

# “TACCU SA PRUNA”

Impianto di accumulo idroelettrico mediante pompaggio  
ad alta flessibilità

Comune di Esterzili (SU)

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE

STRATEGIES FOR WATER



Progettisti: Ing. Luigi Lorenzo Papetti

## Relazione idraulica



REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
0	PRIMA EMISSIONE	15/06/2022	E. Marchesi	C. Pasqua	L. Papetti
1	REVISIONE 1 - INTEGRAZIONI	26/05/2023	E. Marchesi	P. Macchi	L. Papetti

Codice commessa: 1351

Codifica documento: 1351-A-FN-R-05-1

## INDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>DIMENSIONAMENTO DELL'OPERA DI PRESA E RESTITUZIONE PRESSO IL BACINO 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	8
4.3	Criterio di contenimento del pelo libero	8
<b>5</b>	<b>ANALISI DEI TRANSITORI DI MOTO VARIO</b>	<b>9</b>
5.1	Descrizione del fenomeno	9
5.2	Modello idraulico e scenari	9
5.3	Risultati degli scenari	12
5.3.1	Scenario G1	13
5.3.2	Scenario G2	14
5.3.3	Scenario GX	15
5.3.4	Scenario GP	16
5.3.5	Scenario P1	17
5.3.6	Scenario P2	18
5.3.7	Scenario PX	19
5.3.8	Scenario PG	20
<b>5.4</b>	<b>CONCLUSIONI</b>	<b>21</b>
<b>6</b>	<b>DIMENSIONAMENTO DEL BACINO DI MONTE</b>	<b>22</b>
6.1	Determinazione del franco netto minimo da normativa	22
6.2	Determinazione della quota di massimo invaso	23
6.3	Soluzione adottata e verifica	23
<b>7</b>	<b>CALCOLO DELLA PORTATA MASSIMA DELLO SFIORATORE DI SUPERFICIE</b>	<b>24</b>
<b>8</b>	<b>STIMA DELLE PERDITE PER EVAPORAZIONE DAL BACINO DI MONTE</b>	<b>24</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 PRESSO IL BACINO 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 22 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 vibrazioni capaci di indurre danni alle griglie.

Si prevede che attraverso l'opera di presa possa transitare una portata massima di 96,5 m<sup>3</sup>/s. La scelta progettuale adottata è stata quella di prevedere una sezione di imbocco con dimensione di 13 x 8 m (cosicché in totale l'area sia di 104 m<sup>2</sup>, e dunque si abbiano velocità medie inferiori a 1 m/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:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot D_{eq}}}$$

in cui:

$v = 3,86$  m/s = velocità media dell'acqua

$D_{eq} = 5,582$  m = diametro equivalente della sezione policentrica, pari a:

$$D_{eq} = \frac{4 \cdot A}{P}$$

in cui:

$A = 24,98$  m<sup>2</sup> = area della sezione policentrica

$P = 17,898$  m = perimetro bagnato della sezione policentrica

con i valori appena riportati risulta:

$$Fr = 0,52$$

$$h = (0,5 + 2Fr) \cdot D = 8,62 \text{ m}$$

Durante la progettazione delle opere idrauliche si è considerato cautelativamente un valore pari a  $h = 9,25 \text{ m}$ .

### 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 alla galleria sub-orizzontale, posta alla sua base, tramite una curva ad angolo retto.

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  $96,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 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 =  $96,5 \text{ m}^3/\text{s}$

$R$  = 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  $x_0$  ed  $y_0$  rappresentano due parametri geometrici dell'imbocco, che possono essere determinati sfruttando le formule sperimentali di Lazzari:

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

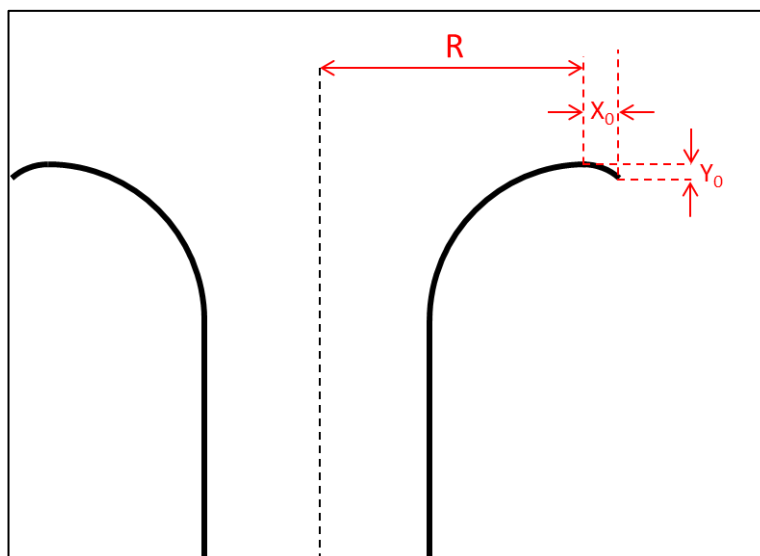


Figura 1 - Schema geometrico dell'imbocco dell'opera di presa e restituzione a calice

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 5 m, si ottengono i valori riportati in Tabella 1.

Grandezza	Valore	Unità di misura
$Q_{\text{stramazzo}}$	96,5	$\text{m}^3/\text{s}$
R	5	m
$x_0$	0,37	m
$y_0$	0,14	m
$\mu$	0,388	-
$(h+y_0)/(R+x_0)$	0,399	-
$h_{\text{str}}$	1,47	m

Tabella 1 - Caratteristiche geometriche dell'opera di presa

Dai calcoli effettuati risulta che la sommergenza minima da considerare è pari a 1,47 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, di limitare le sovrappressioni causate dal colpo d'ariete in tutta la via d'acqua posta a valle delle macchine (specialmente sul tratto delle vie d'acqua compreso tra il pozzo piezometrico ed il bacino di valle), e di permettere infine una migliore regolazione generale dell'impianto.

