

“SERRA DEL CORVO”

Progetto di impianto di accumulo idroelettrico

Comune di Gravina in Puglia (BA)

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE

STRATEGIES FOR WATER



Progettista: Ing. Luigi Lorenzo Papetti

Relazione idraulica



REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
0	PRIMA EMISSIONE	26/01/2022	E. Marchesi	C. Pasqua	L. Papetti
Codice commessa: 1373		Codifica documento: 1373-A-FN-R-05-0			

INDICE

1	INTRODUZIONE	3
2	DIMENSIONAMENTO DELL'OPERA DI PRESA E RESTITUZIONE PRESSO IL BACINO DI VALLE	3
3	DIMENSIONAMENTO DELL'OPERA DI PRESA E RESTITUZIONE PRESSO IL BACINO DI MONTE	4
4	DIMENSIONAMENTO DEL POZZO PIEZOMETRICO	5
4.1	Criterio di stabilità di Thoma	6
4.2	Criterio di strozzatura ottima	6
4.3	Criterio di contenimento del pelo libero	7
5	ANALISI DEI TRANSITORI DI MOTO VARIO	9
5.1	Descrizione del fenomeno	9
5.2	Modello idraulico e scenari	9
5.3	Risultati degli scenari	13
5.3.1	Scenario G1	14
5.3.2	Scenario G2	17
5.3.3	Scenario GX	20
5.3.4	Scenario P1	23
5.3.5	Scenario P2	26
5.3.6	Scenario GP	29
5.3.7	Scenario PG	32
5.4	CONCLUSIONI	34
6	DIMENSIONAMENTO DEL BACINO DI MONTE	35
6.1	Determinazione del franco netto minimo da normativa	35
6.2	Determinazione della quota di massimo invaso	36
6.3	Soluzione adottata e verifica	36
7	CALCOLO DELLA PORTATA MASSIMA DELLO SFIORATORE DI SUPERFICIE	37
8	STIMA DELLE PERDITE PER EVAPORAZIONE DAL BACINO DI MONTE	37

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 26,4 m². 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 griglie.

Si prevede che attraverso l'opera di presa possa transitare una portata massima di 189,1 m³/s. La scelta progettuale adottata è stata quella di prevedere una sezione di imbocco con dimensione di 20 x 10,5 m (cosicché in totale l'area sia di 205 m², 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:

$v = 4,11$ m/s = velocità media dell'acqua

$D_{eq} = 7,604$ m = diametro equivalente della sezione policentrica, pari a:

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

in cui:

$A = 46,06$ m² = area della sezione policentrica

$P = 24,22$ m = perimetro bagnato della sezione policentrica

con i valori appena riportati risulta:

$$Fr = 0,51$$

$$h = (0,5 + 2Fr) \cdot D = 11,03 \text{ m}$$

Durante la progettazione delle opere idrauliche si è considerato $h = 11,75 \text{ m}$.

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 $158,2 \text{ m}^3/\text{s}$; 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 = $158,2 \text{ m}^3/\text{s}$

R = raggio in sommità

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

μ = 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:

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

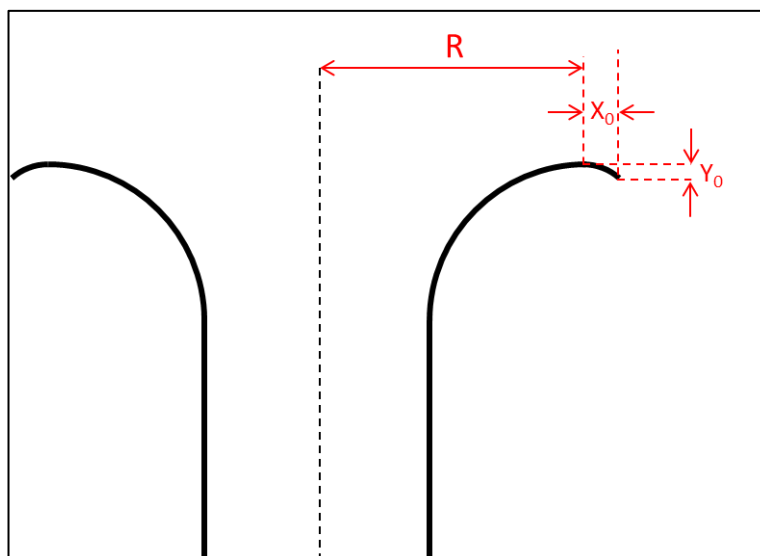


Figura 1 - Schema geometrico dell'imbocco dell'opera di presa e restituzione a calice

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 pari a 6 m, si ottengono i valori riportati in *Tabella 1*.

Grandezza	Valore	Unità di misura
$Q_{\text{stramazzo}}$	158,2	m ³ /s
R	7,5	m
x_0	0,47	m
y_0	0,17	m
μ	0,392	-
$(h+y_0)/(R+x_0)$	0,34	-
h_{str}	1,55	m

Tabella 1 - Caratteristiche geometriche dell'opera di presa

Dai calcoli effettuati risulta che la sommergenza minima da considerare è pari a 1,55 m. Tuttavia, per rimanere a favore di sicurezza, alla sommità del ciglio è stata assegnata una quota tale da garantire 2,5 m di sommergenza rispetto alla quota di minima regolazione.

4 DIMENSIONAMENTO DEL POZZO PIEZOMETRICO

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 condotta forzata (specialmente sul tratto a monte del pozzo), e di permettere infine 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 di massima regolazione del bacino di monte (480,10 m s.l.m.) ed un processo di ottimizzazione, per il quale si dovrebbe collocare il pozzo

piezometrico quanto più possibile a valle (in modo da estendere la porzione di condotta sottoposta a minori sovrappressioni causate dal colpo d'ariete).

La tipologia di pozzo piezometrico adottata per il dimensionamento è quella del pozzo piezometrico cilindrico con strozzatura alla 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 tre:

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

L'applicazione di questi criteri ha condotto a un pozzo piezometrico di diametro di 20 m, alto 98 m (dalla quota di 393,00 m s.l.m. alla quota di 491,00 m s.l.m.), con strozzatura di 4 m di diametro posizionata in prossimità della galleria idraulica (Figura 2).

4.1 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 incremento 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 innalzamento del pelo libero all'interno del pozzo, tanto più intenso quanto più piccola è la sezione del pozzo.

Il criterio di Thoma¹, 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 $D_{Thoma} = 18,60$ m, pertanto al pozzo piezometrico è stato assegnato un valore pari a $D_{pozzo} = 20,00$ m di primo tentativo per le verifiche del soddisfacimento degli altri due criteri citati.

4.2 CRITERIO DI STROZZATURA OTTIMA

La strozzatura definita "ottima" è quella che consente il compromesso migliore tra perdite di carico indotte dalla strozzatura ed ampiezze di oscillazione di massa all'interno del pozzo, affinché vengano minimizzate le sovrappressioni nel canale di scarico. Le perdite di carico generate (K) nell'istante del brusco arresto (a partire da una condizione in cui

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

la portata è pari a quella di progetto) sono equivalenti all'ampiezza di oscillazione dell'acqua all'interno del pozzo (A).

Nell'ipotesi di trascurare le perdite di carico della galleria che congiunge l'invaso di valle ed il pozzo piezometrico, lecita per la ridotta lunghezza di tale galleria, l'ampiezza di oscillazione ha questa definizione nel caso di strozzatura ottima:

$$A = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{Q}{\sigma} \cdot \sqrt{\frac{L \cdot \sigma}{g \cdot \Sigma}} = 11,67 \text{ m}$$

In cui:

A [m] = ampiezza di oscillazione della superficie liquida all'interno del pozzo

Q [m³/s] = portata massima di progetto, pari a 189,1 m³/s

L [m] = lunghezza della galleria che congiunge il bacino di monte ed il pozzo piezometrico, pari a 1.080 m

σ [m²] = area della sezione della galleria di scarico, pari a 46,04 m²

Σ [m²] = area del pozzo piezometrico, pari a 314,16 m²

g [m/s²] = costante di accelerazione gravitazionale, pari a 9,81 m/s²

Le perdite di carico localizzate K , trattandosi di una strozzatura semplice, possono essere definite attraverso la formula di Borda. Conoscendo $K (= A)$ e la velocità all'interno del pozzo, è possibile ricavare la velocità all'interno della strozzatura ed il diametro della strozzatura ottima: $D_{\text{strozzatura,ottima}} = 3,91 \text{ m}$.

Per semplicità costruttiva, si adotta un diametro della strozzatura pari a **$D_{\text{strozzatura}} = 4,00 \text{ m}$** .

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 **455,80 m s.l.m.** e la quota massima è **490,55 m s.l.m.**

Il pozzo è verificato in quanto tali livelli sono contenuti tra la quota minima del pozzo (393,00 m s.l.m.) e quella massima (491,00 m s.l.m.).

