

TITLE:

AVAILABLE LANGUAGE: IT

# CENTRALE DI GUADALAMI

## Conversione a reversibile del Gruppo 3

Comuni di Piana degli Albanesi e Monreale (PA)

### Progetto Definitivo per Autorizzazione

# RELAZIONE IDRAULICA

File: GRE.EEC.R.14.IT.H.16031.00.004.01 - Relazione Idraulica.docx

REV.	DATE	DESCRIPTION	PREPARED	VERIFIED	APPROVED
01	10/05/2022	Prima Emissione	M. Vicentini	F. Maugliani	A. Balestra
00	22/03/2022	Emissione per revisione cliente	J. Vögele M. Baumann	F. Maugliani M. Vicentini	A. Balestra

#### GRE VALIDATION

	Support Team: <i>F. Torasso</i>	Project Engineer: <i>F. Podio</i>
COLLABORATORS	VERIFIED BY	VALIDATED BY

PROJECT / PLANT

GRE CODE

GUADALAMI

GROUP	FUNCIÓN	TYPE	ISSUER	COUNTRY	TEC	PLANT	SYSTEM	PROGRESSIVE	REVISION
GRE	EEC	R	14	IT	H	16031	0000	04	01

CLASSIFICATION

UTILIZATION SCOPE

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.

01	10/05/2022	ViM	MFr/Bal
00	22/03/2022	MaBa/ViM	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	Riferimenti bibliografici	1
1.2	Tipologia di pompaggio ed oscillazione degli invasi	2
2.	CALCOLO DELLE PERDITE DI CARICO	5
2.1	Perdite distribuite	5
2.2	Perdite concentrate	6
2.3	Perdita in corrispondenza di valvole	10
2.4	Valutazione analitica delle perdite di carico	11
2.5	Valutazione perdite di carico in fase di generazione (o “turbinaggio”)	13
2.6	Valutazione delle perdite di carico in fase di pompaggio	13
3.	POTENZA DELL’IMPIANTO	14
4.	VERIFICHE PRELIMINARI	15
4.1	Linee piezometriche in moto stazionario	15
4.2	Sommergenza dell’opera di presa	16
4.3	Transitori nel pozzo piezometrico	17
4.4	Sollecitazioni dovute al colpo d’ariete	20
4.5	Verifica delle condotte forzate	21
5.	CONCLUSIONI	23
	SCHEDA TECNICA RENDIMENTO GR.1	25

## INDICE DELLE FIGURE

<b>Figura 1:</b> Schema idraulico del nodo idraulico di Piana degli Albanesi (Fonte: Dataroom ENEL).....	2
<b>Figura 2:</b> Perdita localizzata per imbocco a spigolo vivo. ....	7
<b>Figura 3:</b> Rappresentazione tipica di un restringimento di sezione. ....	7
<b>Figura 4:</b> Determinazione del coefficiente di perdita per restringimento graduale.....	7
<b>Figura 5:</b> Rappresentazione tipica di un allargamento di sezione.....	8
<b>Figura 6:</b> Schematizzazione per il calcolo delle perdite in curva.....	9
<b>Figura 7:</b> Rappresentazione transizione da sezione circolare a sezione quadrata .....	9
<b>Figura 8:</b> Rappresentazione transizione da sezione quadrata a sezione circolare .....	9
<b>Figura 9:</b> Determinazione del coefficiente di perdita K in caso di paratoie e stoplogs.....	10
<b>Figura 10:</b> Coefficiente di forma della griglia .....	10
<b>Figura 11:</b> Coefficiente di perdita valvola a farfalla .....	11
<b>Figura 12:</b> Determinazione di rendimento gruppo macchina 1 (ENEL , 2014) .....	12
<b>Figura 13:</b> Opera di Presa – profilo longitudinale e sezione del piano “canale a valle” N° 92/G .....	16
<b>Figura 14:</b> Sezione del pozzo piezometrico .....	18
<b>Figura 15:</b> PP Guadalami – oscillazioni per manovra di apertura in turbinaggio. ....	18
<b>Figura 16:</b> PP Guadalami - oscillazioni in manovra di chiusura, per turbinaggio.....	19
<b>Figura 17:</b> PP Guadalami - oscillazioni in manovra di apertura, per pompaggio.....	19
<b>Figura 18:</b> PP Guadalami - oscillazioni in manovra di chiusura, per pompaggio.....	20
<b>Figura 19:</b> Rendimento Gr. 1 Guadalami (ENEL , 2014) .....	25

## INDICE DELLE TABELLE

<b>Tabella 1:</b> Escursione dell'invaso di Piana degli Albanesi con condizione iniziale baricentrica.....	3
<b>Tabella 2:</b> Escursione dell'invaso di Guadalami.....	4
<b>Tabella 3:</b> Valori di scabrezza assoluta per il calcolo delle perdite di carico distribuite.....	6
<b>Tabella 4:</b> Valutazione perdite di carico.....	11
<b>Tabella 5:</b> Perdite di carico in turbinaggio e pompaggio .....	12
<b>Tabella 6:</b> Infrastruttura idraulica Guadalami - piezometriche.....	16
<b>Tabella 7:</b> Calcolo quota minima copertura opera di presa.....	17
<b>Tabella 8:</b> Massime sollecitazioni di colpo d'ariete nelle condotte .....	21

## 1. INTRODUZIONE

La relazione idraulica illustra i calcoli con riferimento alle diverse sollecitazioni e condizioni, anche transitorie, a cui l'infrastruttura idraulica dell'impianto di Guadalami è soggetta nella configurazione di progetto.

Sono state eseguite le seguenti verifiche:

- Calcolo delle perdite di carico;
- Calcolo della potenza dell'impianto;
- Linee piezometriche in moto stazionario;
- Sommergenza dell'opera di presa;
- Transitori nel pozzo piezometrico;
- Sollecitazioni dovute al colpo d'ariete;
- Controllo del dimensionamento condotte forzate.

I calcoli necessari sono stati eseguiti con l'applicazione di formule teoriche, quindi verificate con il codice di calcolo di cui nel programma Hydraulic System dell'École Polytechnique Fédérale di Losanna.

### 1.1 Riferimenti bibliografici

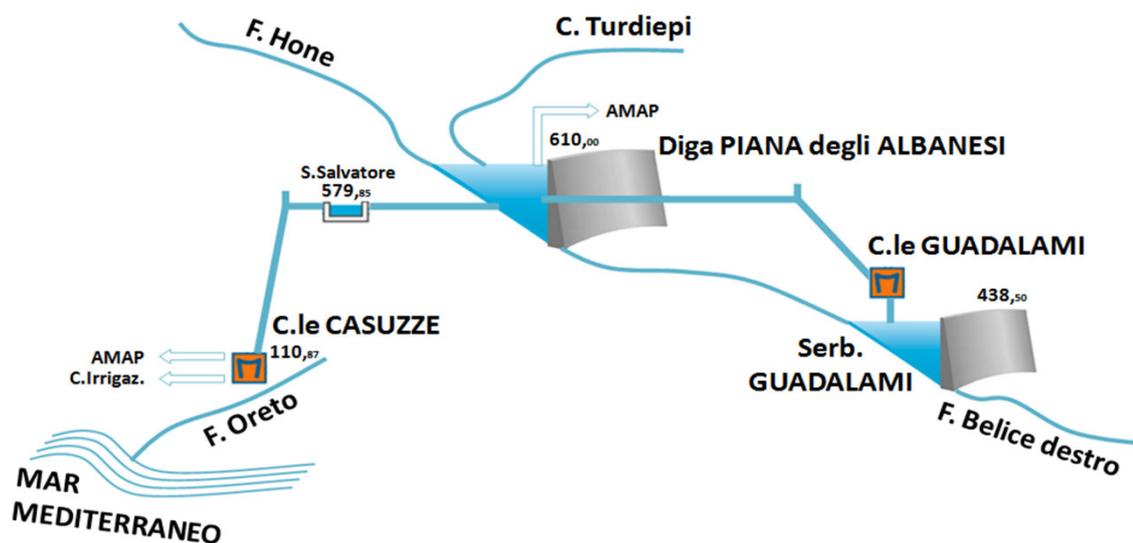
- [1] Sinniger, Hager – Constructiones Hydrauliques, EPFL Traité de Génie civil.
- [2] ASCE – Civil Engineering Guidelines for Planning and Designing Hydroelectric Developments, 1989.
- [3] ENEL, Ingegneria Civile Idraulica Napoli – Impianto Idroelettrico di Guadalami, documento di consistenza ed esercizio, 2013
- [4] Servizio Nazionale Dighe – Foglio di Condizioni per l'Esercizio e la Manutenzione, dighe di Guadalami e Piana degli Albanesi, 2000
- [5] A. Ghetti: Idraulica, seconda edizione - libreria Cortina Padova, 1980
- [6] G. Pistilli: Moto vario nell'impianto di Guadalami – CESI, 1972
- [7] V. Milano: Acquedotti – Hoepli, 1996
- [8] Sicilia Elettrica Nuova Serie n°23 1961
- [9] G. Pistilli, Problemi di moto vario – Università di Napoli, 1962
- [10] ASP, Rapporto di Prova - Centrale idroelettrica di Guadalami Gr1. Determinazione del rendimento nel funzionamento in generazione, ottobre 2014
- [11] Foglio "ANIDEL": Diga della Piana dei Greci (Volumi editi dal 1951 al 1961)
- [12] Assessorato all'ambiente della Regione Sicilia: Relazione Generale del P.A.I. (2004)

