



Hydro Mechanical Specialistic Support
Ing. Paolo Caretti



Green Power

MOMPANTERO 1938-2018 – PERCHE' LE TURBINE FRANCIS POSSONO FAR «CANTARE» LE CONDOTTE FORZATE

Paolo Caretti – Hydro Mechanical Specialistic Support – Andrea Cannata – ENEL
GREEN POWER – Alessandro Prato – ENEL GREEN POWER





Hydro Mechanical Specialistic Support
Ing. Paolo Cjaretti



Green Power



La centrale di Mompantero è situata nel Comune di Susa in Provincia di Torino. E' di proprietà ENEL PRODUZIONE S.p.A. ed è operata dal ENEL GREEN POWER S.p.A.; la costruzione risale al 1936. L'impianto utilizza le acque accumulate nei bacini di compenso a valle della Centrale di Venaus (2 gruppi da 140MVA, 21 m³/s), che ne raccolgono la portata scaricata unita a quella captata dall'opera di presa sul Torrente Cenischia.



Hydro Mechanical Specialistic Support
Ing. Paolo Cjaretti



Green Power



La Centrale di Mompantero è dotata di un singolo gruppo Riva con due turbine Francis ad asse orizzontale e potenza totale 7 MW a 500 giri/minuto (salto lordo di 111,58 m e portata di 7,5 m³/s) accoppiate ad un alternatore Breda da 7 MVA allacciato alla rete mediante un trasformatore GETRA 6/15kV da 10 MVA.



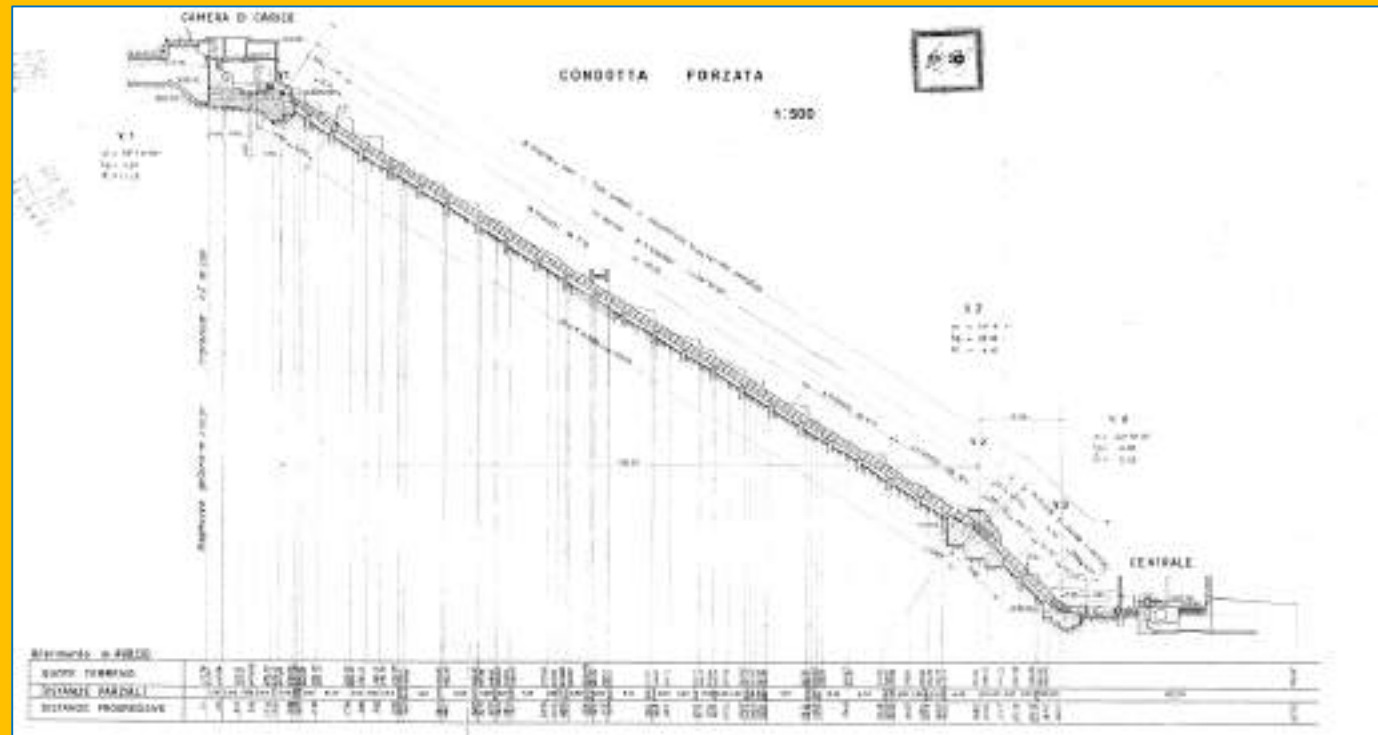
Hydro Mechanical Specialistic Support
Ing. Paolo Cjaretti