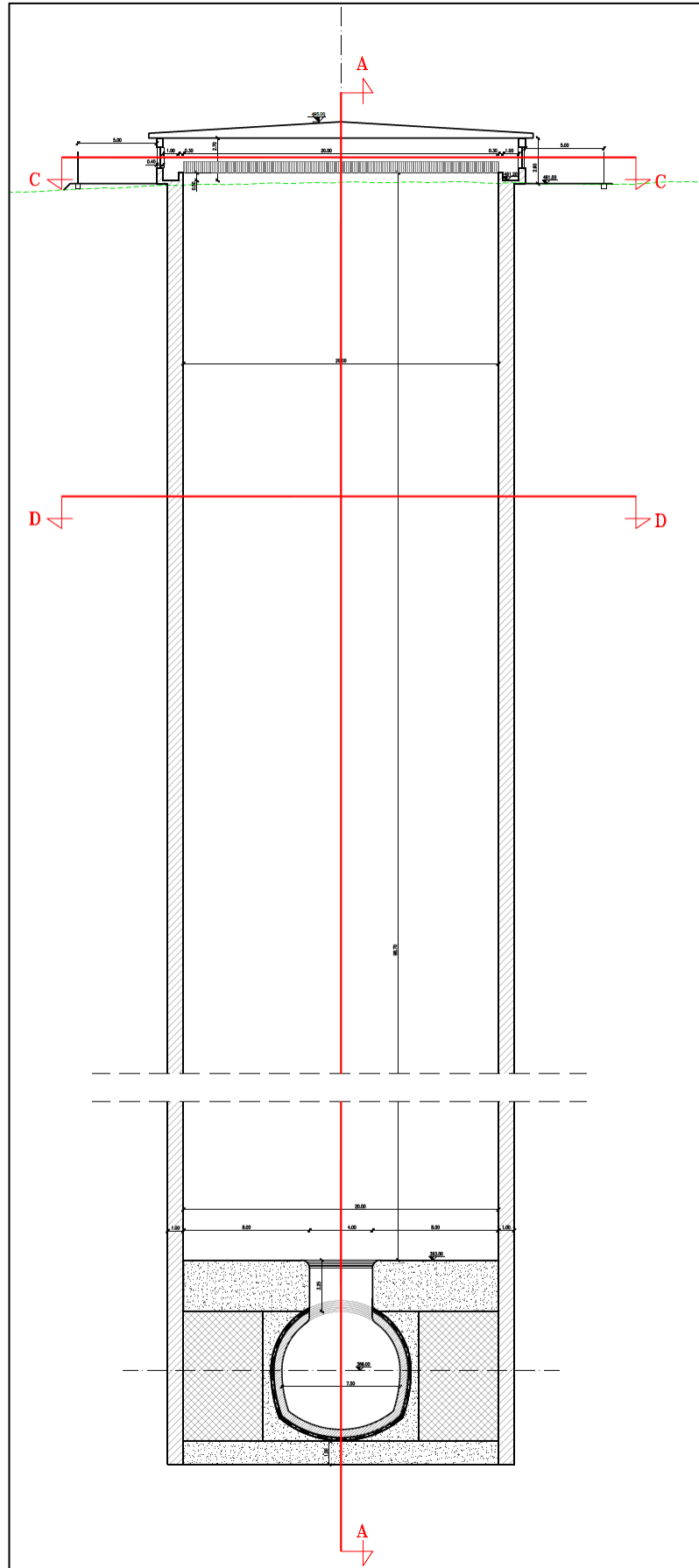


Figura 2 - Sezione del pozzo piezometrico

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 delle condizioni di moto e flusso relative alle macchine idrauliche; in Figura 3 sono poste in corrispondenza delle pompe-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.

La modellazione dell'impianto di Serra del Corvo è quindi la seguente:

- La livelletta C1 rappresenta la condotta forzata verticale di diametro interno di 7,6 m che parte dall'opera di presa del bacino di monte.
- La livelletta C2 rappresenta il tratto di galleria idraulica tra la base del pozzo verticale dell'opera di presa del bacino di monte e la base del pozzo piezometrico, realizzata tramite galleria rivestita in c.a. ed avente sezione policentrica con diametro di 7,5 m.
- Presso il nodo 3 vi è il collegamento col pozzo piezometrico.
- La livelletta C3 rappresenta il tratto di galleria idraulica compreso tra la base del pozzo piezometrico e la biforcazione di monte, realizzata tramite una condotta metallica avente diametro interno di 7,6 m.
- C4 e C5 rappresentano le due condotte metalliche avente diametro di 5,3 m in uscita dalla biforcazione di monte.
- Le due condotte metalliche subiscono un ulteriore restringimento di diametro, portandosi ad un diametro di 3,3 m, prima di collegarsi con le pompe-turbine: questi tratti sono rappresentati dalle livellette C6 e C7.
- A valle delle macchine ci sono due gallerie idrauliche (livellette C9 e C10), rivestite in c.a. ed aventi sezione policentrica con diametro di 7,5 m, che convergono presso il nodo 11.
- La livelletta C11 rappresenta il pozzo di raccordo tra i diffusori ed il pozzo paratoie, avente diametro interno di 7,6 m.
- La livelletta C12 rappresenta il tratto di galleria idraulica che congiunge il pozzo di raccordo all'opera di presa di valle, realizzata tramite galleria rivestita in c.a. ed avente sezione policentrica con diametro di 7,5 m; in esso è presente il restringimento di sezione associato al pozzo paratoie.

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.

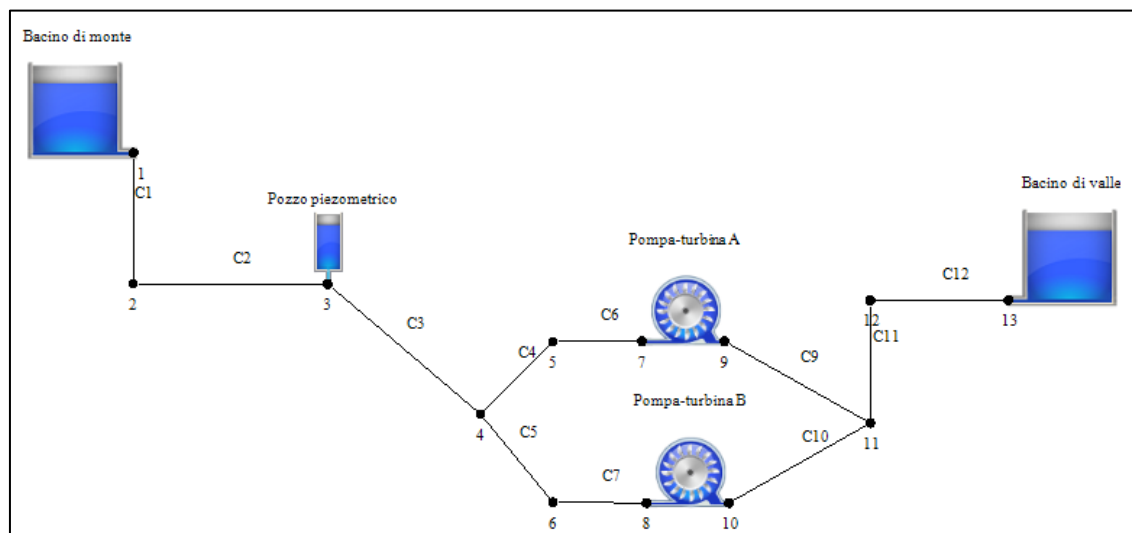


Figura 3 - Schematizzazione dell'impianto di Serra del Corvo. Lo schema raffigura i nodi del sistema analizzato ed i rapporti reciproci delle diverse componenti, ma non rappresenta altimetricamente le loro posizioni.

Sono stati modellati gli scenari seguenti (Tabella 2) che descrivono le condizioni più gravose sia in termini di sovrappressione che di massime oscillazioni all'interno del pozzo piezometrico:

Scenario	Manovra	Quota bacino monte	Quota bacino valle
G1	da impianto fermo a massima generazione	minima regolazione 466,00 m s.l.m.	minima regolazione 261,00 m s.l.m.
G2	da massima generazione a impianto fermo	massima regolazione 480,10 m s.l.m.	minima regolazione 261,00 m s.l.m.
GX	da impianto fermo a massima generazione, seguito da arresto nel momento più sfavorevole	massima regolazione 480,10 m s.l.m.	minima regolazione 261,00 m s.l.m.
P1	da impianto fermo a massimo pompaggio	massima regolazione 480,10 m s.l.m.	massima regolazione 269,00 m s.l.m.
P2	da massimo pompaggio a impianto fermo	minima regolazione 466,00 m s.l.m.	massima regolazione 269,00 m s.l.m.
GP	da massima generazione a massimo pompaggio	massima regolazione 480,10 m s.l.m.	minima regolazione 261,00 m s.l.m.
PG	da massimo pompaggio a massima generazione	minima regolazione 466,00 m s.l.m.	massima regolazione 269,00 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, ipotizzate sulle base di quanto riportato in *Fisher et al 2012*²:

- 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 340 s
- passaggio da impianto a massimo pompaggio a impianto fermo 15 s
- passaggio da massima generazione a massimo pompaggio 420 s
- passaggio da massimo pompaggio a massima generazione 190 s

² 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

Si riportano i risultati ottenuti per i diversi scenari, differenziando il tratto di monte e di valle rispetto alla centrale.

Per gli scenari di monte sono riportati i livelli d'acqua all'interno del pozzo piezometrico e le sovrappressioni raggiunte nei vari nodi della condotta. Per i tratti di valle invece sono riportate le sole sovrappressioni.

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, così fissate:

- limite inferiore - quota fondo: 393,00 m s.l.m.
- limite superiore - quota massima: 491,00 m s.l.m.

Si sottolinea come gli scenari siano pensati per descrivere "condizioni estreme" di utilizzo dell'impianto, che una normale e studiata gestione si premurerà di evitare. Verificando che anche in queste condizioni risulti comunque assicurato un corretto funzionamento del pozzo piezometrico, e che le sovrappressioni generate siano tali da non danneggiare alcun elemento appartenente al sistema di tubazioni o ad esso direttamente connesso, 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 del bacino di monte e di valle di minima regolazione, rispettivamente pari a di 480,10 m s.l.m. e 261,00 m s.l.m. L'introduzione di questo scenario è finalizzata a verificare che l'oscillazione indotta dallo svuotamento iniziale nel pozzo piezometrico non comporti il raggiungimento del livello minimo del pozzo, con conseguente ingresso di aria che danneggerebbe le turbine.

Il risultato della modellazione rappresentato in Figura 4 accerta come l'oscillazione del pozzo sia sempre compresa tra la quota massima e minima.

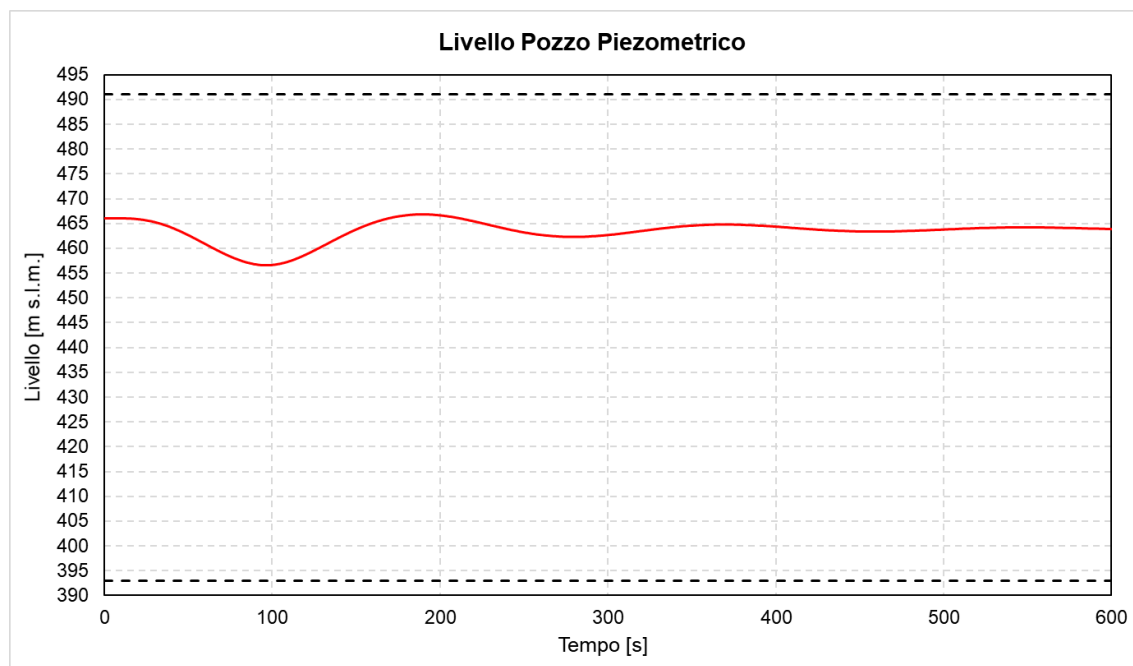


Figura 4 – Scenario G1 - Livello nel pozzo piezometrico

In Figura 5 si riporta l'andamento delle variazioni massime di pressione rispetto alla condizione statica raggiunte durante il moto vario.