## 1.2 Tipologia di pompaggio ed oscillazione degli invasi

Con l'intento di chiarire alcuni aspetti importanti dell'iniziativa, in relazione alle sue caratteristiche tecniche ed al procedimento autorizzativo, si specifica anche nella relazione idraulica quanto dichiarato nella relazione tecnica, ovvero:

**L'iniziativa rappresenta un impianto di pompaggio puro.**

Il bacino imbrifero sotteso al lago artificiale di Piana degli Albanesi è di 41,35 km<sup>2</sup> [11]. Considerando un contributo specifico di 11 l/s km<sup>2</sup>, il volume annuo che affinisce naturalmente al lago può essere stimato in poco più di 13 milioni di m<sup>3</sup>. Il valore di 11 l/s km<sup>2</sup> può essere stimato mediante l'analisi delle piogge e dei fenomeni evapotraspirativi documentati per la Sicilia e per la zona di Palermo all'interno della stesura del piano di Assetto Idrogeologico [12]. Il lago di Piana degli Albanesi costituisce un nodo idraulico per l'alimentazione irrigua e potabile della città di Palermo e le sue acque sono per lo più utilizzate nella centrale di Casuzze. A suo tempo erano concesse alla SGES (oggi ad EGP) mediante Regio Decreto n. 7039 del 27/04/1924. I parametri di concessione sono una portata media 539 l/s e massima di 2 m<sup>3</sup>/s per un salto di salto 475 m. La potenza nominale è pari a 2545,6 kW. Il volume annuo utilizzato nella centrale di Casuzze, se nel calcolo si considera la portata media concessa, è di quasi 17 milioni di m<sup>3</sup>, ovvero un valore maggiore del volume afferente a Piana degli Albanesi, nell'ipotesi che il contributo specifico sia di 11 l/s km<sup>2</sup>. Sul versante meridionale, Piana degli Albanesi alimenta l'impianto idroelettrico di Guadalami. La centrale di Guadalami ha una potenza installata di 80 MW, suddivisa in tre gruppi orizzontali con macchine Francis. Due dei gruppi di potenza sono ternari, per cui la potenza in pompaggio ammonta a 60 MW. L'intervento di potenziamento in pompaggio in programma non costituisce una modifica sostanziale di questi bilanci di massa.



**Figura 1:** Schema idraulico del nodo idraulico di Piana degli Albanesi (Fonte: Dataroom ENEL)

Le portate scaricate dalle turbine della centrale di Guadalami produzione vengono restituite nell'omonimo serbatoio di accumulo giornaliero, realizzato sul corso del fiume Belice, poco a valle dell'edificio sala macchine. Le medesime acque possono essere pompate e rinviate al serbatoio di

monte durante le ore di maggiore disponibilità di carico nella rete elettrica. Dal bilancio idrologico presentato è evidente che l'acqua utilizzata nella centrale di Guadalami, e quella che sarà utilizzata nell'impianto di Piano del Campo, sono frutto di utilizzi giornalieri della risorsa, a scopo di riserva energetica, ma non riguardano alcun apporto naturale afferente a Piana degli Albanesi. Gli apporti naturali, infatti, sono in tutta evidenza completamente utilizzati nella centrale di Casuzze.

#### **L'oscillazione dei livelli idrici nei bacini non subirà modifiche sostanziali.**

Al fine di valutare la stabilità delle sponde degli invasi è necessario considerare le oscillazioni dovute all'esercizio dell'impianto nella nuova configurazione di pompaggio e nella configurazione di generazione. Sulla base dei livelli di esercizio autorizzati e dello storico dei livelli stessi si sono considerate diverse condizioni al contorno nelle due fasi di esercizio. I calcoli si strutturano sul bilancio dei volumi tra i due serbatoi nell'ipotesi di pompaggio puro e su delle possibili previsioni relativamente alla durata dalle fasi di esercizio. La condizione iniziale considerata è quello corrispondente alla quota di 605.00 m s.l.m., pari ad un volume invasato di 9.69 Mm<sup>3</sup>, un valore vicino al livello baricentrico dell'invaso. Il volume del serbatoio di Guadalami è molto limitato, ed ha un'escursione complessiva di 18 metri. Anche per il serbatoio di valle sono considerate durate di fase diverse ma si considerano come condizioni iniziali la quota minima di esercizio all'inizio della fase di generazione, e la quota massima all'inizio della fase di pompaggio.

È importante notare come le oscillazioni dei livelli nei due serbatoi esistenti non varino sostanzialmente nella configurazione di progetto, non venendo modificata la portata turbinata ed aumentando quella in pompaggio di soli 10 m<sup>3</sup>/s. I volumi d'acqua processati saranno gli stessi, ma la maggiore capacità di pompaggio consentirà uno svuotamento più rapido dell'invaso di Guadalami.

Di seguito si presentano i risultati di escursione nelle diverse condizioni iniziali per entrambi gli invasi, considerando il funzionamento a piena potenza di tutti i gruppi disponibili, per un numero di ore differente. Per ovvi motivi i tempi massimi considerati in generazione sono inferiori rispetto a quelli in pompaggio, che arrivano a tempi di ciclo di 8 ore. Sono indicati con  $V_p$  e  $V_r$  rispettivamente il volume processato nella fase di riferimento ed il volume utile dell'invaso rimanente.

Invaso di Piana degli Albanesi					
Fase	Portata [m <sup>3</sup> /s]	Durata [h]	$V_p$ [m <sup>3</sup> ]	$V_r$ [m <sup>3</sup> ]	$\Delta H$ [m]
Pompaggio	37,2	4	535'680	10'229'346	0.23
		6	803'520	10'497'186	0.25
		8	1'071'360	10'765'026	0.47
Generazione	56,6	4	815'040	8'878'626	-0.32
		6	1'222'560	8'471'106	-0.50

**Tabella 1:** Escursione dell'invaso di Piana degli Albanesi con condizione iniziale baricentrica

Invaso di Guadalami					
Fase	Portata [m <sup>3</sup> /s]	Durata [h]	V <sub>p</sub> [m <sup>3</sup> ]	V <sub>r</sub> [m <sup>3</sup> ]	ΔH [m]
Pompaggio	37,2	4	535'680	693'320	-4.62
		6	803'520	425'480	-7.65
		8	1'071'360	157'640	-12.05
Generazione	56,6	4	815'040	815'040	14.60
		6	1'222'560	1'222'560	16.94
		8			

**Tabella 2:** Escursione dell'invaso di Guadalami

## 2. CALCOLO DELLE PERDITE DI CARICO

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

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

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

Ai fini dell'analisi, sono state assunte ipotesi di calcolo (scelta della scabrezza, coefficienti di perdita locale, ecc.) tendenzialmente conservative. In 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 esercizio.

