

# “FAVAZZINA”

## Impianto di accumulo idroelettrico mediante pompaggio ad alta flessibilità

Comune di Scilla (RC)

### COMMITTENTE



### PROGETTAZIONE

STRATEGIES FOR WATER



Progettisti: Ing. Luigi Lorenzo Papetti

## Relazione idraulica



REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
0	PRIMA EMISSIONE	28/04/2023	E. Marchesi	P. Macchi	L. Papetti
Codice commessa: 1422		Codifica documento: 1422-A-FN-R-05-0			

## INDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>DIMENSIONAMENTO DELL'OPERA DI PRESA E RESTITUZIONE DI VALLE</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>DIMENSIONAMENTO DELL'OPERA DI PRESA E RESTITUZIONE PRESSO IL BACINO DI MONTE</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>DIMENSIONAMENTO DEL POZZO PIEZOMETRICO</b>	<b>5</b>
4.1	Premessa	5
4.2	Criterio di stabilità di Thoma	6
4.3	Criterio di contenimento del pelo libero	6
<b>5</b>	<b>ANALISI DEI TRANSITORI DI MOTO VARIO</b>	<b>7</b>
5.1	Descrizione del fenomeno	7
5.2	Modello idraulico e scenari	7
5.3	Risultati degli scenari	10
5.3.1	Scenario G1	11
5.3.2	Scenario G2	12
5.3.3	Scenario GX	13
5.3.4	Scenario GP	14
5.3.5	Scenario P1	15
5.3.6	Scenario P2	16
5.3.7	Scenario PX	17
5.3.8	Scenario PG	18
<b>5.4</b>	<b>CONCLUSIONI</b>	<b>19</b>
<b>6</b>	<b>DIMENSIONAMENTO DEL BACINO DI MONTE</b>	<b>20</b>
6.1	Determinazione del franco netto minimo da normativa	20
6.2	Determinazione della quota di massimo invaso	21
6.3	Soluzione adottata e verifica	21
<b>7</b>	<b>CALCOLO DELLA PORTATA MASSIMA DELLO SFIORATORE DI SUPERFICIE</b>	<b>22</b>
<b>8</b>	<b>STIMA DELLE PERDITE PER EVAPORAZIONE DAL BACINO DI MONTE</b>	<b>22</b>

## 1 INTRODUZIONE

Nella presente relazione vengono sintetizzate le analisi svolte durante il dimensionamento idraulico delle principali opere che costituiscono l'impianto di pompaggio in progetto.

## 2 DIMENSIONAMENTO DELL'OPERA DI PRESA E RESTITUZIONE DI VALLE

L'opera di presa e restituzione è costituita da un canale di calcestruzzo armato ad andamento orizzontale, munito di griglia a protezione dell'imbocco, raccordato al pozzo paratoie. Presso il pozzo paratoie è prevista un'area netta di transito dell'acqua di 12,60 m<sup>2</sup>. Il dimensionamento della sezione di imbocco è stato effettuato in maniera tale che la velocità media dell'acqua, sia in entrata che in uscita, sia sempre inferiore a 1 m/s. Il superamento di tale velocità si rivela spesso causa di eccessive perdite di carico, trasporto ed accumulo di detriti che possono intasare le griglie, o di pericolose vibrazioni capaci di indurre danni gravi alle stesse.

Si prevede che attraverso l'opera di presa possa transitare una portata massima di circa 47 m<sup>3</sup>/s.

È essenziale valutare la sommergenza dell'opera di presa e restituzione in modo da evitare la generazione di vortici, i quali potrebbero danneggiare per cavitazione le componenti meccaniche installate e limitare la portata effettivamente prelevabile dagli invasi. In letteratura sono proposti due diversi approcci, basati sui test svolti da Gordon (1970) e Hacker (1981), in funzione dal valore del numero di Froude ( $Fr$ ), i quali consentono di calcolare il rapporto tra il diametro della condotta e la sommergenza minima che questa deve presentare.

Per calcolare la sommergenza sono quindi state utilizzate le seguenti formule:

Se  $Fr \leq 0,25$ , allora  $1,0 \leq h/D \leq 1,5$

Se  $Fr > 0,25$ , allora  $h/D = 0,50 + 2 \cdot Fr$

quindi:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot D}}$$

in cui:

$v = 3,39$  m/s = velocità media dell'acqua

$D = 4,2$  m = diametro della galleria di aspirazione e scarico

con i valori appena riportati risulta:

$$Fr = 0,53$$

$$h = (0,5 + 2Fr) \cdot D = 6,54 \text{ m}$$

Durante la progettazione delle opere idrauliche si è considerato un valore pari a  $h = 7$  m. Per considerazioni idrodinamiche di maggiore dettaglio si rimanda al capitolo 9.3 dello *Studio Meteomarinò e Valutazioni tecniche sulle soluzioni adottabili sull'opera di presa a mare* (doc. ref. 1422-B-SA-R-01-0).

### 3 DIMENSIONAMENTO DELL'OPERA DI PRESA E RESTITUZIONE PRESSO IL BACINO DI MONTE

L'opera di presa e restituzione a calice è costituita da una soglia di forma circolare (Figura 1), che convoglia le acque all'interno di una struttura verticale di raggio interno variabile; tale struttura è raccordata, tramite una curva ad angolo retto, alle biforcazioni che alimentano i gruppi ternari.

L'opera di presa deve sempre funzionare sotto battente, al fine di limitare i fenomeni di intrusione di aria e di formazione di vortici (che sollecitano la struttura). A tal fine, è necessario individuare la sommergenza minima, ossia un'altezza di acqua che deve essere presente al di sopra della soglia sfiorante affinché venga inibito il funzionamento a stramazzo. La sommergenza minima, che è funzione della portata, coincide con il battente idrico sul ciglio in condizioni di funzionamento a stramazzo nel caso in cui venga derivata la portata massima di progetto, ossia circa 47 m<sup>3</sup>/s; questo valore può essere ricavato sfruttando la seguente legge di deflusso a stramazzo:

$$Q_{str} = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \mu \cdot h_{str}^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{2 \cdot g}$$

In cui:

$Q_{str}$  = portata di riferimento = 47 m<sup>3</sup>/s

$R$  = raggio in sommità

$h_{str}$  = battente idrico in condizioni di funzionamento a stramazzo, per la portata  $Q_{str}$

$\mu$  = coefficiente di efflusso, valutabile secondo la seguente espressione (Lazzari, 1959):

$$\mu = 0,371 \cdot \left( \frac{R + x_0}{h + y_0} \right)^{0,05}$$

In cui  $x_0$  e  $y_0$  rappresentano due parametri geometrici dell'imbocco, che possono essere determinati sfruttando le formule sperimentali di Lazzari:

$$\begin{cases} x_0 = 0,144 \cdot (h + y_0) + 0,011 \cdot (R + x_0) \\ y_0 = 0,055 \cdot (h + y_0) + \frac{0,03 \cdot (h + y_0)^2}{R + x_0} \end{cases}$$

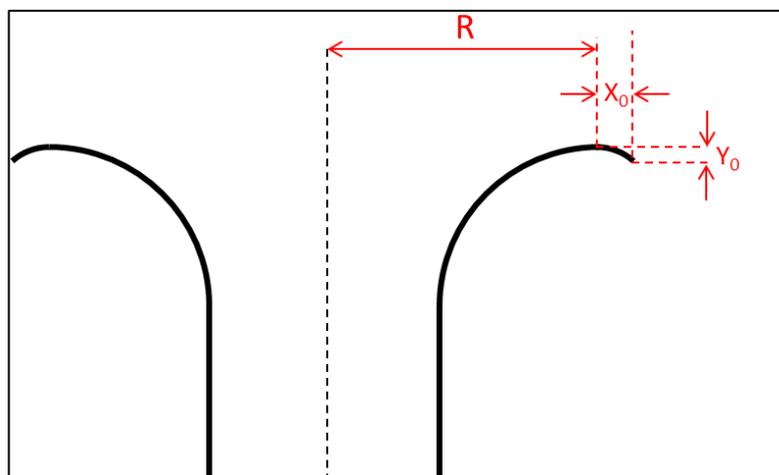


Figura 1 - Schema geometrico dell'imbocco dell'opera di presa e restituzione a calice

La validità delle formule di Lazzari sussiste se vale quanto segue:

$$0,1 \leq \left( \frac{h + y_0}{R + x_0} \right) \leq 0,5$$

Ipotizzando di avere un ciglio di raggio di 4 m, si ottengono i valori riportati in Tabella 1.