La posizione del pozzo piezometrico è prevista a 60 m dal termine dei raccordi delle vie d'acqua a valle della centrale.

La tipologia di pozzo piezometrico adottata per il dimensionamento è quella del pozzo piezometrico cilindrico con strozzatura alle base. Rispetto alla soluzione più semplice, ossia il pozzo piezometrico cilindrico a sezione costante, questa soluzione 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 due:

- 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 12 m, alto 77 m (dalla quota di 292,00 m s.l.m. alla quota di 215,00 m s.l.m.), collegato alla galleria idraulica con una strozzatura di 2,4 m di diametro (Figura 2).

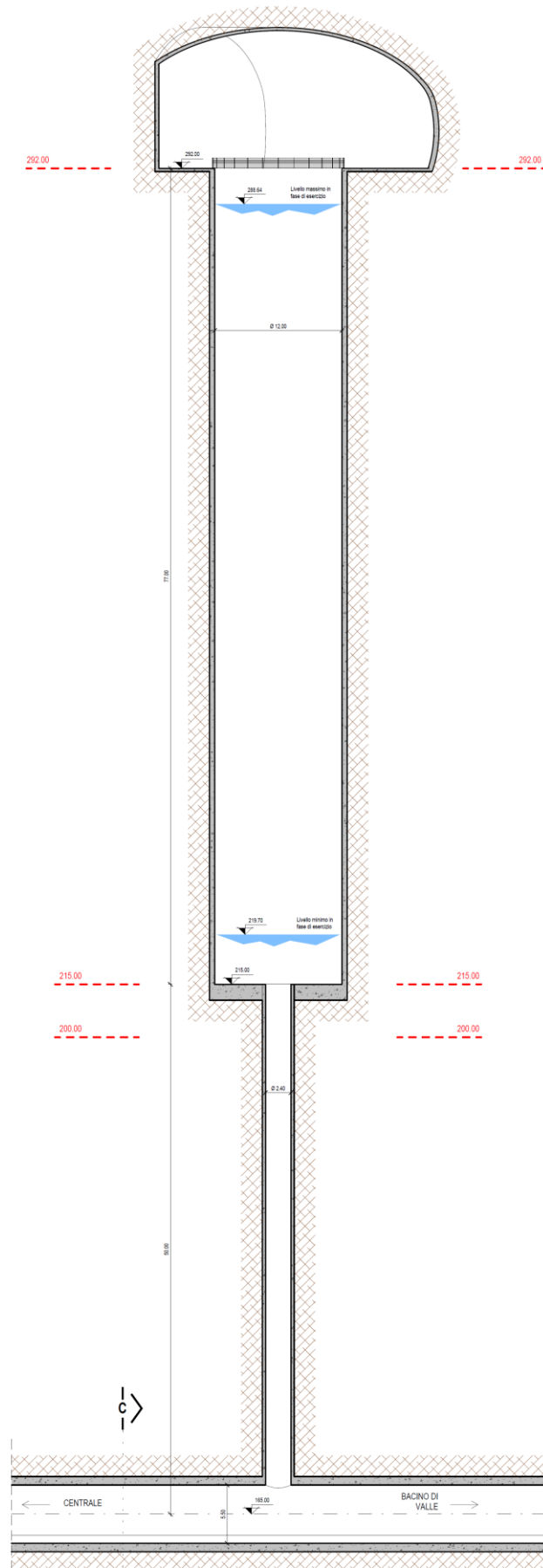


Figura 2 - Sezione del pozzo piezometrico

## 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. Esso è stato introdotto nel 1910 ed è tutt'ora considerato il metodo di riferimento per questo 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  $D_{Thoma} = 9,03 \text{ m}$ . In seguito agli Il diametro scelto è pari a  $D_{pozzo} = 12,00 \text{ m}$ , pertanto il criterio di Thoma è soddisfatto.

## 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 **219,70 m s.l.m.** e la quota massima è **288,74 m s.l.m.**

Il pozzo è verificato in quanto tali livelli sono contenuti tra la quota minima del pozzo (215,00 m s.l.m.) e quella massima (292,00 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*).

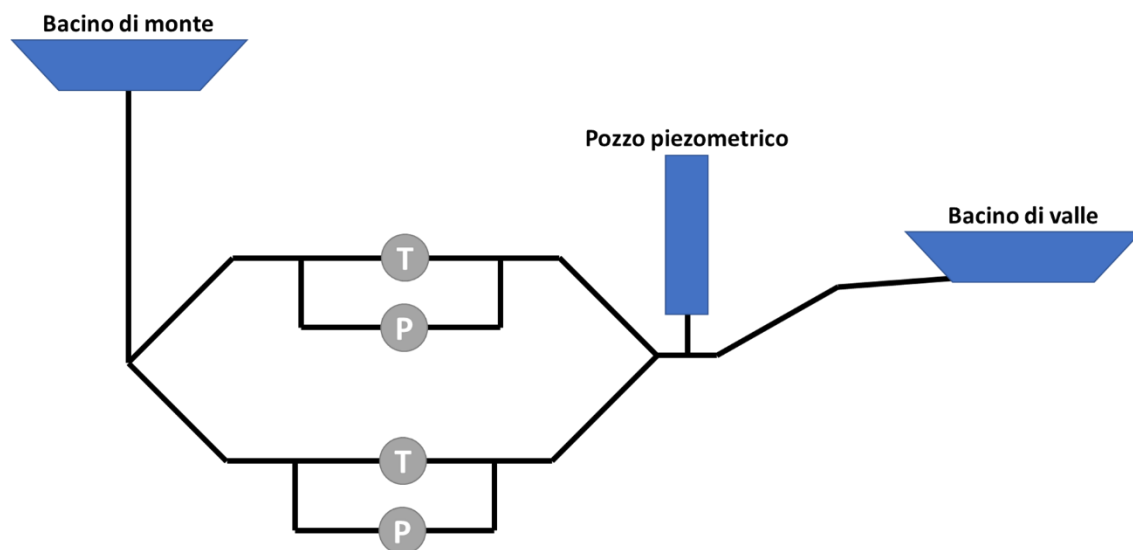
WHAMO è in grado di modellare le reti di trasporto di fluidi e gli elementi che le compongono, quali condotte e diramazioni, serbatoi, pozzi piezometrici e organi elettromeccanici.