### 2.1 Perdite distribuite

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

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

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

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 viene calcolato mediante la seguente formula di Colebrook-White:

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

dove:

$\varepsilon$	Scabrezza assoluta, riportata in <b>Tabella 3</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 ( $1.31 \cdot 10^{-6}$ Pa s)

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

Materiale	Scabrezza assoluta $\varepsilon$ [mm]	n Manning [s/m <sup>1/3</sup> ]
Acciaio	0.50	0.011
Calcestruzzo	1.50	0.013

**Tabella 3:** Valori di scabrezza assoluta per il calcolo delle perdite di carico distribuite.

## 2.2 Perdite concentrate

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

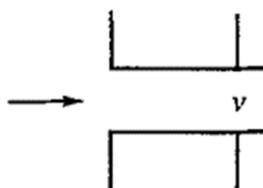
$$\Delta H = K \frac{v^2}{2g}$$

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> ]

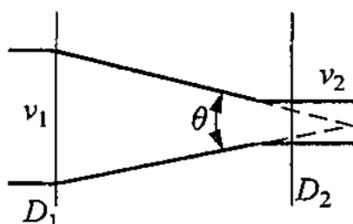
Il coefficiente di perdita  $K$  è stimato, caso per caso, come descritto nei successivi paragrafi.

Le perdite localizzate all'imbocco sono calcolate considerando che la sagoma di ingresso non sia raccordata, ovvero che la bocca di presa termini con spigolo vivo con un angolo di 90°: L'ipotesi è corroborata dai disegni di consistenza [3]. Si adotta pertanto un coefficiente di perdita  $K = 0,5$  come suggerito da **Figura 2**.



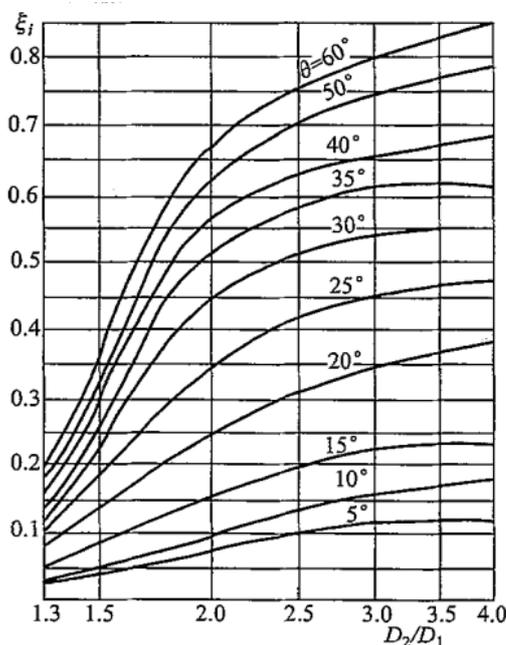
**Figura 2:** Perdita localizzata per imbocco a spigolo vivo.

In caso di restringimento di sezione il coefficiente di perdita, come suggerito da **Figura 3** 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:



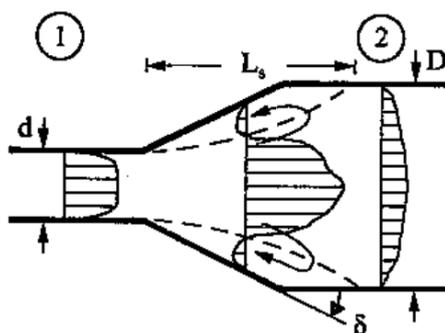
**Figura 3:** Rappresentazione tipica di un restringimento di sezione.

Noti i parametri appena descritti è possibile ricavare il coefficiente di perdita K attraverso l'abaco di **Figura 4**:



**Figura 4:** Determinazione del coefficiente di perdita per restringimento graduale.

Gli allargamenti di sezione sono definiti secondo **Figura 5**, 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 5:** Rappresentazione tipica di un allargamento di sezione

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 apertura

$E$                         coefficiente adimensionale pari a 0.75

Nel caso di curve circolari il coefficiente di perdita, secondo **Figura 6**, si calcola con la seguente formula:

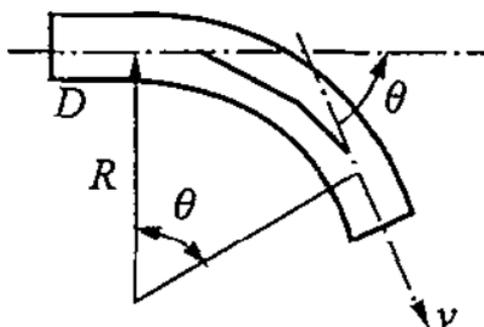
$$K = \left(0.131 + 0.1632 \cdot \left(\frac{D}{R}\right)^{7/2}\right) \cdot \frac{\theta}{90^\circ}$$

dove:

$\theta$                         angolo di curvatura [°]

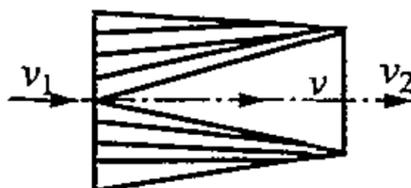
$R$                         raggio di curvatura [m]

$D$                         diametro della sezione considerata [m]



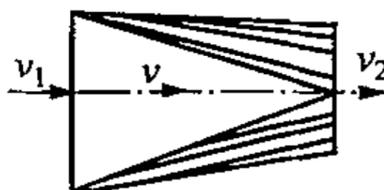
**Figura 6:** Schematizzazione per il calcolo delle perdite in curva

In caso di transizione da sezione circolare a quadrata il valore della velocità di riferimento per il calcolo delle perdite è la media delle velocità in ingresso e in uscita. Il coefficiente di perdita è assunto pari a 0.10 (**Figura 7**)



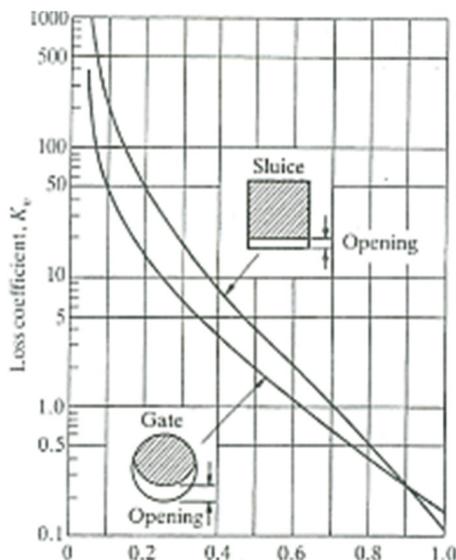
**Figura 7:** Rappresentazione transizione da sezione circolare a sezione quadrata

In caso di transizione da sezione quadrata a circolare, analogamente a quanto esposto al paragrafo precedente, il valore della velocità di riferimento per il calcolo delle perdite è la media delle velocità in ingresso e in uscita. Il coefficiente di perdita è assunto pari a 0.05 **Figura 8:**



**Figura 8:** Rappresentazione transizione da sezione quadrata a sezione circolare

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 **Figura 9:**



**Figura 9:** Determinazione del coefficiente di perdita  $K$  in caso di paratoie e stoplogs

Per il calcolo delle perdite in corrispondenza delle griglie viene adottata la formula semplificata di **Figura 10** che consente il calcolo del coefficiente di perdita  $K$ :

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

- 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 10**)

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

**Figura 10:** Coefficiente di forma della griglia

**2.3 Perdita in corrispondenza di valvole**

Le perdite localizzate in presenza di valvole dipendono dalla natura della valvola e dal grado di apertura delle stessa. Si consideri il rapporto  $t/D$  come il rapporto di strozzamento [5]. Nel caso di valvole a farfalla, il coefficiente di perdita  $\xi$  è dato dalla seguente tabella **Figura 11**. In tabella il

rapporto  $t/D$  indica il rapporto geometrico nelle geometrie della valvola e  $\xi$  il coefficiente per il calcolo delle perdite localizzate, di tipo "Borda" [5]:

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

**Figura 11:** Coefficiente di perdita valvola a farfalla

Non essendo disponibili dati specifici sulle valvole a farfalla installate si assume  $\xi$  pari a 0.20. Nel caso invece delle valvole rotative si assume, conservativamente, un coefficiente di perdita  $\xi$  pari a 0.20.

