



HGT Design & Execution



GRE CODE

GRE.EEC.R.14.IT.H.16071.00.035.00

TITLE:

AVAILABLE LANGUAGE: IT

Impianto idroelettrico di PIZZONE II

Progetto Definitivo per Autorizzazione

# RELAZIONE IDRAULICA

FILE NAME: GRE.EEC.R.14.IT.H.16071.00.035.00.docx

ORDINE APPARTENENZA			Ingegneri	Ingegnere	
PROVINCIA/REGIONE			Milano	Verona	
NUM. MATRICOLA			10669	1542	
00	29-11-22	REVISIONE	R. Radice	R. Keffer	G. Sembenelli
REV.	DATE	DESCRIPTION	PREPARED	CHECKED	APPROVED

## GRE VALIDATION

		F. Torasso
COLLABORATORS	VERIFIED BY	VALIDATED BY

PROJECT PLANT	GRE CODE																		
	GROUP	FUNCTION	TYPE	ISSUER	COUNTRY	TEC.	PLANT			SYSTEM	PROGRESSIVE	REVISION							
	GRE	EEC	R	1	4	I	T	H	1	6	0	7	1	0	0	0	3	5	0

CLASSIFICATION: <b>PUBLIC</b>	UTILIZATION SCOPE: <b>PROGETTO DEFINITIVO PER AUTORIZZAZIONE</b>
-------------------------------	--

## INDEX

1. INTRODUZIONE .....	3
2. SVILUPPO DEL MODELLO IDRAULICO DI SIMULAZIONE .....	4
3. DATI IDRAULICI.....	5
3.1. SCHEMA IDRAULICO.....	5
3.2 VERIFICA DEL COMPORTAMENTO NELLO STATO STAZIONARIO .....	6
3.3 VERIFICA DEL COMPORTAMENTO NELLO STATO TRANSITORIO .....	7
3.4 LIVELLI NEI SERBATOI .....	9
3.5 PORTATE.....	9
3.6 VELOCITÀ DELLE ONDE.....	9
3.7 PERDITE DI CARICO .....	10
3.8 TEMPI DI MANOVRA DEGLI ORGANI IDRAULICI .....	10
3.9 SCENARI ANALIZZATI.....	10
4 ANALISI DELLO STATO STAZIONARIO .....	12
5 ANALISI DEL TRANSITORIO IDRAULICO.....	13
5.2 LOAD REJECTION (RIFIUTO DI CARICO) .....	13
5.3 PUMP TRIP (BLOCCO POMPE) .....	14
6 VERIFICA DELLE OPERE DI PRESA.....	16
7 VERIFICA DELLA SOMMERGENZA DELLE TURBINE/POMPA.....	18
8 CONCLUSIONI .....	20

## 1. INTRODUZIONE

Enel è proprietaria e gestore del Sistema Idroelettrico di Montagna Spaccata che consiste in una serie di invasi in cascata che alimentano altrettante centrali. Nel tratto di monte di questo sistema esiste oggi l'invaso di Montagna Spaccata, che alimenta la centrale di Pizzone e l'Invaso di Castel San Vincenzo, che riceve le acque dalla Centrale di Pizzone e alimenta quella di Rocchetta.

Nell'ambito delle strategie di investimento per ampliare la produzione di energia rinnovabile Enel sta considerando la possibilità di intervenire sul Sistema esistente per migliorarne l'efficienza o incrementarne la potenza installata.

Stantec S.p.A. (di seguito "**Stantec**"), in qualità di Consulente Tecnico, è stata incaricata da Enel Green Power S.p.A. (di seguito "**EGP**") di effettuare uno Studio di Pre-Fattibilità e successivamente il presente Progetto Definitivo per Autorizzazione per valutare la possibilità di convertire lo schema idroelettrico tradizionale esistente in un nuovo impianto di pompaggio / generazione preservando i due bacini.

Nel 2021 è stato consegnato a Enel il citato Studio di Pre-Fattibilità, selezionando una alternativa progettuale basata sulla realizzazione di una Centrale da 400 MW, dimensionata per sfruttare al massimo le caratteristiche naturali dell'area.

Detta soluzione era basata sulla realizzazione di una nuova galleria di adduzione e condotte forzate con una portata massima di progetto pari a 120 m<sup>3</sup>/s a servizio di due gruppi macchine reversibili da circa 200 MW cadauna da installarsi in caverna.

I gruppi erano previsti uno a velocità fissa ed uno a velocità variabile.

Successivamente, in sede di tavolo tecnico con Terna, gestore della rete, si è deciso di limitare la potenzialità massima della Centrale a 300 MW, adeguando il dimensionamento delle opere a tale diversa produzione, per consentire il collegamento alla rete in prossimità dell'impianto limitando la costruzione di nuove linee.

Dalle verifiche effettuate è conseguito un ridimensionamento della massima portata di progetto in fase di produzione a 90 m<sup>3</sup>/s.

In fase di ripompaggio la massima portata è stata definita in 77 m<sup>3</sup>/s, con un tempo di ripompaggio pari a 8h, come da indicazioni ricevute dal committente.

Il presente elaborato riassume le analisi preliminari dello stato stazionario e dei transitori idraulici che sono state eseguite nell'ambito del progetto dell'impianto di Pizzone II. Gli obiettivi delle analisi sono stati di stimare le perdite di carico ed i requisiti massimi di prevalenza per il pompaggio, determinare le pressioni massime e minime e i requisiti necessari per la protezione dalle sovrappressioni.

Nelle fasi di successivo sviluppo della progettazione esecutiva, con definizione puntuale dei dati e delle informazioni dimensionali e tecniche, occorrerà riverificare i modelli di simulazione successivamente presentati per adeguarli alle effettive condizioni di lavoro dell'impianto.

## 2. SVILUPPO DEL MODELLO IDRAULICO DI SIMULAZIONE

In questo documento si riportano i calcoli dimensionali relativi al comportamento idraulico delle opere progettate sia nello stato stazionario che per le condizioni transitorie.

I calcoli nello stato stazionario stimano i requisiti massimi richiesti alle turbine-pompa nella funzione di pompaggio/risollevamento nelle condizioni operative più sfavorevoli, minimo livello operativo nel serbatoio di valle (Castel San Vincenzo) e massimo livello operativo nel serbatoio di monte (Montagna Spaccata).

I calcoli nello stato transitorio stimano le pressioni massime e minime e definiscono i requisiti di protezione dalle sovrapressioni.

I calcoli relativi allo stato stazionario sono stati effettuati utilizzando la formula di William & Hazen:

$-Q = 0,359 \times 10^{-5} D^{2,63} C I^{0,54}$ , dove:

-Q= portata in l/s

D= diametro interno in mm

I= cadente piezometrica.

C= coefficiente di attrito secondo William & Hazen.

Nel caso in oggetto, al coefficiente di attrito C è stato assegnato un valore prudenziale di 120, corrispondente a condotte in cemento in buono stato di conservazione, quale sarà da attendersi dopo diversi anni di attività.