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 3 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 3 - 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 Taccu Sa Pruna simula il comportamento delle vie d'acqua così come descritte al § 5.5 della *Relazione Tecnica Particolareggiata* (elaborato 1351-A-FN-R-01-1).

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:

Scenario	Manovra	Quota bacino monte	Quota bacino valle
<b>G1</b>	da impianto fermo a massima generazione	minima regolazione 652,00 m s.l.m.	massima regolazione 267,00 m s.l.m.
<b>G2</b>	da massima generazione a impianto fermo	massima regolazione 662,70 m s.l.m.	minima regolazione 242,00 m s.l.m.
<b>GX</b>	da impianto fermo a massima generazione, seguito da arresto nel momento più sfavorevole	massima regolazione 662,70 m s.l.m.	minima regolazione 242,00 m s.l.m.
<b>GP</b>	da massima generazione a massimo pompaggio	massima regolazione 662,70 m s.l.m.	minima regolazione 242,00 m s.l.m.
<b>P1</b>	da impianto fermo a massimo pompaggio	massima regolazione 662,70 m s.l.m.	minima regolazione 242,00 m s.l.m.
<b>P2</b>	da massimo pompaggio a impianto fermo	minima regolazione 652,00 m s.l.m.	massima regolazione 267,00 m s.l.m.
<b>PX</b>	da impianto fermo a massimo pompaggio, seguito da arresto nel momento più sfavorevole	minima regolazione 652,00 m s.l.m.	massima regolazione 267,00 m s.l.m.
<b>PG</b>	da massimo pompaggio a massima generazione	minima regolazione 652,00 m s.l.m.	massima regolazione 267,00 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 3) 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: 215,00 m s.l.m.
- limite superiore - quota sommità pozzo: 292,00 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 (652,00 m s.l.m.) e di massima regolazione nel bacino di valle (267,00 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 4 accerta come l'oscillazione di livello dell'acqua all'interno del pozzo sia sempre compresa tra la quota massima (sommità) e minima (base).

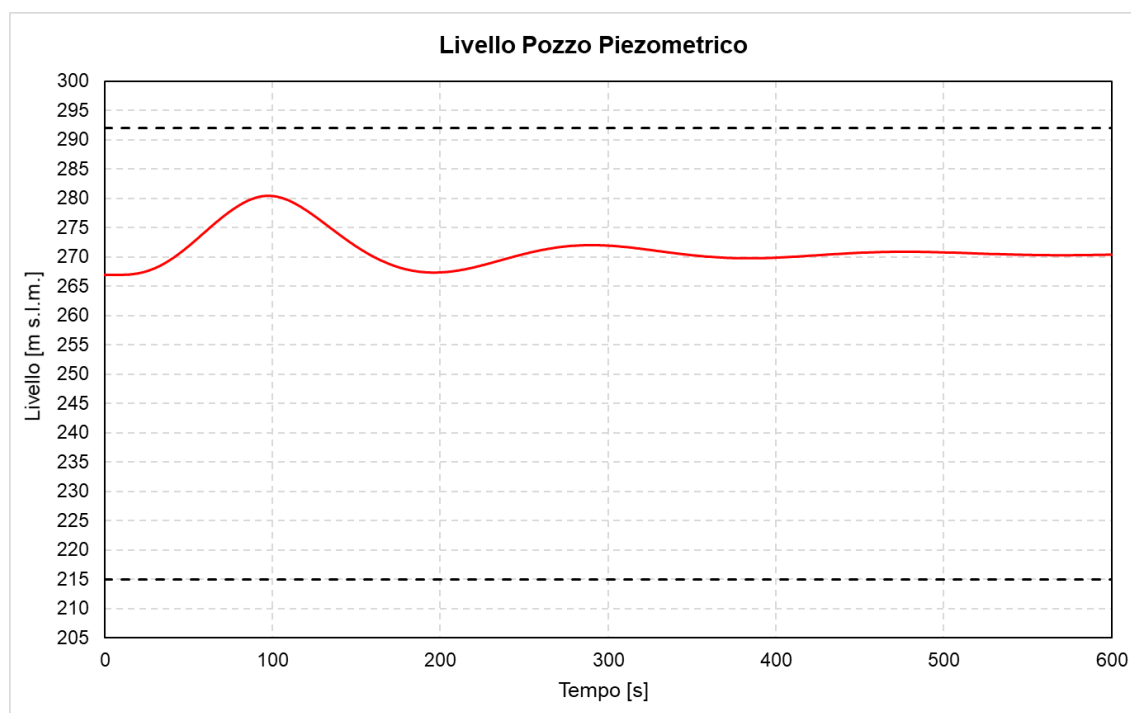


Figura 4 – Scenario G1 - Livello nel pozzo piezometrico

### 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 (662,70 m s.l.m.), quello del bacino di valle di minima regolazione (242,00 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 invaso del bacino di valle) l'arresto delle turbine non porti allo svuotamento del pozzo piezometrico.

