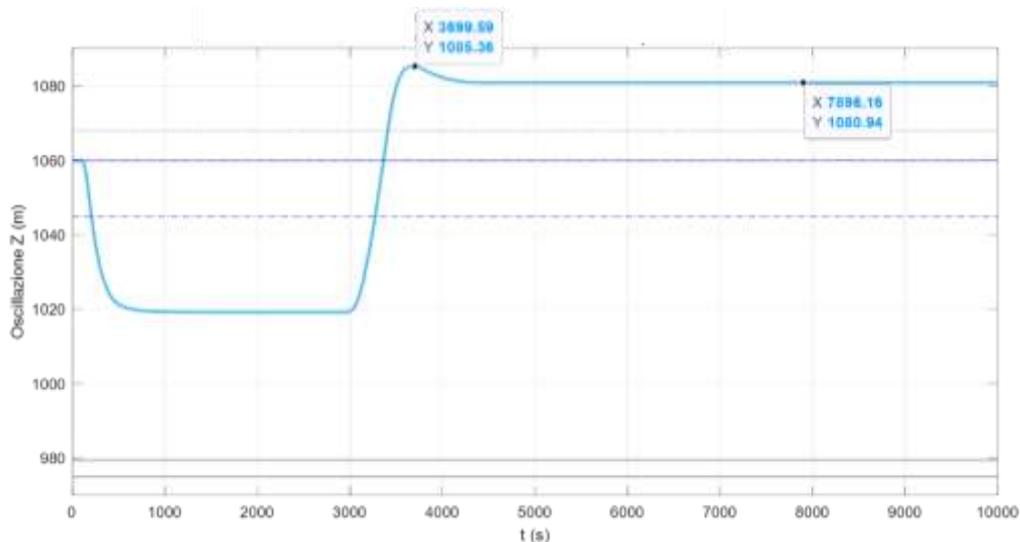
Vengono qui di seguito riportate le verifiche più significative con la massima nuova portata in pompaggio (ipotizzata fino a 43 m<sup>3</sup>/s) e con l'assetto geometrico attuale.

Avviamento pompaggio (160 s) fino a regime, alla massima regolazione



**Figura 49:** Pozzo piezometrico esistente: avviamento pompaggio fino a regime con serbatoio alla quota di massima regolazione e con nuova portata di pompaggio.

Commutazione generazione → pompaggio (420 s), alla massima regolazione



**Figura 50:** Pozzo piezometrico esistente: commutazione generazione – pompaggio con serbatoio alla quota di massima regolazione e con nuova portata di pompaggio.

Come si può notare:

- la piezometrica a regime è superiore all'attuale estradosso del pozzo (1080.9 vs. 1078.75);
- nella condizione di commutazione, il massimo livello è pari a 1085.36, con un franco negativo rispetto all'interno attuale, di circa 9.86 m.

L'obiettivo della soluzione proposta è quello di mantenere i livelli circa pari a quelli attuali, mantenendo un franco di almeno 3 metri rispetto alla nuova quota di estradosso posizionata ad elev.1082.00 m slm, ed un massimo livello operativo nel pozzo pari a 1079.00 m slm.

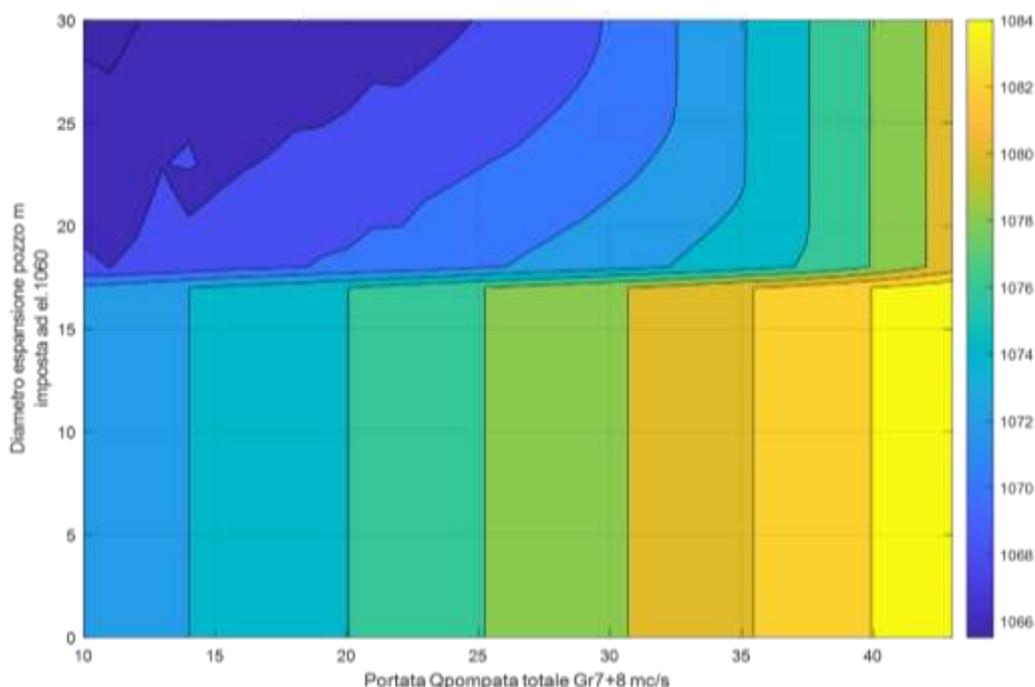
Con una portata complessiva di 41.0 m<sup>3</sup>/s, circa pari a quella massima di progetto, la piezometrica a regime in corrispondenza del PP si posiziona alla quota 1079.00 m slm.

Resta imprescindibile un'indagine per valutare l'effetto della scabrezza e delle perdite concentrate attuali, vista la lunghezza dell'adduzione (14 km).

Ciò premesso, si può valutare l'ampliamento del PP esistente che consente di assorbire la peggiore manovra.

Come prima ipotesi si considera semplicemente di allargare il diametro del pozzo e vedere che livelli si ottengono per il massimo sopralzo.

Viene effettuata un'analisi di sensitività utilizzando come parametri la portata pompata ed il diametro del pozzo aggiuntivo.