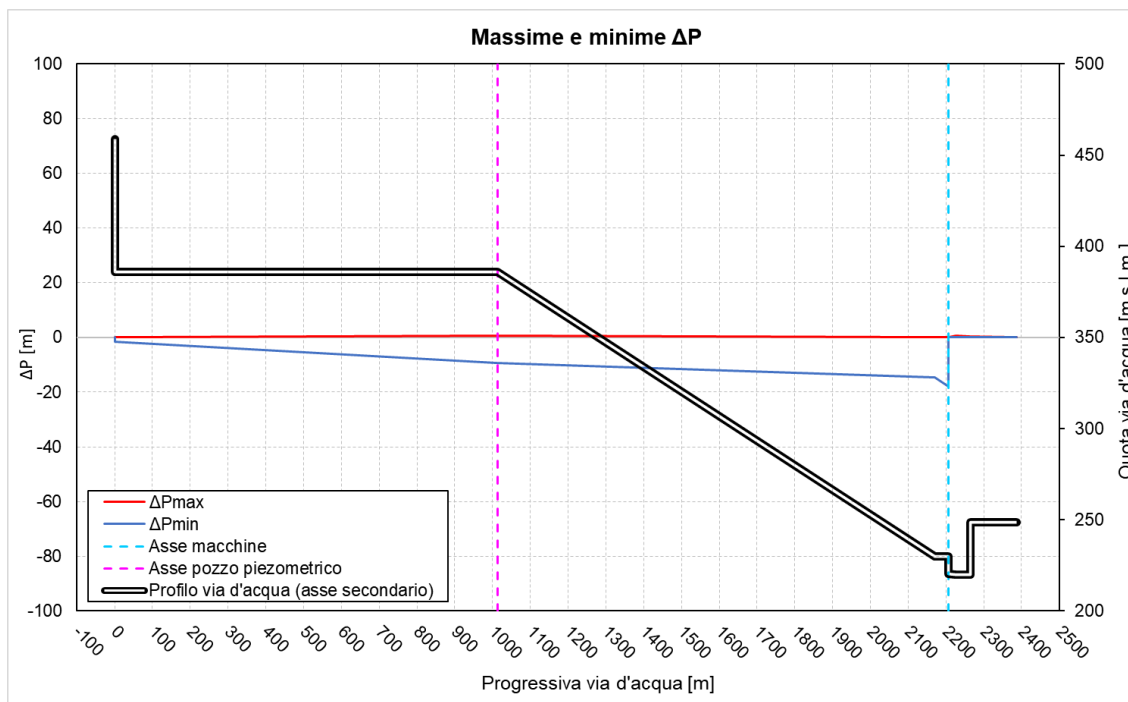


Figura 5 – Scenario G1 - Andamento delle sovrappressioni lungo le vie d'acqua

Per quanto riguarda le sovrappressioni positive (Tabella 3), i risultati più significativi sono relativi al tratto di valle dell'impianto: in particolare, il valore massimo di sovrappressione avviene presso il lato di valle delle macchine idrauliche, in cui si hanno circa 0,6 m di sovrappressione positiva, corrispondente ad una variazione di 1,4 % rispetto al carico statico ($H_s = 41$ m), dato dalla differenza tra il livello del bacino di valle la quota del diffusore.

Nodo	Progressiva (m)	Elemento	ΔP max (m)	ΔP max (%)
1	0	Opera di presa di monte	0.0	0.0%
2	0	Vertice basso presa monte	0.0	0.0%
3	1014	Base pozzo piezometrico	0.0	0.0%
4	2170	Biforcazione monte	0.0	0.0%
7	2207	Monte macchine	0.0	0.0%
9	2207	Valle macchine	0.6	1.4%
11	2264	Biforcazione valle	0.4	1.0%
12	2264	Sommità raccordo	0.4	0.9%
14	2386	Opera di presa di valle	0.0	0.0%

Tabella 3 – Scenario G1 – Massime variazioni positive di pressione nei nodi principali dell'impianto

Per quanto riguarda le sovrappressioni negative (Tabella 4), i risultati più significativi sono relativi al tratto di monte dell'impianto: in particolare, il valore massimo di sovrappressione avviene presso il lato di monte delle macchine idrauliche, in cui si hanno circa 18,0 m di sovrappressione negativa, corrispondente ad una variazione di 7,6 % rispetto

al carico statico ($H_s = 236$ m), dato dalla differenza tra il livello del bacino di monte e l'asse delle macchine.

Nodo	Progressiva (m)	Elemento	ΔP min (m)	ΔP min (%)
1	0	Opera di presa di monte	0.0	0.0%
2	0	Vertice basso presa monte	-1.4	-0.6%
3	1014	Base pozzo piezometrico	-9.3	-4.0%
4	2170	Biforcazione monte	-14.6	-6.2%
7	2207	Monte macchine	-18.0	-7.6%
9	2207	Valle macchine	0.0	0.0%
11	2264	Biforcazione valle	0.0	-0.1%
12	2264	Sommità raccordo	0.0	-0.1%
14	2386	Opera di presa di valle	0.0	0.0%

Tabella 4 – Scenario G1 – Massime variazioni negative di pressione nei nodi principali dell'impianto

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 (480,10 m s.l.m.), quello del bacino di valle di minima regolazione (261,00 m s.l.m.). Questo scenario è pensato per verificare che l'oscillazione indotta nel pozzo piezometrico - a causa della massima quota statica iniziale e dalla rapida chiusura degli organi di valle - non raggiunga la sommità del pozzo stesso, e per valutare le massime sovrappressioni attese in caso di brusco arresto delle macchine.

Il risultato della modellazione rappresentato in Figura 6 accerta come l'oscillazione del pozzo sia sempre compresa tra la quota massima e minima.

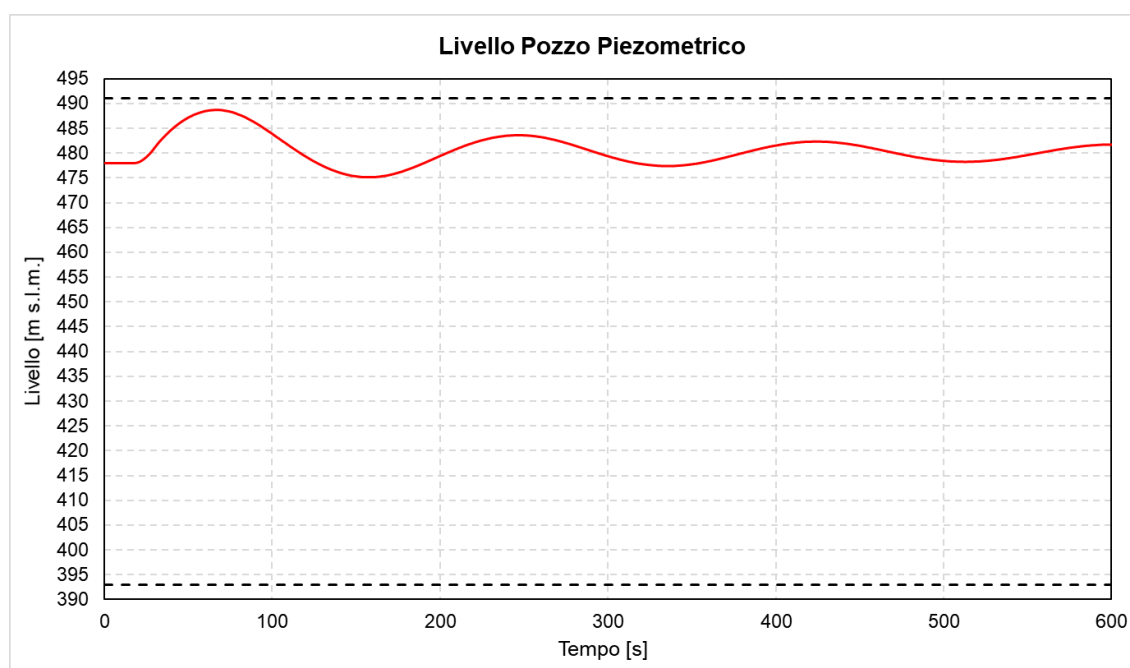


Figura 6 – Scenario G2 - Livello nel pozzo piezometrico

In Figura 7 si riporta l'andamento delle variazioni massime di pressione rispetto alla condizione statica raggiunte durante il moto vario.