Green Power

La condotta forzata è composta da virole saldate per bollitura in senso longitudinale e con chiodatura semplice circonferenziale di giunzione tra le virole successive.

Il diametro nominale interno è di **1.500 mm** per tutta la lunghezza di circa **185 m**. Lo spessore è variabile tra i **7,5 mm** del tratto di monte e i **14 mm** al biforcato. La condotta è appoggiata su selle, spaziate di circa **6 metri**.

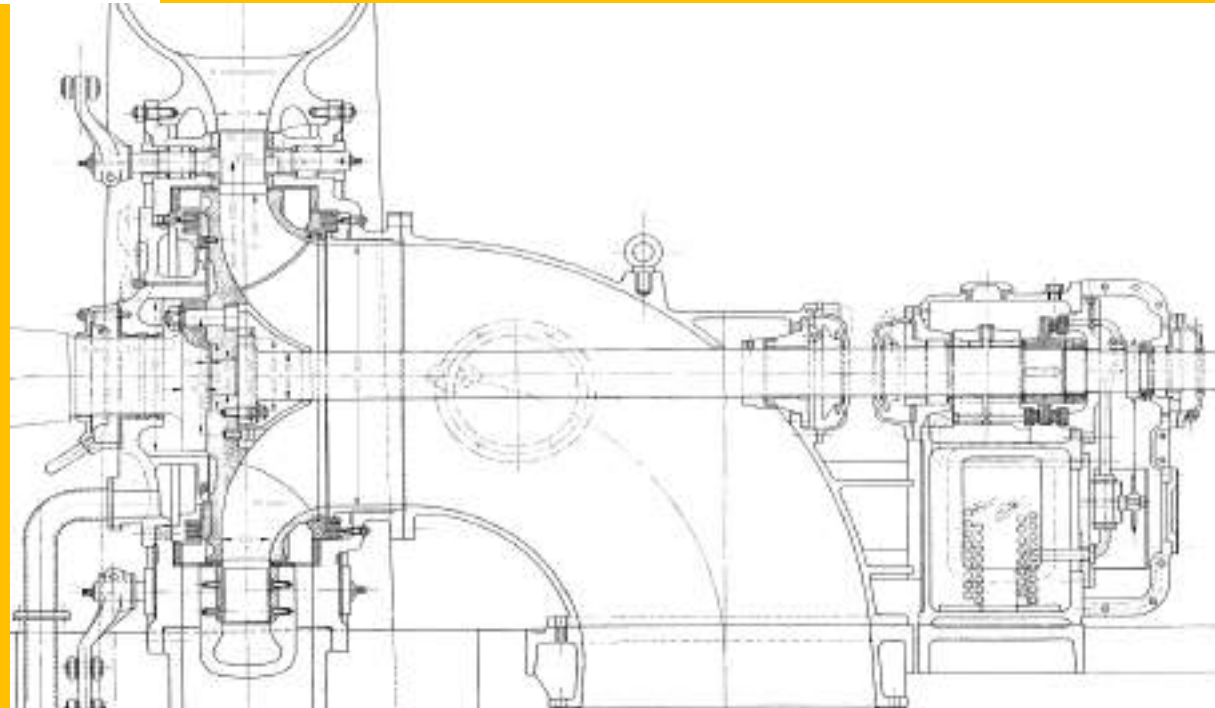




Hydro Mechanical Specialistic Support
Ing. Paolo Cjaretti



Green Power



Nel 1938 la RIVA aveva fornito le nuove turbine Francis sinistra e destra della centrale di MOMPANTERO con distributore a **16 pale e giranti a 15 pale**, non conoscendo bene a quel tempo la potenziale criticità di questa combinazione.



Hydro Mechanical Specialistic Support
Ing. Paolo Cjaretti



Green Power

La combinazione di numero pale :

$$\mathbf{Zd=16 \text{ e } Zr=15}$$

è infatti riconosciuta in tempi moderni come critica.

L'equazione dell'interazione rotore – statore:

$$n * Z_d \pm k = m * Z_r$$

viene risolta dalla terna di valori:

$$\mathbf{m=1}$$

$$\mathbf{n=1}$$

$$\mathbf{k= -1}$$

con **m** e **n** numeri interi generici e **k** numero di nodi del campo di pressione creato dall'interazione rotore-statore





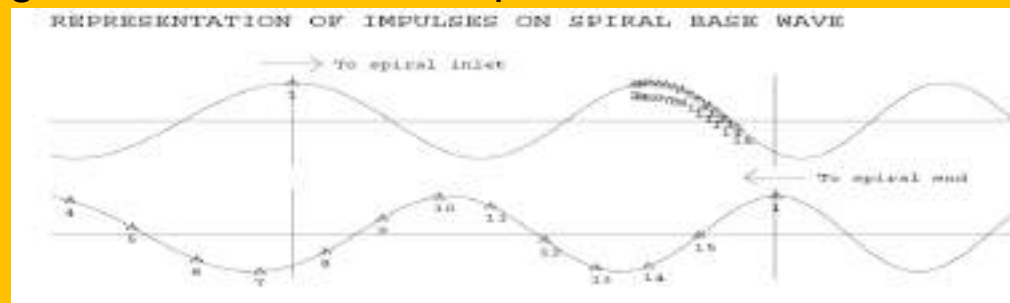
Hydro Mechanical Specialistic Support
Ing. Paolo Cjaretti

La soluzione $k = -1$ indica che la pulsazione di pressione di frequenza:

$$f_{RSI} = 500/60 * 15 * 1 = 125 \text{ Hz}$$

girava **in senso opposto** rispetto alla girante e quindi usciva dalla spirale.

Inoltre, per una sfortunata combinazione geometrica della spirale, il coefficiente di sincronizzazione degli impulsi generati dal presentarsi delle pale girante sulla scia delle pale distributore era molto elevata e risultava pari a **0.811**



Si creava quindi un'onda stazionaria che si sviluppava lungo la condotta e che eccitava un suo modo proprio di vibrare, facendola risuonare in modo significativo sul tono puro di **125 Hz**.

LA CENTRALE NEL 1938 ERA INGESTIBILE IN QUESTE CONDIZIONI!!