Grandezza	Valore	Unità di misura
$Q_{\text{stramazzo}}$	47	m <sup>3</sup> /s
R	4	m
$x_0$	0,36	m
$y_0$	0,15	m
$\mu$	0,384	-
$(h+y_0)/(R+x_0)$	0,49	-
$h_{\text{str}}$	1,06	m

Tabella 1 - Caratteristiche geometriche dell'opera di presa

Dai calcoli effettuati risulta che la sommergenza minima da considerare è pari a 1,06 m.

## 4 DIMENSIONAMENTO DEL POZZO PIEZOMETRICO

### 4.1 PREMESSA

Il pozzo piezometrico è previsto al fine di migliorare il comportamento dell'impianto nel caso di moto vario per:

- limitare le sovrappressioni causate dal colpo d'ariete in tutto il canale di carico (specialmente sul tratto che dal pozzo piezometrico raggiunge l'opera di presa e restituzione di valle);
- permettere una migliore regolazione generale dell'impianto.

La posizione scelta è il risultato di un compromesso tra il vincolo per il quale il pozzo debba comprendere la quota del livello del mare e l'opportunità di collocare il pozzo piezometrico quanto più possibile in prossimità della centrale (in modo da estendere il più possibile la porzione di canale di scarico sottoposta a minori sovrappressioni causate dal colpo d'ariete).

La tipologia di pozzo piezometrico adottata per il dimensionamento è quella del pozzo cilindrico con strozzatura alla base. Rispetto alla soluzione più semplice, ossia il pozzo piezometrico cilindrico a sezione costante, questa architettura permette, a parità di condizioni di sollecitazione, di ridurre le ampiezze di oscillazione del pelo libero dell'acqua in esso contenuto.

I criteri che regolano il dimensionamento del pozzo sono essenzialmente tre:

- criterio di stabilità di Thoma
- criterio di contenimento del pelo libero

L'applicazione di questi criteri ha condotto a un pozzo piezometrico di diametro di 10 m, alto 70 m (dalla quota di 35 m s.l.m. alla quota di -35 m s.l.m.), con strozzatura di 1,80 m.

## 4.2 CRITERIO DI STABILITÀ DI THOMA

Con l'introduzione di un pozzo piezometrico lungo il sistema di condotte che collegano l'invaso alle macchine idrauliche della centrale, l'impianto è soggetto a fenomeni di oscillazioni di massa.

Nel caso di un piccolo decremento della quota del pelo idrico all'interno del pozzo piezometrico, aumenterebbe il salto dell'impianto, e dunque la potenza generata. Un aumento della potenza tende ad accelerare le turbine; in tal caso subentra il regolatore di velocità che, con l'obiettivo di riportare la potenza a quella desiderata, interviene riducendo la portata. Quest'azione potrebbe pertanto comportare un ulteriore abbassamento del pelo libero all'interno del pozzo, tanto più intenso quanto più piccola è la sezione del pozzo.

Il criterio di Thoma<sup>1</sup>, permette di individuare la sezione minima che deve essere garantita nel pozzo piezometrico affinché vi sia stabilità. Tale metodo è stato introdotto nel 1910 ed è tutt'ora considerato il riferimento per questo tipo di dimensionamento.

Introducendo un fattore di sicurezza pari a 1,5 è stato possibile ricavare il diametro necessario a soddisfare il criterio di Thoma, pari a  $D_{Thoma} = 4,29 m$ . Tuttavia, è stato deciso di adottare come diametro un valore maggiore, pari a  $D_{pozzo} = 10,00 m$ , in modo tale da limitare le oscillazioni del pelo libero, che consente di avere un pozzo piezometrico meno alto e conseguentemente una più breve galleria d'accesso alla sua sommità.

## 4.3 CRITERIO DI CONTENIMENTO DEL PELO LIBERO

Le variazioni subite dal livello dall'acqua in seguito ad eventi di moto vario sono state analizzate al § 5. Dai risultati emersi da questa analisi, possono dunque essere estrapolati i valori delle quote massime e minime raggiunte dall'acqua all'interno del pozzo piezometrico: la quota minima è pari a -31,55 m s.l.m. e la quota massima è 31,18 m s.l.m. Il pozzo è verificato in quanto tali livelli sono contenuti tra la quota minima del pozzo (- 35 m s.l.m.) e quella massima (35 m s.l.m.).

---

<sup>1</sup> Thoma, D., (1910), *Zur Theorie des Wasserschlosses bei Selbsttaetig Geregeltten Turbinenanlagen*, Oldenburg, Munchen, Germany.

## 5 ANALISI DEI TRANSITORI DI MOTO VARIO

### 5.1 DESCRIZIONE DEL FENOMENO

Gli eventi di moto vario delle correnti in pressione di un impianto sono generati dalla variazione di portata fluente in una determinata sezione del sistema di condotte. Questi fenomeni, detti transitori di moto, sono tipicamente conseguenti all'entrata in funzione di un organo di regolazione, il quale, attivandosi, va a modificare il regime stazionario che si era precedentemente instaurato. Aspetto caratterizzante dei transitori di moto è il continuo variare di quegli elementi, carichi e grandezze che descrivono la corrente del fluido: la portata, la pressione e la velocità.

In condizioni di normale esercizio le operazioni di manovra degli organi regolatori, così come l'avvio o spegnimento delle macchine idrauliche, sono realizzate con sequenze e tempistiche studiate al fine di controllare i transitori sopra introdotti e le loro conseguenze. In condizioni di manovra brusche o d'emergenza invece è necessario aspettarsi un'importante variazione nelle componenti che contribuiscono a descrivere il carico totale, e quindi l'energia del flusso.

All'interno delle tubazioni connesse alla sezione dove si è verificata la variazione d'efflusso si genera una rapida e continua riflessione delle onde di pressione. Queste onde determinano una serie di bruschi e violenti colpi contro le pareti della condotta stessa e, a livello idraulico, si modificano in ogni sezione la pressione e la velocità dell'acqua, grandezze da cui dipendono il carico piezometrico e totale.

Il fenomeno appena descritto subisce degli smorzamenti, solitamente abbastanza rapidi, dettati dalle caratteristiche della condotta entro la quale esso si verifica, oltre che naturalmente da quelli introdotti dal continuo passaggio da energia cinetica a pressione. È quindi corretto aspettarsi che gli istanti più critici e pericolosi siano quelli appena successivi alla variazione del flusso.

Tutte le considerazioni appena introdotte in caso di brusco arresto del flusso valgono anche in caso di rapido avvio di una macchina idraulica, con le sole differenze date dal segno delle grandezze in gioco.

### 5.2 MODELLO IDRAULICO E SCENARI

L'analisi è stata condotta utilizzando il software WHAMO (*Water Hammer And Mass Oscillation*) 3.0 distribuito da USACE (*U.S. Army Corps of Engineers*).