### 2.4 Valutazione analitica delle perdite di carico

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

POMPAGGIO		CALCOLO DELLE PERDITE DI CARICO D'IMPIANTO DI GUADALAMI																	
		Qref=	38	m3/s															
<b>ASPIRAZIONE</b>	L	D	A	Q	V	V2/2G	$\epsilon$	$\lambda$	J	DH <sub>dist</sub>	K <sub>pomp</sub>	DH <sub>pomp</sub>		DH TOT	DH/Q <sup>2</sup>				
				4.15	9.5	2.29	0.267					1	0.267	0.267	0.0030				
														<b>TOTALE</b>	<b>0.267</b>				
<b>MANDATA</b>	L	D	A	Q	V	V2/2G	$\epsilon$	$\lambda$	J	DH <sub>dist</sub>	K <sub>pomp</sub>	DH <sub>pomp</sub>		DH TOT	DH/Q <sup>2</sup>				
TRATTO COMUNE	20	2	3.14	9.5	3.0	0.466	0.00027	0.0127	0.0030	0.059	0.6	0.280		0.339	0.0038				
TRATTO COLL 1	20	1.8	2.54	4.5	1.8	0.159	0.00027	0.0130	0.0011	0.023	0.5	0.080		0.103	0.0051				
TRATTO CF	280	3	7.07	19	2.7	0.368	0.00027	0.0117	0.0014	0.404	0.45	0.166		0.569	0.0016				
TRATTO UNICO FINO A PP	62	4.5	15.90	38	2.4	0.291	0.00027	0.0109	0.0007	0.044	0.2	0.058		0.102	0.0001				
														<b>TOTALE</b>	<b>1.113</b>				
<b>GALLERIA FORZATA</b>	L	DI	A	Q	V	V2/2G	$\epsilon$	$\lambda$	J	DH <sub>dist</sub>	K <sub>pomp</sub>	DH <sub>pomp</sub>		DH TOT	DH/Q <sup>2</sup>				
TRATTO DA PP A SERBATOIO	745	4.6	16.62	38	2.3	0.267	0.003	0.0177	0.0010	0.766	1.2	0.320		1.085	0.0008				
														<b>TOTALE</b>	<b>1.085</b>				
														DH TOT	DH/Q <sup>2</sup>				
														<b>DH TOTALE SISTEMA</b>	<b>2.47</b>				
															<b>0.00171</b>				
														611.466					
<b>TURBINAGGIO</b>																			
		Qref=	62	m3/s															
<b>ASPIRAZIONE Gruppo 3</b>	L	D	A	Q	V	V2/2G	$\epsilon$	$\lambda$	J	DH <sub>dist</sub>	K <sub>turb</sub>	DH <sub>turb</sub>		DH TOT	DH/Q <sup>2</sup>				
				4.15	14	3.37	0.580					1.2	0.696	0.696	0.0030				
														<b>TOTALE</b>	<b>0.696</b>				
<b>MANDATA</b>	L	D	A	Q	V	V2/2G	$\epsilon$	$\lambda$	J	DH <sub>dist</sub>	K <sub>turb</sub>	DH <sub>turb</sub>		DH TOT	DH/Q <sup>2</sup>				
TRATTO COMUNE	20	2	3.14	14	4.5	1.013	0.00027	0.0127	0.0064	0.128	0.5	0.506		0.635	0.0038				
TRATTO COLL 1	20	1.8	2.54	7	2.8	0.386	0.00027	0.0130	0.0028	0.056	0.4	0.154		0.210	0.0051				
TRATTO CF	280	3	7.07	31	4.4	0.981	0.00027	0.0117	0.0038	1.074	0.45	0.441		1.516	0.0016				
TRATTO UNICO FINO A PP	62	4.5	15.90	62	3.9	0.775	0.00027	0.0109	0.0019	0.116	0.2	0.155		0.271	0.0001				
														<b>TOTALE</b>	<b>2.632</b>				
<b>GALLERIA FORZATA</b>	L	D	A	Q	V	V2/2G	$\epsilon$	$\lambda$	J	DH <sub>dist</sub>	K <sub>turb</sub>	DH <sub>turb</sub>		DH TOT	DH/Q <sup>2</sup>				
TRATTO DA PP A SERBATOIO	745	4.6	16.62	62	3.7	0.710	0.003	0.0177	0.0027	2.038	1	0.710		2.748	0.0008				
														<b>TOTALE</b>	<b>2.748</b>				
														DH TOT	DH/Q <sup>2</sup>				
														<b>DH TOTALE SISTEMA</b>	<b>6.08</b>				
															<b>0.00158</b>				

**Tabella 4:** Valutazione perdite di carico

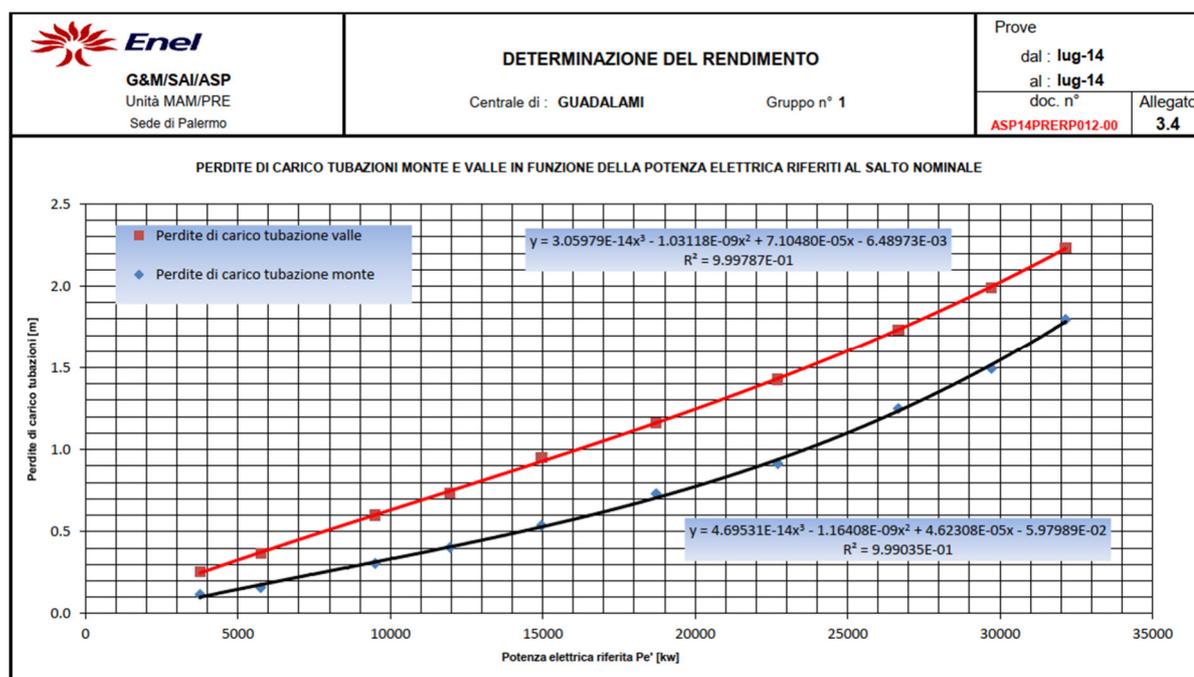
Le perdite sono calcolate con assunzioni conservative. È possibile confrontare i risultati con le misure storiche, analizzando i rapporti “Moto vario nell’impianto di Guadalami” (1966) e “Determinazione del Rendimento Gr. 1” (2014) [3]. Le perdite di carico in turbinaggio e pompaggio (tutti i gruppi macchine funzionanti) risultano a:

	Misurazioni 1966	Misurazioni 2014	Calcolate 2022
Portata d’acqua	$Q = 54.9 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q = 22.4 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q = 62 \text{ m}^3/\text{s}$
$\Delta H_{\text{turbinaggio}}$	5.90 m	2.1 m	6.08 m
$\frac{\Delta H}{Q^2}$	0.001958	0.004185	0.00158
Portata d’acqua	$Q = 25.4 \text{ m}^3/\text{s}$	–	$Q = 38 \text{ m}^3/\text{s}$
$\Delta H_{\text{pompaggio}}$	1.85 m	–	2.47 m
$\frac{\Delta H}{Q^2}$	0.002868	–	0.00171

**Tabella 5:** Perdite di carico in turbinaggio e pompaggio

La differenza nel  $\Delta H_{\text{pompaggio}}$  è data dal fatto che le misurazioni del 1966 sono state fatte con una portata d’acqua in pompaggio di 25.4 m³/s, mentre i calcoli in Tabella 4 prevedono una portata di 37,2 m³/s.

Mediante il confronto di calcoli e misure, illustrati in **Tabella 5**, è possibile validare il modello di calcolo, che nella simulazione in generazione dà risultati in linea con le misure realizzate in passato, come si evince dai risultati presentati nella colonna “calcolate 2022”.



**Figura 12:** Determinazione di rendimento gruppo macchina 1 (ENEL , 2014)

Per ulteriori informazioni, limitatamente alle perdite idrauliche in configurazione di generazione del solo gruppo 1, sulle perdite di carico del gruppo 1, consultare Scheda tecnica rendimento Gr.1, riportata in Allegato A.

## 2.5 Valutazione perdite di carico in fase di generazione (o “turbinaggio”)

Il nuovo gruppo reversibile in fase di turbinaggio funzionerà in sostituzione del gruppo esistente GR3, con la stessa portata, e pertanto considerando il massimo salto lordo pari a circa 178.5 m, si ottiene, con la massima portata di impianto, un salto netto pari a:

$$S_{netto} = S_{lordo} - K \cdot Q_{turbinata}^2 = 178.5 - (0.00158) \cdot 62^2 = 172.48 \text{ m}$$

viceversa, con il minimo salto lordo pari a 160.9 m circa, si ottiene:

$$S_{netto} = S_{lordo} - K \cdot Q_{turbinata}^2 = 160.9 - (0.00158) \cdot 62^2 = 154.82 \text{ m}$$

## 2.6 Valutazione delle perdite di carico in fase di pompaggio

Il gruppo reversibile in fase di pompaggio può funzionare sia da solo che contemporaneamente agli altri due gruppi. Nella condizione di massimo convogliamento dal serbatoio di Piana degli Albanesi, considerando il massimo salto lordo pari a circa 179 m, si ottiene un salto netto pari a:

$$S_{netto} = S_{lordo} + K \cdot Q_{pompaggio}^2 = 178.5 + 0.00171 \cdot 38^2 = 180.97 \text{ m}$$

viceversa, con il minimo salto lordo pari a 160.2 m circa, si ottiene:

$$S_{netto} = S_{lordo} + K \cdot Q_{pompaggio}^2 = 160.9 + 0.00171 \cdot 38^2 = 163.37 \text{ m}$$

La portata massima di pompaggio si è considerata, con arrotondamento in eccesso, pari a 38 m<sup>3</sup>/s. Si noti che il serbatoio Piana degli Albanesi può essere riempito con la massima capacità delle pompe fino alla massima regolazione, senza che l'acqua sfiori dal pozzo piezometrico (430 + 181.5 = 611.5 m slm < 612.0 m slm).

### 3. POTENZA DELL'IMPIANTO

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

- in turbinaggio:  $P_{max\ idraulica} = gQ\Delta H = 9.806 * 14 * 172.92/1000 = 23.7\ MW$ ;
- in pompaggio:  $P_{max\ idraulica} = gQ\Delta H = 9.806 * 10 * 181.47/1000 = 17.8\ MW$ ;

Assumendo preliminarmente i seguenti valori di rendimento alla massima potenza:

- girante in turbinaggio: 0.910
- girante in pompaggio: 0.875
- alternatore/motore: 0.975
- trasformatore: 0.995

si ottengono i seguenti rendimenti di gruppo alla massima potenza:

- gruppo in turbinaggio: 0.883
- gruppo in pompaggio: 0.848

Le massime potenze erogate/richieste sono pertanto pari a:

- gruppo in turbinaggio:  $23.7 \cdot 0.883 = 20.9\ MW$
- gruppo in pompaggio:  $17.8 / 0.853 = 20.9\ MW$

Il dimensionamento del nuovo gruppo reversibile e del trasformatore di potenza, che andrà sostituito, sono illustrati nella relazione elettromeccanica (si veda GRE.EEC.R.14.IT.H.16031.00.05.00). I rendimenti assunti nella relazione elettromeccanica sono in linea con quelli citati in questa sede ma potranno subire delle modifiche nelle fasi successive di dimensionamento e scelta dei macchinari.

## 4. VERIFICHE PRELIMINARI

Nei seguenti paragrafi si effettuano alcune verifiche preliminari di tipo idraulico e strutturale, considerando lo schema idraulico nelle varie possibilità di esercizio indicate in precedenza.

### 4.1 Linee piezometriche in moto stazionario

Lo scopo di questo paragrafo è quello di valutare in termini di incremento di carico statico l'effetto dell'inversione della piezometrica lungo i rami "di mandata" causata dall'operazione del gruppo reversibile. Nello schema di pompaggio differenziale, il ramo lungo il quale si inverte la piezometrica è la derivazione da Piana degli Albanesi. 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.

#### Inversione di piezometrica lungo la derivazione Albanesi

Serbatoio di Piana degli Albanesi, quota di massima regolazione:	609.00 m slm;
Portata del pompaggio:	38 m <sup>3</sup> /s
Perdite di carico:	
Tratto da PP a Serbatoio:	$0.00075 \cdot 38^2 = 1.09 \text{ m}$
Tratto unico fino a PP:	$7.05 \cdot 10^{-5} \cdot 38^2 = 0.10 \text{ m}$
Tratto C.F:	$0.00158 \cdot 19^2 = 0.57 \text{ m}$
Tratto Collegato 1:	$0.00507 \cdot 4.5^2 = 0.10 \text{ m}$
Tratto comune:	$0.00376 \cdot 9.5^2 = 0.34 \text{ m}$
Aspirazione:	$0.00296 \cdot 9.5^2 = 0.27 \text{ m}$
Totale perdite carico pompaggio	<b>2.47 m</b>
Quote piezometriche:	
Pozzo piezometrico:	$609 + 2.47 = 611.47 \text{ m slm}$
Quote asse condotta:	
Galleria al pozzo:	572.7 m slm
Condotta forzata alla base:	422.5 m slm