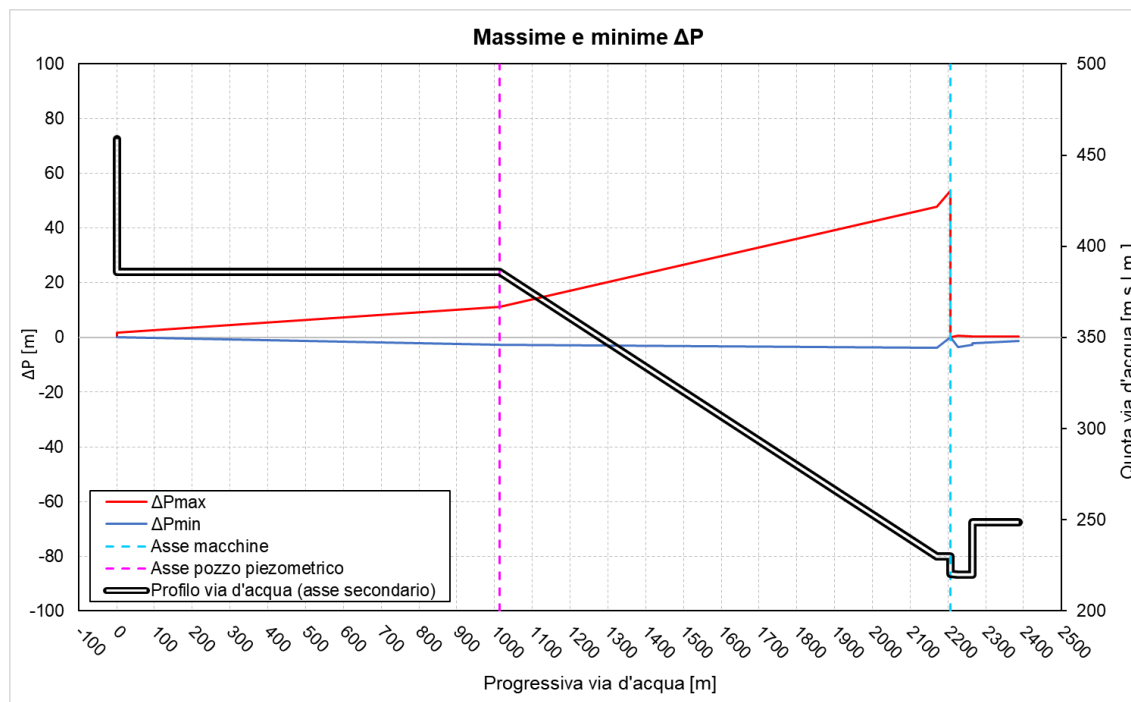


Figura 7 – Scenario G2 - Andamento delle sovrappressioni lungo le vie d'acqua

Per quanto riguarda le sovrappressioni positive (Tabella 5), i risultati più significativi sono relativi al tratto di monte dell'impianto: in particolare, il valore massimo di sovrappressione avviene presso il lato di monte delle macchine idrauliche, in cui si hanno circa 53,6 m di sovrappressione positiva, corrispondente ad una variazione di 20,8 % rispetto al carico statico ($H_s = 258$ m), dato dalla differenza tra il livello del bacino di monte e l'asse delle macchine.

Nodo	Progressiva (m)	Elemento	ΔP max (m)	ΔP max (%)
1	0	Opera di presa di monte	0.0	0.0%
2	0	Vertice basso presa monte	1.7	0.7%
3	1014	Base pozzo piezometrico	11.3	4.4%
4	2170	Biforcazione monte	47.9	18.6%
7	2207	Monte macchine	53.6	20.8%
9	2207	Valle macchine	0.5	1.3%
11	2264	Biforcazione valle	0.5	1.2%
12	2264	Sommità raccordo	0.4	1.0%
14	2386	Opera di presa di valle	0.4	1.0%

Tabella 5 – Scenario G2 – Massime variazioni positive di pressione nei nodi principali dell'impianto

Per quanto riguarda le sovrappressioni negative (Tabella 6), i risultati più significativi sono relativi al tratto di valle dell'impianto: in particolare, il valore massimo di sovrappressione avviene presso il lato di valle delle macchine idrauliche, in cui si hanno circa 3,6 m di sovrappressione negativa, corrispondente ad una variazione di 8,7 % rispetto

al carico statico ($H_s = 41$ m), dato dalla differenza tra il livello del bacino di valle la quota del diffusore.

Nodo	Progressiva (m)	Elemento	ΔP min (m)	ΔP min (%)
1	0	Opera di presa di monte	0.0	0.0%
2	0	Vertice basso presa monte	0.0	0.0%
3	1014	Base pozzo piezometrico	-2.8	-1.1%
4	2170	Biforcazione monte	-3.7	-1.4%
7	2207	Monte macchine	0.0	0.0%
9	2207	Valle macchine	-3.6	-8.7%
11	2264	Biforcazione valle	-2.7	-6.7%
12	2264	Sommità raccordo	-2.2	-5.4%
14	2386	Opera di presa di valle	-1.4	-3.3%

Tabella 6 – Scenario G2 – Massime variazioni negative di pressione nei nodi principali dell'impianto

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 ingresso dal bacino di monte raggiunge il valore massimo: in tale situazione, per il bilancio di massa, il volume d'acqua in ingresso dal bacino di monte sarà interamente assorbito dal pozzo piezometrico. Il livello del bacino di monte è di massima regolazione (480,10 m s.l.m.), quello del bacino di valle di minima regolazione (261,00 m s.l.m.). Questo scenario è pensato per verificare che l'oscillazione indotta nel pozzo piezometrico non raggiunga la sommità del pozzo stesso, e per valutare le massime sovrappressioni attese in caso di brusco arresto delle macchine.

Il risultato della modellazione rappresentato in Figura 8 accerta come l'oscillazione del pozzo sia sempre compresa tra la quota massima e minima.

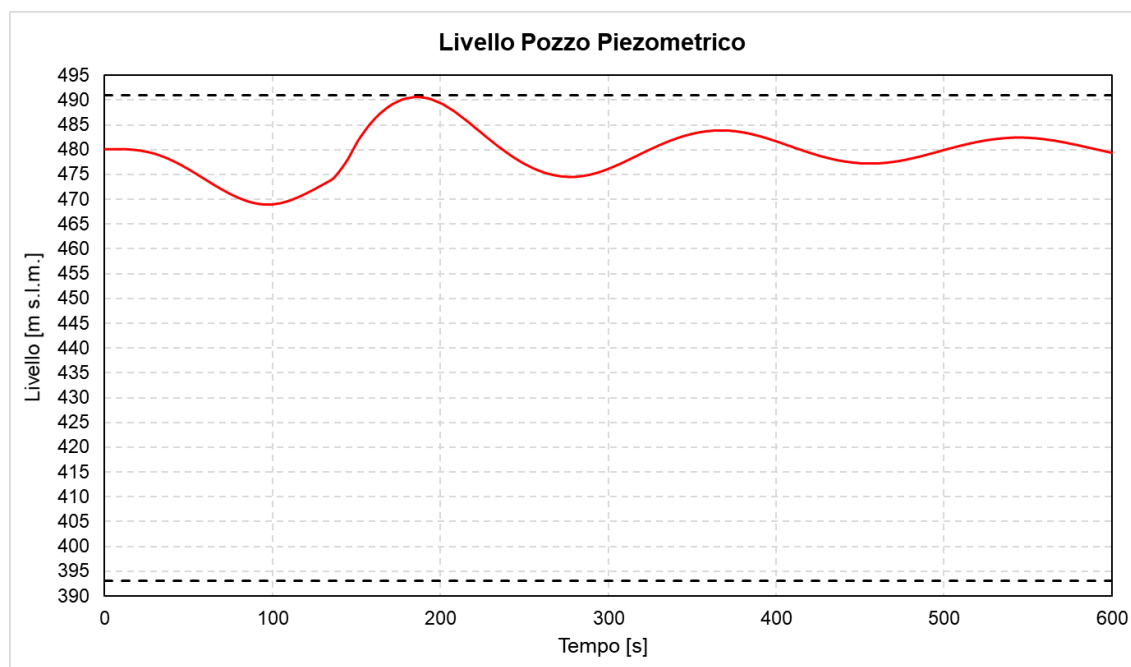


Figura 8 – Scenario GX - Livello nel pozzo piezometrico

In Figura 7 si riporta l'andamento delle variazioni massime di pressione rispetto alla condizione statica raggiunte durante il moto vario.

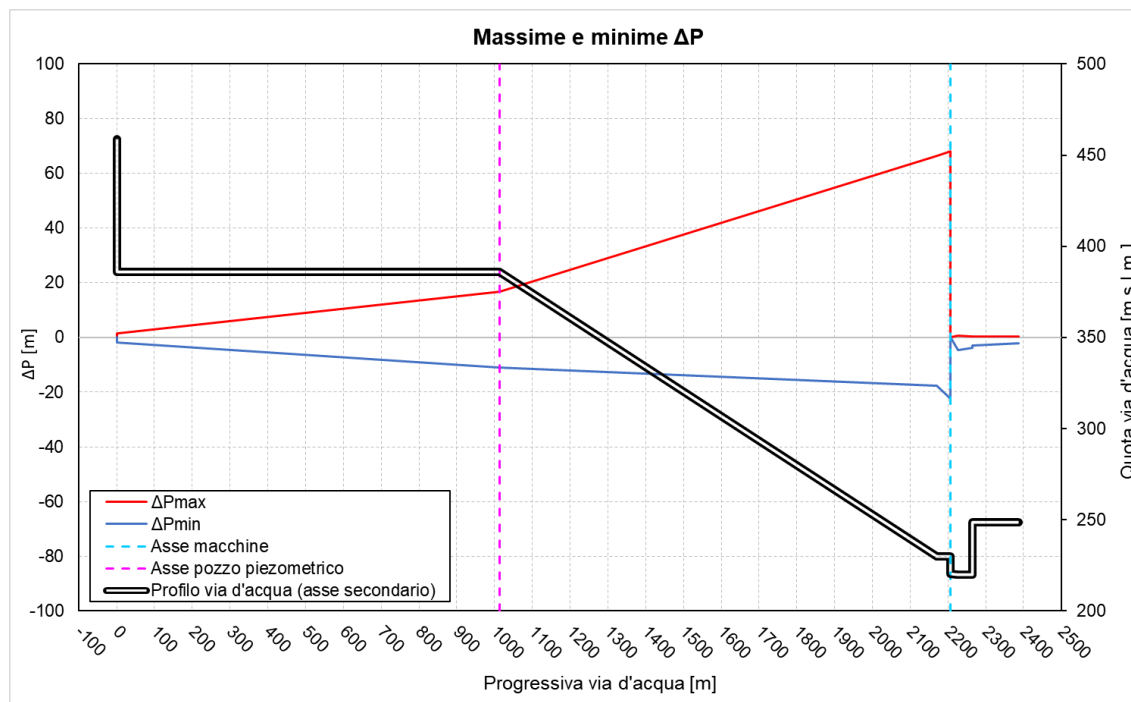


Figura 9 – Scenario GX - Andamento delle sovrappressioni lungo le vie d'acqua

Per quanto riguarda le sovrappressioni positive (Tabella 7), i risultati più significativi sono relativi al tratto di monte dell'impianto: in particolare, il valore massimo di sovrappressione avviene presso il lato di monte delle macchine idrauliche, in cui si hanno circa 68,1 m di sovrappressione positiva, corrispondente ad una variazione di 26,4 % rispetto al carico statico ($H_s = 258$ m), dato dalla differenza tra il livello del bacino di monte e l'asse delle macchine.