Hydro Mechanical Specialistic Support
Ing. Paolo Cjaretti

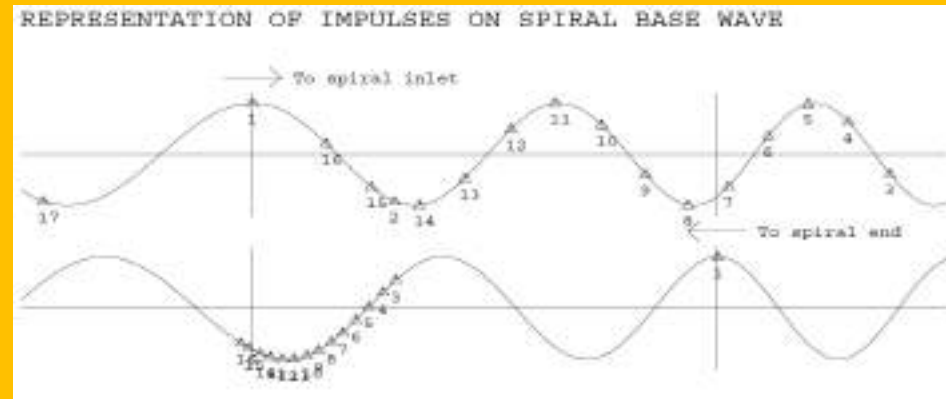


Green Power

I progettisti della **RIVA** hanno capito che dovevano cambiare il numero delle pale girante per provare a risolvere il problema.

Sono state quindi fornite due nuove giranti a **17 pale** al posto delle originarie a 15 pale.

In questo caso i valori dei coefficienti di sincronizzazione degli impulsi, che ora sono sulla frequenza di **141.67 Hz**, risultano pari a **0.149** verso imbocco spirale e **0.459** verso la fine della spirale.



La pulsazione di pressione che usciva dalla spirale era ora molto debole e non riusciva ad eccitare modi propri di vibrare della condotta.

LA CENTRALE E' STATA QUINDI GESTITA CON GIRANTI A 17 PALE SENZA PROBLEMI VIBRO-ACUSTICI FINO ALLA ESTATE 2018!



Hydro Mechanical Specialistic Support
Ing. Paolo Cjaretti



Green Power

Verso la fine del 2018 la condotta era ritornata improvvisamente a vibrare creando sempre un rumore sordo su una frequenza **acustica** bassa. Misure di vibrazione della condotta fatte ENEL indicavano che il fenomeno vibratorio era tutto sulla frequenza di interazione rotore-statore **$f_{RSI}=141.7$ Hz**

Una campagna di misure di vibrazione e rumore più dettagliata indicava che tutta la condotta vibrava su quella frequenza, **ma l'ampiezza di vibrazione era molto variabile da punto a punto**, con i valori massimi (35 mm/s) concentrati in una zona ristretta tra la sella 6 e la sella 8.

6) MISURA 6- POSIZIONE 6
A CAVALLO SELLA 8

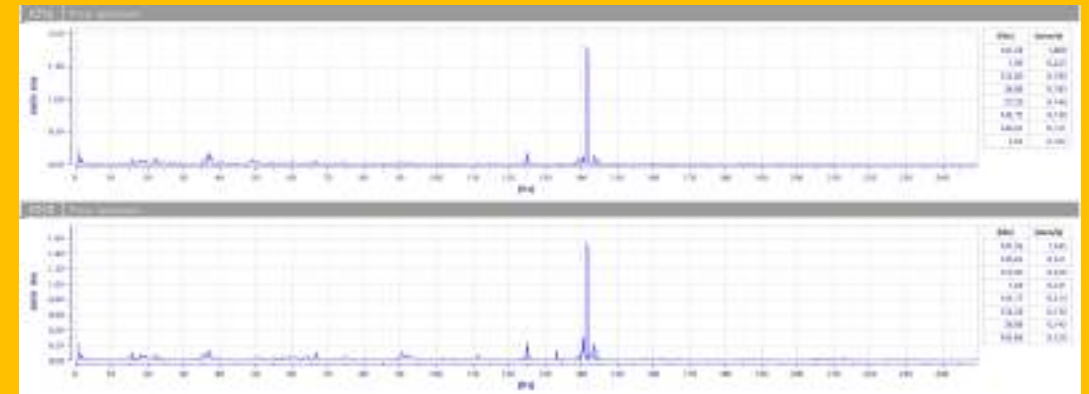
CH1	V_rms(mm/s)=	8,8
CH2	V_rms(mm/s)=	6,8