Il coefficiente di attrito C per le tratte di condotte in acciaio è stato assunto pari a 155.

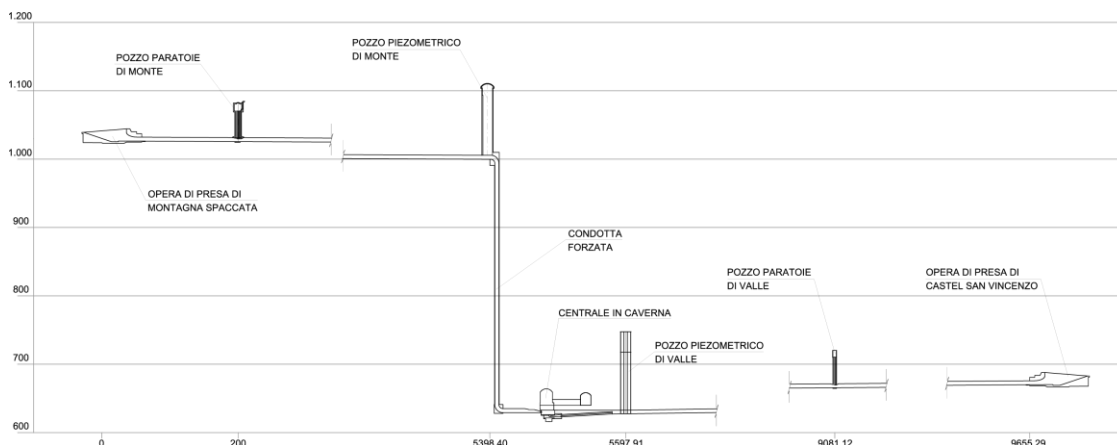
Portate e pressioni nello stato transitorio di progetto sono stati calcolati utilizzando il software WHAMO 3.0 (Water Hammer and Mass Oscillation) distribuito da USACE ( U.S. Army Corps of Engineers).

Il pacchetto software calcola i flussi in funzione della variabile temporale, le pressioni ed i carichi nelle reti causate da variazioni nel funzionamento di turbomacchine o valvole e cambiamenti nel carico o nelle portate ai confini della rete utilizzando uno schema implicito a differenze finite.

### 3. DATI IDRAULICI

#### 3.1. SCHEMA IDRAULICO

Lo schema idraulico considerato è basato sul layout sviluppato nel presente progetto e descritto nella Relazione Tecnica Generale (GRE.EEC.R.14.IT.H.16071.00.021.00 – *Relazione Tecnica Generale*) e sintetizzato nella seguente figura.



**Figura 3-1. Schema progettuale proposto**

Il sistema è compreso tra i bacini di Montagna Spaccata e Castel San Vincenzo.

La configurazione delle vie d'acqua a monte è costituita da un tunnel di derivazione dall'invaso di Montagna Spaccata lungo circa 5.400 m rivestito in calcestruzzo con raggio idraulico pari a 1,522 m corrispondente ad una tubazione circolare di 6,0 m di diametro, fino al primo pozzo piezometrico, quindi una condotta verticale in acciaio di 6,0 m di diametro lunga circa 400 m e una condotta forzata in acciaio sempre di diametro di 6,0 m lunga circa 100,0 m fino alla Centrale, situata quindi a monte delle due unità reversibili.

A valle della centrale contenente le due unità, lo schema idraulico prevede un doppio tunnel in acciaio con diametro di 4500 mm, lungo circa 100 m fino al secondo pozzo piezometrico, quindi un tunnel di derivazione lungo circa 3.000 m rivestito in calcestruzzo con raggio idraulico pari a 1,522 m corrispondente ad una tubazione circolare di 6,0 m di diametro, fino allo sbocco nel serbatoio di Castel San Vincenzo.

In complesso, lo sviluppo del sistema di condotte tra i due invasi ammonta a circa 10.000 m.

Le condizioni operative previste per i due bacini corrispondono ai seguenti livelli:

- bacino di Montagna Spaccata; massimo livello di accumulo: 1068,00 m s.l.m.m.
- bacino di Montagna Spaccata; minimo livello di accumulo: 1061,50 m s.l.m.m.
- bacino di Castel San Vincenzo; massimo livello di accumulo: 695,30 m s.l.m.m.
- bacino di Castel San Vincenzo; minimo livello di accumulo: 690,45 m s.l.m.m.

La condizione di massimo livello geodetico di turbinatura e di pompaggio in questo scenario di esercizio (massimo livello nel bacino di Montagna Spaccata, minimo livello nel bacino di Castel San Vincenzo) è pari a  $1068,0 - 690,45 = 377,55$  m.

Le minime condizioni di dislivello operativo geodetico sia in funzione di turbinatura che di pompaggio risultano in questo scenario di esercizio pari a 366,20 m.

Le portate di picco utilizzate nell'analisi degli scenari di generazione e di pompaggio sono rispettivamente pari a  $90 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $80 \text{ m}^3/\text{s}$ , quest'ultimo valore leggermente superiore ai  $77 \text{ m}^3/\text{s}$  che derivano dal bilancio idraulico del sistema.

Le due unità di turbina/pompaggio di cui si prevede l'installazione sono costituite da una macchina tipo Francis reversibile a giri fissi ( $500 \text{ giri}/\text{min}$ ) e da una macchina a giri variabili ( $500 \text{ giri}/\text{min} \pm 7\%$ ) aventi le seguenti caratteristiche:

- Unità a giri fissi:

- massima potenza in turbina: 153 MW
- range di portate della macchina in turbina:  $23,1 - 45 \text{ m}^3/\text{s}$
- range di salto netto della macchina in turbina:  $332,6 - 386,8 \text{ m}$
- massima potenza in pompaggio: 147 MW
- range di portate della macchina in pompaggio:  $28,8 - 39,0 \text{ m}^3/\text{s}$
- prevalenza totale della macchina in pompaggio:  $350 - 410 \text{ m}$

- Unità a giri variabili:

- massima potenza in turbina: 153 MW
- range di portate della macchina in turbina:  $22,3 - 45 \text{ m}^3/\text{s}$
- range di salto netto della macchina in turbina:  $332,6 - 386,8 \text{ m}$
- massima potenza in pompaggio: 147 MW
- range di portate della macchina in pompaggio:  $26-40 \text{ m}^3/\text{s}$
- prevalenza totale della macchina in pompaggio:  $350 - 410 \text{ m}$

L'asse delle unità di turbina/pompaggio è stato assunto alla quota  $630.0 \text{ m s.l.m.m.}$

### 3.2 VERIFICA DEL COMPORTAMENTO NELLO STATO STAZIONARIO

La verifica è stata effettuata nelle due condizioni più critiche, corrispondenti la prima al momento di pompaggio terminale, con una portata di  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  con quota del bacino di Castel San Vincenzo pari al minimo ( $690,45 \text{ m s.l.m.m.}$ ) e quello del bacino di Montagna Spaccata pari al massimo di invaso ( $1068,0 \text{ m s.l.m.m.}$ ), cioè con un dislivello geodetico pari a  $377,55 \text{ m}$  e la seconda corrispondente al momento di turbina iniziale, con una portata di  $90 \text{ m}^3/\text{s}$  con quota del bacino di Castel San Vincenzo pari al massimo ( $695,30 \text{ m s.l.m.m.}$ ) e quello del bacino di Montagna Spaccata pari al minimo di invaso ( $1061,50 \text{ m s.l.m.m.}$ ), cioè con un dislivello geodetico pari a  $366,20 \text{ m}$ .