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

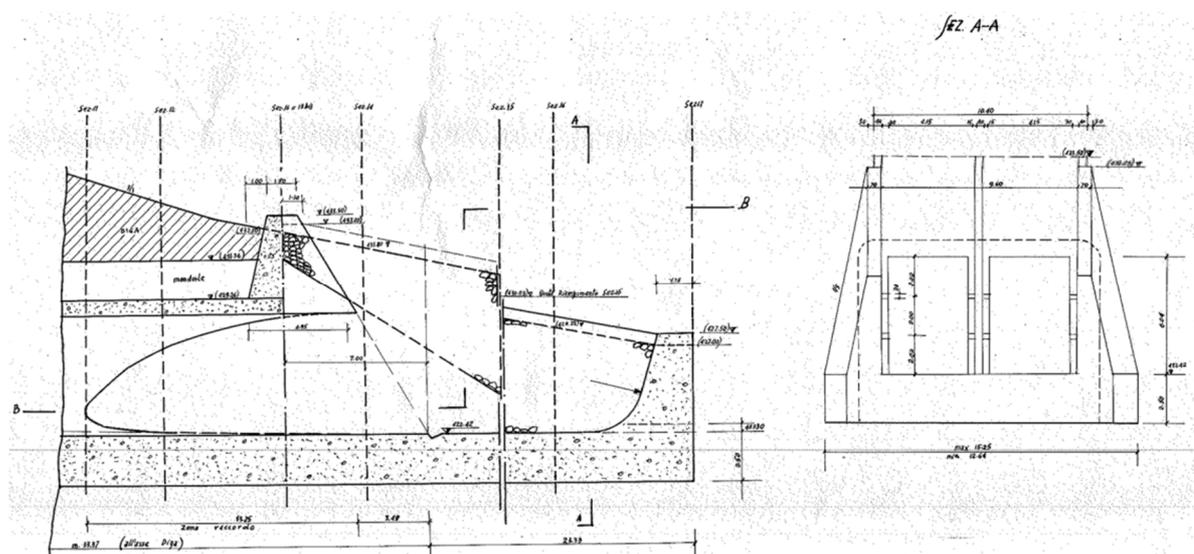
Oggetto	Pressione Statica (m H <sub>2</sub> O) max. invaso originario	Pressione in moto stazionario con piezometrica invertita (m H <sub>2</sub> O)
Asse galleria, al pozzo piezometrico	36.3	38.9 (+7.1%)

Oggetto	Pressione Statica (m H <sub>2</sub> O) max. in vaso originario	Pressione in moto stazionario con piezometrica invertita (m H <sub>2</sub> O)
Condotta Forzata, alla base	179.0	181.0 (+1.4%)

**Tabella 6:** Infrastruttura idraulica Guadalami - piezometriche

### 4.2 Sommergenza dell’opera di presa

Dato l’incremento d’aspirazione dell’opera di presa di valle, al serbatoio del Guadalami, da 27,2 m<sup>3</sup>/s a 37,2 m<sup>3</sup>/s, è necessario la valutazione della sommergenza minima necessaria per garantire il funzionamento dell’opera. Le grandezze geometriche rilevanti sono visibili in **Figura 13**.



**Figura 13:** Opera di Presa – profilo longitudinale e sezione del piano “canale a valle” N° 92/G

Per il calcolo fatto è stato usato il metodo proposto da Giesecke (Giesecke, Heimerl, & Mosonyi, 2014):

$$h_{e_s} = C * v * \sqrt{d/g}$$

$h_{e_s}$  altezza minima di copertura

C Costante:  $C = 1.7$  per aspirazione simmetrica  
 $C = 2.3$  per aspirazione asimmetrica

v velocità media dell’acqua nella sezione [m/s]

d diametro condotta

Portata	38 m <sup>3</sup> /s
Superficie opera di presa	50.13 m <sup>2</sup>
Velocità d’aspirazione alla portata di progetto	0.76 m/s

Costante d'aspirazione	1.7
Diametro condotta (assunzione)	3.25 m
Altezza di minima sommersenza	0.74 m
Bordo superiore opera di presa	428.46 m slm
Quota minima di funzionamento	429.20 m slm
Quota minima "massimo svaso" serbatoio Guadalami	430.0 m slm

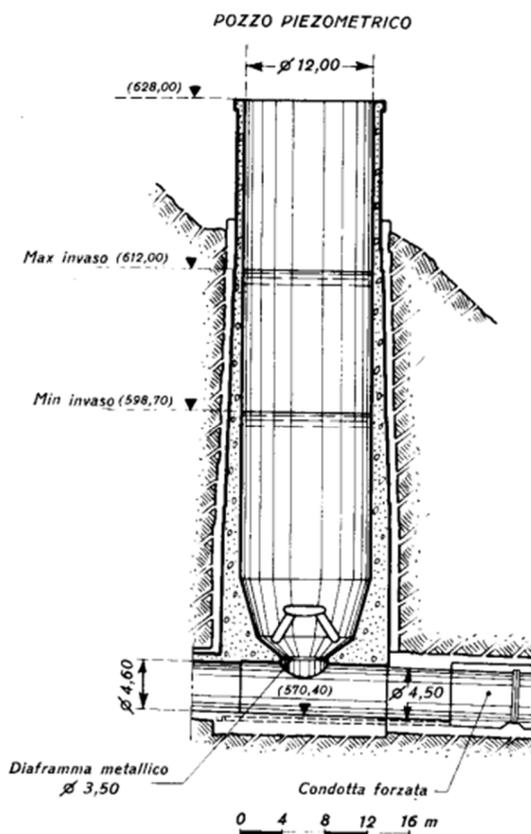
**Tabella 7:** Calcolo quota minima copertura opera di presa

Secondo i calcoli visibili in **Tabella 7** non ci sono problemi risultanti dall'aumento di portata d'aspirazione in pompaggio per quanto riguarda la sommersenza/copertura dell'opera di presa dal serbatoio di Guadalami, essendo la quota di funzionamento imposta dalla minima sommersenza oltre 80 cm inferiore rispetto alla minima regolazione.

#### 4.3 Transitori nel pozzo piezometrico

Il calcolo del moto vario dell'impianto di Guadalami è stato minuziosamente studiato da parte di Giuseppe Pistilli (Università di Napoli) nel 1962. I calcoli sono stati verificati sia con una calcolatrice elettronica (analizzatore differenziale numerico) dell'Università di Napoli che con un modello a scala ridotta; per ulteriori informazioni si veda [6], [9]. Questi calcoli sono poi stati controllati con misurazioni in loco con impianto funzionante. Per la verifica del moto vario con il nuovo gruppo reversibile con il già citato software Hydraulic System sono state effettuate alcune simulazioni delle principali manovre previste, specificatamente per il sistema con il nuovo gruppo reversibile. In fase di turbinaggio verso Guadalami, le manovre di apertura e chiusura con il nuovo GR3 hanno effetti sul sistema identici a quelli della configurazione di macchine attuale: la portata è uguale. Diversamente, in fase di pompaggio verso il serbatoio di Piana degli Albanesi, occorre studiare i transitori nel pozzo piezometrico dovuti alle manovre di avvio e fermata del nuovo gruppo reversibile. Considerata la lunghezza della galleria forzata di adduzione, il tempo di manovra influenza la sopraelevazione di livello nel pozzo, con riduzione del franco disponibile di cui è necessaria la verifica di adeguatezza.