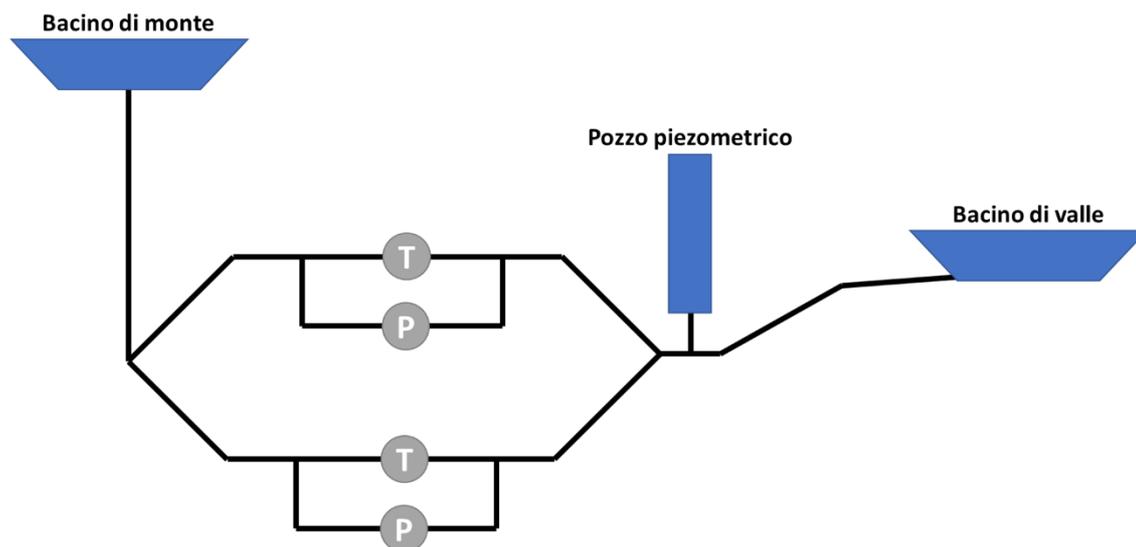
WHAMO è in grado di modellare le reti di trasporto di fluidi e gli elementi che le compongono, quali condotte e diramazioni, serbatoi, pozzi piezometrici e organi elettromeccanici.

Attraverso la risoluzione delle equazioni governanti il moto (conservazione della quantità di moto e continuità) WHAMO determina le variazioni nel tempo (transitori) di portata e carico piezometrico, generate dalla variazione delle condizioni iniziali di operatività di organi elettromeccanici come valvole, turbine e pompe. Per queste ragioni WHAMO è largamente usato per l'analisi di impianti idroelettrici e sistemi di pompaggio.

La rete sarà quindi modellata grazie ad elementi come:

- Nodi, i quali separano tratti di condotta aventi diverse caratteristiche in termini di diametro, spessore, pendenza e materiale.
- Livellette (*pipes*), le quali rappresentano i tratti di condotta tra due nodi aventi caratteristiche comuni.
- *Surge tank*, rappresentante il pozzo piezometrico.
- *Boundary conditions*, utilizzate per fissare i livelli di monte e valle dei bacini, questi ipotizzati abbastanza grandi da non subire variazioni di livello al variare della portata transitante nelle condotte.
- *Flow boundary conditions*, descrittive le condizioni di moto e flusso relative alle macchine idrauliche; sono poste in corrispondenza di pompe e turbine, ed espresse come portata fluente rispetto al tempo.

In Figura 2 è riportata la schematizzazione (non in scala) dell'impianto di pompaggio, al fine di identificare graficamente la posizione di nodi, livellette e dei vari elementi principali che caratterizzano il sistema.



*Figura 2 - Schematizzazione dell'impianto (in cui T=turbina e P=pompa). Lo schema non rappresenta la reale distribuzione spaziale (quote e distanze) dei componenti dell'impianto, ma solamente i loro rapporti reciproci.*

La modellazione dell'impianto di Favazzina simula il comportamento delle vie d'acqua così come descritte al § 4.3 della *Relazione Tecnica Particolareggiata* (doc. ref 1422-A-FN-R-01-0).

Le perdite di carico descritte dal sistema sono quelle distribuite, ovvero dipendenti da portata fluente, materiali e dimensioni della condotta. Sono poi stati introdotti degli elementi *ad-hoc* per introdurre le perdite concentrate, presenti ad esempio nelle giunzioni delle condotte o nei cambi di diametro.

Sono stati modellati gli scenari seguenti (Tabella 2) che descrivono le condizioni più gravose per le oscillazioni all'interno del pozzo piezometrico. Si fa presente che, a favore di sicurezza, è stata considerata un'escursione massima del livello del mare di +/-50 cm.

Scenario	Manovra	Quota bacino monte	Quota mare
<b>G1</b>	da impianto fermo a massima generazione	minima regolazione 615 m s.l.m.	alta marea 0,50 m s.l.m.
<b>G2</b>	da massima generazione a impianto fermo	massima regolazione 631 m s.l.m.	bassa marea -0,50 m s.l.m.
<b>GX</b>	da impianto fermo a massima generazione, seguito da arresto nel momento più sfavorevole	massima regolazione 631 m s.l.m.	bassa marea -0,50 m s.l.m.
<b>GP</b>	da massima generazione a massimo pompaggio	massima regolazione 631 m s.l.m.	bassa marea -0,50 m s.l.m.
<b>P1</b>	da impianto fermo a massimo pompaggio	massima regolazione 631 m s.l.m.	bassa marea -0,50 m s.l.m.
<b>P2</b>	da massimo pompaggio a impianto fermo	minima regolazione 615, m s.l.m.	alta marea 0,50 m s.l.m.
<b>PX</b>	da impianto fermo a massimo pompaggio, seguito da arresto nel momento più sfavorevole	minima regolazione 615 m s.l.m.	alta marea 0,50 m s.l.m.
<b>PG</b>	da massimo pompaggio a massima generazione	minima regolazione 615 m s.l.m.	alta marea 0,50 m s.l.m.

Tabella 2 – Scenari modellati

Di seguito si riportano le tempistiche utilizzate in WHAMO per la rapida manovra degli organi idraulici di valle (pompe e turbine di Figura 2) responsabili del transitorio di moto, come riportate in *Fisher et al 2012*<sup>2</sup>:

- avvio turbine e passaggio da impianto fermo a massima generazione 90 s
- passaggio da impianto a massima generazione a impianto fermo 15 s
- avvio pompe e passaggio da impianto fermo a massimo pompaggio 85 s
- passaggio da impianto a massimo pompaggio a impianto fermo 15 s
- passaggio da massima generazione a massimo pompaggio 45 s
- passaggio da massimo pompaggio a massima generazione 60 s

<sup>2</sup> Fisher, R.K., J. Koutnik, L. Meier, V. Loose, K. Engels, and T. Beyer, "A Comparison of Advanced Pumped Storage Equipment Drivers in the US and Europe," HydroVision International, 2012.

### 5.3 RISULTATI DEGLI SCENARI

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti per i diversi scenari, descrivendo l'oscillazione del livello dell'acqua all'interno del pozzo piezometrico.

Per quanto riguarda il pozzo piezometrico, si deve verificare che l'oscillazione dei livelli d'acqua sia compresa tra la sua quota minima e massima (scelte a seguito dell'applicazione del criterio di contenimento del pelo libero):

- limite inferiore – quota base pozzo: -35,00 m s.l.m.
- limite superiore – quota sommità pozzo: 35,00 m s.l.m.

Si sottolinea come gli scenari siano pensati per descrivere "condizioni estreme" di utilizzo dell'impianto, che una "normale gestione", pianificata ed analizzata nei dettagli, consentirà di evitare. Verificando che anche in queste condizioni risulti comunque assicurato un corretto funzionamento del pozzo piezometrico, ci si pone in condizione di sicurezza.

### 5.3.1 SCENARIO G1

Lo scenario G1 modella l'impianto in condizioni di avvio (in 90 s) a massimo carico delle due turbine, partendo da una condizione di minima regolazione nel bacino di monte (615 m s.l.m.) e di alta marea (0,50 m s.l.m.).