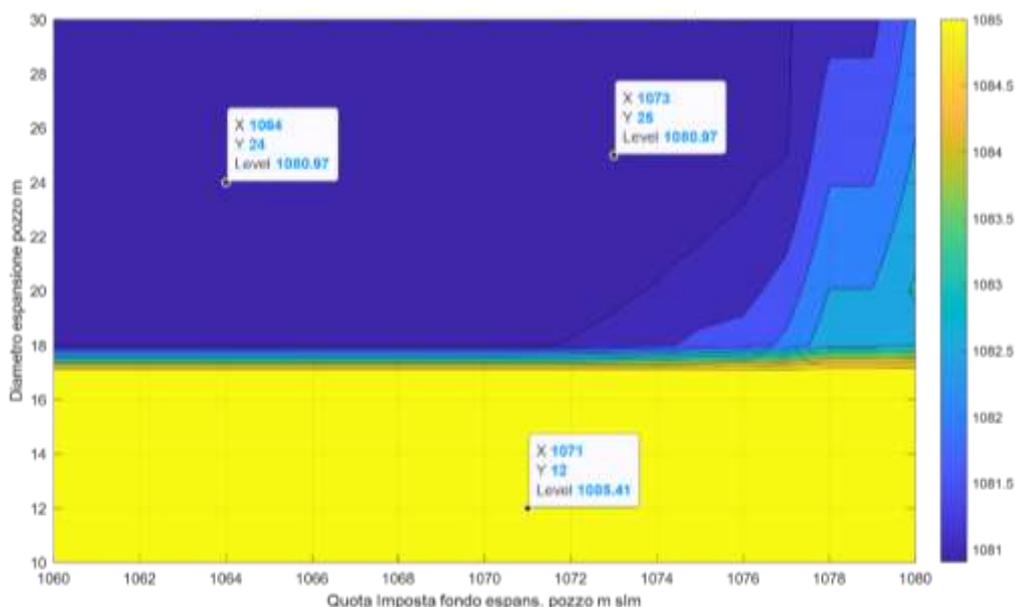


**Figura 51:** Pozzo piezometrico San Giacomo monte – max sopralzo f(Q,D)

Quello che si nota è che un pozzo aggiuntivo con diametro superiore a circa 17 m (quindi utilizzando una superficie complessiva circa doppia rispetto a quella attuale) consente di ridurre marcatamente i livelli di massimo sopralzo, a prescindere dalla portata pompata.

Per ottenere la quota a partire dalla quale è ottimale eseguire il raddoppio, e dato che le manovre interessate dalle modifiche sono quelle di pompaggio, ha senso allargare il pozzo a partire da quote superiori a quella di minima regolazione.

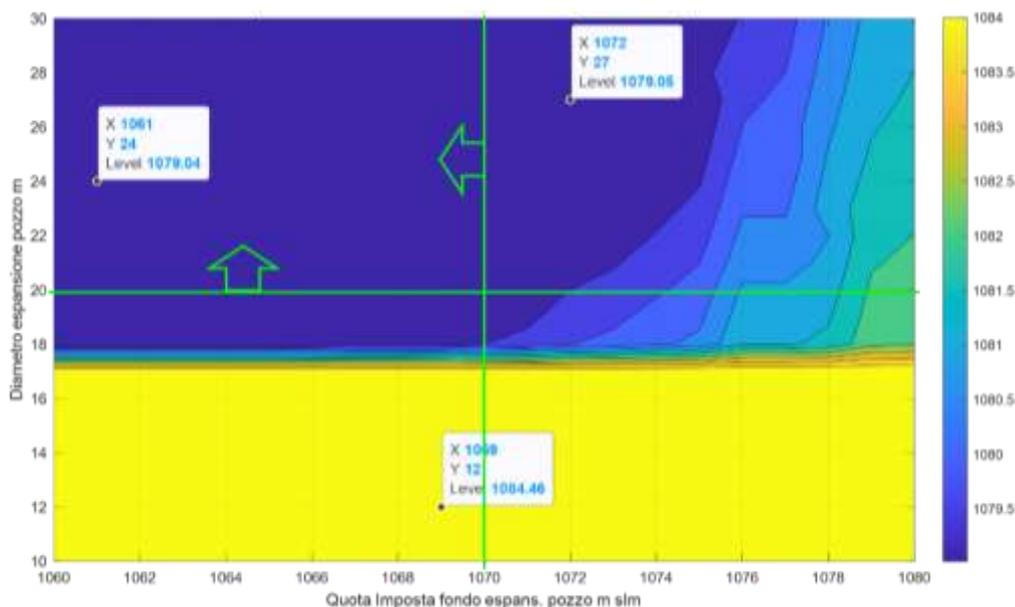
Viene effettuata un'analisi di sensitività utilizzando come parametri la quota ed il diametro, alla massima portata pompabile (43 m<sup>3</sup>/s con entrambi i gruppi).



**Figura 52:** Pozzo piezometrico San Giacomo monte – max soprizzo  $f(D, Z_{imposta})$ . Portata fissa  $Q_{pomp} = 43.00$  m<sup>3</sup>/s.

Si nota che solo sopra un certo diametro del pozzo aggiuntivo si ha un effetto smorzante, e si nota che solo al di sotto di una certa quota d'imposta i livelli durante il transitorio non superano mai quello a regime di moto permanente.

Lo stesso ragionamento viene ora eseguito tenendo conto che il livello a regime si posizioni attorno a quota 1079.00, quindi con una massima portata pompata pari a circa 41 m<sup>3</sup>/s.



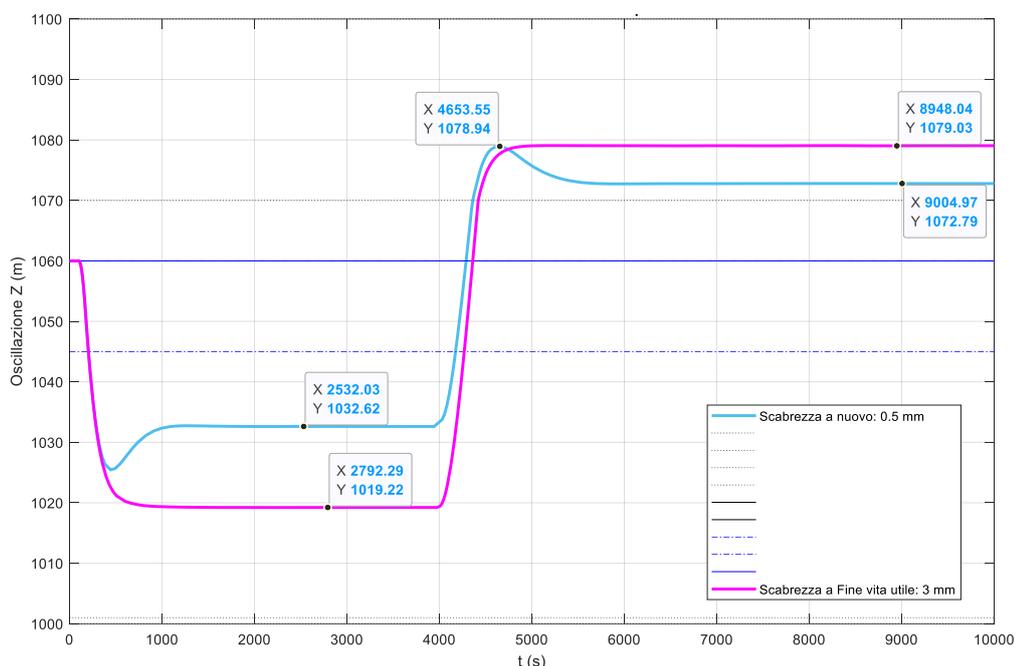
**Figura 53:** Pozzo piezometrico San Giacomo monte – max soprizzo  $f(D, Z_{imposta})$ . Portata fissa  $Q_{tot} = 41.00$  m<sup>3</sup>/s

Anche qui il risultato è chiaro. Si può chiaramente distinguere una zona data da due limitazioni ben precise, entro la quale è conveniente posizionarsi:

- il diametro del pozzo aggiuntivo non dovrà essere inferiore a 18.0 m. Si assume un diametro di 20.0 m;
- la quota d'imposta del pozzo non dovrà essere superiore ad elev. 1070.0 m slm.