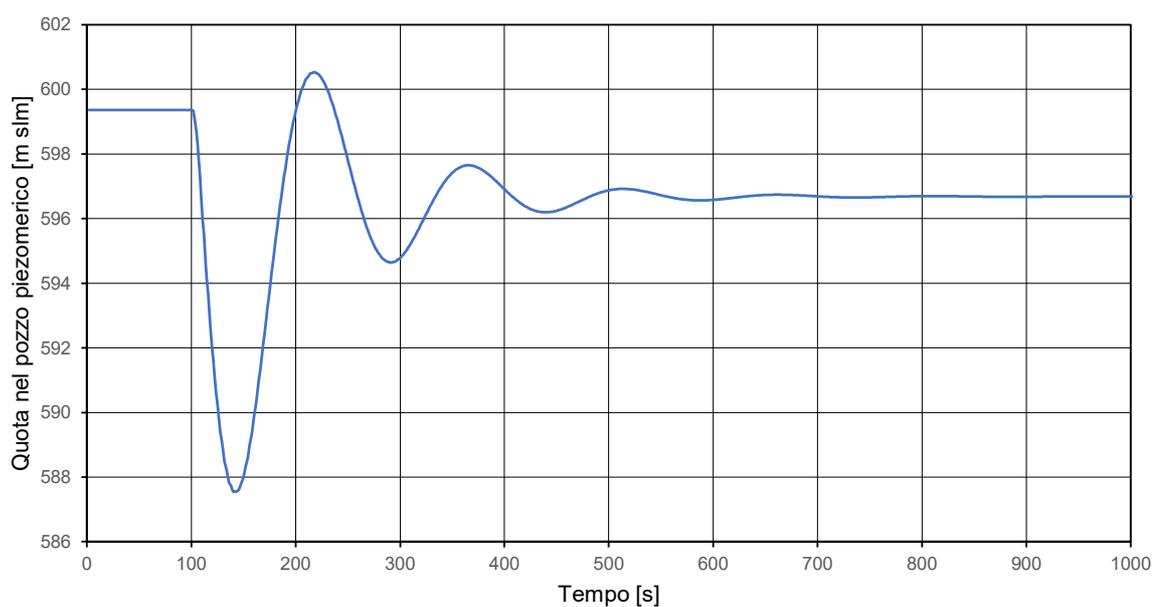
Al fine di rendere più facile la lettura del transitorio riportato, e degli altri casi che si illustrano nel seguito, si riporta la geometria del pozzo piezometrico con le quote di riferimento.



**Figura 14:** Sezione del pozzo piezometrico

Manovra di avviamento delle turbine

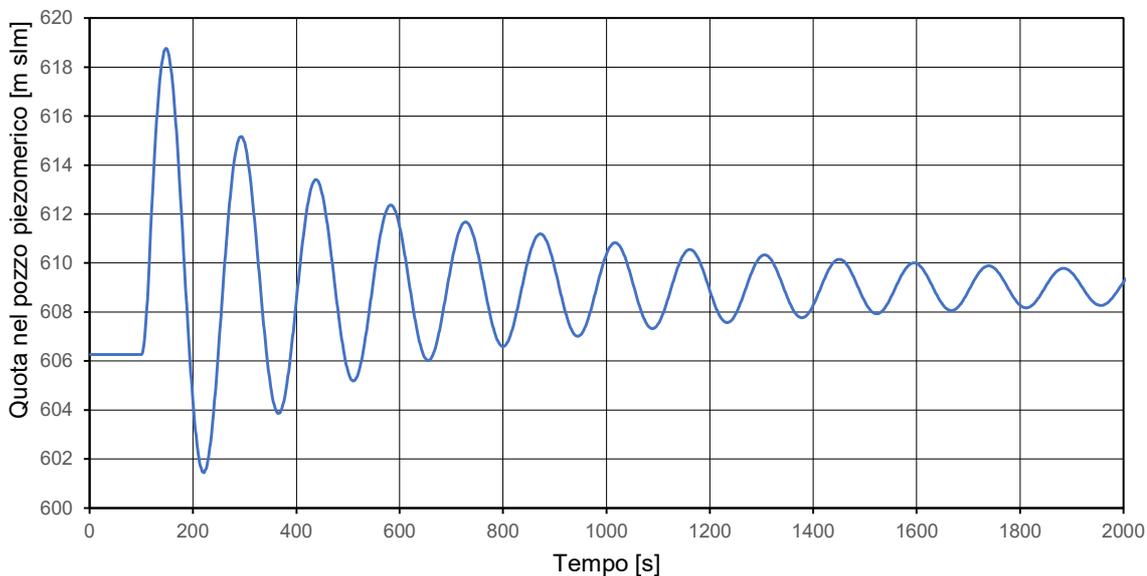
Il tempo di apertura adottato è di 16 s, in cui la portata raggiunge il valore di 62.0 m<sup>3</sup>/s. Si considera la piezometrica di partenza pari alla quota di minima regolazione nel serbatoio, ovvero alla quota di 599.40 m slm.



**Figura 15:** PP Guadalami – oscillazioni per manovra di apertura in turbinaggio.

Manovra di arresto delle turbine

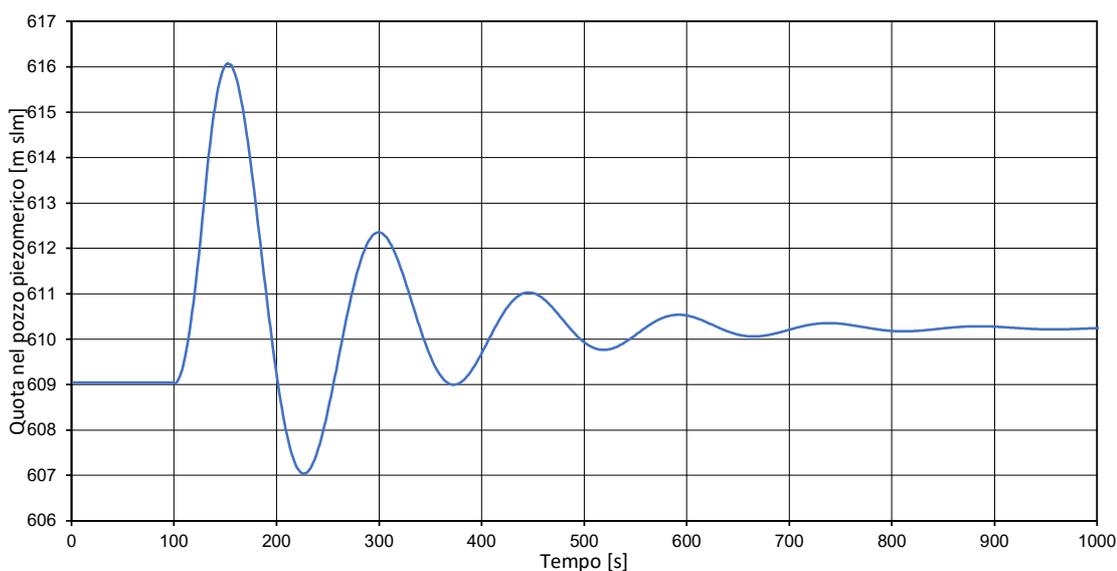
Il tempo di chiusura adottato è di 8 s. Si considera la piezometrica di partenza pari alla quota di 606,20 m slm, un valore superiore a quello baricentrico.



**Figura 16:** PP Guadalami - oscillazioni in manovra di chiusura, per turbinaggio.

Manovra di avviamento delle pompe

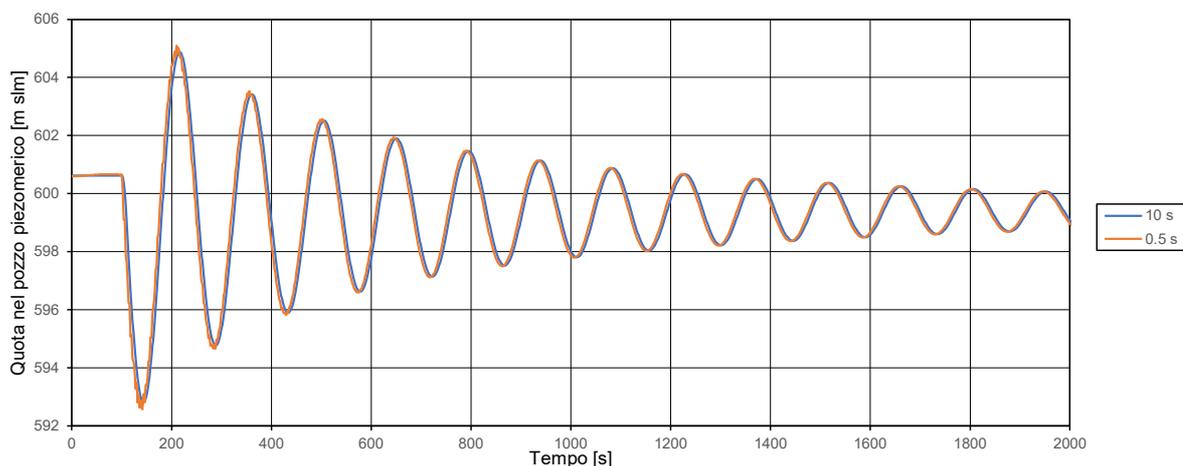
Il tempo di apertura adottato è di 30 s, in cui la portata raggiunge il valore di 38 m<sup>3</sup>/s.- Si considera la piezometrica di partenza pari alla quota di massima regolazione nel serbatoio, ovvero a quota 609.00 m slm. Com'è evidente nella seguente grafica, il pozzo funziona correttamente con la portata in pompaggio aumentata del contributo del nuovo GR3.