L'introduzione di questo scenario è finalizzata a verificare che l'oscillazione indotta dal riempimento iniziale nel pozzo piezometrico non comporti il raggiungimento del livello massimo del pozzo.

Il risultato della modellazione, rappresentato in Figura 3, accerta come l'oscillazione di livello dell'acqua all'interno del pozzo sia sempre compresa tra la quota massima (sommità) e minima (base).

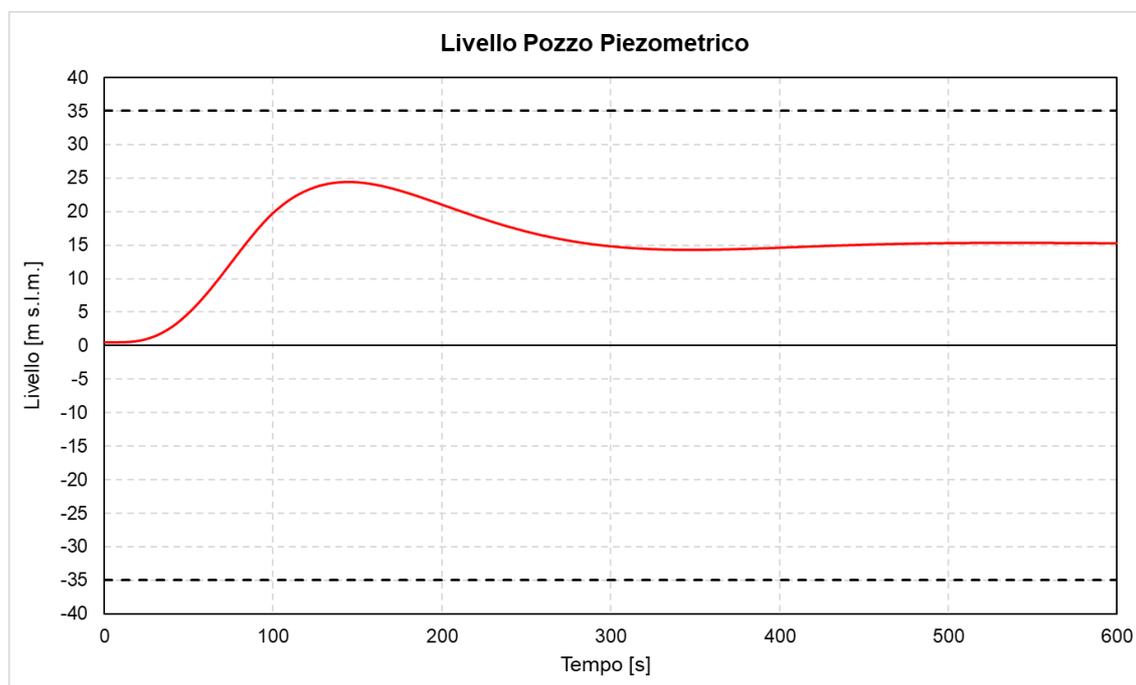


Figura 3 – Scenario G1 – Livello nel pozzo piezometrico

### 5.3.2 SCENARIO G2

Lo scenario G2 verifica il comportamento dell'impianto conseguente al rapido arresto (in 15 s) delle due turbine in condizioni di massimo carico. Il livello del bacino di monte è di massima regolazione (631 m s.l.m.), quello del mare è quello assunto in condizione di bassa marea (-0,50 m s.l.m.).

Questo scenario ha lo scopo di verificare che in condizioni iniziali di "basso livello" del pozzo piezometrico (conseguente alla condizione di bassa marea) l'arresto delle turbine non porti allo svuotamento del pozzo piezometrico.

Il risultato della modellazione, rappresentato in Figura 4, accerta come l'oscillazione di livello dell'acqua all'interno del pozzo sia sempre compresa tra la quota massima (sommità) e minima (base).

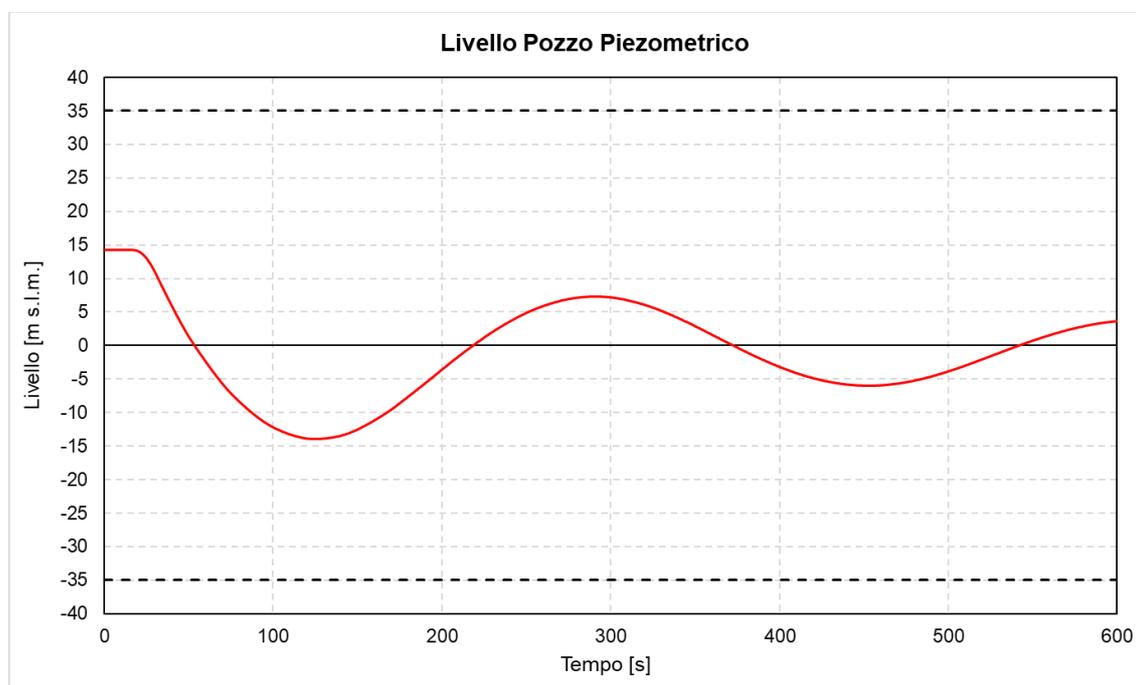


Figura 4 – Scenario G2 - Livello nel pozzo piezometrico

### 5.3.3 SCENARIO GX

Lo scenario GX verifica il comportamento dell'impianto conseguente all'avvio a massima potenza in generazione, seguito da un rapido arresto (in 15 s) delle due turbine nel momento più sfavorevole, ossia nel momento in cui la portata in uscita verso il mare raggiunge il valore massimo: in tale situazione, per il bilancio di massa, il volume d'acqua in uscita verso il mare sarà interamente assorbito dal pozzo piezometrico. Il livello del bacino di monte è di massima regolazione (631 m s.l.m.), quello del mare è quello assunto in condizione di bassa marea (-0,50 m s.l.m.).

Questo scenario ha lo scopo di verificare che in condizioni iniziali di "basso livello" del pozzo piezometrico (conseguente alla condizione di bassa marea) l'arresto delle turbine non porti allo svuotamento del pozzo piezometrico.

Il risultato della modellazione, rappresentato in Figura 5, verifica come l'oscillazione di livello dell'acqua all'interno del pozzo sia sempre compresa tra la quota massima (sommità) e minima (base).