7) MISURA 7- POSIZIONE 7
A CAVALLO SELLA 7

CH1	V_rms(mm/s)=	35,8
CH2	V_rms(mm/s)=	12,9

8) MISURA 8- POSIZIONE 8
A META' TRA SELLA 6 E 7

CH1	V_rms(mm/s)=	35,7
CH2	V_rms(mm/s)=	22,6





Hydro Mechanical Specialistic Support
Ing. Paolo Cjaretti



Green Power

E' stata effettuata **una prova di impatto** sulla condotta forzata, a gruppo fermo e condotta piena, per poter conoscere le sue principali frequenze naturali in prossimità dei punti di maggior vibrazione.

Lo spettro seguente mostra appunto la presenza **di 2 picchi attorno a 141.67 Hz**, che confermano la condizione di risonanza locale attuale. Si nota anche un forte picco a **111.3 Hz**, che permette di spiegare anche la situazione di risonanza con la frequenza di 125 Hz trovata nel 1938.





Hydro Mechanical Specialistic Support
Ing. Paolo Cjaretti



Green Power

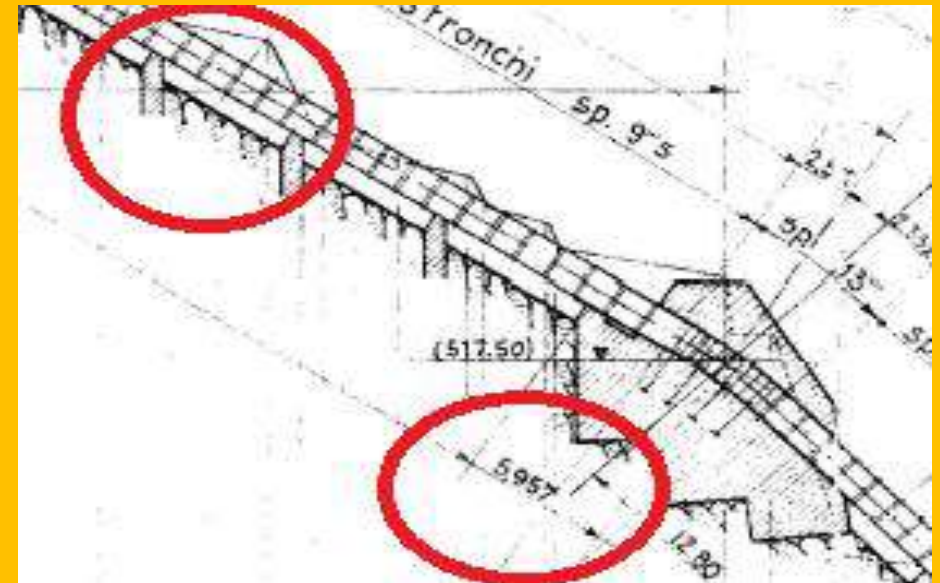
Essendo il fenomeno della risonanza solo locale, è stata verificata analiticamente quale potesse essere la lunghezza di tratto di condotta che poteva avere generato questa frequenza naturale.

Considerando il tratto di condotta come incastrato alle estremità, si ottiene una frequenza naturale prossima a **141.67 Hz** con una lunghezza di circa **5.8 m**, che è molto vicina a quella reale tra 2 selle di appoggio.