Le perdite di carico continue nel sistema idraulico considerato in fase di pompaggio terminale ammontano complessivamente a  $7,74 \text{ m}$ .

Le perdite di carico localizzate per imbocco, sbocco, curve, biforcazioni, raccordi con variazioni di diametro, valvole ecc. sono stimate in circa 2,87 m.

Complessivamente la prevalenza nel pompaggio nelle condizioni estreme risulta pari a 10,61 m, che sommata alla prevalenza geodetica richiede di superare un carico totale netto di 388,16 m, compatibile con la curva di lavoro dei gruppi turbina-pompa in progetto in fase di pompaggio (350,0-410,0 m).

Nelle fasi iniziali previste per il pompaggio (con livello nel serbatoio di Montagna Spaccata pari a 1061,50 m s.l.m.m e livello nel serbatoio di Castel San Vincenzo pari a 695,30 m s.l.m.m), il carico totale netto ammonta a 377,55 m, sempre compatibile con la curva di lavoro in fase di pompaggio.

Le perdite di carico continue nel sistema idraulico considerato in fase di turbinatura iniziale ammontano complessivamente a 9,60 m.

Le perdite di carico localizzate per imbocco, sbocco, curve, biforcazioni, raccordi con variazioni di diametro, valvole ecc. sono stimate in circa 2,94 m.

Complessivamente la prevalenza geodetica in turbinatura nelle condizioni iniziali risulta pari a 380,50 m, compatibile con la curva di lavoro dei gruppi turbina-pompa in progetto in fase di turbinatura (332,6-386,8 m).

Nelle fasi finali previste per la turbinatura (con livello nel serbatoio di Montagna Spaccata pari a 1061,50 m s.l.m.m e livello nel serbatoio di Castel San Vincenzo pari a 695,30 m s.l.m.m), il carico totale netto ammonta a 369,20 m, sempre compatibile con la curva di lavoro in fase di turbinatura.

### 3.3 VERIFICA DEL COMPORTAMENTO NELLO STATO TRANSITORIO

Gli eventi di moto vario delle correnti in pressione di un sistema come quello in progetto sono generati da variazioni delle portate fluenti causate da modifiche dell'assetto fisico di parti del sistema di condotte e/o dei relativi manufatti di regolazione e/o movimentazione.

Tali fenomeni, detti transitori di moto, derivano generalmente dall'entrata in funzione di un organo di regolazione che modifica il regime stazionario di moto precedentemente instauratosi.

Durante i transitori di moto si determina quindi un continuo variare degli elementi che in precedenza caratterizzavano il moto del fluido: portata, pressione e velocità.

In condizioni di normale esercizio le operazioni di manovra degli organi regolatori, così come l'avvio o lo spegnimento delle macchine idrauliche, sono gestite con sequenze e tempistiche determinate al fine di controllare i fenomeni transitori indotti e quindi le loro conseguenze.

In condizioni di manovra repentine o comunque di emergenza invece si determinano rapide e notevoli variazioni delle componenti del moto che contribuiscono al relativo carico energetico totale e quindi all'energia del flusso.

Si determinano quindi all'interno delle condotte rapide e continue riflessioni di onde di pressione.

Queste onde causano rapidi e forti fenomeni di variazione di pressione sulle pareti interne delle condotte, nonché variazioni rapidissime delle pressioni e velocità dell'acqua.

Questi fenomeni tendono a smorzarsi nel tempo, dipendendo dalle caratteristiche delle condotte, nonché dalle condizioni di moto iniziali; ne consegue che le situazioni più critiche siano quelle appena successive al determinarsi dei fenomeni di variazione delle condizioni di moto suddette.

Attraverso la risoluzione delle equazioni che governano il moto, (conservazione e continuità della quantità di moto) il software WHAMO calcola le variazioni nel tempo (transitori) di portata e carico piezometrico generate dalla modifica delle condizioni operative iniziali degli organi elettromeccanici con turbine, pompe e valvole.

Per questi motivi il software WHAMO viene frequentemente utilizzato per la simulazione di impianti idroelettrici e sistemi di pompaggio.

Il sistema in progetto è stato quindi modellato secondo i seguenti elementi:

- Nodi, che separano diversi tratti di condotta e in particolare tratti aventi diametri, pendenze o materiali differenti.
- Surge Shaft: pozzi piezometrici.
- Boundary conditions; livelli idrici di monte e di valle del sistema, ipotizzati abbastanza stabili da non subire variazioni di livello al variare delle portate transitorie nelle condotte nel transitorio.
- Flow boundary conditions; condizioni di moto e flusso relativi alle macchine idrauliche, nel nostro caso turbine e pompe, ed espresse come portate fluenti in funzione del tempo.

Ai fini della verifica nello stato transitorio, il modello WHAMO è stato fisicamente costruito, oltre che con il sistema di condotte citato nei paragrafi precedenti, anche con i seguenti manufatti di protezione dalle sovrappressioni.

Nello stato di progetto, è previsto che le protezioni contro le sovrappressioni consistano in:

- Un pozzo piezometrico di monte di 14,00 m di diametro equivalente;
- Un pozzo piezometrico di valle di 11,40 m di diametro equivalente.

Il collegamento dei pozzi al sistema di condotte è realizzato tramite orifizi di diametro rispettivamente 4,00 m e 3,80 m. Lo schema ed i dati idraulici utilizzati nel modello WHAMO sono riportati di seguito.

Nella sottostante figura 3.1 si riporta la schematizzazione idraulica del modello WHAMO.