Questa scelta consentirebbe eventualmente di gestire nello stesso modo anche le portate fino a 43 m<sup>3</sup>/s, con franco ridotto.

Riverificando il transitorio più impattante considerando scabrezze a nuovo (0.5 mm) ed a fine vita (3 mm), si ottiene:



**Figura 54:** Pozzo piezometrico modificato: manovra di avviamento generazione (60 m<sup>3</sup>/s) e commutazione da generazione a pompaggio (41 m<sup>3</sup>/s).

Costruttivamente, i due pozzi dovranno essere collegati da una condotta avente sezione pari almeno a 6.0 m, ben raccordata e con pendenza tale da assicurare il completo svuotamento del nuovo pozzo.

Considerate le nuove condizioni operative, la lunghezza della galleria di adduzione e le indeterminatezze sulla reale operatività dell'attuale sistema idraulico, per quanto allo stato non risultino riportati malfunzionamenti dell'esistente pozzo piezometrico, la scelta progettuale dovrà essere supportata con la previa esecuzione di:

- prove sull'adduzione finalizzate alla valutazione dell'attuale scabrezza;
- prove su modello per validare l'efficacia della soluzione progettuale.

Per le considerazioni sopra riportate l'alternativa 3 risulta essere quella ottimale sia in termini idraulici che costruttivi, e verrà utilizzata nel seguito per le valutazioni strutturali.

#### 4.5.2.2 Pozzo piezometrico di valle

Per una valutazione preliminare, si riportano nel seguente elenco i principali dati di riferimento per il nuovo pozzo della derivazione Piaganini:

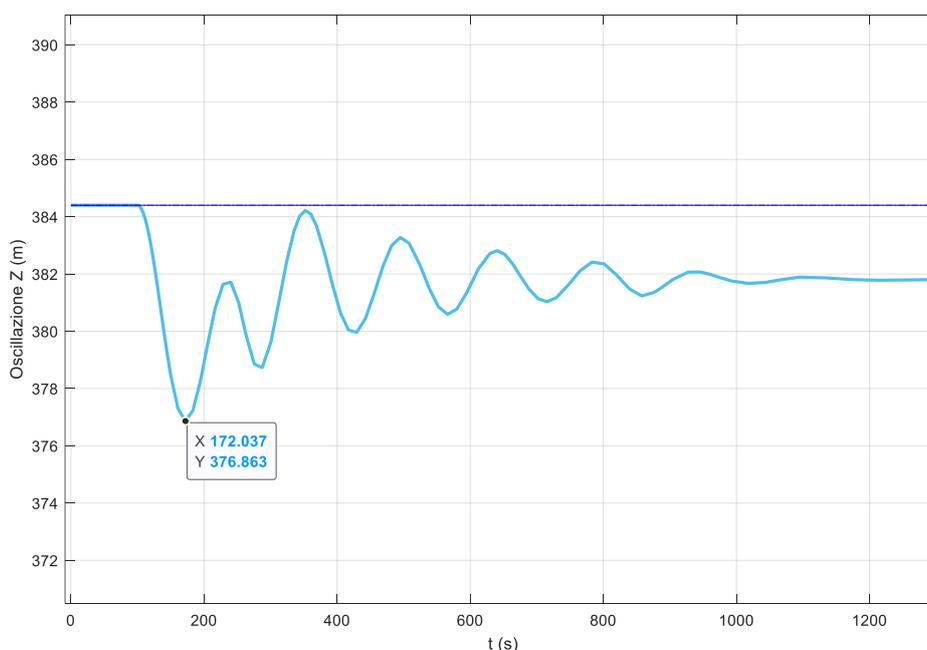
Livelli serbatoio:	max. reg	397 m slm
	min. reg	384.4 m slm
Portata:	33 m <sup>3</sup> /s	
Manovre:	Avviamento	160 s
	Brusco arresto	20 s

Dimensioni geometriche:

Asse galleria all'intersezione:	329.00 m slm
Canna principale:	D=6.0 m
Quota base pozzo:	340.00 m slm
Camera di espansione superiore:	
Quota base camera:	395.00 m slm
Superficie:	490 m <sup>2</sup>
Galleria:	H= 10 m + altezza volta
	B=8 → L=60 m
	B=10 → L=45 m

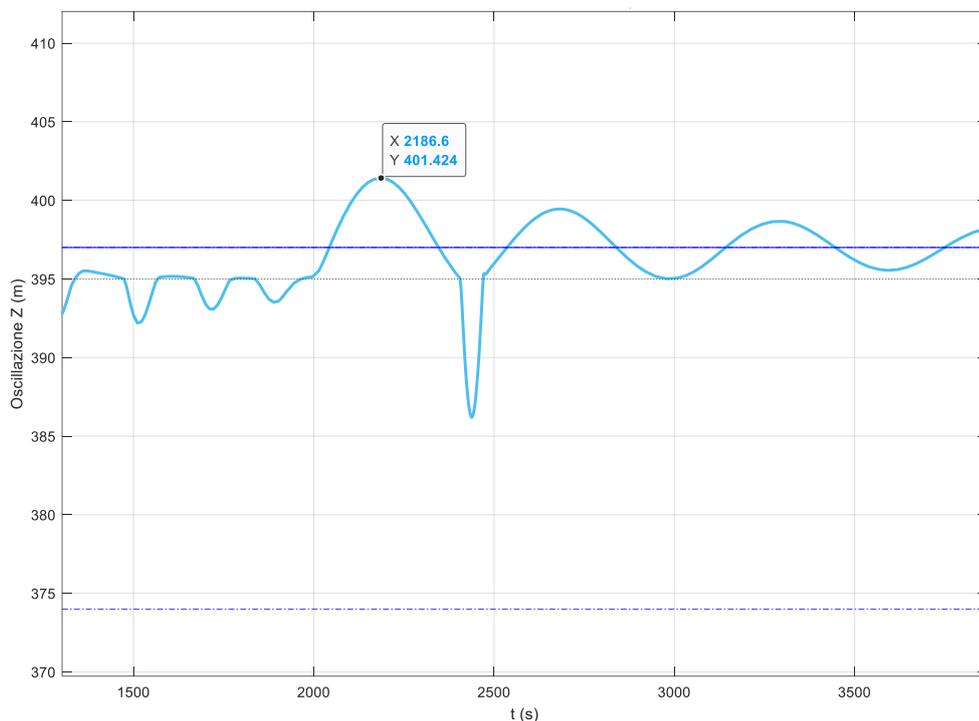
Vengono nel seguito presentate le principali verifiche con diversi valori di scabrezza: a fine vita rispettivamente a nuovo