CALCOLO CON EFFETTO MASSA ACQUA									
D_e(m)=	1,529	s(m)=	0,0145	D_i(m)=	1,500	S_n(m2)=	0,068899	J_1(m4)=	0,020354
								J_2(m4)=	0,019782 usato questo valore
L(m)=	5,750	E(N/mm2)=	208000	E(N/m2)=	2,08E+11	r(kg/m3)=	7810		
V_H2O(m3)=	10,55778	m_H2O(kg)=	10557,78	V_tubo(m3)=	0,396693	m_tubo(kg)=	3098,176	m_tot_1(kg)=	13655,96
								ρ_calc_1(kg/m3)=	34424,46

CONDIZIONI DI CALCOLO : TUBO INCASTRATO AI 2 ESTREMI

modo proprio	k_i	f(Hz)
1	4,73	141,76
2	7,853	390,75
3	10,996	766,12
4	14,137	1266,31





Hydro Mechanical Specialist Support
Ing. Paolo Cjaretti



Green Power

Il fenomeno vibratorio presente solo da qualche mese sulla condotta è quindi nato **da una modifica della sua geometria**, molto probabilmente a causa di un **allungamento termico impedito** dal giunto di dilatazione bloccato e conseguente allo svuotamento della condotta con temperature esterne elevate.

Ipotizzando un salto termico di **25°C** su una lunghezza libera di **155 m**, si avrebbe **un allungamento pari a 47 mm**.
Se il giunto non scorre, si calcola **una forza per allungamento impedito pari a 2200 KN**.

E' quindi molto verosimile considerare una significativa deformazione della condotta rispetto alle condizioni nominali precedenti. Anche le selle possono essersi deformate, comportando una diversa condizione locale di vincolo per qualche tronco di condotta dove si è scaricata la forza per allungamento impedito.



Hydro Mechanical Specialistic Support
Ing. Paolo Cjaretti



Green Power

PUO' ESSERE ESERCITA UNA CONDOTTA FORZATA IN QUESTE CONDIZIONI?

Si è investigata la pericolosità della vibrazione trovata, andando a valutare lo stato di sforzo creato dallo spostamento picco-picco.

Nel punto di maggior vibrazione, dove si misurano **35 mm/s**, praticamente tutti sulla frequenza di **141.67 Hz**, si trova che lo spostamento picco-picco corrispondente equivale a **0.11 mm**.

Un'analisi sforzi-deformazioni permette di evidenziare come questa deformazione corrisponda ad un **incremento di sforzo pari al 18.7 %**.

Si è confrontato questo risultato con quanto indicato dall'**American Society of Civil Engineers** nel testo "**Steel Penstock – Manual n°79**", dove si definisce, come limite di riferimento nella valutazione della criticità di un fenomeno vibratorio lungo la condotta forzata, **un incremento di sforzo pari al 20%**.

Al di sopra di questo valore si indica la necessità di intervenire per porre rimedio, abbassando il livello della vibrazione. **Il calcolo effettuato mostrava quindi il raggiungimento del limite di riferimento.**



Hydro Mechanical Specialist Support
Ing. Paolo Cjaretti



Green Power

ENEL GREEN POWER S.p.A., ha subito provveduto a eseguire, secondo i criteri definiti dalle specifiche interne **MID80, MID71 e MID70** :

- una valutazione dello stato della condotta forzata, attraverso un'analisi meccanica e civile
 - l'installazione di una rete di prismi
- un'ispezione interna del tratto terminale della condotta , sia con drone che con personale

Enel ha inoltre sostituito il giunto di dilatazione a valle del vertice V1 (camera di carico)



Hydro Mechanical Specialisttic Support
Ing. Paolo Cjaretti



La condotta si è presentata in buono stato di conservazione esterno, le selle di sostegno risultano sane dal punto di vista strutturale, ma presentano luci variabili tra **5 e 20 mm** con la condotta, in particolare tra sella **n°2 e n°12**.

Le luci rilevate, lasciano presupporre che la condotta si sia spostata in direzione trasversale (h.3:00-9:00)

La spessimetria ha evidenziato che è soddisfatta pienamente la condizione prevista dalla specifica tecnica **MID 70** per quanto riguarda la conservazione degli spessori; alla condotta viene assegnato il livello di **attenzione 1**, per il quale è previsto di procedere ad un nuovo controllo **trascorsi 10 anni dalla presente ispezione**.