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

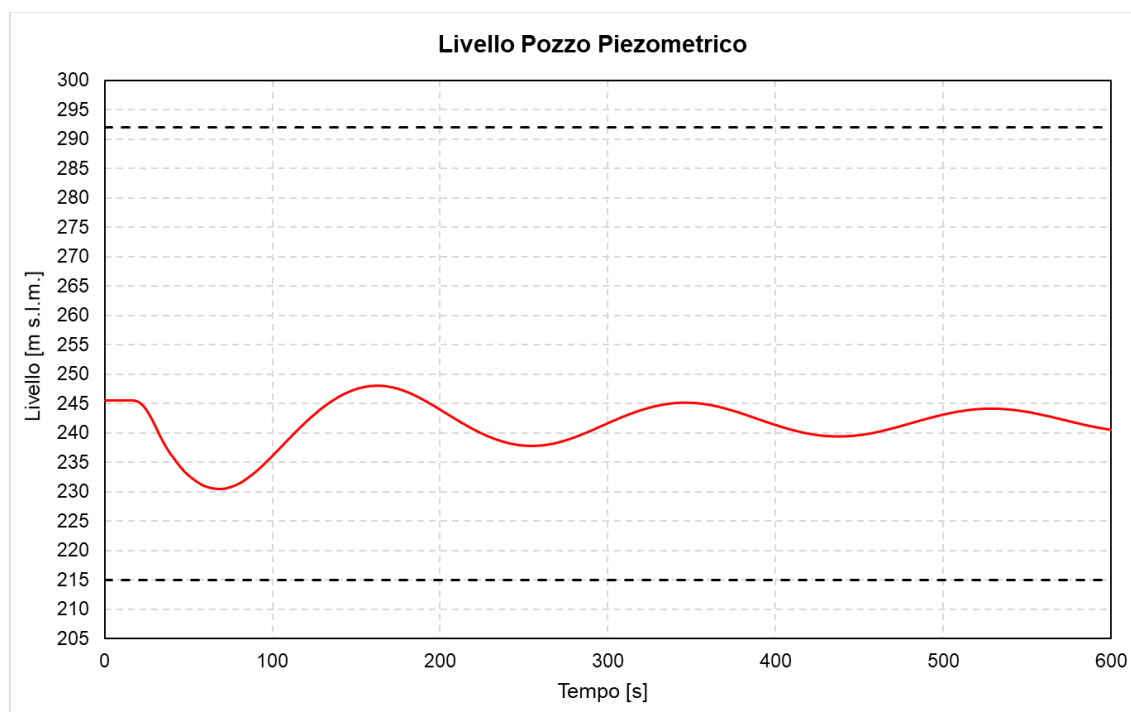


Figura 5 – Scenario G2 - Livello nel pozzo piezometrico

### 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 bacino di valle raggiunge il valore massimo: in tale situazione, per il bilancio di massa, il volume d'acqua in uscita verso il bacino di valle sarà interamente assorbito dal pozzo piezometrico. Il livello del bacino di monte è di massima regolazione (662,70 m s.l.m.), quello del bacino di valle di minima regolazione (242,00 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 invaso del bacino di valle) l'arresto delle turbine 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).

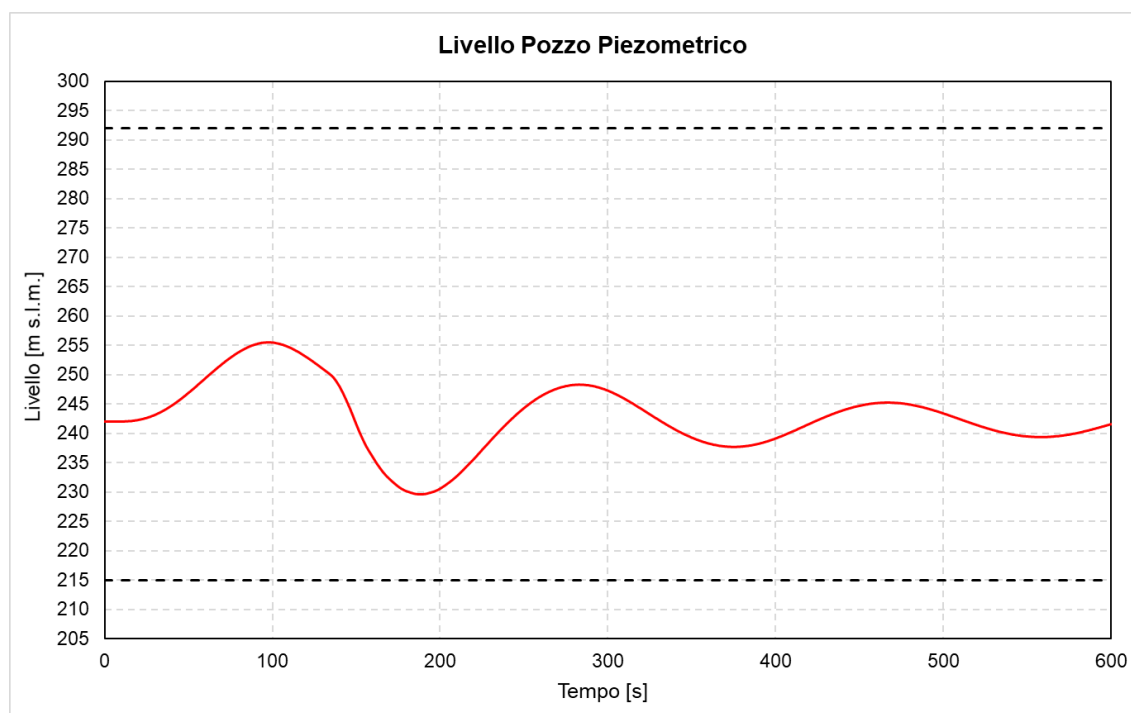


Figura 6 – Scenario GX - Livello nel pozzo piezometrico

#### 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 (662,70 m s.l.m.), quello del bacino di valle di minima regolazione (242,00 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 invaso del bacino di valle) il passaggio da massima generazione a massimo pompaggio non porti allo svuotamento del pozzo piezometrico.

