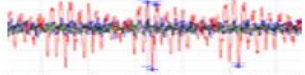


**Hydro Mechanical Specialistic Support**  
Ing. Paolo Caretti

# Problematiche vibratorie e normative internazionali

Paolo Caretti – Hydro Mechanical Specialistic Support



**Hydro Mechanical Specialistic Support**  
Ing. Paolo Caretti

## **Normative internazionali attualmente in uso**

**1)ISO 10816-5 -Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts —Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pumping plants**

**2)ISO 7919-5 Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on rotating shafts —Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pumping plants**



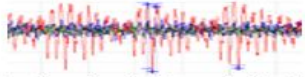
**Hydro Mechanical Specialistic Support**  
Ing. Paolo Caretti

## Aspetti fondamentali della norma ISO 10816-5

Misura delle vibrazioni radiali assolute delle parti non rotanti

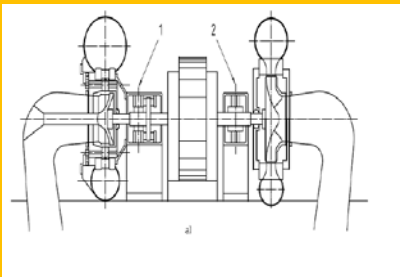
Le prescrizioni basilari di applicabilità della norma sono:

- velocità dei gruppi compresi tra 60 e 1800 RPM
- presenza di supporti a strisciamento, escludendo l'applicazione ai gruppi equipaggiati con supporti a rotolamento, mentre i supporti ad acqua non vengono citati
- potenza minima del gruppo 1 MW

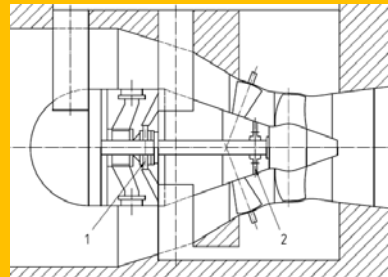


**Hydro Mechanical Specialistic Support**  
Ing. Paolo Caretti

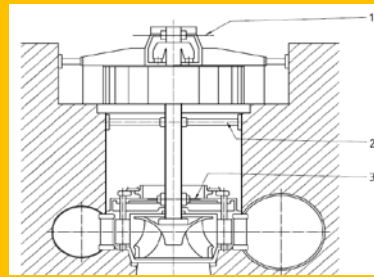
La norma fa riferimento a 4 tipologie di gruppi di generazione in funzione dell'orientamento dell'albero e di come sono scaricati i supporti sulle fondazioni



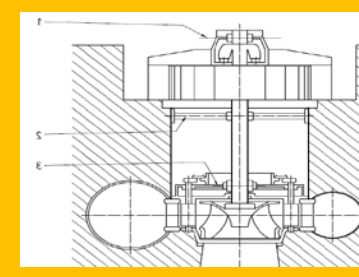
Tipologia 1



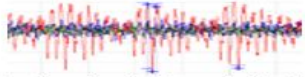
Tipologia 2



Tipologia 3



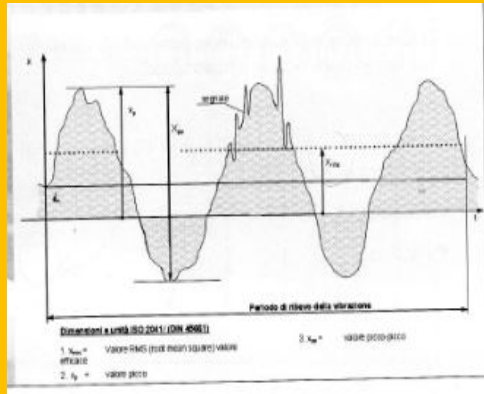
Tipologia 4



**Hydro Mechanical Specialistic Support**  
Ing. Paolo Caretti

I parametri di riferimento utilizzati dalla norma per indicare lo stato vibratorio sono:

**Spostamento picco-picco  $S_{p-p}(\mu\text{m})$  e Velocità efficace  $V_{rms}$  (mm/s)**



**Confronto fra le unità**

**Pk-Pk** : Preferibile quando si è interessati allo spostamento massimo ad esempio problemi legati a carico su componenti di macchina e prevalentemente su cuscinetti a strisciamento con sonde di prossimità

**0-Pk** : E' prevalentemente utilizzato per fenomeni transitori

**RMS** : Il valore RMS o valore efficace è la radice quadrata della media dei quadrati dei valori della forma d'onda acquisiti dallo strumento. Il valore efficace rappresenta l'energia associata alla vibrazione

La norma indica che per gruppi a velocità inferiore a 300 RPM è da preferire lo spostamento  $S_{p-p}$ , mentre per velocità superiori a 300 è da preferire la velocità efficace  $V_{rms}$ .