#### Scabrezza a fine vita – Avviamento pompaggio



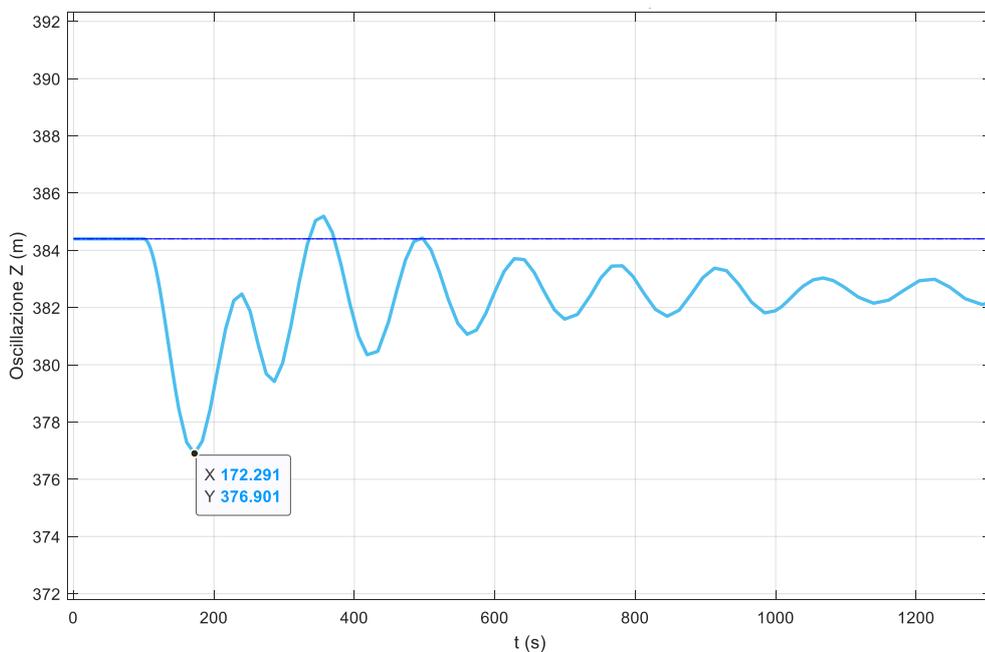
**Figura 55:** Nuovo pozzo piezometrico di valle: manovra di avviamento pompaggio fino a regime con serbatoio di Piaganini alla quota di minima regolazione.

Scabrezza a fine vita – Brusco arresto pompaggio



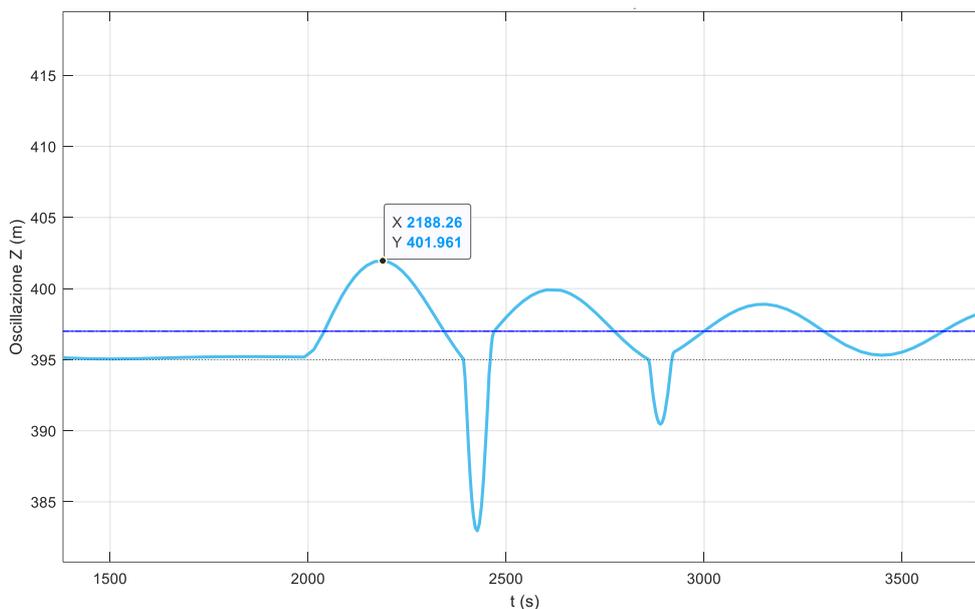
**Figura 56:** Nuovo pozzo piezometrico di valle: manovra di brusco arresto pompaggio con serbatoio di Piaganini alla quota di massima regolazione.

Scabrezza a nuovo – Avviamento pompaggio



**Figura 57:** Nuovo pozzo piezometrico di valle: manovra di avviamento pompaggio fino a regime con serbatoio di Piaganini alla quota di minima regolazione.

Scabrezza a nuovo – Brusco arresto pompaggio



**Figura 58:** Nuovo pozzo piezometrico di valle: manovra di brusco arresto pompaggio con serbatoio di Piaganini alla quota di massima regolazione.

**4.6 Perdite idrauliche**

Considerati tutti i limiti tecnici espressi dalle precedenti valutazioni, le massime portate di progetto relative al funzionamento combinato degli impianti di S. Giacomo II e di S. Giacomo III sono::

- **Turbinaggio da Provvidenza verso Piaganini:** 60.15 m<sup>3</sup>/s
- **Pompaggio da Piaganini verso Provvidenza:** 41.76 m<sup>3</sup>/s

In funzione delle valutazioni degli specialisti elettromeccanici, nelle fasi progettuali successive verranno utilizzati i dati ottimali.

Il progetto prevede la possibilità di:

- Utilizzare la nuova pompa da sola (circa 33 m<sup>3</sup>/s) o in combinazione al Gruppo 7 esistente (circa 42 m<sup>3</sup>/s).

In fase di generazione non ci sono modifiche all'assetto attualmente installato.

*4.6.1 Valutazione delle perdite di carico in fase di turbinaggio*

In fase di turbinaggio dei gruppi esistenti, e pertanto considerando il massimo salto lordo di circa 1060.0-403.25=656.75 m, si ottiene un salto netto pari a:

$$H_{\text{netto}} = H_{\text{lordo}} - K \cdot Q^2_{\text{turbinata}} = 656.75 - 0.0136 \cdot 60.15^2 = 656.75 - 49.2 = 607.6 \text{ m};$$

viceversa, con il minimo salto lordo pari a 648.0 m circa, si ottiene:

$$H_{\text{netto}} = H_{\text{lordo}} - K \cdot Q^2_{\text{turbinata}} = 641.75 - 0.0136 \cdot 60.15^2 = 641.75 - 49.2 = 592.5 \text{ m};$$

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

In fase di pompaggio il nuovo Gruppo 8 può funzionare sia da solo che contemporaneamente al Gr.7.