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

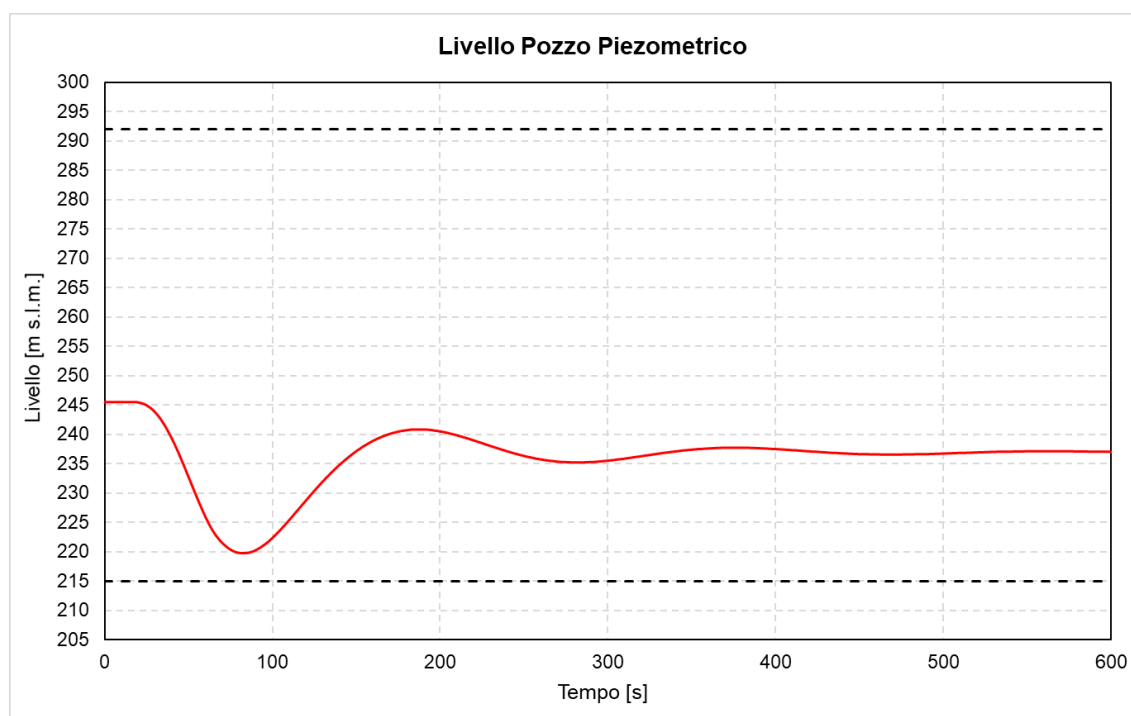


Figura 7 - Scenario GP - Livello nel pozzo piezometrico



### 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 (662,70 m s.l.m.), quello del bacino di valle di minima regolazione (242,00 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 invaso del bacino di valle) l'avvio delle pompe non porti allo svuotamento 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).

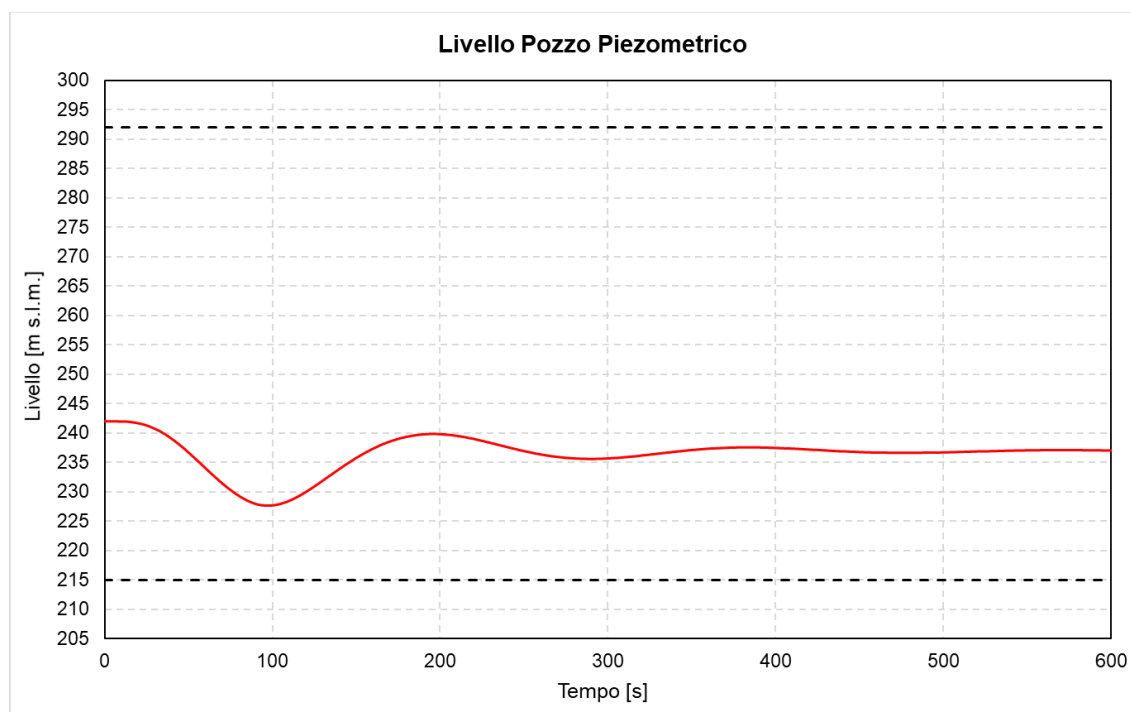


Figura 8 – Scenario P1 - Livello nel pozzo piezometrico

### 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 (652,00 m s.l.m.), quello del bacino di valle di massima regolazione (267,00 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 invaso del bacino di valle) l'arresto delle pompe non porti al riempimento del pozzo piezometrico.