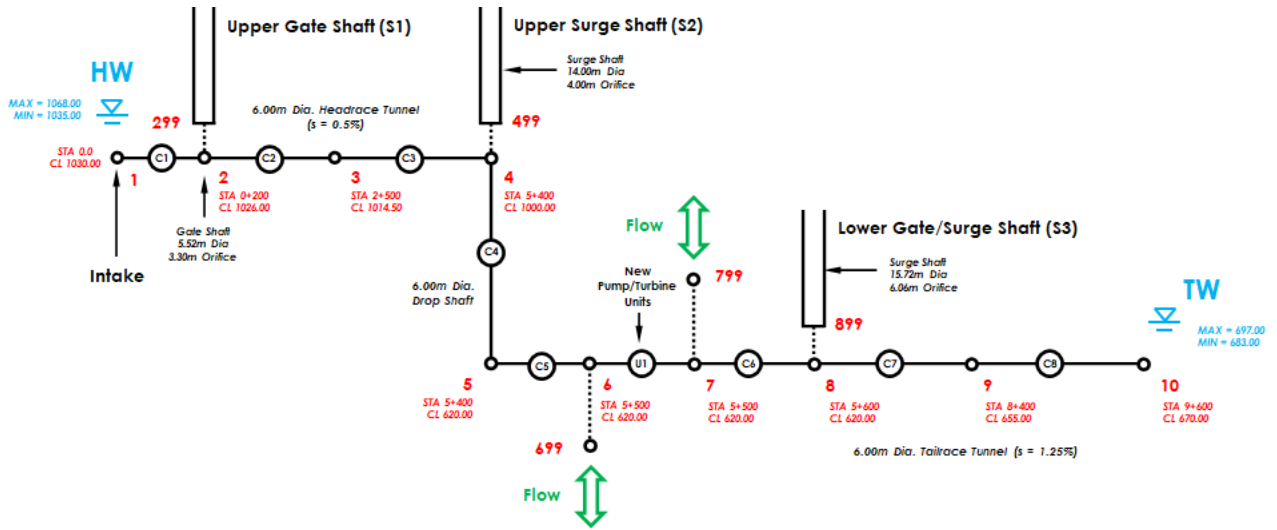


Figura 3-2. Schema Idraulico modello WHAMO

Nella successiva Tabella 3.1 si riportano i dati conseguenti alle simulazioni modellistiche.

Tabella 3-1. Dati Idraulici Modello WHAMO

Link ID	Node ID		TYPE	Invert (m)		L (m)	Sta (m)	D (m)	Lining	Darcy 'f'	Location	Total	
	US	DS		US	DS							Cplus	Cminus
C1	1	2	-	1027.00	1026.00	200.0	200.0	6.00	CONCRETE	0.015	U/S	1.00	0.50
C2	2	3	-	1026.00	1014.50	2300.0	2500.0	6.00	CONCRETE	0.015	U/S	0.13	0.13
C3	3	4	-	1014.50	1000.00	2900.0	5400.0	6.00	CONCRETE	0.015	U/S	0.03	0.03
C4	4	5	-	1000.00	620.00	400.0	5400.0	6.00	STEEL	0.010	U/S	0.16	0.16
C5	5	6	-	620.00	620.00	100.0	5500.0	6.00	STEEL	0.010	U/S	0.16	0.16
C6	7	8	-	620.00	620.00	100.0	5600.0	6.00	CONCRETE	0.015	U/S	0.00	0.00
C7	8	9	-	620.00	655.00	2800.0	8400.0	6.00	CONCRETE	0.015	U/S	0.03	0.03
C8	9	10	-	655.00	670.00	1200.0	9600.0	6.00	CONCRETE	0.015	U/S	2.53	2.53
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	D/S	0.50	1.00
U1	6	7	BUTTERFLY	620.00	620.00	-	-	0.30	-	-	-	-	-
D1	2	299	DUMMY	-	-	-	-	3.30	-	-	-	2.78	1.23
D2	4	499	DUMMY	-	-	-	-	4.00	-	-	-	2.78	1.23
D3	6	699	DUMMY	-	-	-	-	6.00	-	-	-	2.78	1.23
D4	799	7	DUMMY	-	-	-	-	6.00	-	-	-	-	-
D5	8	899	DUMMY	-	-	-	-	6.06	-	-	-	-	-
SC1	299	-	-	1032.00	-	-	-	5.52	CONCRETE	0.016	-	-	-
SC2	499	-	-	1006.00	-	-	-	14.00	CONCRETE	0.012	-	-	-
SC3	899	-	-	626.00	-	-	-	15.72	CONCRETE	0.011	-	-	-
F1	699	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F1	799	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HW	1	-	-	1068.00 - 1035.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TW	10	-	-	697.00 - 683.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-

### 3.4 LIVELLI NEI SERBATOI

I livelli nel serbatoio superiore di Montagna Spaccata cautelativamente utilizzati nell'analisi sono stati 1.068,0 m s.l.m.m e 1.045,0 m s.l.m.m corrispondenti rispettivamente alla quota dello sfioratore (Full Supply Level - FSL) e ad un livello minimo di regolazione cautelativo (Minimum Operating Level - MOL). I corrispondenti livelli FSL e MOL per il bacino inferiore di Castel San Vincenzo sono cautelativamente assunti rispettivamente pari a 696,0 m s.l.m.m e 683,0 m s.l.m.m.

### 3.5 PORTATE

Le portate di picco utilizzate nell'analisi degli scenari di generazione e di pompaggio sono rispettivamente pari a 90 m<sup>3</sup>/s e 80 m<sup>3</sup>/s.

### 3.6 VELOCITÀ DELLE ONDE

La velocità dell'onda utilizzata in queste simulazioni è stata assunta pari a 1.000 m al secondo<sup>1,2</sup>.

### 3.7 PERDITE DI CARICO

Le perdite di carico all'interno del sistema includono perdite dovute all'ingresso e all'uscita, perdite dovute a curve e cambiamenti nella direzione del flusso e perdite distribuite lungo le condotte.

Le perdite di carico localizzate sono state calcolate utilizzando il manuale di progettazione delle strutture idrauliche n. 8 di D.S. Miller<sup>3</sup>.

Le perdite di carico distribuite sono state calcolate sia per le superfici in calcestruzzo che per le superfici in acciaio. Le parti in calcestruzzo del sistema di tunnel sono state associate ad un valore n di Manning di 0,015, le parti in acciaio del sistema di tunnel ad un valore n di Manning di 0,012. I corrispondenti fattori di attrito f di Darcy utilizzati nel modello WHAMO variano tra 0,010 (condotte in acciaio) e 0,015 (condotte in calcestruzzo).

Le perdite di carico calcolate dal sistema sono quelle distribuite (continue); sono poi stati introdotti degli elementi ad hoc per stimare le perdite localizzate.

Di particolare importanza ai fini della funzionalità del sistema sono le perdite localizzate relative agli strozzamenti in ingresso ai pozzi piezometrici che causando forti perdite per le portate di acqua in ingresso ai pozzi ne riducono di conseguenza le relative oscillazioni.

### 3.8 TEMPI DI MANOVRA DEGLI ORGANI IDRAULICI

I tempi di manovra degli organi idraulici determinano ovviamente la gravosità delle condizioni di sovrappressione e di massime oscillazioni del livello idrico all'interno dei pozzi piezometrici.

I tempi di manovra attesi per le macchine in oggetto sono del seguente ordine:  
- avvio turbine e passaggio da impianto fermo alle condizioni di massima generazione: ca 90s;

- passaggio da impianto alla massima generazione a fermo impianto: ca 15s;

- avvio pompe e passaggio da impianto fermo alle condizioni di massimo sollevamento: ca 85s;

- passaggio da impianto al massimo pompaggio a fermo impianto: ca 15s.