$$H_{\text{netto}} = H_{\text{lordo}} + K_{\text{Providenza}} * Q_{t, \text{Providenza}}^2 + K_{\text{Piaganini}} * Q_{t, \text{Piaganini}}^2 =$$

$$= 675.60 + 0.0146 * 41.76^2 + 0.0028 * 33.47^2 = 675.60 + 25.4 + 3.1 = 704.1 \text{ m};$$

viceversa, con il minimo salto lordo pari a 648 m circa, si ottiene:

$$H_{\text{netto}} = H_{\text{lordo}} + K_{\text{Providenza}} * Q_{t, \text{Providenza}}^2 + K_{\text{Piaganini}} * Q_{t, \text{Piaganini}}^2 =$$

$$= 648.0 + 0.0146 * 41.76^2 + 0.0028 * 33.47^2 = 648.0 + 25.4 + 3.1 = 676.5 \text{ m};$$

#### 4.7 Potenza della nuova pompa

Assumendo preliminarmente (dati da finalizzare con il Fornitore del nuovo gruppo) i seguenti valori di rendimento alla massima potenza

- girante in pompaggio: 0.918
- alternatore/motore e convertitore statico: 0.96

si ottengono i seguenti rendimenti di gruppo alla massima potenza:

- gruppo in pompaggio: 0.881

Le massime potenze idrauliche che la nuova pompa deve gestire nel processo di trasferimento dell'acqua tra i due serbatoi sono le seguenti:

$$P_{\text{max, idraulica}} = \gamma Q \Delta H = 9.81/1000 * 33.47 * 704.1 = 231.2 \text{ MW}$$

Infine, per ricavare la potenza elettrica apparente si considera un  $\cos(f) = 0.87$ . La tabella seguente riassume le valutazioni eseguite:

Potenza massima in pompaggio	idraulica [MW]	All'albero [MW]	Assorbita [MW]	Elettrica [MVA]
	231.2	251.9	262.4	≈300 < 310

**Tabella 14:** Potenze idrauliche e assorbite del nuovo gruppo pompa.

La potenza massima assorbita è quindi inferiore alla potenza elettrica disponibile al trasformatore esistente. Si rimanda alla Relazione Idro-Elettromeccanica per ulteriori informazioni.

#### 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 della nuova pompa.

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

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 resta 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 Provvidenza (fase di pompaggio)**

Serbatoio Provvidenza:	Quota di massimo invaso originario:	1062.20 m slm;
	Quota di massima regolazione:	1060.00 m slm;
Portata del pompaggio:		41.76 m <sup>3</sup> /s;
Perdite di carico:	Galleria forzata:	$0.0104 \cdot 41.76^2 = 18.14$ m
	Condotta forzata:	$0.0063 \cdot 41.76^2 = 10.99$ m
Quote piezometriche:	Pozzo piezom.:	$1062.20 + 18.14 = 1080.34$ m slm
	Base C.F.:	$1080.34 + 10.99 = 1091.32$ m slm
Quote asse condotta:	Galleria @pozzo:	993.35 m slm
	C.F. @ base:	325.00 m slm (asse nuova pompa)

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	68.85	86.99 (+26.9%)
Condotta Forzata, alla base	737.20	766.33 (+4.0%)

**Tabella 15:** Derivazione Provvidenza – piezometriche – pompaggio con  $Q_{tot} = 41.76$  m<sup>3</sup>/s.

Lo stesso calcolo è stato fatto per valutare le pressioni solamente per il nuovo Gruppo 8 con una portata di 33.47 m<sup>3</sup>/s.

Oggetto	Pressione Statica (mH2O) @ max. invaso originario	Pressione in moto stazionario con piezometrica invertita (mH2O)
Galleria, al pozzo piezometrico	68.85	80.50 (+17.4%)
Condotta Forzata, alla base	737.20	755.9 (+2.5%)

**Tabella 16:** Derivazione Provvidenza – piezometriche – pompaggio con  $Q_{Gr.8} = 33.47 \text{ m}^3/\text{s}$ .

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 galleria di adduzione (fase di turbinaggio per il Gr. 6)**

Serbatoio Provvidenza:	Quota di massimo invaso originario:	1062.20 m slm;
	Quota di massima regolazione:	1060.00 m slm;
Portata del turbinaggio:		50.34 m <sup>3</sup> /s;
Perdite di carico:	Galleria forzata:	$0.0103 \cdot 50.34^2 = 26.10 \text{ m}$
	Condotta forzata:	$0.0043 \cdot 50.34^2 = 10.90 \text{ m}$
Quote piezometriche:	Pozzo piezom.:	$1062.20 + 26.10 = 1088.30 \text{ m slm}$
	Base C.F.:	$1088.30 + 10.90 = 1099.20 \text{ m slm}$
Quote asse condotta:	Galleria @pozzo:	993.35 m slm
	C.F. @ base:	403.25 m slm (asse Gruppo 6)

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	68.85	94.95 (+37.9%)
Condotta Forzata, alla base	658.95	696.0 (+5.6%)

**Tabella 17:** Galleria di adduzione – piezometriche – turbinaggio con  $Q_{GR6} = 50.34 \text{ m}^3/\text{s}$ .

**Inversione di piezometrica lungo la nuova galleria d'alimentazione del gruppo pompa (fase di pompaggio)**

Serbatoio Piaganini:	Quota di massimo invaso originario:	397.50 m slm;
	Quota di massima regolazione:	397.00 m slm;

Portata del pompaggio:		33.47 m <sup>3</sup> /s;
Perdite di carico:	Galleria forzata:	0.0025*33.47 <sup>2</sup> = 2.80 m
	Condotta forzata:	0.0003*33.47 <sup>2</sup> = 0.34 m
Quote piezometriche:	Pozzo piezom.:	397.00+2.80 = 399.80 m slm
	Base C.F.:	399.80 + 0.34 = 400.14 m slm
Quote asse condotta:	Galleria @pozzo:	329.00 m slm
	C.F. @ base:	326.30 m slm (asse nuova pompa)

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 (mH2O)
Galleria, al pozzo piezometrico	68.50	70.80 (+3.4%)
Condotta Forzata, alla base	71.20	73.50 (+3.2%)

**Tabella 18:** Derivazione Piaganini – 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 della nuova galleria forzata di alimentazione/scarico

Per la deviazione Provvidenza non si ritiene necessario approfondire tale argomento. Invece per la derivazione Piaganini è stata calcolata la sommergenza minima con la formula di Knauss (1987). (ref. [5])

$$\left(\frac{h}{d}\right)_{cr} = \frac{1}{2} + 2 \cdot F$$

Con

$$F = \frac{v}{\sqrt{g \cdot d}}$$

Dove:

$h$	sommergenza dell'opera [m]
$d$	diametro della galleria [m]
$F$	Numero di Froude [-] (secondo [5], deve essere maggiore di 0.25)

Con i parametri della nuova galleria d'adduzione di Piaganini (L≈2'700 m, d=4.5 m, Q=33.47 m<sup>3</sup>/s) risulta una sommergenza  $h$  min di 5.1 m nel serbatoio di Piaganini. Viene dunque scelto un valore pari a 5.15 m, così da avere una quota di 379.25 m s.l.m. in asse.