Hydro Mechanical Specialist Support
Ing. Paolo Cjaretti



Green Power

L'ispezione visiva ha messo in luce il **parziale bloccaggio del giunto di dilatazione** e un tratto di condotta nel quale **lo scorrimento longitudinale impedito ha generato lo spostamento trasversale della condotta**, deformando le selle di appoggio e la condotta stessa, modificandone la frequenza propria avvicinandola ai **141,67 Hz** propri dell'interazione rotore-statore.

Enel ha installato, al fine di valutare gli effettivi spostamenti della condotta in conseguenza del giunto di dilatazione limitato o bloccato nel suo scorrimento, **una rete di prismi per svolgere trilaterazioni sulla condotta**. Sono stati installati in totale 3 prismi in punti fissi (su di affioramenti rocciosi vicini) ed 8 prismi sulla condotta forzata.

Inoltre è stata svolta, al fine verificare l'eventuale presenza di oggetti che ostruissero il biforcuto e fossero causa della vibrazione, una **doppia ispezione interna** al tratto terminale della condotta forzata, con drone e con personale. Il risultato dell'ispezione è stato negativo, non evidenziando nulla di anomalo, eccezion fatta la presenza di un piccolo ritaglio di lamiera caduto all'interno durante le operazioni di montaggio del nuovo giunto