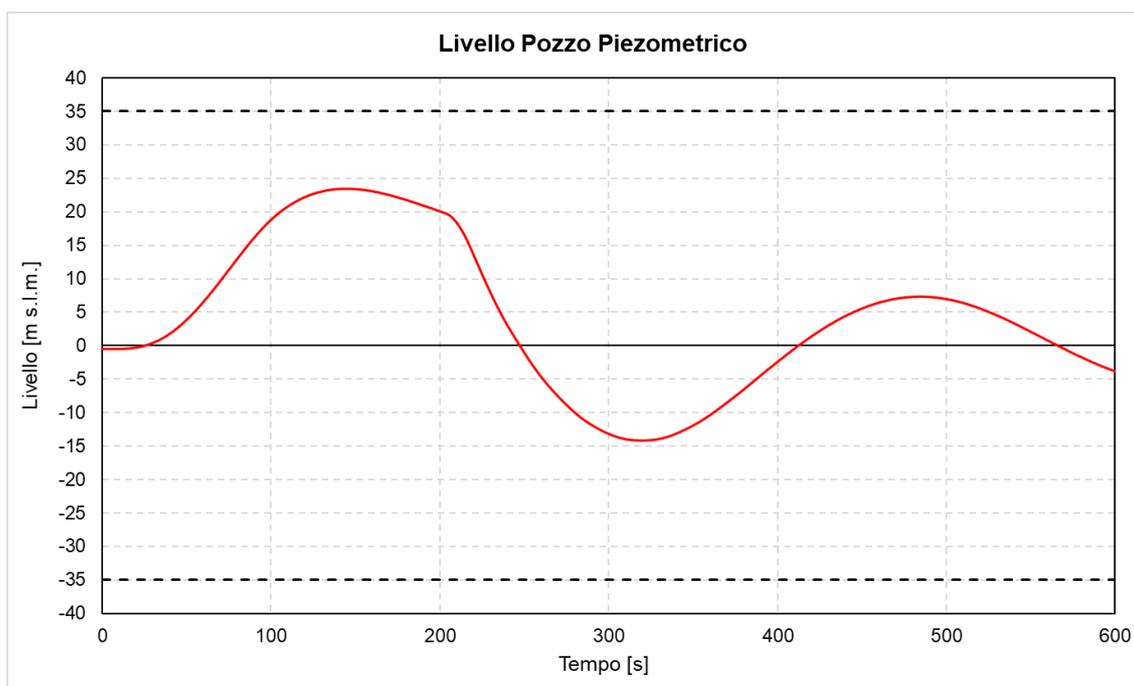


Figura 5 – Scenario GX - Livello nel pozzo piezometrico

### 5.3.4 SCENARIO GP

Lo scenario GP verifica il comportamento dell'impianto a seguito del passaggio (in 45 s) da massima generazione a massimo pompaggio.

Il livello del bacino di monte è di massima regolazione (631 m s.l.m.), quello del mare è quello assunto in condizione di bassa marea (-0,50 m s.l.m.).

Questo scenario ha lo scopo di verificare che in condizioni iniziali di "basso livello" del pozzo piezometrico (conseguente alla condizione di bassa marea) il passaggio da massima generazione a massimo pompaggio non porti allo svuotamento del pozzo piezometrico.

Il risultato della modellazione, rappresentato in Figura 6, verifica come l'oscillazione di livello dell'acqua all'interno del pozzo sia sempre compresa tra la quota massima (sommità) e minima (base).

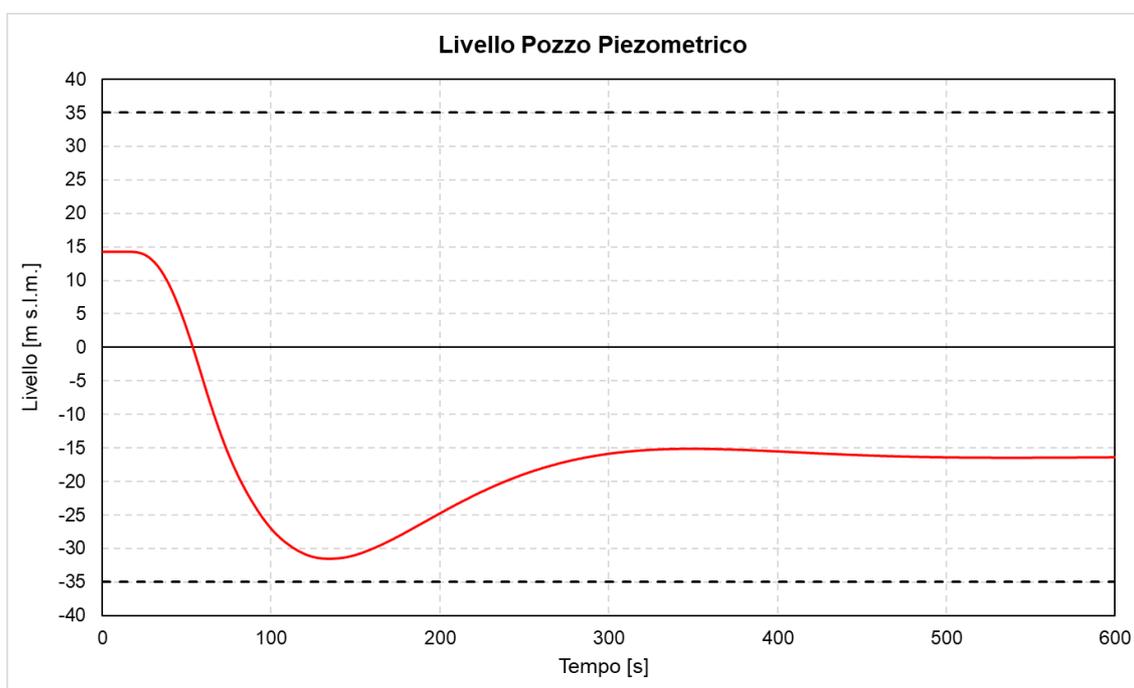


Figura 6 - Scenario GP - Livello nel pozzo piezometrico

### 5.3.5 SCENARIO P1

Lo scenario P1 verifica il comportamento dell'impianto conseguente all'avvio (in 85 s) delle due pompe in condizioni di massimo carico.

Il livello del bacino di monte è di massima regolazione (631 m s.l.m.), quello del mare è quello assunto in condizione di bassa marea (-0,50 m s.l.m.).

Questo scenario ha lo scopo di verificare che in condizioni iniziali di "basso livello" del pozzo piezometrico (conseguente alla condizione di bassa marea) l'avvio delle pompe non porti allo svuotamento del pozzo piezometrico.

Il risultato della modellazione, rappresentato in Figura 7, accerta come l'oscillazione di livello dell'acqua all'interno del pozzo sia sempre compresa tra la quota massima (sommità) e minima (base).