Nodo	Progressiva (m)	Elemento	ΔP max (m)	ΔP max (%)
1	0	Opera di presa di monte	0.0	0.0%
2	0	Vertice basso presa monte	1.5	0.6%
3	1014	Base pozzo piezometrico	16.7	6.5%
4	2170	Biforcazione monte	66.4	25.7%
7	2207	Monte macchine	68.1	26.4%
9	2207	Valle macchine	0.7	1.7%
11	2264	Biforcazione valle	0.5	1.3%
12	2264	Sommità raccordo	0.4	1.0%
14	2386	Opera di presa di valle	0.2	0.6%

Tabella 7 – Scenario GC – Massime variazioni positive di pressione nei nodi principali dell'impianto

Per quanto riguarda le sovrappressioni negative (Tabella 8), i risultati più significativi sono relativi al tratto di valle dell'impianto: in particolare, il valore massimo di sovrappressione avviene presso il lato di valle delle macchine idrauliche, in cui si hanno circa 4,6 m di sovrappressione negativa, corrispondente ad una variazione di 11,2 % rispetto

al carico statico ($H_s = 41$ m), dato dalla differenza tra il livello del bacino di valle la quota del diffusore.

Nodo	Progressiva (m)	Elemento	ΔP min (m)	ΔP min (%)
1	0	Opera di presa di monte	0.0	0.0%
2	0	Vertice basso presa monte	-1.9	-0.7%
3	1014	Base pozzo piezometrico	-11.0	-4.3%
4	2170	Biforcazione monte	-17.7	-6.8%
7	2207	Monte macchine	-22.5	-8.7%
9	2207	Valle macchine	-4.6	-11.2%
11	2264	Biforcazione valle	-3.7	-9.1%
12	2264	Sommità raccordo	-3.1	-7.5%
14	2386	Opera di presa di valle	-2.1	-5.1%

Tabella 8 – Scenario GX – Massime variazioni negative di pressione nei nodi principali dell'impianto

5.3.4 SCENARIO P1

Lo scenario P1 verifica il comportamento dell'impianto conseguente all'avvio (in 340 s) delle due pompe in condizioni di massimo carico.

Il livello del bacino di monte è di massima regolazione (480,10 m s.l.m.), quello del bacino di valle di massima regolazione (261,00 m s.l.m.). Questo scenario è pensato per verificare che in condizioni iniziali di "alto livello" del pozzo piezometrico (conseguente alla condizione di invaso del bacino di monte), l'oscillazione non raggiunga la sommità del pozzo stesso a seguito dell'innalzamento dato dall'avvio delle pompe di valle.

Il risultato della modellazione rappresentato in Figura 10 accerta come l'oscillazione del pozzo sia sempre compresa tra la quota massima e minima.

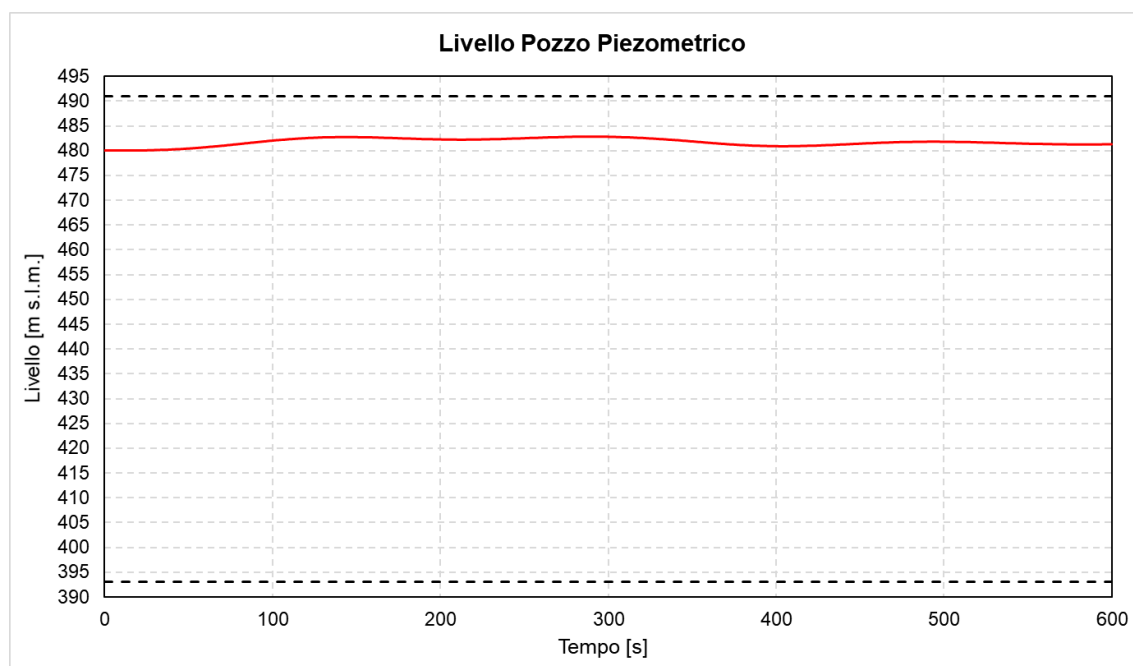


Figura 10 – Scenario P1 - Livello nel pozzo piezometrico

In Figura 11 si riporta l'andamento delle variazioni massime di pressione rispetto alla condizione statica raggiunte durante il moto vario.

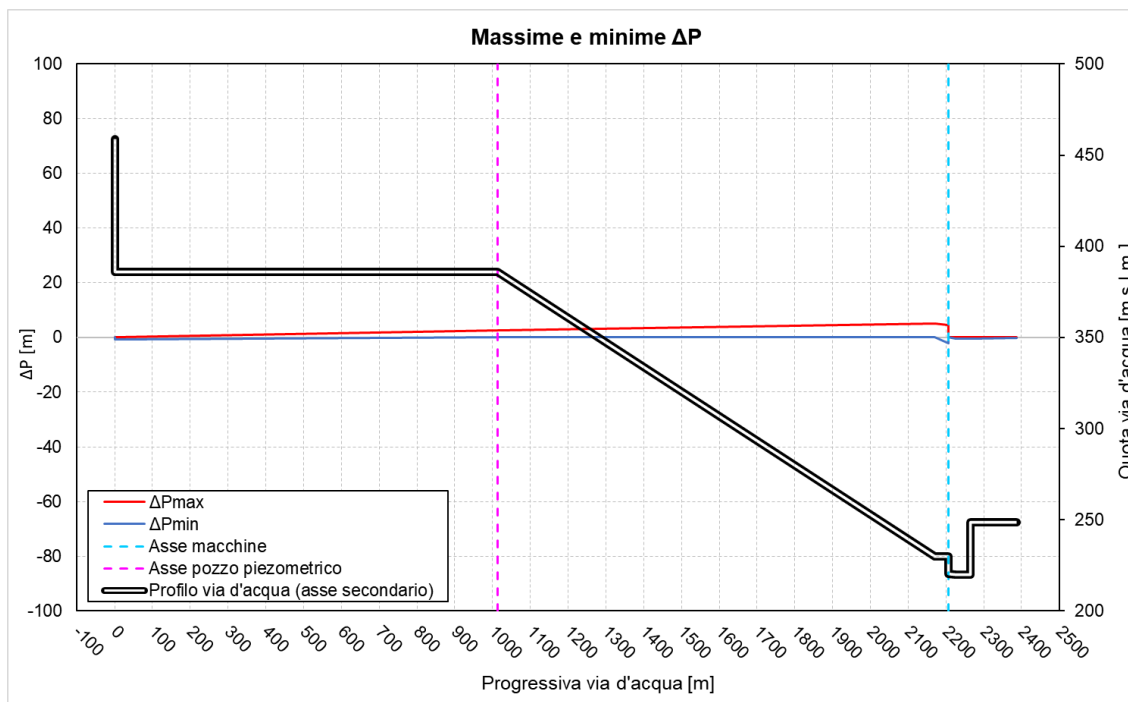


Figura 11 – Scenario P1 - Andamento delle sovrappressioni lungo le vie d'acqua

Per quanto riguarda le sovrappressioni positive (Tabella 9), i risultati più significativi sono relativi al tratto di monte dell'impianto: in particolare, il valore massimo di sovrappressione avviene presso la biforcazione a monte delle macchine, in cui si hanno circa 5,0 m di sovrappressione positiva, corrispondente ad una variazione di 1,9 % rispetto al carico statico ($H_s = 258$ m), dato dalla differenza tra il livello del bacino di valle la quota del diffusore.

Nodo	Progressiva (m)	Elemento	ΔP max (m)	ΔP max (%)
1	0	Opera di presa di monte	0.0	0.0%
2	0	Vertice basso presa monte	0.1	0.0%
3	1014	Base pozzo piezometrico	2.7	1.0%
4	2170	Biforcazione monte	5.0	1.9%
7	2207	Monte macchine	4.5	1.7%
9	2207	Valle macchine	0.0	0.0%
11	2264	Biforcazione valle	0.0	0.0%
12	2264	Sommità raccordo	0.0	0.0%
14	2386	Opera di presa di valle	0.0	0.0%

Tabella 9 – Scenario P1 – Massime variazioni positive di pressione nei nodi principali dell'impianto

Per quanto riguarda le sovrappressioni negative (Tabella 10), i risultati più significativi sono relativi al tratto di valle dell'impianto: in particolare, il valore massimo di sovrappressione avviene presso il lato di valle delle macchine idrauliche, in cui si hanno circa 0,6 m di sovrappressione negativa, corrispondente ad una variazione di 1,2 % rispetto

al carico statico ($H_s = 49$ m), dato dalla differenza tra il livello del bacino di valle la quota del diffusore.

Nodo	Progressiva (m)	Elemento	ΔP min (m)	ΔP min (%)
1	0	Opera di presa di monte	0.0	0.0%
2	0	Vertice basso presa monte	-0.8	-0.3%
3	1014	Base pozzo piezometrico	0.0	0.0%
4	2170	Biforcazione monte	0.0	0.0%
7	2207	Monte macchine	-2.0	-0.8%
9	2207	Valle macchine	-0.6	-1.2%
11	2264	Biforcazione valle	-0.5	-1.1%
12	2264	Sommità raccordo	-0.5	-1.1%
14	2386	Opera di presa di valle	-0.3	-0.6%

Tabella 10 – Scenario P1 – Massime variazioni negative di pressione nei nodi principali dell'impianto

5.3.5 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 (466,00 m s.l.m.), quello del bacino di valle di massima regolazione (269,00 m s.l.m.). Questo scenario è pensato per verificare che in condizioni iniziali di "basso livello" del pozzo piezometrico (conseguente alla condizione di invaso del bacino di monte) il blocco delle pompe non porti allo svuotamento del pozzo piezometrico.