Nelle verifiche del moto transitorio si è considerata una situazione estrema più conservativa, basata sulla chiusura lineare del distributore (wicket gates) in un tempo di 6 secondi, che rappresenta uno scenario possibile in occasione di situazioni eccezionali.

### 3.9 SCENARI ANALIZZATI

La presente analisi si è concentrata sui due scenari di load rejection (Rifiuto di carico, con il blocco totale delle due turbine) e di pump trip (fermo pompe) illustrati nella tabella seguente. La chiusura lineare del distributore (wicket gates) di 6 secondi è un'ipotesi conservativa basata su installazioni simili.

---

<sup>1</sup> Wylie, Benjamin, E., and Streeter, Victor L. Fluid Transients in Systems. 1993.

<sup>2</sup> Parmakian, J. Waterhammer Analysis. 1963.

<sup>3</sup> D. S Miller. IAHR Hydraulic Structures Design Manual No.8 - Discharge Characteristics., 1994.



Green Power

HGT Design & Execution



GRE CODE

GRE.EEC.R.14.IT.H.16071.00.035.00

PAGE

11 di/of 20

**Tabella 3-2. Scenari limite condizioni transitorio**

Case ID	Wicket Gate Closure Time (Linear) (s)	Upper Reservoir Level (m)	Lower Reservoir Level (m)	Total Flow (m <sup>3</sup> /s)
2-UNIT SIMULTANEOUS LOAD REJECTION	6.0	1,068.0 (FSL)	683.0 (MOL)	90.00
2-UNIT SIMULTANEOUS PUMP TRIP	6.0	1,035.0 (MOL)	697.0 (FSL)	80.00

#### 4 ANALISI DELLO STATO STAZIONARIO

Come detto nei capitoli precedenti sono stati effettuati calcoli dello stato stazionario per stimare la perdita di carico ed i requisiti di prevalenza del progetto in modalità di generazione e pompaggio. I risultati sono i seguenti:

- La prevalenza geodetica stimata nel sistema in fase di generazione tra il bacino di Montagna Spaccata e il bacino di Castel San Vincenzo con portata di 90 m<sup>3</sup>/s oscilla tra 377,50 e 366,20 m a seconda delle condizioni al contorno definite dai livelli nei due bacini.
- La prevalenza netta stimata nel sistema in fase di ripompaggio tra il bacino di Castel San Vincenzo e il bacino di Montagna Spaccata con portata di 77 m<sup>3</sup>/s oscilla tra 376,81m e 388,16 m a seconda delle condizioni al contorno definite dai livelli nei due bacini.

## 5 ANALISI DEL TRANSITORIO IDRAULICO

Sono stati effettuati calcoli idraulici relativi ai transitori limite di load rejection e pump trip per stimare l'aumento massimo delle pressioni e i requisiti di protezione da sovrappressioni del progetto (pozzi piezometrici). I risultati per entrambi i casi indagati sono forniti nelle sezioni seguenti.

### 5.2 LOAD REJECTION (RIFIUTO DI CARICO)

Nello scenario di Load Rejection (LR), o Rifiuto di Carico, si crea un transitorio a seguito del blocco rapido ed improvviso della turbina, che potrebbe generare il fenomeno del colpo d'ariete nella condotta a monte della centrale.

Si è valutato lo scenario limite di load rejection simultaneo delle due turbine al massimo flusso di generazione con il serbatoio superiore di Montagna Spaccata alla quota 1.068,0 m s.l.m.m (FSL) e il bacino idrico inferiore di Castel San Vincenzo alla quota 683,0 m s.l.m.m (MOL).

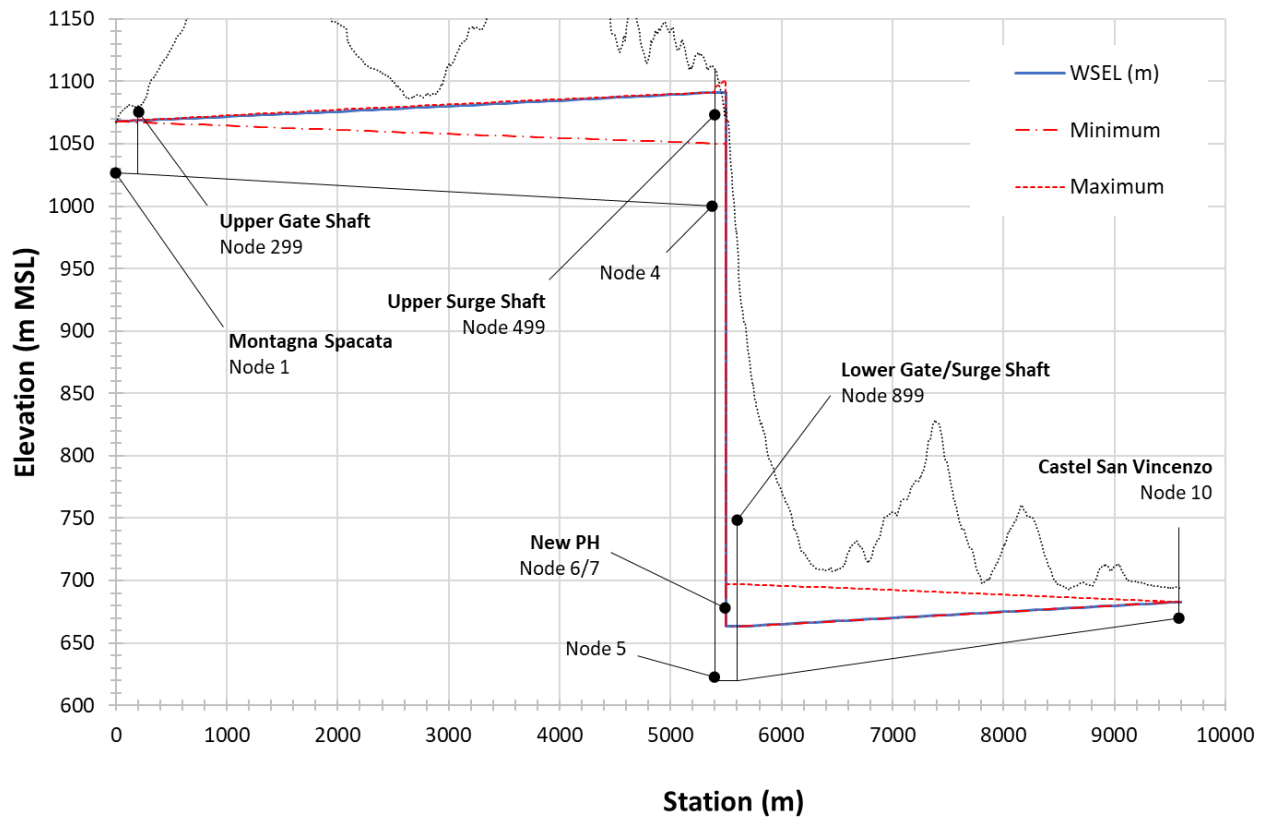
Questa ipotesi è di tipo conservativo in quanto il progetto è concepito per operare con un massimo livello nel serbatoio superiore di Montagna Spaccata pari a 1061,50 m s.l.m.m e un minimo livello nel serbatoio inferiore di Castel San Vincenzo pari a 690,45 m s.l.m.m.