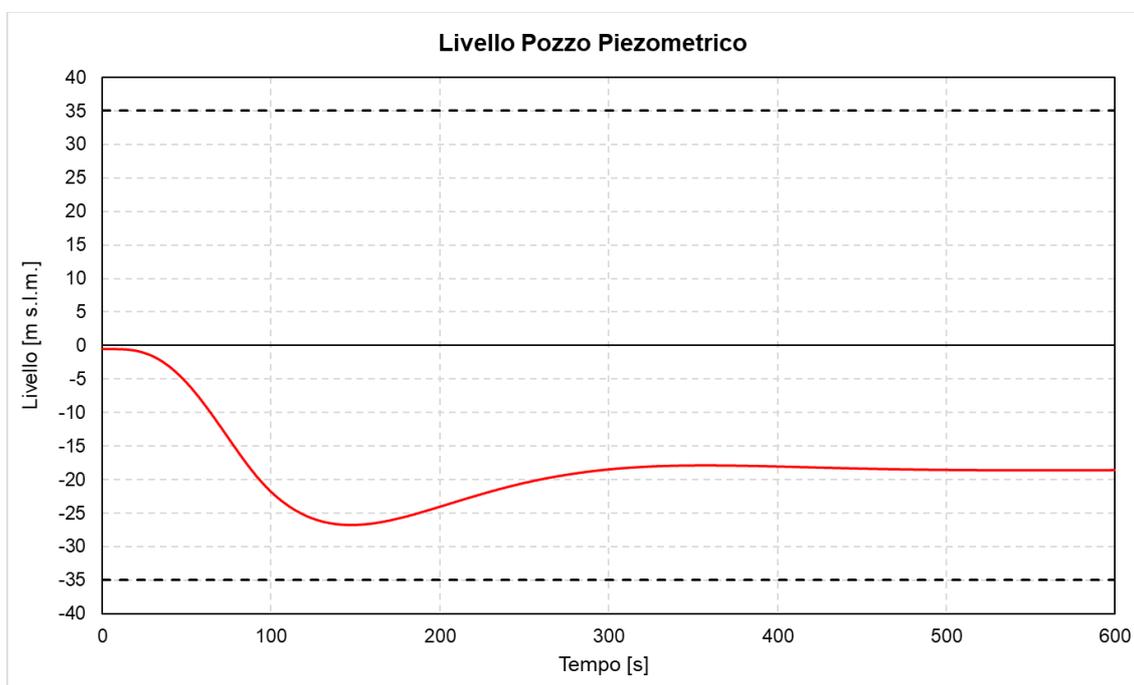


Figura 7 – Scenario P1 - Livello nel pozzo piezometrico

### 5.3.6 SCENARIO P2

Lo scenario P2 verifica il comportamento dell'impianto conseguente al blocco (in 15 s) delle due pompe in condizioni di massimo carico.

Il livello del bacino di monte è di minima regolazione (615 m s.l.m.), quello del mare è quello assunto in condizione di alta marea (0,50 m s.l.m.).

Questo scenario ha lo scopo di verificare che in condizioni iniziali di "alto" del pozzo piezometrico (conseguente alla condizione di alta marea) l'arresto delle pompe non porti al riempimento del pozzo piezometrico.

Il risultato della modellazione, rappresentato in Figura 8, accerta come l'oscillazione di livello dell'acqua all'interno del pozzo sia sempre compresa tra la quota massima (sommità) e minima (base).

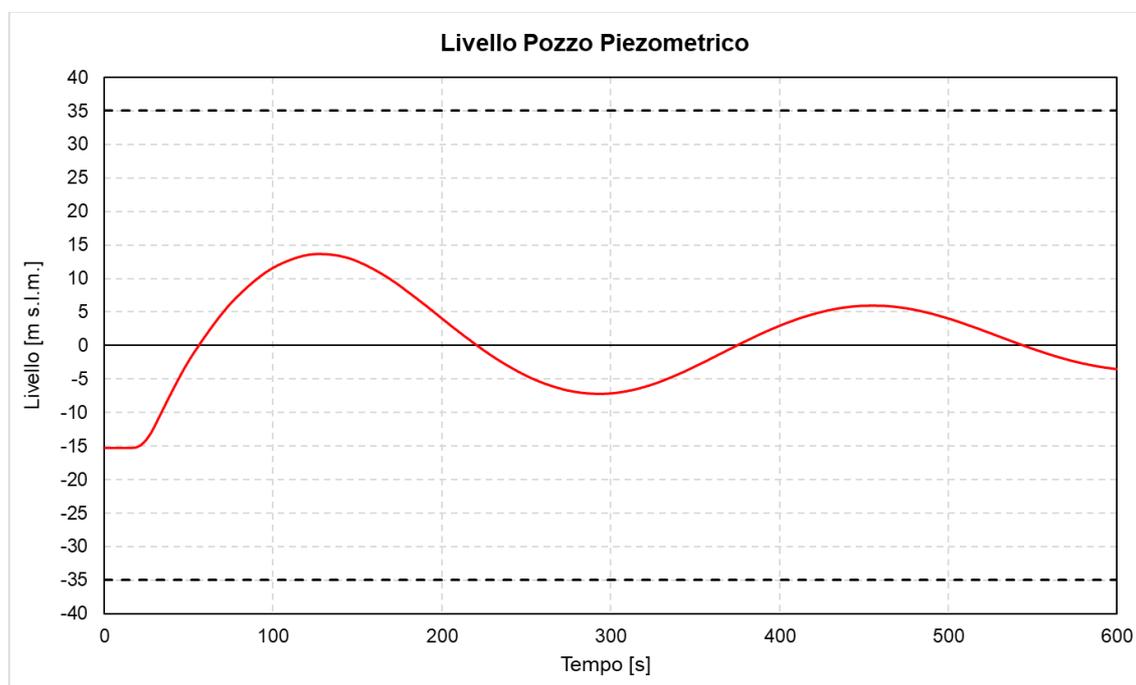


Figura 8 - Scenario P2 - Livello nel pozzo piezometrico

### 5.3.7 SCENARIO PX

Lo scenario PX verifica il comportamento dell'impianto conseguente all'avvio a massima potenza in pompaggio, seguito da un rapido arresto (in 15 s) delle due pompe nel momento più sfavorevole, ossia nel momento in cui la portata in ingresso dal mare raggiunge il valore massimo: in tale situazione, per il bilancio di massa, il volume d'acqua in ingresso da mare sarà interamente assorbito dal pozzo piezometrico. Il livello del bacino di monte è di minima regolazione (615 m s.l.m.), quello del mare è quello assunto in condizione di alta marea (+0,50 m s.l.m.).

Questo scenario ha lo scopo di verificare che in condizioni iniziali di "alto livello" del pozzo piezometrico (conseguente alla condizione di alta marea) l'arresto delle pompe non porti al riempimento del pozzo piezometrico.

Il risultato della modellazione, rappresentato in Figura 9, verifica come l'oscillazione di livello dell'acqua all'interno del pozzo sia sempre compresa tra la quota massima (sommità) e minima (base).

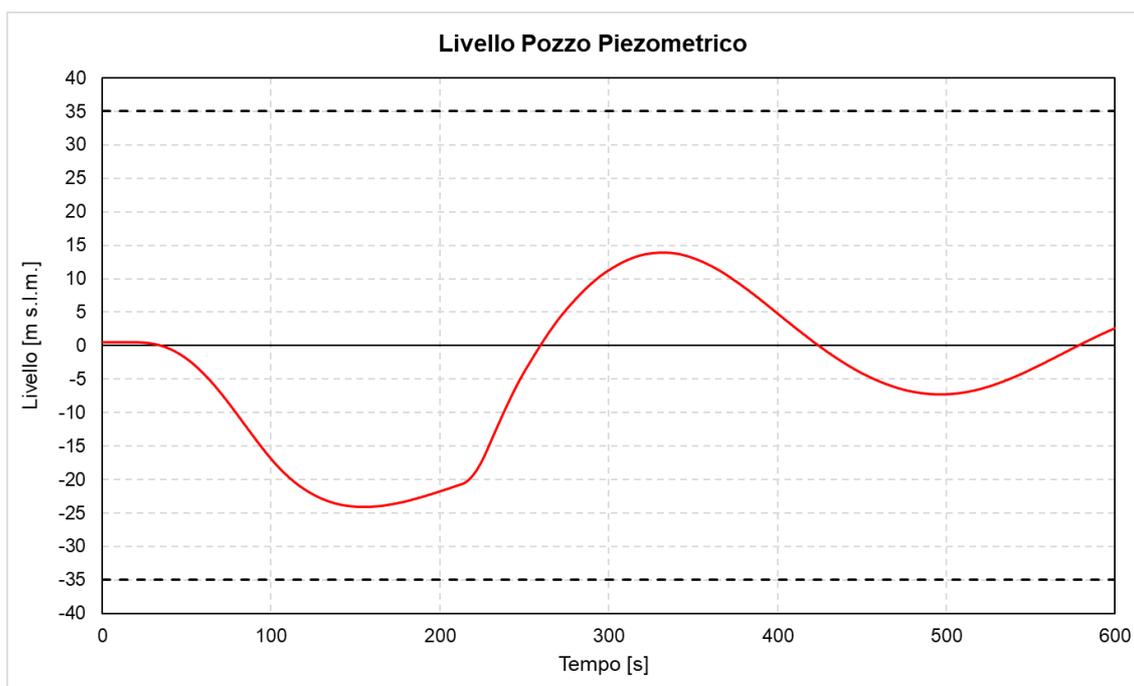


Figura 9 – Scenario PX - Livello nel pozzo piezometrico

### 5.3.8 SCENARIO PG

Lo scenario PG verifica il comportamento dell'impianto a seguito del passaggio (in 60 s) da massimo pompaggio a massimo carico a generazione a massimo carico.