Il risultato della modellazione rappresentato in Figura 12 accerta come l'oscillazione del pozzo sia sempre compresa tra la quota massima e minima.

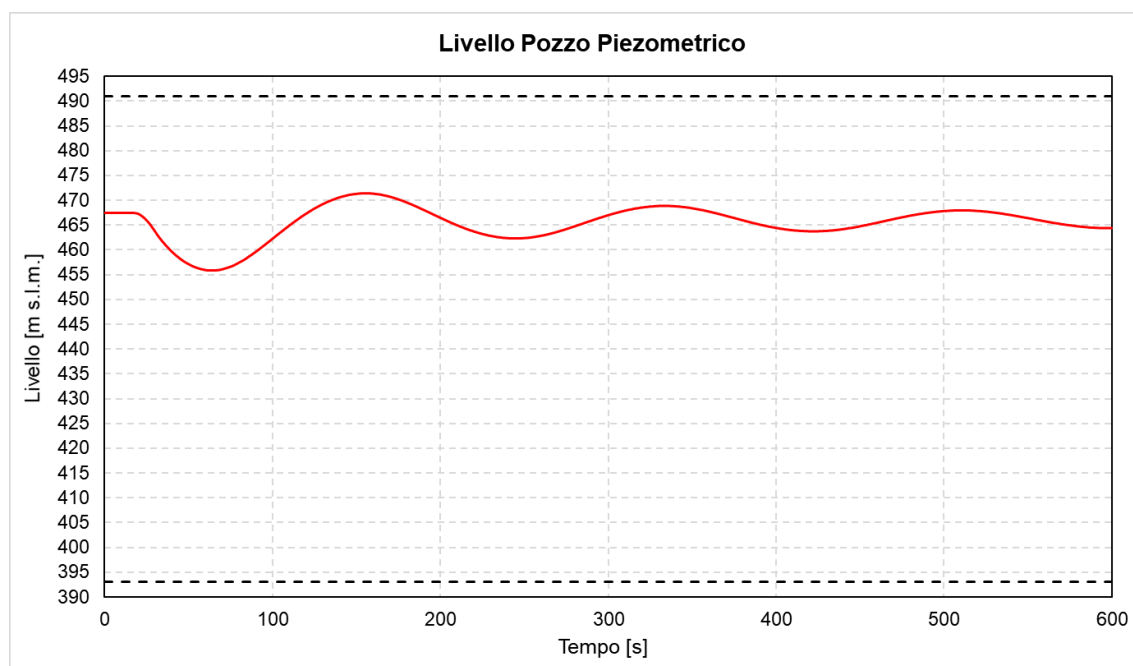


Figura 12 - Scenario P2 - Livello nel pozzo piezometrico

In Figura 13 si riporta l'andamento delle variazioni massime di pressione rispetto alla condizione statica raggiunte durante il moto vario.

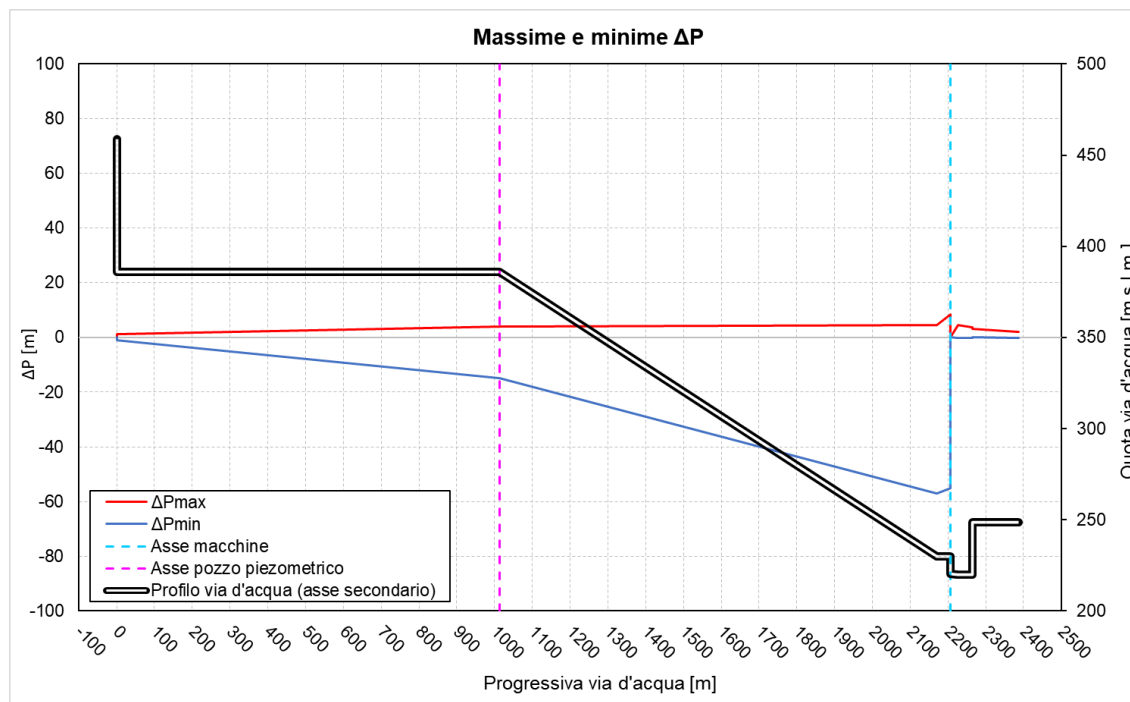


Figura 13 – Scenario P2 - Andamento delle sovrappressioni lungo le vie d'acqua

Per quanto riguarda le sovrappressioni positive (Tabella 11), i risultati più significativi sono relativi al tratto di valle dell'impianto: in particolare, il valore massimo di sovrappressione avviene presso il lato di valle delle macchine idrauliche, in cui si hanno circa 4,6 m di sovrappressione positiva, corrispondente ad una variazione di 9,5 % rispetto al carico statico ($H_s = 49$ m), dato dalla differenza tra il livello del bacino di valle la quota del diffusore.

Nodo	Progressiva (m)	Elemento	ΔP max (m)	ΔP max (%)
1	0	Opera di presa di monte	0.0	0.0%
2	0	Vertice basso presa monte	1.2	0.5%
3	1014	Base pozzo piezometrico	3.9	1.7%
4	2170	Biforcazione monte	4.5	1.9%
7	2207	Monte macchine	8.4	3.6%
9	2207	Valle macchine	4.6	9.5%
11	2264	Biforcazione valle	3.6	7.4%
12	2264	Sommità raccordo	3.0	6.2%
14	2386	Opera di presa di valle	2.0	4.0%

Tabella 11 – Scenario P2 – Massime variazioni positive di pressione nei nodi principali dell'impianto

Per quanto riguarda le sovrappressioni negative (Tabella 12), i risultati più significativi sono relativi al tratto di monte dell'impianto: in particolare, il valore massimo di sovrappressione avviene presso la biforcazione a monte delle macchine, in cui si hanno circa 57,0 m di sovrappressione negativa, corrispondente ad una variazione del 24,2 %

rispetto al carico statico ($H_s = 236$ m), dato dalla differenza tra il livello del bacino di monte e l'asse delle macchine.

Nodo	Progressiva (m)	Elemento	ΔP min (m)	ΔP min (%)
1	0	Opera di presa di monte	0.0	0.0%
2	0	Vertice basso presa monte	-1.1	-0.5%
3	1014	Base pozzo piezometrico	-14.8	-6.3%
4	2170	Biforcazione monte	-57.0	-24.2%
7	2207	Monte macchine	-55.0	-23.3%
9	2207	Valle macchine	-0.1	0.0%
11	2264	Biforcazione valle	-0.1	-0.5%
12	2264	Sommità raccordo	0.0	-6.3%
14	2386	Opera di presa di valle	-0.1	-24.2%

Tabella 12 – Scenario P2 – Massime variazioni negative di pressione nei nodi principali dell'impianto

5.3.6 SCENARIO GP

Lo scenario GP verifica il comportamento dell'impianto a seguito del passaggio (in 420 s) da massima generazione a massimo pompaggio.

Il livello del bacino di monte è di massima regolazione (480,10 m s.l.m.), quello del bacino di valle di minima regolazione (269,00 m s.l.m.). Questo scenario è pensato per verificare che in condizioni iniziali di "alto livello" del pozzo piezometrico (conseguente alla condizione di invaso del bacino di monte) lo scambio da pompaggio a produzione non porti al raggiungimento del livello massimo pozzo.

Il risultato della modellazione rappresentato in Figura 14 accerta come l'oscillazione del pozzo sia sempre compresa tra la quota massima e minima.

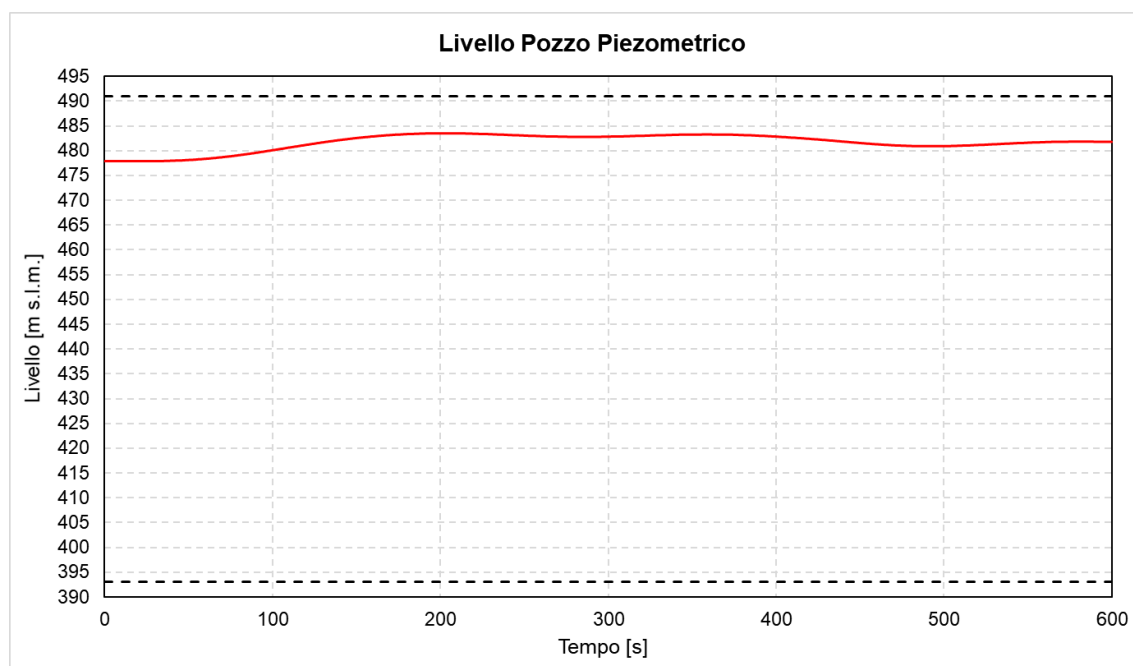


Figura 14 - Scenario GP - Livello nel pozzo piezometrico

In Figura 15 si riporta l'andamento delle variazioni massime di pressione rispetto alla condizione statica raggiunte durante il moto vario.