I risultati di calcolo, forniti nella tabella seguente, sono stati utilizzati per il dimensionamento del pozzo piezometrico di monte. Dai risultati emersi da questa analisi sono stati estrapolati i valori delle quote massime e minime raggiunte dall'acqua all'interno del pozzo piezometrico.

**Tabella 5-1. Risultati dell'analisi dei transitori – scenario di load rejection**

WHAMO Node ID (Location)	Station (m)	Minimum HGL (m)	Maximum HGL (m)
Node 1 (Upper Reservoir)	0+00	1,068.0	1,068.0
Node 3 (Middle of Headrace Tunnel)	25+00	1,059.6	1,079.6
Node 499 (Upper Surge Shaft)	54+00	1,050.3	1,091.3
Node 6 (Upstream of Pump/Turbine Units)	55+00	1,050.3	1,101
Node 7 (Downstream of Pump/Turbine Units)	55+00	663.2	697.4
Node 899 (Lower Gate/Surge Shaft)	56+00	663.2	697.4
Node 9 (Middle of Tailrace Tunnel)	84+00	677.0	687.3
Node 10 (Lower Reservoir)	96+00	683.0	683.0

Di seguito è mostrato il grafico dei carichi nelle condizioni più critiche per il pozzo piezometrico di monte.



**Figura 5-1. Risultati dell'analisi dei transitori – Scenario di load rejection a 107s dalla chiusura (effettuata in 6s), tempo per cui si verifica il massimo livello nel pozzo piezometrico di monte.**

Come mostrato nella tabella e nella figura sopra, i carichi di picco stimati sulla base di una chiusura minima conservativa del distributore di 6 secondi sono sempre sopra le quote di tunnel e la condotta forzata. La linea di carico ha un massimo all'interno delle condotte superiori pari approssimativamente a 1.101 m s.l.m.m. Il valore massimo per la condotta nel tratto di valle è approssimativamente pari a 697.4 m s.l.m.m.

### 5.3 PUMP TRIP (BLOCCO POMPE)

Nello scenario di Pump Trip (PT) il transitorio è generato dal blocco improvviso della macchina quando funziona in pompaggio; questo potrebbe generare il fenomeno del colpo d'ariete nella condotta a valle della centrale.

Si è valutato lo scenario limite di pump trip simultaneo delle 2 unità al flusso massimo di pompaggio con il serbatoio superiore di Montagna Spaccata a quota 1,035.0 m s.l.m.m (MOL) e il serbatoio inferiore di Castel San Vincenzo a quota m 697.0 s.l.m.m (FSL).

Anche in questo caso la verifica è conservativa.

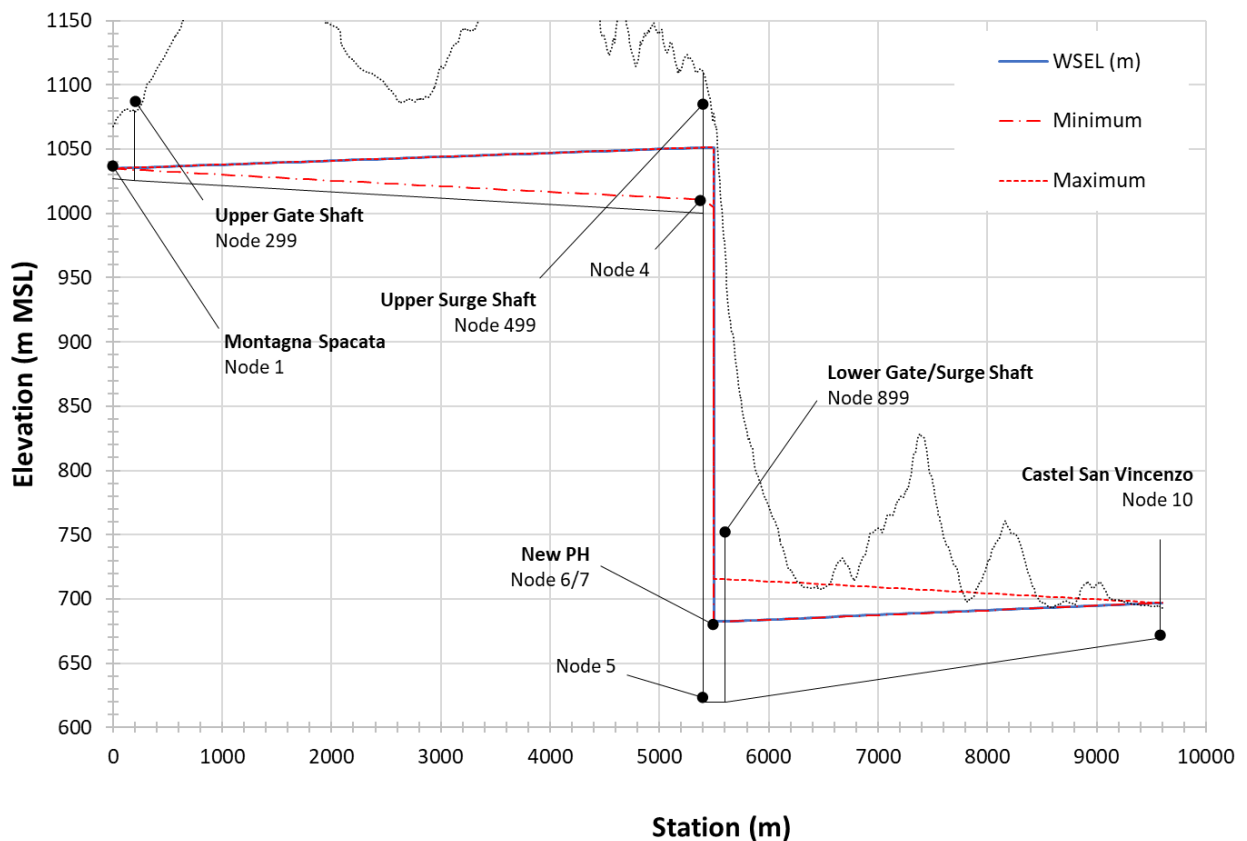
I risultati di calcolo, forniti nella tabella seguente, sono stati utilizzati per il dimensionamento del pozzo piezometrico di valle. Dai risultati emersi da questa analisi sono stati estrapolati i valori delle quote massime e minime raggiunte dall'acqua all'interno del pozzo piezometrico.