Il livello del bacino di monte è di minima regolazione (615 m s.l.m.), quello del mare è quello assunto in condizione di alta marea (+0,50 m s.l.m.).

Questo scenario ha lo scopo di verificare che l'oscillazione indotta dal riempimento iniziale nel pozzo piezometrico non comporti il raggiungimento del livello massimo del pozzo.

Il risultato della modellazione rappresentato in Figura 10 verifica come l'oscillazione di livello dell'acqua all'interno del pozzo sia sempre compresa tra la quota massima (sommità) e minima (base).

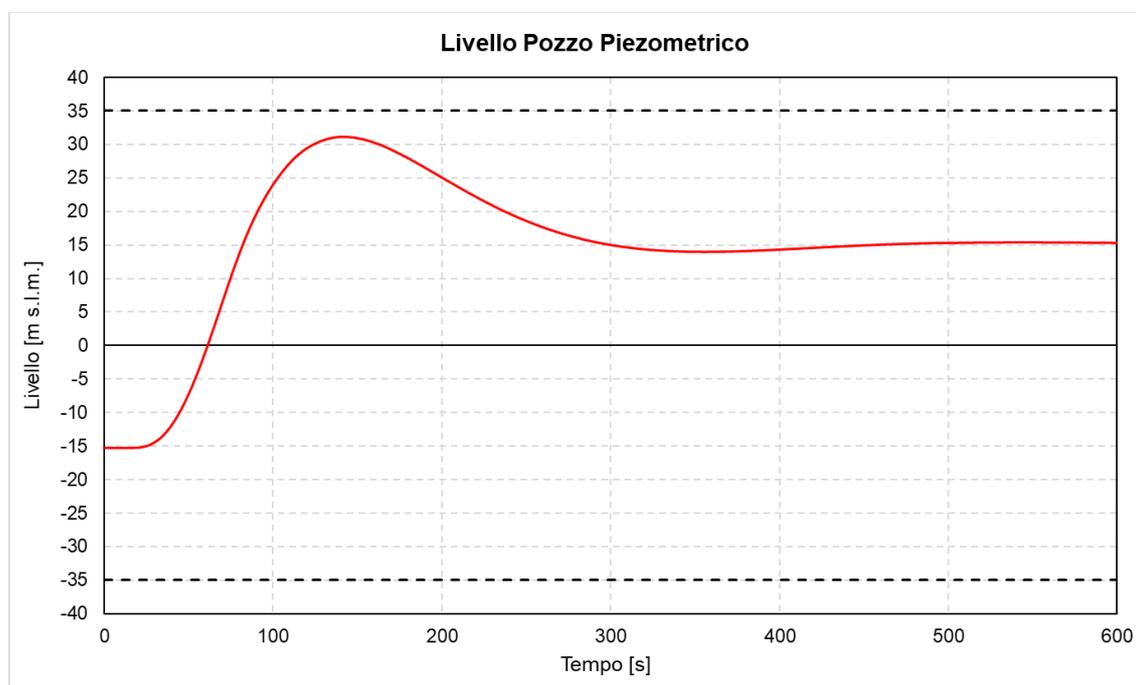


Figura 10 - Scenario PG - Livello nel pozzo piezometrico

#### 5.4 CONCLUSIONI

In Tabella 3 sono riassunti, per ogni scenario, i risultati in termini di livelli massimi e minimi raggiunti nel pozzo piezometrico.

Scenario	Livello minimo pozzo [m s.l.m.]	Livello massimo pozzo [m s.l.m.]
G1	0,49	24,45
G2	-13,96	14,23
GX	-14,17	23,44
GP	<u>-31,55</u>	14,23
P1	-26,82	-0,49
P2	-15,33	13,69
PX	-24,08	13,87
PG	-15,33	<u>31,18</u>

*Tabella 3 – Risultati riassuntivi dell'analisi dei transitori di moto vario*

In conclusione, è possibile affermare che il pozzo piezometrico è verificato in quanto il livello raggiunto al suo interno è sempre compreso tra la base del pozzo (-35,00 m s.l.m.) e la sommità del pozzo (35,00 m s.l.m.).

## 6 DIMENSIONAMENTO DEL BACINO DI MONTE

### 6.1 DETERMINAZIONE DEL FRANCO NETTO MINIMO DA NORMATIVA

Il rilevato che costituisce il bacino di monte è classificabile come "grande diga" in quanto determina un volume d'invaso superiore al milione di metri cubi. Per questa categoria di dighe, il D.M. 26/06/2014 prevede delle norme relative al franco netto minimo, definito in questo modo: "... differenza tra la quota del piano di coronamento e quella di massimo invaso incrementata della semialtezza della maggiore tra l'onda generata dal vento ovvero quella di massima regolazione incrementata della semialtezza dell'onda da sisma di progetto, calcolate come all'art. C2. Per il calcolo del franco netto dovranno essere, inoltre, considerati i fenomeni di interazione tra moto ondoso e diga: "riflessione" e "risalita" (run-up). Per queste due ultime componenti, ai fini del mantenimento del franco previsto, si potrà anche ricorrere ad un idoneo muro paraonde, di altezza non superiore a 1,4 m ...".

Sinteticamente, nel caso di rilevati in terra il franco (inteso come dislivello tra quota di massimo invaso e quota del coronamento della diga) è definito come la somma dei contributi seguenti:

- contributo variabile in funzione dell'altezza del rilevato (1,5 m per dighe di altezza inferiore a 15 m; 3,5 m per dighe di altezza superiore o uguale a 90 m; per valori intermedi si ricorre all'interpolazione lineare).

L'altezza massima della diga è di 25 m, pertanto questo contributo è assunto pari a 1,767 m;

- contributo associato all'abbassamento del coronamento derivante dai cedimenti del terreno e del rilevato dopo il termine della costruzione, nonché quelli derivanti da azioni sismiche; questi non devono essere assunti inferiori a 0,5 cm per metro di altezza della diga.

In questa fase preliminare, si prende come riferimento il valore indicato, pertanto questo contributo è pari a  $0,005 \text{ m} \times 25 \text{ m} = 0,125 \text{ m}$ ;

- contributo associato alle onde da vento e da sisma; in mancanza di indagini più precise, il D.M. indica di assumere i valori della massima ampiezza delle onde generate nel serbatoio dal vento di velocità  $U$  (km/h) incrementati dalla risalita contro il paramento dello sbarramento, dati nella tabella seguente:

Velocità vento [km/h]	Ampiezza d'onda [m]									
	Fetch [km]									
	1	2	4	6	8	10	11	20	40	50
100	0.27	0.38	0.53	0.65	0.75	0.84	0.88	1.18	1.67	1.87
80	0.20	0.29	0.40	0.49	0.57	0.64	0.67	0.90	1.27	1.42
60	0.14	0.20	0.29	0.35	0.41	0.45	0.48	0.64	0.90	1.01
40	0.09	0.13	0.18	0.22	0.26	0.29	0.30	0.40	0.57	0.63
	run_up [m]									
	0.033	0.063	0.12	0.17	0.223	0.273	0.298	0.518	0.973	1.188



## 7 CALCOLO DELLA PORTATA MASSIMA DELLO SFIORATORE DI SUPERFICIE

Lo sfioratore di superficie è previsto lungo il lato sud-est del bacino, con soglia posta a 25 cm sopra la quota di massima regolazione (631 m s.l.m.), dunque a quota 631,25 m s.l.m.