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

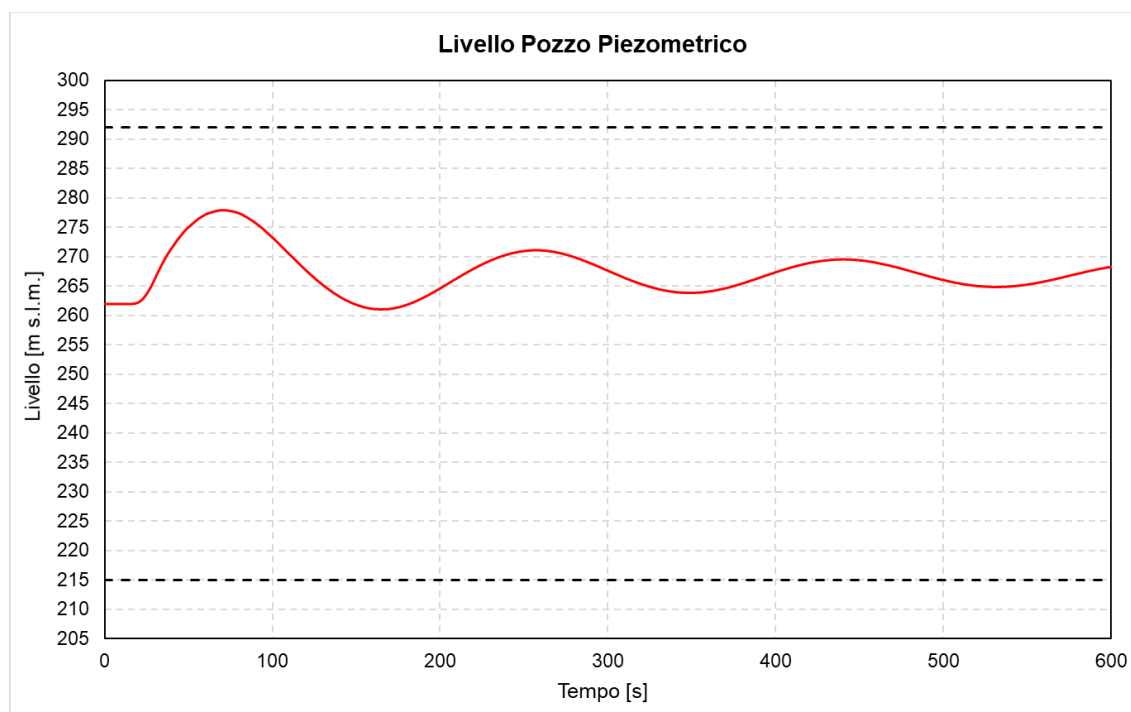


Figura 9 - Scenario P2 - Livello nel pozzo piezometrico

### 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 bacino di valle raggiunge il valore massimo: in tale situazione, per il bilancio di massa, il volume d'acqua in ingresso dal bacino di valle sarà interamente assorbito dal pozzo piezometrico. Il livello del bacino di monte è di minima regolazione (652,00 m s.l.m.), quello del bacino di valle di massima regolazione (267,00 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 invaso del bacino di valle) l'arresto delle pompe non porti al riempimento del pozzo piezometrico.

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).