#### 4.8.4 Transitori nel pozzo piezometrico di monte (Provvidenza) nelle condizioni di progetto

Sono state effettuate nei paragrafi precedenti alcune simulazioni delle principali manovre previste specificatamente per il sistema nuovo con la nuova pompa.

Vengono riportati in **Tabella 19** i tempi di manovra concordati.

Manovra	Tempo necessario [s]
Avviamento pompa	160
Avviamento turbina	70
Turbinaggio – pompaggio	420
Pompaggio – turbinaggio	190
Arresto brusco	20

**Tabella 19:** Tempi di manovra concordati Enel GP per le verifiche dei transitori nei pozzi piezometrici.

##### Manovra di apertura

Il tempo di apertura adottato è di 160 s, in cui la portata raggiunge il valore di 41.76 m<sup>3</sup>/s. Si considera la piezometrica di partenza pari alla quota di massima regolazione nel serbatoio, ovvero ad elev. 1060.00 m slm. Considerata la lunghezza della galleria forzata di adduzione, il tempo di manovra influenza relativamente poco il livello del sopralzo nel pozzo.

La geometria del pozzo è quella indicata in **Figura 29**.

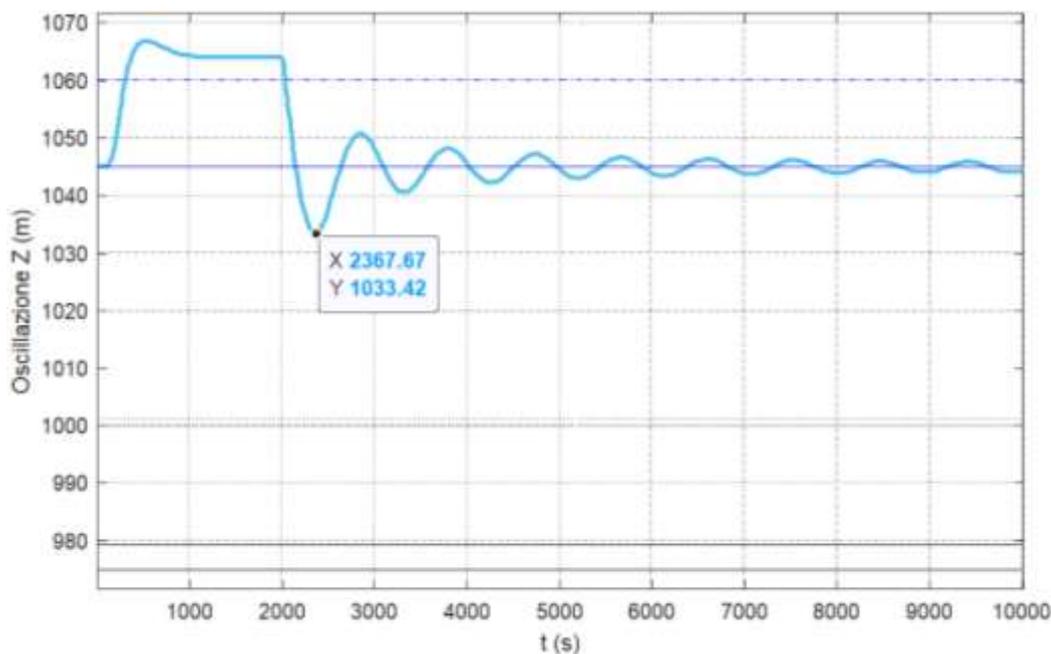
I risultati della manovra di apertura (vedi **Figura 54**) mostrano che il transitorio risulta in un sopralzo fino a quota 1078.94 m slm.

##### Manovra di chiusura

Il tempo di chiusura adottato è di 20 s.

Si considera la piezometrica di partenza pari alla quota di minima regolazione nel serbatoio, ovvero ad elev. 1045.00 m slm.

I risultati della manovra di chiusura (vedi **Figura 59** qui sotto) mostrano che la piezometrica nella prima oscillazione negativa NON TAGLIA la generatrice superiore della condotta (elev. 1033.42 m slm):



**Figura 59:** Nuovo pozzo piezometrico di monte: manovra di brusco arresto pompaggio con serbatoio di Piaganini alla quota di minima regolazione.

#### 4.8.5 Transitori nel pozzo di valle (derivazione Piaganini)

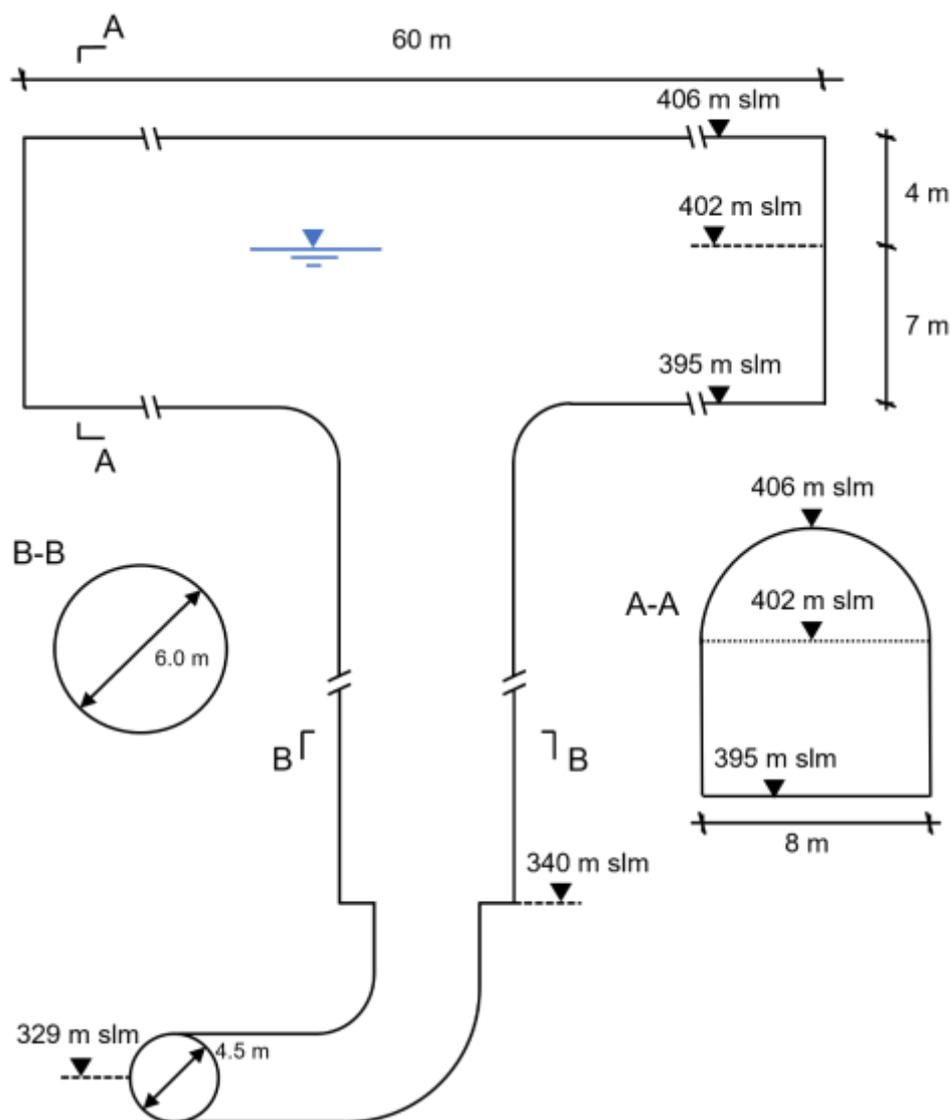
La galleria forzata d'alimentazione per la nuova pompa sarà costruita ex novo.