**Tabella 5-2. Risultati dell'analisi dei transitori – Scenario di Pump Trip**

WHAMO Node ID (Location)	Station (m)	Minimum HGL (m)	Maximum HGL (m)
Node 1 (Upper Reservoir)	0+00	1,035.0	1,035.0
Node 3 (Middle of Headrace Tunnel)	25+00	1,023.4	1,042.6

WHAMO Node ID (Location)	Station (m)	Minimum HGL (m)	Maximum HGL (m)
Node 499 (Upper Surge Shaft)	54+00	1,010.9	1,051.3
Node 6 (Upstream of Pump/Turbine Units)	55+00	1,005.0	1,051.3
Node 7 (Downstream of Pump/Turbine Units)	55+00	682.3	715.6
Node 899 (Lower Gate/Surge Shaft)	56+00	682.3	715.6
Node 9 (Middle of Tailrace Tunnel)	84+00	692.6	702.6
Node 10 (Lower Reservoir)	96+00	697.0	697.0

Di seguito è mostrato il grafico dei carichi nelle condizioni più critiche per il pozzo piezometrico di valle.



**Figura 5-2. Risultati dell'analisi dei transitori – Pump trip a 281s dalla chiusura (effettuata in 6s), tempo per cui si verifica il massimo livello nel pozzo piezometrico di valle.**

Come mostrato nella tabella e nella figura sopra, i carichi di picco stimati sulla base di una chiusura conservativa del distributore di 6 secondi sono sempre sopra le quote dei tunnel e della condotta forzata. La linea di carico ha un massimo all'interno delle condotte superiori pari approssimativamente a 1.051 m s.l.m.m. Il valore massimo per la condotta nel tratto di valle è approssimativamente pari a 715.6 m s.l.m.m.

## 6 VERIFICA DELLE OPERE DI PRESA

Le opere di presa e restituzione previste nei due invasi di Montagna Spaccata e Castel San Vincenzo saranno simili, costituite da pareti sfioranti con sviluppo di 155 m, aventi pianta trapezia nella parte iniziale, convergenti in un canale rettangolare largo 10 m.

Saranno installate griglie di protezione con luce di 500 mm, necessarie per evitare l'ingresso nelle vie d'acqua di materiale solido che potrebbe danneggiare le macchine idrauliche installate.

Le griglie, a pulizia non automatizzata, saranno soggette ad un moto con direzione variabile nel senso del flusso, tra le condizioni di turbinatura e quelle di pompaggio, per cui è attendibile che l'accumulo sulle stesse di materiali fini sarà molto ridotto.

Si è verificato inoltre che i manufatti di carico evitino lo sviluppo di vortici poiché questi fenomeni influenzano negativamente il funzionamento del sistema danneggiando le pareti dei canali di adduzione, aumentando le perdite di carico e immettono aria nella corrente liquida causando nelle turbine vibrazioni, cavitazioni, carichi non equilibrati etc.

I criteri da seguire per evitare la formazione di vortici non sono ad oggi definiti perfettamente e non esiste una singola formula che tenga compiutamente conto di tutti i possibili fattori che incidono sul fenomeno.

Secondo il comitato ASCE per le opere di presa degli impianti idroelettrici tutti i fattori di disturbo che introducono non uniformità nelle velocità di transito nelle diverse sezioni sono fonte di vortici.

Tra questi sono citati:

- condizioni asimmetriche di transito dell'acqua;
- insufficiente sommergenza;
- separazione della vena fluida e formazione di vortici;
- velocità in arrivo superiori a 0,65 m/s;
- bruschi cambi nella direzione del flusso.

La sommergenza insufficiente e l'asimmetria della corrente in arrivo sembrano essere le cause più comuni di formazione dei vortici.

Per questo motivo si è progettata una configurazione simmetrica dei manufatti di presa.

Per determinare il livello minimo di sommersione della presa al fine di evitare formazione di vortici sono disponibili formule empiriche.

Tale valore rappresenta l'affondamento della generatrice superiore della condotta al di sotto del pelo libero nel bacino.

Come detto, in letteratura sono proposti diversi approcci, basati sui test svolti da Gordon (1970) e Hacker (1981) in funzione del valore del numero di Froude (Fr), che consentono di calcolare il rapporto tra il diametro della condotta (D) e la sommergenza minima (h) che questa deve presentare.

Per calcolare la suddetta sommergenza minima vengono utilizzate le seguenti formule:  
Se  $FR \leq 0,25$  allora  $1,0 \leq h/D \leq 1,5$ .

Se  $FR > 0,25$  allora  $h/D = 0,50 + (2 Fr)$

Il numero di Froude FR viene espresso in questo modo:

$$Fr = V / \sqrt{(g \cdot D)}$$

In cui, nel presente caso ( $Q = 90 \text{ m}^3/\text{s}$ ):

$$-V = 3,10 \text{ m/s}$$



-D= 6,0 m (diametro sezione)

-g= 9,81 m/s<sup>2</sup>.

Risulta: Fr = 0,41, > 0,25 e

H= 7,92 m, arrotondato a 8,0 m.

Nel caso del manufatto di presa nel bacino di Montagna Spaccata, con generatrice superiore della condotta di presa a quota 1032,08 m.s.m, la minima quota di sommergezza necessaria per evitare la formazione di vortici risulta pari a 1040,45 m.s.m.

La regolazione nello scenario di esercizio di progetto prevede una oscillazione tra le quote di 1061,50 e 1068 m.s.m.

Nel caso del manufatto di presa nel bacino di Castel San Vincenzo, con generatrice superiore della condotta di presa a quota 675,07 m.s.m, la minima quota di sommergezza risulta pari a 683,80 m.sl.m.

La regolazione nello scenario di esercizio di progetto prevede una oscillazione tra le quote di 690,45 e 695,30 m.s.m.

## 7 VERIFICA DELLA SOMMERGENZA DELLE TURBINE/POMPA

Al fine di prevenire il formarsi di fenomeni di cavitazione nei gruppi turbina/pompa, sono stati verificati i requisiti di sommersenza dell'asse delle macchine nei confronti del minimo livello idrico operativo previsto nel bacino di Castel San Vincenzo.

Le condizioni più critiche dei possibili fenomeni di cavitazione si verificano infatti nelle fasi operative di pompaggio rispetto alle fasi operative di turbinatura.

I valori di stima dei possibili eventi di cavitazione e dei valori minimi di sommersenza sono forniti usualmente dai fabbricanti delle macchine, che sovente utilizzano anche modelli fisici per simulare il comportamento nelle diverse condizioni operative.

Al fine di definire comunque i valori di sommersenza necessari per l'operatività dell'impianto in oggetto al fine di evitare i suddetti fenomeni di cavitazione, sono stati utilizzati i criteri contenuti nelle norme statunitensi IS 12800-Part.1.1993, "Linee guida per la selezione delle turbine, dimensionamento preliminare e layout di impianti idroelettrici di superficie".