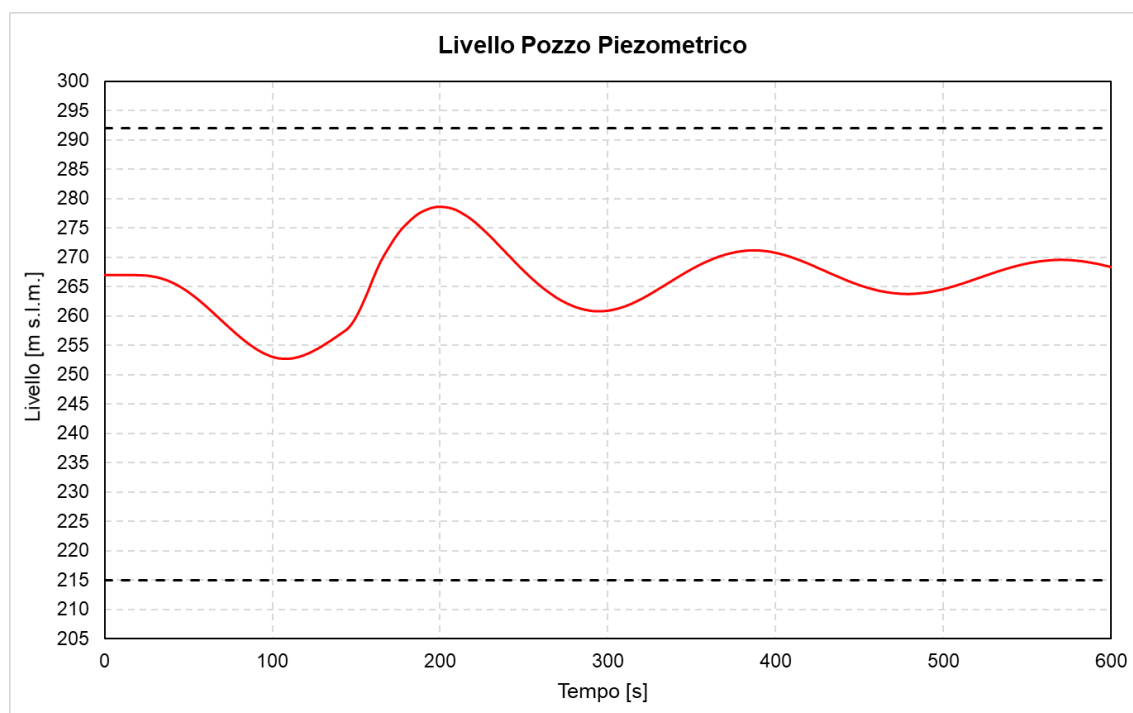


Figura 10 – Scenario PX - Livello nel pozzo piezometrico

### 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 (652,00 m s.l.m.), quello del bacino di valle di massima regolazione (267,00 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 11 verifica come l'oscillazione di livello dell'acqua all'interno del pozzo sia sempre compresa tra la quota massima (sommità) e minima (base).

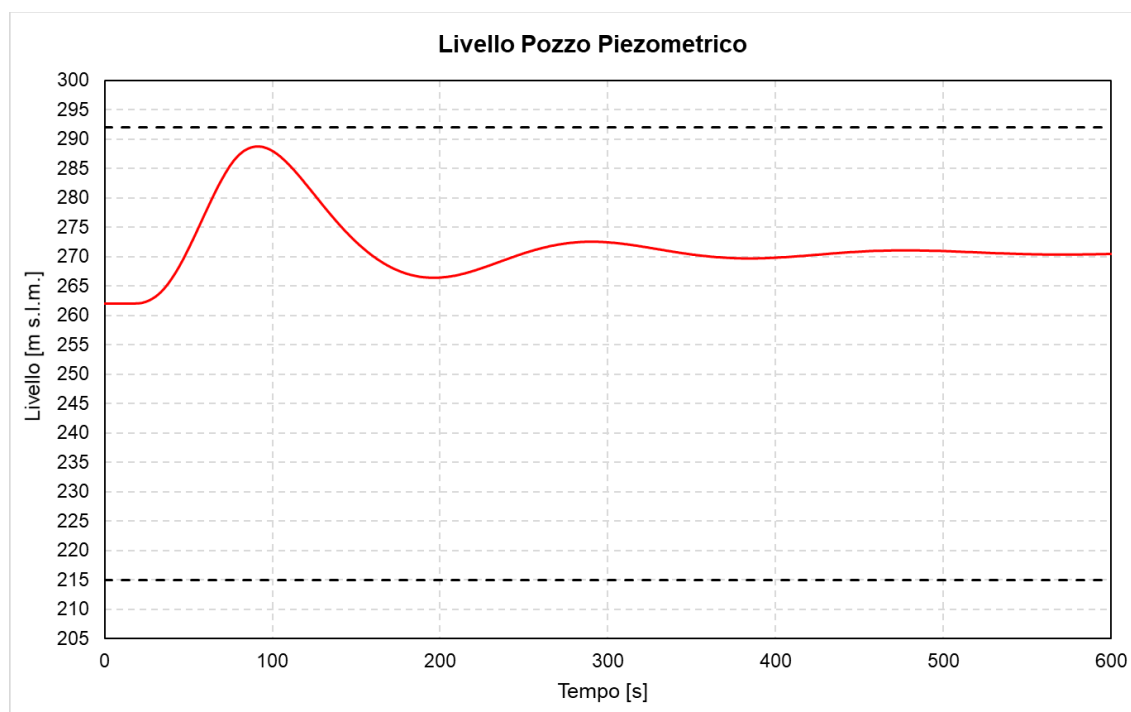


Figura 11 - Scenario PG - Livello nel pozzo piezometrico

#### 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	267,01	280,45
G2	230,46	248,08
GX	<u>219,70</u>	245,55
GP	229,67	255,46
P1	227,69	242,01
P2	261,00	277,98
PX	261,95	<u>288,74</u>
PG	252,71	278,65

*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 (215,00 m s.l.m.) e la sommità del pozzo (292,00 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 17 m, pertanto questo contributo è assunto pari a 1,553 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  $0,005 \text{ m} \times 17 \text{ m} = 0,085 \text{ m}$ ;

- 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/ora) 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

Essendo il *fetch* inferiore ad 1 km, si assume cautelativamente il valore associato alla velocità massima del vento prevista nella tabella per *fetch* di 1 km; tale contributo è pertanto pari a  $0,27 \text{ m} + 0,033 \text{ m} = 0,303 \text{ m}$

Come riportato in precedenza, la normativa vigente prevede la possibilità di ricorrere a muri paraonde per contenere questo contributo.

## 6.2 DETERMINAZIONE DELLA QUOTA DI MASSIMO INVASO

Il bacino di monte non sbarra alcun corso d'acqua, e pertanto non possiede un bacino imbrifero. In altre parole, le uniche acque che possono essere recapitate all'interno del bacino sono quelle derivanti dalle precipitazioni che cadono all'interno della superficie delimitata dal perimetro del coronamento.

Pertanto, l'altezza di massimo invaso può essere calcolata semplicemente tramite un'analisi idrologica, valutando l'altezza di precipitazione associata ad un tempo di ritorno di 3.000 anni. Per le analisi idrologiche eseguite, si rimanda alla *Relazione idrologica* (elaborato 1351-A-FN-R-04-1).

È stato scelto di adottare in via cautelativa l'altezza di precipitazione associata ad una durata di 24 ore, ossia **356,8 mm**. Come ulteriore misura cautelativa, in virtù dell'intrinseca incertezza delle analisi idrologiche ed in considerazione del fatto che la superficie scolante (quella delimitata dal coronamento) è maggiore della superficie bagnata alla quota di massima regolazione, si ipotizza che tale altezza sia pari a **0,400 m**.