I tempi di manovra rimangono quelli concordati in **Tabella 19**.

##### Manovra di brusco arresto

Il tempo di chiusura adottato è di 20 s, in cui la portata dal valore di regime pari a 33.47 m<sup>3</sup>/s raggiunge il valore nullo. Si considera la piezometrica di partenza pari alla quota di massima regolazione nel serbatoio, ovvero ad elev. 397.00 m slm.

Il pozzo comincia alla quota 340.00 m slm con una sezione circolare (d=6 m, h=55 m), dopodiché la sezione diventa a "D", con BxH = 8x7 m (più una cupola di 4 m), per una lunghezza di 60 m, come illustrato in **Figura 60**.



**Figura 60:** Schematizzazione del pozzo piezometrico di valle.

I risultati della manovra di arresto mostrano un soprizzo fino a quota 401.96 m s.l.m., come mostrato in **Figura 58**:

Manovra di apertura

Il tempo di apertura adottato è di 160 s.

Si considera la piezometrica di partenza pari alla quota di minima regolazione nel serbatoio, ovvero ad elev. 384.40 m s.l.m.

I risultati della manovra di apertura (vedi **Figura 57**) mostrano che la piezometrica nella prima oscillazione negativa NON TAGLIA la generatrice superiore della galleria (el.350.00).

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

Si considerano gli effetti indotti dall'introduzione della nuova pompa.

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

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

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

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

dove:

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

#### 4.8.6.1 CF Provvidenza

Non sono note le caratteristiche del materiale esistente. Si ipotizza che la resistenza di design sia pari a  $160 \text{ N/mm}^2$ .

Celerità onde:  $c = 1000 \text{ m/s}$  (stima);

Fase di turbinaggio (Gruppo 6 – Pelton):

Con la turbina attuale, la sovrappressione è calcolata con la lunghezza attuale per il Gruppo 6 (730 m e diametro 3'600 mm fino all'otturatore, che ha diametro 2'200 mm) e spessore 67 mm (ai fini delle verifiche si considera uno spessore corrosivo pari a 65 mm).

Tempo di manovra  $T_m = 20 \text{ s}$ ;

$T_{cr} = 2L/c = 2 \cdot 730 / 1000 = 1.46 \text{ secondi}$ .

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

Massima portata transitante:  $50.34 \text{ m}^3/\text{s}$ ;

Massima velocità in C.F.  $13.24 \text{ m/s}$ ;

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

$$\Delta H_{\max} = \pm 2 \cdot 1'900 / 20 \cdot 13.24 / 9.81 = \pm 256.43 \text{ mH}_2\text{O}$$

Carico Statico +Pozzo +Colpo Ariete (mH2O)	Pressione (MPa)	Diametro (mm)	Spessore (mm)	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma$ ammissibile (N/mm <sup>2</sup> )
659.0 + 37.0 + 256.4 = 952.4	9.35	2'200	65	158.29	160.0

**Tabella 20:** Condotta Forzata Provvidenza – turbinaggio - verifica di resistenza per il Gruppo 6.

Risulta un fattore di sicurezza circa unitario (valore da aggiornare quando le indagini saranno disponibili).

Fase di pompaggio (con il nuovo gruppo pompa):

Alla base, la C.F. con lo stacco nuovo e lunga in totale circa 870 m ha diametro interno 2'600 mm e spessore 85 mm con diametro all'otturatore pari a 2'000 mm.

Tempo di manovra  $T_m = 20$  s;

$T_{cr} = 2L/c = 2*870/1000 = 1.74$  secondi.

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

Massima portata transitante: 33.47 m<sup>3</sup>/s;

Massima velocità in C.F. 6.30 m/s;

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

$$\Delta H_{max} = \pm 2*870/20*6.30/9.81 = \pm 55.9 \text{ mH2O}$$

Carico Statico +Pozzo +Colpo Ariete (mH2O)	Pressione (MPa)	Diametro (mm)	Spessore (mm)	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma$ ammissibile (N/mm <sup>2</sup> )
732.2 + 18.7 + 55.9 = 806.8	8.22	2'000	85	96.7	160.0

**Tabella 21:** Condotta Forzata Provvidenza – pompaggio - verifica di resistenza per la nuova pompa.

**Risulta un fattore di sicurezza di 1.65.**

4.8.6.2 CF Piaganini

Si intende la parte di condotta blindata e parte all'aperto tra la nuova pompa ed il nuovo pozzo piezometrico di valle.

La C.F. è lunga circa 125 m e ha diametro interno pari a 4'500 mm e spessore di 16 mm e alla valvola di macchina ha diametro 3'800 mm.

Massima portata transitante: 33.47 m<sup>3</sup>/s;  
 Massima velocità in C.F. 2.10 m/s;  
 Tempo di manovra  $T_m = 20$  s;  
 Celerità onde:  $c = 1000$  m/s (stima);  
 $T_{cr} = 2L/c = 2 \cdot 125 / 1000 = 0.25$  secondi.

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

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

$$\Delta H_{max} = \pm 2 \cdot 125 / 20 \cdot 2.10 / 9.81 = \pm 2.7 \text{ mH}_2\text{O}$$

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> )
72.5 + 3.1 + 2.7 = 78.3	0.80	3'800	15	101.3	160

**Tabella 22:** Condotta Forzata Piaganini - verifica di resistenza.

**Risulta un fattore di sicurezza di 1.58.**

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

	Max sopralzo transitorio (mH <sub>2</sub> O)	Sovrappressione dinamica colpo d'ariete (mH <sub>2</sub> O)	Massima pressione totale (mH <sub>2</sub> O)
<b>C.F. Provvidenza turbinaggio</b>	696.0	256.4	952.4
<b>C.F. Provvidenza pompaggio</b>	750.9	55.9	806.8
<b>C.F. Piaganini</b>	75.6	2.7	78.3

**Tabella 23:** Riassunto delle pressioni per il nuovo sistema.

#### 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 che 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 un 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 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

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

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:

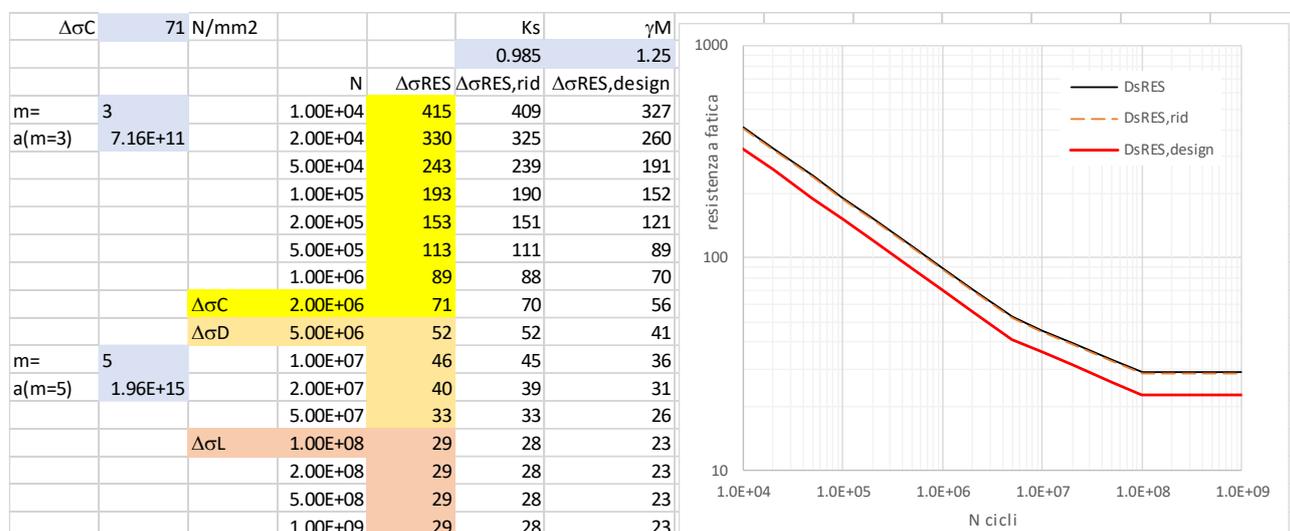


Figura 61: Diagramma di Wohler della resistenza a fatica.

### Definizione delle azioni di progetto

#### Condotta forzata di monte durante il pompaggio:

La condotta forzata esistente a monte dello stacco per la nuova pompa ha diametro 3'000 mm e spessore 85 mm circa ad elev. 325.00 m slm.

La resistenza di design dell'acciaio non è nota. Si ipotizza che sia pari a 160 N/mm<sup>2</sup>.

La quota di massimo invaso si pone ad elev. 1062.20 m slm, esercitando sulla condotta una pressione statica pari a 7.23 Mpa, a cui corrisponde, utilizzando la formula di Mariotte, una tensione pari a  $s = 127.6$  N/mm<sup>2</sup>.

- il massimo sopralzo nel pozzo piezometrico durante le manovre pari a  $\pm 18.71$  m, si ottiene una variazione di pressione pari a  $\Delta p_{NOM,PP} = 0.18$  MPa.
- la sovrappressione del colpo d'ariete pari al massimo consentito dalla normativa vigente ovvero  $\Delta p_{NOM,CA} = 0.55$  MPa.

Si ottiene la massima  $\Delta p_{NOM} = 0.73 \text{ MPa}$ , a cui corrisponde il valore di progetto dell'ampiezza di un ciclo, pari a:

$$\Delta \sigma_{NOM} = 12.9 \text{ N/mm}^2$$

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  $70/12.9 = 5.4$ .

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  $41/12.9 = 3.18$ .

#### Derivazione Piaganini per il modo pompaggio (nuovo gruppo pompa):

La condotta forzata nuova, alla base, ha diametro 3'600 mm e spessore 15 mm circa ad elev. 325.00 m slm.

La resistenza di design dell'acciaio non è nota. Si ipotizza che sia pari a  $160 \text{ N/mm}^2$ .

La quota di massimo invaso si pone ad elev. 397.50 m slm, esercitando sulla condotta una pressione statica pari a  $0.73 \text{ Mpa}$ , a cui corrisponde, utilizzando la formula di Mariotte, una tensione pari a  $s = 87.6 \text{ N/mm}^2$ .

- il massimo soprizzo nel pozzo piezometrico durante le manovre pari a  $\pm 3.14 \text{ m}$ , si ottiene una variazione di pressione pari a  $\Delta p_{NOM,PP} = 0.031 \text{ MPa}$ .
- la sovrappressione del colpo d'ariete pari al massimo consentito dalla normativa vigente ovvero  $\Delta p_{NOM,CA} = 0.026 \text{ MPa}$ .

Si ottiene la massima  $\Delta p_{NOM} = 0.057 \text{ MPa}$ , a cui corrisponde il valore di progetto dell'ampiezza di un ciclo, pari a:

$$\Delta \sigma_{NOM} = 6.8 \text{ N/mm}^2$$

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  $70/6.8 = 10.23$ .

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  $41/6.8 = 6.0$ .

## 5. CONCLUSIONI

Enel SpA – HGT Design & Execution, ha affidato a Lombardi SA l'incarico professionale di ingegneria per la Progettazione Preliminare e Definitiva per Autorizzazione dell'intervento di realizzazione di una nuovo gruppo pompa all'interno del complesso idroelettrico di San Giacomo di proprietà Enel Produzione SpA, sito nel Comune di Fano Adriano (TE) e composto dalle Centrali di San Giacomo I e San Giacomo II.

Il nuovo impianto denominato **San Giacomo III** consente l'incremento della potenza in pompaggio tra i due serbatoi. L'idea del potenziamento nasce per iniziativa delle strutture Tecniche di Enel Green Power con lo scopo di sfruttare al meglio la risorsa idrica disponibile, adeguandone l'utilizzo alle nuove esigenze di regolazione e servizi ancillari di rete.

L'intervento in progetto prevede il potenziamento in pompaggio dell'impianto di generazione esistente (per complessivi  $P = 60.6$  MW,  $Q = 8.29$  m<sup>3</sup>/s) con l'aggiunta di una nuova pompa così caratterizzata:

- Portata pompata pari a 33.47 m<sup>3</sup>/s; Potenza assorbita: 297.3 MW

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 delle oscillazioni di massa nei pozzi piezometrici e nelle gallerie idrauliche.

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 che includessero anche valutazioni sulla galleria di adduzione, dati che sono stati richiesti al Cliente considerata la lunghezza della galleria di adduzione e che eventualmente verranno integrati con opportune indagini.

La soluzione individuata ed idraulicamente verificata prevede:

- realizzazione di una nuova caverna sotto le caverne esistenti in cui installare la nuova pompa, dotata di galleria accesso carrabile e galleria di via di fuga;
- connessione alla condotta forzata esistente di San Giacomo II;
- modifiche al pozzo piezometrico di monte finalizzate ad un aumento del volume disponibile;
- costruzione di una nuova galleria d'adduzione di valle e relativo nuovo pozzo piezometrico;
- costruzione di una nuova opera di restituzione/presa nel serbatoio di Piaganini, con camera paratoie in sotterraneo;
- connessione all'esistente trasformatore da 310 MVA, con commutazione rispetto al Gr.7 Pelton.

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 note le caratteristiche esatte della nuovo gruppo pompa fornite dal Costruttore.

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.