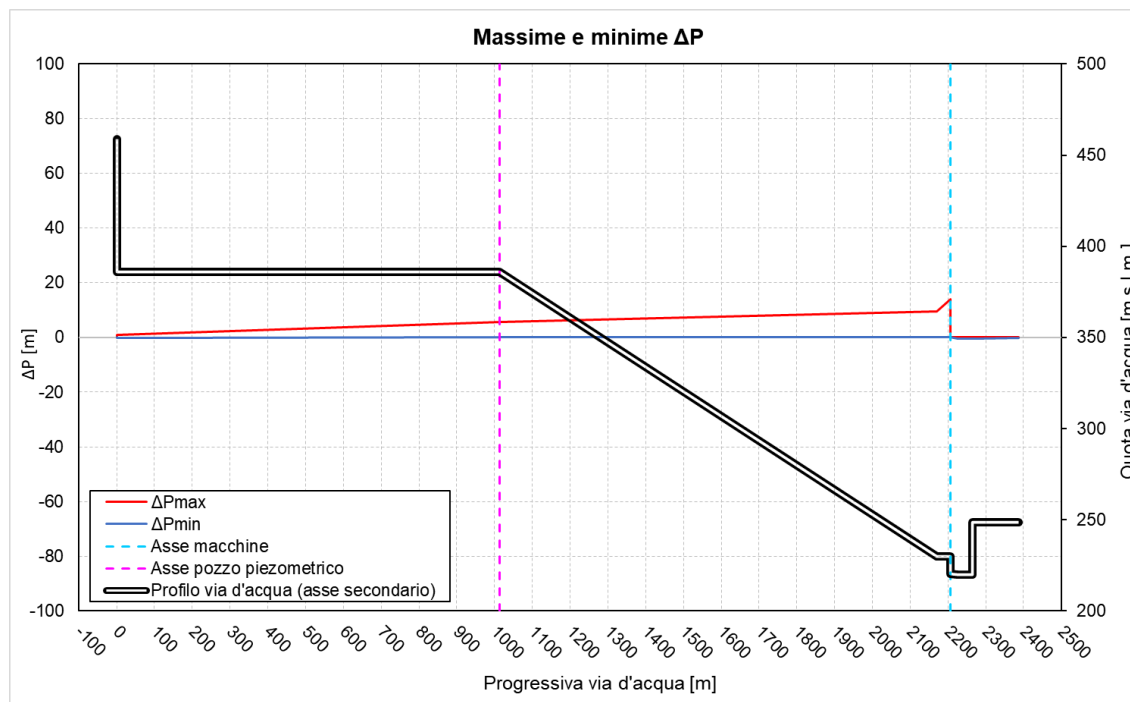


Figura 15 – Scenario GP - Andamento delle sovrappressioni lungo le vie d'acqua

Per quanto riguarda le sovrappressioni positive (Tabella 13), i risultati più significativi sono relativi al tratto di monte dell'impianto: in particolare, il valore massimo di sovrappressione avviene presso il lato di monte delle macchine idrauliche, in cui si hanno circa 14,0 m di sovrappressione positiva, corrispondente ad una variazione di 5,4 % rispetto al carico statico ($H_s = 258$ m), dato dalla differenza tra il livello del bacino di monte e l'asse delle macchine.

Nodo	Progressiva (m)	Elemento	ΔP max (m)	ΔP max (%)
1	0	Opera di presa di monte	0.0	0.0%
2	0	Vertice basso presa monte	1.0	0.4%
3	1014	Base pozzo piezometrico	5.6	2.2%
4	2170	Biforcazione monte	9.5	3.7%
7	2207	Monte macchine	14.0	5.4%
9	2207	Valle macchine	0.0	0.0%
11	2264	Biforcazione valle	0.0	0.0%
12	2264	Sommità raccordo	0.0	0.0%
14	2386	Opera di presa di valle	0.0	0.0%

Tabella 13 – Scenario GP – Massime variazioni positive di pressione nei nodi principali dell'impianto

Per quanto riguarda le sovrappressioni negative (Tabella 14), i risultati più significativi sono relativi al tratto di valle dell'impianto: in particolare, il valore massimo di sovrappressione avviene presso il lato di valle delle macchine idrauliche, in cui si hanno circa 0,6 m di sovrappressione negativa, corrispondente ad una variazione di 1,4 % rispetto

al carico statico ($H_s = 41$ m), dato dalla differenza tra il livello del bacino di valle la quota del diffusore.

Nodo	Progressiva (m)	Elemento	ΔP min (m)	ΔP min (%)
1	0	Opera di presa di monte	0.0	0.0%
2	0	Vertice basso presa monte	0.0	0.0%
3	1014	Base pozzo piezometrico	0.0	0.0%
4	2170	Biforcazione monte	0.0	0.0%
7	2207	Monte macchine	0.0	0.0%
9	2207	Valle macchine	-0.6	-1.4%
11	2264	Biforcazione valle	-0.5	-1.3%
12	2264	Sommità raccordo	-0.5	-1.1%
14	2386	Opera di presa di valle	-0.2	-0.4%

Tabella 14 – Scenario GP – Massime variazioni negative di pressione nei nodi principali dell'impianto

5.3.7 SCENARIO PG

Lo scenario PG verifica il comportamento dell'impianto a seguito del passaggio (in 190 s) da massimo pompaggio a massimo carico a generazione a massimo carico.

Il livello del bacino di monte è di minima regolazione (466,00 m s.l.m.), quello del bacino di valle di massima regolazione (269,00 m s.l.m.). Questo scenario è finalizzato a verificare che l'oscillazione indotta dallo svuotamento iniziale nel pozzo piezometrico non comporti il raggiungimento del livello minimo del pozzo, con conseguente ingresso di aria che danneggerebbe le turbine.

Il risultato della modellazione rappresentato in Figura 16 accerta come l'oscillazione del pozzo sia sempre compresa tra la quota massima e minima.

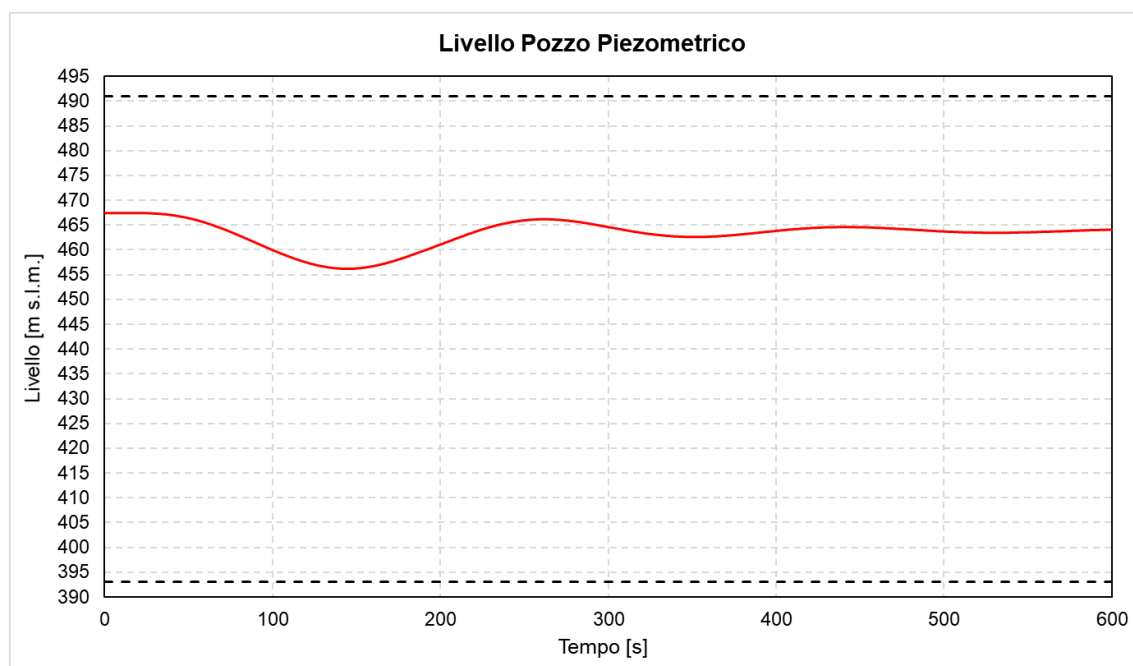


Figura 16 - Scenario PG - Livello nel pozzo piezometrico

In si riporta l'andamento delle variazioni massime di pressione rispetto alla condizione statica raggiunte durante il moto vario.