Come riportato nella *Relazione Tecnica Particolareggiata* (doc. ref. 1422-A-FN-R-01-0), ci si attende il funzionamento di tale sfioratore solo in occorrenza di una concatenazione di eventi sfavorevoli in caso di un evento meteorico associato ad un tempo di ritorno di 3.000 anni; ad ogni modo, di seguito è calcolata la massima portata che ci si attende in uscita dallo sfioratore.

La formula utilizzata per il calcolo di tale portata è quella dello sfioratore Bazin:

$$Q = \mu \cdot L \cdot h_{sfioro} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_{sfioro}}$$

dove:

$Q$  [m<sup>3</sup>/s] = portata transitante dallo sfioratore di superficie

$L$  [m] = larghezza della luce dello sfioratore

$\mu$  [-] = coefficiente di efflusso

$h_{sfioro}$  [m] = battente d'acqua sopra la soglia sfiorante

La  $h_{sfioro}$  è pari a 120 mm, ottenuta come differenza tra 631,37 m s.l.m. (quota raggiungibile in occasione dell'evento di precipitazione citato al § 6.2) e 631,25 m s.l.m. (la quota della soglia dello sfioratore), trascurando quindi ogni effetto di laminazione che la presenza dello sfioratore stesso introdurrà e ipotizzando che non sia attivata la derivazione tramite l'impianto di pompaggio, il quale ridurrebbe il livello all'interno del bacino e conseguentemente la lama d'acqua sopra il ciglio dell'opera.

Il coefficiente di efflusso ha valore 0,385 (valido per sfioratori a larga soglia) mentre la larghezza  $L$  è scelta pari a 4 m.

Con i valori appena introdotti la portata sfiorata è  **$Q = 0,28$  m<sup>3</sup>/s.**

Come descritto al § 4.8 della *Relazione Tecnica Particolareggiata* (doc. ref. 1422-A-FN-R-01-0), si prevede la realizzazione di un opportuno sistema di convogliamento delle acque capace di smaltire in sicurezza questa modesta portata convogliandola a valle dei gruppi ternari (tramite una condotta avente diametro nominale di circa 350 mm, dotata di opportuni diaframmi). All'interno di questa condotta saranno anche convogliate le acque di drenaggio interne del bacino di monte, raccolte in un cunicolo di drenaggio posto alla base del paramento interno del bacino. Tale cunicolo sarà accessibile tramite un accesso posto nell'area nord-ovest del bacino.

## 8 STIMA DELLE PERDITE PER EVAPORAZIONE DAL BACINO DI MONTE

La stima delle perdite d'acqua per evaporazione dalla superficie di un bacino è argomento complicato e di difficile valutazione.

Come è intuibile, esso dipende da diversi fattori come temperatura di acqua e aria, umidità, irraggiamento, precipitazioni, presenza di venti e da altre variabili atmosferiche che, combinandosi con quelle sito-specifiche (come, ad esempio, la profondità del bacino), rendono quantomeno complicato calcolare un valore con alta affidabilità.

In letteratura sono presenti diverse formulazioni dell'evaporazione da bacino proposte da vari autori: Thornthwaite-Holzman, Meyer, Leather, Visentini, ecc. In questo paragrafo sarà sviluppato il calcolo seguendo due delle alternative proposte da Visentini le quali, soprattutto in Italia, hanno trovato significativo utilizzo ed applicazione.

I dati utilizzati in ingresso ai due metodi sono i seguenti:

- temperature medie mensili a Scilla, stimate come media tra le massime e minime mensili (dati ottenuti dal *National Centers for Environmental Information*)
- superficie occupata dall'acqua nel bacino di monte alla quota di massima regolazione: 98.000 m<sup>2</sup>
- superficie occupata dall'acqua nel bacino di monte alla quota di minima regolazione: 43.000 m<sup>2</sup>

Il primo dei due metodi consente di stimare l'evaporazione media mensile  $E_m$  partendo dalla relativa temperatura media mensile, tramite la formula:

$$E_{mensile} = 2,25 \cdot T_m^{1,5}$$

Si ottengono i risultati riportati in Tabella 4.

Mese	Temperature medie mensili [°C]	$E_{mensile}$ [mm/mese]
Gennaio	12.0	93.5
Febbraio	12.0	93.5
Marzo	14.0	117.9
Aprile	16.0	144.0
Maggio	19.0	186.3
Giugno	24.0	264.5
Luglio	27.0	315.7
Agosto	27.0	315.7
Settembre	24.0	264.5
Ottobre	21.0	216.5
Novembre	17.0	157.7
Dicembre	14.0	117.9
Media annua	18,9	190,6
Somma	-	2287,8 [mm/anno]

Tabella 4 - Temperature medie mensili ed evaporazione media mensile<sup>3</sup>

Moltiplicando il risultato di evaporazione annua ottenuto per la superficie del bacino di monte alla massima regolazione si ottiene la stima dell'evaporazione annua del bacino in esame:

$$Evap_{annua,1} = 2.287,8 \frac{\text{mm}}{\text{anno}} \cdot 98.000 \text{ m}^2 \approx 224.000 \frac{\text{m}^3}{\text{anno}} = 7,1 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

<sup>3</sup> I dati di temperature medie mensili provengono dal sito <https://it.weatherspark.com/>.

Ipotizzando invece di aver un bacino che per il 50% dell'anno è alla quota di massima regolazione mentre per il restante tempo è posto a quella di minima regolazione, si ottiene:

$$Evap_{annua,1} = 2.287,8 \frac{\text{mm}}{\text{anno}} \cdot \frac{98.000 + 43.000}{2} \text{ m}^2 \approx 161.000 \frac{\text{m}^3}{\text{anno}} = 5,1 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

Il secondo metodo di stima dell'evaporazione proposto da Visentini prevede l'utilizzo della temperatura media annua e di un coefficiente empirico (90 nel caso di specchi d'acqua posizionati in quota sopra i 500 m s.l.m.) e di un contributo fisso di 300 mm/anno, espressi nella seguente formulazione:

$$E_{annua,2} = 90 \cdot 18,9 \text{ }^\circ\text{C} + 300 \frac{\text{mm}}{\text{anno}} = 2.002,5 \frac{\text{mm}}{\text{anno}}$$

Procedendo come per il primo metodo, moltiplicando il risultato di evaporazione annua appena ottenuto per la superficie del bacino di monte alla massima regolazione si ottiene la stima dell'evaporazione annua del bacino in esame:

$$Evap_{annua,2} = 2.002,5 \frac{\text{mm}}{\text{anno}} \cdot 98.000 \text{ m}^2 \approx 196.000 \frac{\text{m}^3}{\text{anno}} = 6,2 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

Ipotizzando un bacino che per il 50% dell'anno è alla quota di massima regolazione mentre per il restante tempo è posto a quella di minima regolazione, si ottiene:

$$Evap_{annua,2} = 2.002,5 \frac{\text{mm}}{\text{anno}} \cdot \frac{98.000 + 43.000}{2} \text{ m}^2 \approx 141.000 \frac{\text{m}^3}{\text{anno}} = 4,5 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

In conclusione, volendo prendere il risultato più cautelativo, ovvero quello che restituisce il più elevato valore di evaporazione, si considera per il bacino di monte una perdita di 224.000 m<sup>3</sup>/anno, pari a 7,1 l/s.



Tel: +39 030 3702371 – Mail: [info@frosionext.com](mailto:info@frosionext.com) - Sito: [www.frosionext.com](http://www.frosionext.com)  
Via Corfù 71 - Brescia (BS), CAP 25124  
P.Iva e Codice fiscale: 03228960179