**Figura 17:** PP Guadalami - oscillazioni in manovra di apertura, per pompaggio.

Manovra di arresto delle pompe

Il tempo di chiusura adottato è di 0.5 s. Si considera la piezometrica di partenza pari alla quota di minima regolazione nel serbatoio, ovvero a quota 599.40 m slm. I risultati della manovra di chiusura mostrano che la piezometrica nella prima oscillazione negativa non raggiunge la generatrice superiore della condotta (el. 575 m slm):



**Figura 18:** PP Guadalami - oscillazioni in manovra di chiusura, per pompaggio.

#### 4.4 Sollecitazioni dovute al colpo d'ariete

Si considerano gli effetti indotti dall'introduzione del nuovo gruppo reversibile. Le massime sovrapressioni 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 sovrapressioni 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: $\Delta V$	la variazione di velocità in condotta (m/s)
L	lunghezza della condotta (m)
c	celerità di propagazione delle onde (m/s)
g	accelerazione di gravità (m/s <sup>2</sup> )
$T_M$	tempo di manovra (s)
$T_{CR}$	tempo critico della condotta forzata, pari a $T_{CR} = 2L/c$ .

La presente valutazione del colpo d'ariete è da considerarsi preliminare in quanto il comportamento nel transitorio è influenzato dal funzionamento di tutti i gruppi. Queste valutazioni saranno trattate esaurientemente nella fase di progettazione esecutiva.

#### Condotta forzata della derivazione di Piana degli Albanesi

Alla base, la C.F. lunga circa 400 m ha diametro interno di 1'800-4'000 mm e spessore da 10 a 24 mm. La condotta è composta d' acciaio legato al Cr-Cu. La resistenza media per la trazione del materiale è considerata in questa fase pari a  $\sigma_{mat.} = 510 \text{ N/mm}^2$  [7].

Massima portata transitante: 62.0 m<sup>3</sup>/s;

Massima velocità in C.F. 3.2 m/s;

Tempo di manovra  $T_m = 8 \text{ s}$ ;

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

$T_{cr} = 2L/c = 2 * 400/1000 = 0.80$  secondi.

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

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

$$\Delta H_{max} = \pm 2 * 400/8 * 3.2/9.81 = \pm 31 \text{ mH}_2\text{O}$$

e quindi pari a circa il 17 % della massima pressione idrostatica.

Lo scenario considerato prevede, in favore della sicurezza, la contemporaneità del massimo sovrizzo nel pozzo piezometrico e la massima sovrappressione di colpo d'ariete, in modo da ottenere le massime sollecitazioni nelle condotte forzate, all'otturatore:

	Max Sovralzo Pozzo piezometrico	Sovrappressione dinamica colpo d'ariete	Massima pressione totale
C.F. Albanesi	182 m H <sub>2</sub> O	+31 m H <sub>2</sub> O	213 m H <sub>2</sub> O
C.F. Albanesi	620 m slm	+31 m slm	651 m slm

**Tabella 8:** Massime sollecitazioni di colpo d'ariete nelle condotte

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

#### **4.5 Verifica delle condotte forzate**

Secondo la documentazione disponibile sull'impianto, [8], le condotte forzate sono state dimensionate alle seguenti condizioni:

- Carico idrostatico massimo in corrispondenza dell'asse delle rispettive sezioni:

- All'inizio della condotta: 39,4 m
- Nella sez. terminale delle derivazioni: 189,5 m
- Sovrapressione dovuta al moto transitorio nel pozzo piezometrico: 11,2 m
- Sovrapressione di colpo d'ariete riferita al carico idrostatico massimo: 25%
- Sovrapressione in pompaggio per intempestiva chiusura della valvola a farfalla: 76,5 m

A causa dell'aumento del carico in pompaggio non vengono cagionati problemi nel pozzo piezometrico a cui il sistema non riesca a far fronte. Infatti, la sovrappressione in pompaggio di 76.5 m stimata nel calcolo di verifica dell'assetto d'impianto attuale, risulta dalla chiusura della valvola di macchina in 8 secondi ed è superiore a quella causata dalla nuova configurazione del gruppo 3, come si illustra nel seguito.

Il calcolo della sovrappressione causata dal gruppo 3 (Gr. 3) in pompaggio per intempestiva chiusura della valvola di macchina porta ad un valore simile, solo leggermente differente rispetto ai gruppi macchine 1 e 2, in quanto il diametro e la portata in pompaggio della condotta del Gr. 3 sono leggermente più piccoli (1.4 m invece di 1.6). Dal calcolo la sovrappressione in pompaggio per intempestiva chiusura della valvola a farfalla per il Gr. 3 risulta pari a:

$$\Delta h = \frac{2 * \Delta v * L}{g * T_s} = 66.3 \text{ m}$$

Questa pressione è inferiore a quella utilizzata per il dimensionamento della condotta (+76.5 m).

A favore di sicurezza, viene quindi assunto che le condotte afferenti al Gr. 3 devono riuscire a sopportare la sovrappressione calcolata per gli altri due gruppi.

Non ci sono insufficienze dei materiali conseguenti al nuovo stato tensionale, come dimostra il calcolo seguente.

La pressione massima per il gruppo 3 risulta pari a:

$$h_{max} = 76.5 + 179 = 255.5 \text{ m}$$

Da cui lo spessore della tubazione minima necessaria:

$$s = \frac{D}{2} \times \frac{p}{\sigma} = 700 \text{ mm} * \frac{2.55 \text{ N/mm}^2}{510 \text{ N/mm}^2} = 3.5 \text{ mm} < 10 \text{ mm}$$

Per lo spessore considerato si veda § 2.6 della relazione illustrativa GRE.EEC.R.14.IT.H.16031.00.01. Si è considerato il valore più basso di quelli citati, anche se certamente, nel tratto finale, gli spessori sono più consistenti.

## 5. CONCLUSIONI

Enel Green Power Engineering & Construction ha affidato a Lombardi SA l'incarico professionale di ingegneria per la Progettazione Definitiva dell'intervento di potenziamento dell'impianto idroelettrico di Guadalami, sito nei Comuni di Piana degli Albanesi e di Monreale.

L'intervento in progetto prevede il potenziamento in pompaggio dell'impianto di generazione esistente con la sostituzione del gruppo di generazione 3 (GR.3) con un gruppo reversibile di generazione/pompaggio così caratterizzato:

- Portata pompata pari a 10 m<sup>3</sup>/s;
- Portata turbinata pari a 14 m<sup>3</sup>/s;

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. Queste verifiche sono state condotte in diverse condizioni di esercizio transitorio, eseguendo delle simulazioni idrauliche per la verifica dei fenomeni transitori all'interno della galleria di derivazione e di scarico.

I risultati ottenuti, in termini generali, dimostrano che il sistema idraulico risulta compatibile con l'installazione del nuovo gruppo e correttamente dimensionato dal punto di vista idraulico e tale da favorire lo smorzamento delle oscillazioni di massa durante le manovre ipotizzate.

Giubiasco, 10 maggio 2022

Lombardi SA

JV/ViM

## **ALLEGATO A**

SCHEDA TECNICA RENDIMENTO GR.1 [10]