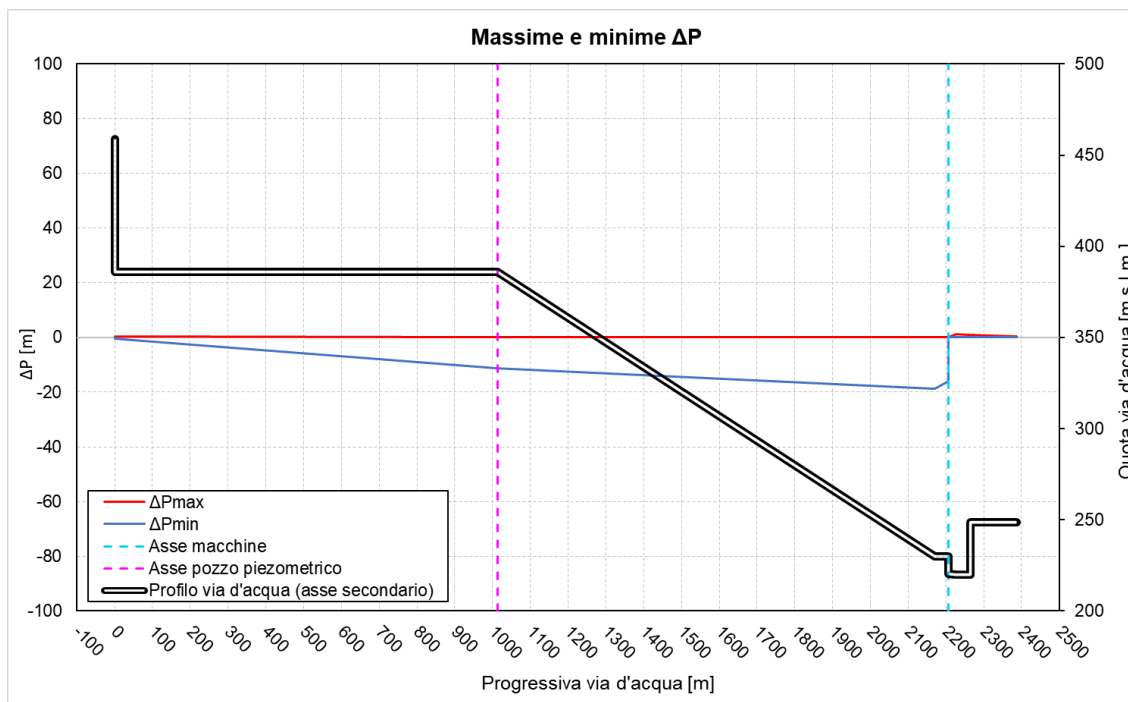


Figura 17 – Scenario PG - Andamento delle sovrappressioni lungo le vie d'acqua

Per quanto riguarda le sovrappressioni positive (Tabella 15), i risultati più significativi sono relativi al tratto di valle dell'impianto: in particolare, il valore massimo di sovrappressione avviene presso il lato di valle delle macchine idrauliche, in cui si hanno circa 1,2 m di sovrappressione positiva, corrispondente ad una variazione di 2,4 % rispetto al carico statico ($H_s = 49$ m), dato dalla differenza tra il livello del bacino di valle la quota del diffusore.

Nodo	Progressiva (m)	Elemento	ΔP max (m)	ΔP max (%)
1	0	Opera di presa di monte	0.0	0.0%
2	0	Vertice basso presa monte	0.2	0.1%
3	1014	Base pozzo piezometrico	0.0	0.0%
4	2170	Biforcazione monte	0.0	0.0%
7	2207	Monte macchine	0.0	0.0%
9	2207	Valle macchine	1.2	2.4%
11	2264	Biforcazione valle	1.0	2.0%
12	2264	Sommità raccordo	0.9	1.7%
14	2386	Opera di presa di valle	0.5	1.1%

Tabella 15 – Scenario PG – Massime variazioni positive di pressione nei nodi principali dell'impianto

Per quanto riguarda le sovrappressioni negative (Tabella 16), i risultati più significativi sono relativi al tratto di monte dell'impianto: in particolare, il valore massimo di sovrappressione avviene presso la biforcazione a monte delle macchine, in cui si hanno circa 18,9 m di sovrappressione negativa, corrispondente ad una variazione di 8,0 % rispetto

al carico statico ($H_s = 236$ m), dato dalla differenza tra il livello del bacino di monte e l'asse delle macchine.

Nodo	Progressiva (m)	Elemento	ΔP min (m)	ΔP min (%)
1	0	Opera di presa di monte	0.0	0.0%
2	0	Vertice basso presa monte	-0.5	-0.2%
3	1014	Base pozzo piezometrico	-11.2	-4.7%
4	2170	Biforcazione monte	-18.9	-8.0%
7	2207	Monte macchine	-15.9	-6.8%
9	2207	Valle macchine	0.0	0.0%
11	2264	Biforcazione valle	0.0	0.0%
12	2264	Sommità raccordo	0.0	0.0%
14	2386	Opera di presa di valle	0.0	0.0%

Tabella 16 – Scenario PG – Massime variazioni negative di pressione nei nodi principali dell'impianto

5.4 CONCLUSIONI

In Tabella 17 sono riassunti per ogni scenario i risultati in termini di:

- livelli massimi e minimi raggiunti nel pozzo piezometrico
- valori più elevati di sovrappressione

Scenario	Livello minimo pozzo	Livello massimo pozzo	Sovrappressione massima monte	Sovrappressione massima valle
	[m s.l.m.]	[m s.l.m.]	[m]	[m]
G1	456.60	466.78	-18.0	0.5
G2	475.10	488.75	53.6	-3.7
GX	469.00	490.55	68.1	-4.6
P1	480.10	482.87	5.0	-0.6
P2	455.80	471.38	-57.0	4.6
GP	477.96	483.51	14.0	-0.6
PG	456.14	483.51	-18.9	1.2

Tabella 17 – Risultati riassuntivi dell'analisi dei transitori di moto vario

Il pozzo piezometrico è verificato in quanto il livello raggiunto al suo interno è sempre contenuto tra il limite inferiore (393,00 m s.l.m.) e quello superiore (491,00 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 m³. 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 24 m, pertanto questo contributo è assunto pari a 1,740 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 m x 24 m = 0,120 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

Il *fetch* è di poco superiore ad 1 km, pertanto si assume cautelativamente il valore associato alla velocità massima del vento prevista nella tabella per *fetch* pari a 2 km; tale contributo è pertanto pari a $0,38 \text{ m} + 0,063 \text{ m} = 0,443 \text{ m}$
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 dalla precipitazione che cade 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*.

È stato scelto di adottare in via cautelativa l'altezza di precipitazione associata ad una durata di 24 ore, ossia **161 mm**. Come ulteriore misura cautelativa, in virtù dell'intrinseca incertezza delle analisi idrologiche ed in considerazione del fatto che la superficie sciolante (quella delimitata dal coronamento) è maggiore della superficie bagnata alla quota di massima regolazione, si ipotizza che tale altezza sia pari a **0,200 m**.

In questa fase di progettazione è previsto collocare la soglia dello sfioratore di superficie 30 cm al di sopra della quota di massima regolazione, pari a 480,10 m s.l.m.; pertanto l'altezza di massimo invaso è pari a 480,60 m s.l.m.

Si fa presente che questa scelta è a favore di sicurezza in quanto si ipotizza che durante l'intera durata dell'evento di piena venga trascurato il debole 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 18); esso consente di contenere interamente gli effetti di sovrizzo causato dalle onde da vento e da sisma (aventi un valore stimato di 0,443 m).

In questo modo, è stato possibile soddisfare la verifica del franco di sicurezza della diga prevedendo una differenza di 1.9 m tra la quota di massimo invaso (480,60 m s.l.m.) ed il piano di coronamento (482,50 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 $1,740 + 0,120 \text{ m} = 1,860 \text{ m}$.

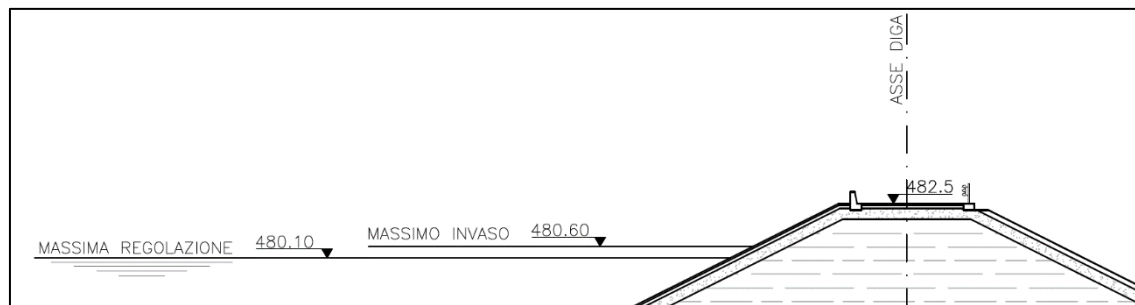


Figura 18 – Dettaglio del rilevato di monte

7 CALCOLO DELLA PORTATA MASSIMA DELLO SFIORATORE DI SUPERFICIE

Lo sfioratore di superficie è previsto lungo il lato Sud-Ovest del bacino, con soglia posta a 30 cm sopra la quota di massima regolazione (480,10 m s.l.m.), dunque a quota 480,60 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 [m³/s] = portata transitante dallo sfioratore di superficie

L [m] = larghezza della luce dello sfioratore

μ [-] = coefficiente di efflusso

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

La h_{sfioro} è pari ai 200 mm di precipitazione introdotti al § 6.2 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 **$Q = 0,61$ m³/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 a Gravina in Puglia, 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: 420.000 m²
- superficie occupata dall'acqua nel bacino di monte alla quota di minima regolazione: 315.000 m²

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

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

Si ottengono i seguenti risultati (Tabella 18):

Mese	Temperature medie mensili [°C]	$E_{mensile}$ [mm/mese]
Gennaio	5,9	32,2
Febbraio	6,4	36,4
Marzo	9,4	64,8
Aprile	12,8	103,0
Maggio	17,5	164,7
Giugno	22,6	241,7
Luglio	25,4	288,0
Agosto	25,3	286,3
Settembre	20,3	205,8
Ottobre	16	144,0
Novembre	11,3	85,5
Dicembre	7,1	42,6
<i>Media annua</i>	<i>15,0</i>	<i>141,3</i>
<i>Somma</i>	-	<i>1695,2 [mm/anno]</i>

Tabella 18 - Temperature medie mensili ed evaporazione media mensile³

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:

$$Evap_{annua,1} = 1.695,2 \frac{\text{mm}}{\text{anno}} \cdot 420.000 \text{ m}^2 \approx 712.000 \frac{\text{m}^3}{\text{anno}} = 22,6 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

³ I dati di temperature medie mensili provengono dal sito it.climate-data.org.

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:

$$Evap_{annua,1} = 1.335,8 \frac{\text{mm}}{\text{anno}} \cdot \frac{420.000 + 315.000}{2} \text{ m}^2 \approx 623.000 \frac{\text{m}^3}{\text{anno}} = 19,8 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

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 tra i 200 e i 500 m s.l.m.), espressi nella seguente formulazione:

$$E_{annua,2} = 90 \cdot 15,0 \text{ }^\circ\text{C} = 1.350 \frac{\text{mm}}{\text{anno}}$$

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:

$$Evap_{annua,2} = 1.350 \frac{\text{mm}}{\text{anno}} \cdot 420.000 \text{ m}^2 \approx 567.000 \frac{\text{m}^3}{\text{anno}} = 18,0 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

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:

$$Evap_{annua,2} = 1.350 \frac{\text{mm}}{\text{anno}} \cdot \frac{420.000 + 315.000}{2} \text{ m}^2 \approx 496.000 \frac{\text{m}^3}{\text{anno}} = 15,7 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

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 712.000 m³/anno, pari a 22,6 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 Serra del Corvo, e dunque si induce indirettamente una diminuzione delle perdite per evaporazione nell'invaso di Serra del Corvo.



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