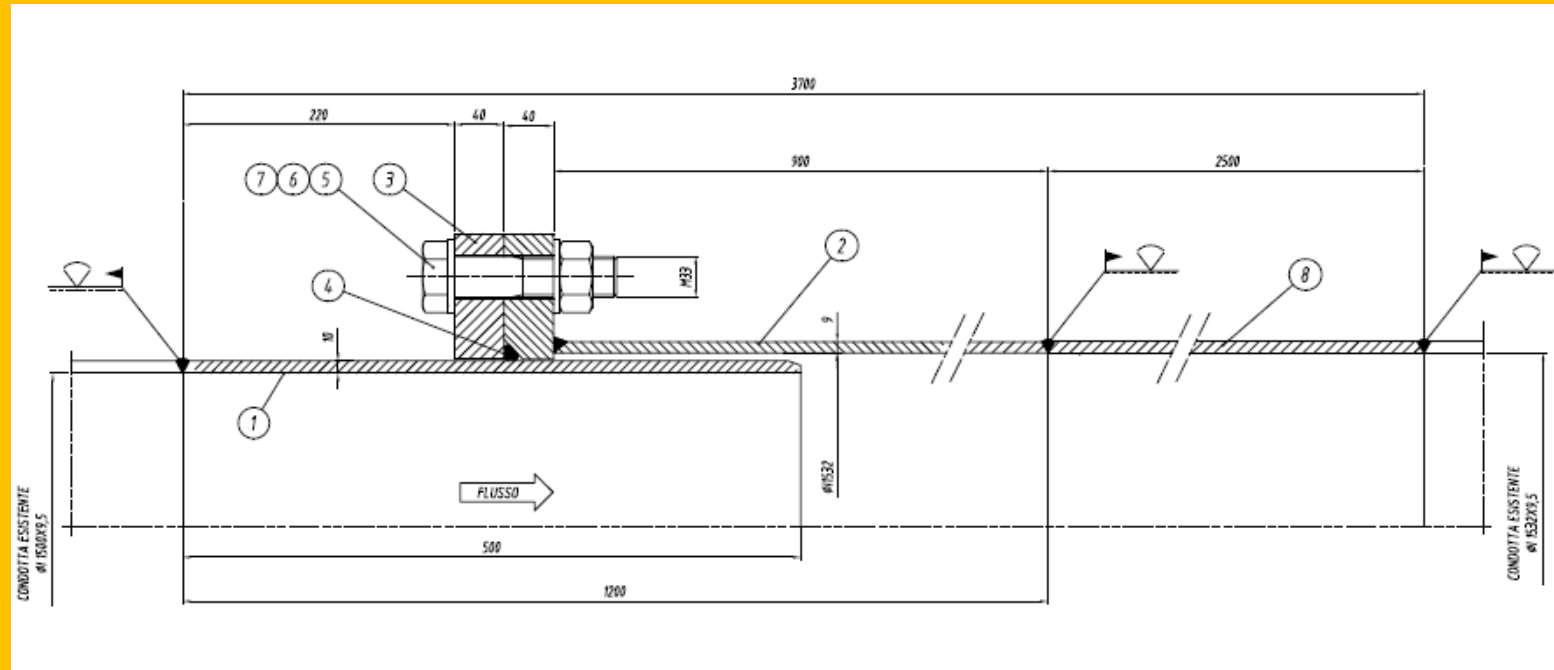


Hydro Mechanical Specialistic Support
Ing. Paolo Cjaretti



Green Power

Evidenziato il blocco del giunto di dilatazione, dei quali ne è generalmente impossibile la manutenzione a meno di sfilare il maschietto, Enel ha provveduto alla sostituzione dello stesso.





Hydro Mechanical Specialist Support
Ing. Paolo Cjaretti



Green Power

Dopo la sostituzione del giunto si è successivamente provato a liberare il tratto di condotta compreso tra la sella 6 e la 8, tagliando momentaneamente la sella 7. La condotta si è così riassetata prima di essere nuovamente vincolata alla sella 7.

Queste 2 attività hanno consentito di ridurre significativamente il livello di vibrazione nei punti più critici.

				MOMPANTERO - MISURE VIBRAZIONE CONDOTTA							
				CONFRONTO MISURE 14/01/2019 - 26/06/2019 - 04/09/2019							
				14/01/2019	26/06/2019	26/06/2019	26/06/2019	26/06/2019	04/09/2019	04/09/2019	
MISURE CONDOTTA	P_el(MW)=			7,2	4,5	7,2	7,2	7,2	4,5	7,2	
0) MISURA 0 - POSIZIONE DI PARTENZA 0								con ARIA			
IN QUESTA POSIZIONE E' STATO MISURATO IL RUMORE	Leq(dB(A))=			72	74	82			77	81	