L'espressione utilizzata in tali norme (peraltro di ampia diffusione e utilizzo) per valutare l'effetto della cavitazione tra macchine aventi analoghe geometrie e caratteristiche idrauliche è conosciuta come "parametro di Thoma", sigma  $\sigma$ :

$\sigma = \text{NPSH}/H$  dove:

$H$  (m) = prevalenza della pompa (o assorbita nel caso di turbine)

NPSH= Net positive suction head (m)

$\sigma$  = valore critico sigma al quale si verifica una forte diminuzione nelle prestazioni della macchina e possono determinarsi fenomeni di danneggiamento delle sue componenti meccaniche a contatto con il liquido pompato.

A sua volta, NPSH risulta determinato da:

$\text{NPSH} = H_s + H_a - H_v - H_f$ , con:

$H_s$  = prevalenza geodetica tra il minimo livello nel serbatoio di alimentazione e la quota dell'asse della girante della pompa (m)

$H_a$  = pressione atmosferica al livello del serbatoio di alimentazione, assunto pari a 630 m.s.ml (m)

$H_v$  = pressione di vapore dell'acqua pompata alla massima temperatura attesa nella pompa, assunta pari a 70 °C (m)

$H_f$  = perdita di carico nella tratta di condotta tra il serbatoio di alimentazione e la pompa (m).

I valori di  $\sigma$  riscontrati in corrispondenza di centrali attive con caratteristiche analoghe a quella in oggetto, nella funzione di pompaggio sono compresi tra 0,10 e 0,17 (nel caso di funzione di turbinatura tali valori praticamente si dimezzano, risultando compresi tra 0,05 e 0,08).

Nel caso in oggetto, la verifica del minimo livello di sommersenza  $H_s$  necessario è stata calcolata con:

$H_a = 9,25$  m

$H_v = 3,12$  m

$H_f = 5,0$  m.

$H = 389,0$  m.

Risulta il valore minimo di sommergezza  $H_s$  :

$$H_s = (\sigma \cdot 389) - 1,13 \text{ m}$$

Per la determinazione del valore di  $\sigma$  si è calcolata la velocità di rotazione "n" di una macchina ottimale con:

$$n = Q(H_{geod})^{0,75} / \sqrt{Q}, \text{ con } Q = 77/2 = 38,5 \text{ m}^3/\text{s} \text{ e } H_{geod} = 378 \text{ m}$$

$$n = 532 \text{ giri/min.}$$

Poichè le macchine in progetto hanno una velocità di rotazione di 500 giri/min, si calcola  $n_{sp}$ :

$$n_{sp} = 500/532 = 0,94 \text{ (94 \%)}$$

A questa velocità e rapporto di efficienza rispetto ad una pompa ottimale, i valori di  $\sigma$  critico sono stimabili come da Fig 8 del documento "Pump-turbine characteristics"- Engineering monograph n.39- R.S. Stelzer, R.N. Walters- U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation- Dicembre 1977.

Il valore di  $\sigma$  critico calcolato dalla curva di interpolazione dei dati sperimentali corrisponde a 0,135.

Applicando questo valore, la minima sommergezza dell'asse pompa/turbina rispetto al minimo valore di livello idrico nel bacino di alimentazione risulta pari a:

$$- H_s = (0,135 \cdot 389) - 1,13 \text{ m} = 51,38 \text{ m.}$$

Poichè l'asse turbina è collocato a quota 630,00 m.sl.m, il minimo battente idrico nell'invaso di Castel San Vincenzo risulta essere pari a:

$$-630,00 + 51,38 = 681,38 \text{ m.sl.m,}$$

ampiamente compatibile con il minimo livello idrico operativo previsto in tale bacino (690,45 m.sl.m).

Considerata la sperimentalià dei dati utilizzabili per valutare la sommergezza minima della turbina/pompa, si è effettuata una ulteriore stima del coefficiente  $\sigma$  critico, utilizzando una diversa metodologia.

Si calcola la velocità della macchina a 500 giri/minuto, un termine di rad/s:

$$\dot{\omega} = 2\pi n / 60 = 2\pi 500 / 60 = 52,44 \text{ rad/s ( 8,33 giri/s).}$$

$$\dot{\omega}_s = \dot{\omega} \sqrt{Q} / (g \cdot h)^{3/4} = 52,33 \sqrt{38,5} / (9,81 \cdot 378)^{0,75} = 0,684.$$

$$\sigma \text{ critico} = 0,20 \dot{\omega}_s^{1,33} = 0,1206.$$

Questo secondo valore è congruente e conferma il sigma critico precedentemente calcolato.

## 8 CONCLUSIONI

Il presente elaborato riassume le analisi dello stato stazionario, dei transitori idraulici e delle verifiche idrauliche che sono state eseguite nell'ambito dell'attuale fase di elaborazione progettuale dell'impianto PHSP di Montagna Spaccata.

Gli obiettivi delle analisi sono stati di stimare le perdite di carico ed i requisiti massimi di prevalenza per il pompaggio, determinare le pressioni massime e minime e i requisiti necessari per la protezione dalle sovrappressioni, verificare la sommergenza minima delle macchine per evitare fenomeni di cavitazione. Di seguito si riportano gli esiti delle simulazioni effettuate:

- Analisi dello stato stazionario
  - In generazione
    - La perdita di carico stimata nel sistema con le unità al picco di flusso in generazione di 90 m<sup>3</sup>/s risulta pari a 12,54 m
  - In pompaggio
    - La perdita di carico stimata nel sistema con le unità al flusso di pompaggio di picco di 77 m<sup>3</sup>/s risulta pari a 10,61 m
- Analisi dei transitori (verificate con tempi di chiusura di 6 s)
  - In generazione
    - I carichi di picco stimati sulla base di una chiusura conservativa del distributore di 6 secondi sono sempre sopra le quote di tunnel e condotta forzata.
    - La linea di carico ha un massimo all'interno delle condotte superiori pari approssimativamente a 1.100;
    - Il valore massimo per la condotta nel tratto di valle è approssimativamente pari a 697,4 m.
  - In pompaggio
    - Come mostrato nella tabella e nella figura riportata in precedenza, i carichi di picco stimati sulla base di una chiusura conservativa del distributore di 6 secondi sono sempre sopra le quote di tunnel e condotta forzata.
    - La linea di carico ha un massimo all'interno delle condotte superiori pari approssimativamente a 1.051 m;
    - Il valore massimo per la condotta nel tratto di valle è approssimativamente pari a 715,6m.
- Verifica della sommergenza minima
  - In pompaggio
    - La sommergenza minima rispetto al minimo livello operativo nel bacino di Castel San Vincenzo è stata stimata in 51,38 m, ampiamente compatibile con i livelli operativi nel bacino e con la quota d'asse dei gruppi turbina/pompa.

Come già segnalato in premessa, nelle fasi di successivo sviluppo della progettazione esecutiva, con definizione puntuale dei dati e delle informazioni dimensionali e tecniche, occorrerà riverificare i modelli di simulazione presentati per adeguarli alle effettive condizioni di lavoro dell'impianto.