Pertanto, la quota di massimo invaso è pari a **663,10 m s.l.m.**, 40 cm al di sopra della quota di massima regolazione (pari a 662,70 m s.l.m.).

È utile sottolineare che questa scelta è a favore di sicurezza in quanto si ipotizza che durante l'intera durata dell'evento di precipitazione venga trascurato il modesto effetto di laminazione operatore dallo sfioratore di superficie e non venga fatto entrare in funzione l'impianto di pompaggio.

## 6.3 SOLUZIONE ADOTTATA E VERIFICA

Al fine di contenere l'altezza della diga, e conseguentemente l'ingombro planimetrico, si è deciso di realizzare un muro paraonde alto 0,50 m (Figura 12); esso consente di contenere interamente gli effetti di sovrizzo causato dalle onde da vento e da sisma (aventi un valore stimato di 0,303 m).

In questo modo, è stato possibile soddisfare la verifica del franco di sicurezza della diga prevedendo una differenza di 1,70 m tra la quota di massimo invaso (663,10 m s.l.m.) ed il piano di coronamento (664,80 m s.l.m.): infatti, tale dislivello consente di contenere la parte restante del franco minimo non associato alle onde da vento e sisma, ossia  $1,553 + 0,085 \text{ m} = 1,638 \text{ m}$ .

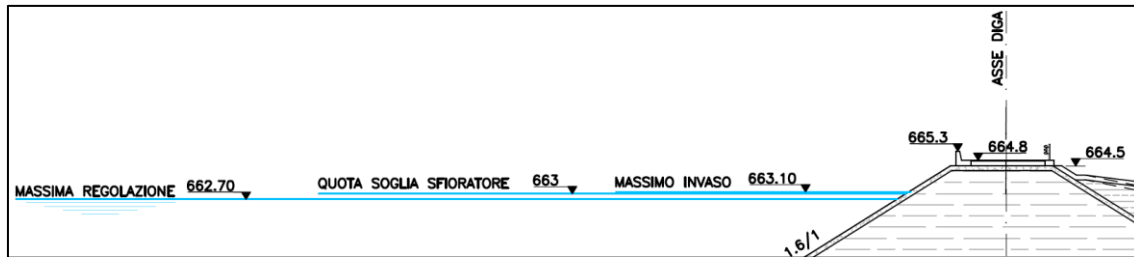


Figura 12 – Dettaglio del rilevato di monte

## 7 CALCOLO DELLA PORTATA MASSIMA DELLO SFIORATORE DI SUPERFICIE

Lo sfioratore di superficie è previsto lungo il lato Nord del bacino, con soglia posta a 30 cm sopra la quota di massima regolazione (662,70 m s.l.m.), dunque a quota 663,00 m s.l.m.

Come riportato nella *Relazione Tecnica Particolareggiata*, 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 100 mm, ottenuta come differenza tra 663,10 m s.l.m. (quota raggiungibile in occasione dell'evento di precipitazione citato al § 6.2) e 663,00 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  **$Q = 0,22$  m<sup>3</sup>/s.**

## 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 ad Esterzili, 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: 363.000 m<sup>2</sup>
- superficie occupata dall'acqua nel bacino di monte alla quota di minima regolazione: 197.000 m<sup>2</sup>

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

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

Si ottengono i seguenti risultati (Tabella 4):

Mese	Temperature medie mensili [°C]	$E_{mensile}$ [mm/mese]
Gennaio	7,0	41,7
Febbraio	7,5	46,2
Marzo	9,5	65,9
Aprile	11,5	87,7
Maggio	15,5	137,3
Giugno	20,0	201,2
Luglio	23,5	256,3
Agosto	22,5	240,1
Settembre	19,5	193,7
Ottobre	16,0	144,0
Novembre	11,5	87,7
Dicembre	8,5	55,8
<i>Media annua</i>	<i>14,4</i>	<i>129,8</i>
<i>Somma</i>	-	<i>1557,8 [mm/anno]</i>

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:

$$Evap_{annua,1} = 1.557,8 \frac{\text{mm}}{\text{anno}} \cdot 363.000 \text{ m}^2 \approx 565.000 \frac{\text{m}^3}{\text{anno}} = 17,9 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

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:

<sup>3</sup> I dati di temperature medie mensili provengono dal sito [www.ncei.noaa.gov/](http://www.ncei.noaa.gov/).

$$Evap_{annua,1} = 1.557,8 \frac{\text{mm}}{\text{anno}} \cdot \frac{363.000 + 197.000}{2} \text{ m}^2 \approx 436.000 \frac{\text{m}^3}{\text{anno}} = 13,8 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

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:

$$E_{annua,2} = 90 \cdot 14,4 \text{ }^\circ\text{C} + 300 \frac{\text{mm}}{\text{anno}} = 1.593,8 \frac{\text{mm}}{\text{anno}}$$

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:

$$Evap_{annua,2} = 1.593,8 \frac{\text{mm}}{\text{anno}} \cdot 363.000 \text{ m}^2 \approx 579.000 \frac{\text{m}^3}{\text{anno}} = 18,4 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

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:

$$Evap_{annua,2} = 1.593,8 \frac{\text{mm}}{\text{anno}} \cdot \frac{363.000 + 197.000}{2} \text{ m}^2 \approx 446.000 \frac{\text{m}^3}{\text{anno}} = 14,2 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

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 579.000 m<sup>3</sup>/anno, pari a 18,4 l/s.

Questa stima potrebbe essere ritenuta cautelativa considerando il fatto che, in seguito al trasferimento di acqua dal bacino di valle a quello di monte, si riduce la superficie bagnata dell'invaso di Nuraghe Arrubiu, e dunque si induce indirettamente una diminuzione delle perdite per evaporazione in tale invaso.



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