OBTENENDO:	Lpk(dB(C))=			91	94	102			96	102	
6) MISURA 6 - POSIZIONE 6	DH1	V_rms(mm/s)=		8,8	2,7	5,7					
A CAVALLO SELLA 8	DH2	V_rms(mm/s)=		6,8	1,6	3,7					
7) MISURA 7 - POSIZIONE 7	DH1	V_rms(mm/s)=		35,8	7,3	15,3			5,4	5,2	
A CAVALLO SELLA 7	DH2	V_rms(mm/s)=		12,9	4,1	8,3			3,6	1,8	
8) MISURA 8 - POSIZIONE 8	DH1	V_rms(mm/s)=		35,7	6,6	18,2	14,5	13,9	4,2	10,3	
A META' TRA SELLA 6 E 7	DH2	V_rms(mm/s)=		22,8	3,8	12,7			8,8	6,7	



Hydro Mechanical Specialist Support
Ing. Paolo Cjaretti



Green Power

Nonostante il significativo miglioramento della situazione vibratoria , non si sono ancora avuti sufficienti miglioramenti dal punto di vista acustico.

Sono quindi allo studio interventi acustici sul tratto inferiore della condotta forzata.



Hydro Mechanical Specialistic Support
Ing. Paolo Cjaretti



RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano ing. Leonardo Cosmai e Sig. Giampaolo Ravanelli di Voith Hydro Milano per le informazioni relative alle turbine originarie RIVA matricola 3585-3586.



Hydro Mechanical Specialistic Support
Ing. Paolo Cjaretti



Green Power

Vi ringrazio per l'attenzione!