**Hydro Mechanical Specialistic Support**  
Ing. Paolo Caretti

I sensori indicati per le misure sono di tipo sismico : velocimetri ed accelerometri



sensibilità 75 mV/mm/s



sensibilità 10.2 mV/m/s<sup>2</sup>



**Hydro Mechanical Specialistic Support**  
Ing. Paolo Caretti

La norma prevede 2 criteri di valutazione per quantificare la severità dello stato vibratorio, che sono:

**- Criterio dell'ampiezza di vibrazione**

**-Criterio della variazione dell'ampiezza di vibrazione**

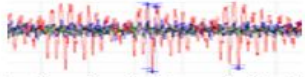
**Il primo criterio** fornisce dei valori di riferimento per le 4 diverse tipologie di gruppi e per le 4 zone di valutazione:

**Zona A:** ampiezza di vibrazione applicata a gruppi appena messi in servizio

**Zona B:** ampiezza di vibrazione accettabile per funzionamento a lungo termine

**Zona C:** ampiezza di vibrazione non soddisfacente per funzionamento a lungo termine

**Zona D:** ampiezza di vibrazione sufficientemente severa per creare danni al gruppo



**Hydro Mechanical Specialistic Support**  
Ing. Paolo Caretti

Zone boundary	At measurement location 1, 2, 3 and 4	
	Peak-to-peak displacement $\mu\text{m}$	R.m.s. velocity mm/s
A/B	30	1,6
B/C	50	2,5
C/D	80	4,0

NOTE: Vibration levels of two-jet Pelton machines are strongly influenced by the orientation of the resulting steady-state force vector and the operating jet (lower or upper) under part-load conditions.

Tipologia 1

Zone boundary	At measurement location 1 and 2
	R.m.s. velocity mm/s
A/B	2,5
B/C	4,0
C/D	6,4

NOTE: Displacement values cannot at present be given for this machine group since vibrations of the bulb with very low frequencies and high displacement amplitudes are frequently transmitted to the machine bearings. They may disguise at these parts all vibration displacement values originating from the machine itself. The recommended zone boundary values are not applicable to the evaluation of bulb vibration amplitudes.

Tipologia 2

Zone boundary	At all main bearings	
	Peak-to-peak displacement $\mu\text{m}$	R.m.s. velocity mm/s
A/B	30	1,6
B/C	50	2,5
C/D	80	4,0

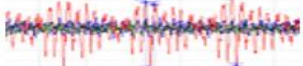
Tipologia 3

Zone boundary	At measurement location 1		At all other main bearings	
	Peak-to-peak displacement $\mu\text{m}$	R.m.s. velocity mm/s	Peak-to-peak displacement $\mu\text{m}$	R.m.s. velocity mm/s
A/B	65	2,5	30	1,6
B/C	100	4,0	50	2,5
C/D	160	6,4	80	4,0

NOTE 1: If a machine has a lower generator bearing without bracing against the foundation, the vibration should be evaluated according to measurement location 1.  
NOTE 2: Umbrella-type machines belong to this group, evaluation zone boundaries are those for the main bearings.

Tipologia 4





**Hydro Mechanical Specialistic Support**  
Ing. Paolo Caretti

**Il secondo criterio** riguarda invece il fatto che la variazione dell'ampiezza di vibrazione sia una indicazione dell'avvenuta variazione dello stato del macchinario e quindi della possibilità che un guasto progressivo possa essere in corso.

Variazioni di ampiezza di vibrazione che superano il 25% di quanto indicato dai valori previsti per il limite superiore della zona B sono sintomo di un avvenuto guasto, in particolare se risultano repentini.



**Hydro Mechanical Specialistic Support**  
Ing. Paolo Caretti

Una criticità della norma è dovuta al fatto che prevede il controllo di 2 parametri molto diversi tra loro, lo spostamento  $S_{p-p}$  e la velocità efficace  $V_{rms}$ .

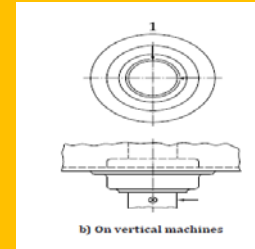
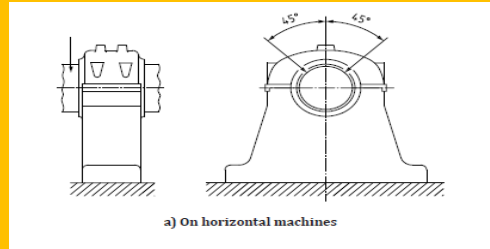
Il primo parametro è ottenibile, tramite sensore di tipo sismico, solo attraverso una integrazione numerica, quando si utilizza un velocimetro, se non addirittura attraverso doppia integrazione numerica, quando si utilizza un accelerometro, come succede praticamente sempre, ovvero introducendo delle incertezze dovute alla integrazione.



**Hydro Mechanical Specialistic Support**  
Ing. Paolo Caretti

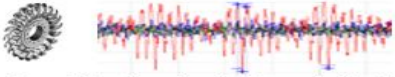
## Aspetti fondamentali della norma ISO 7919-5

Questa norma prende in considerazione la misura delle vibrazioni radiali relative delle parti rotanti rispetto alle carcasse dei supporti di guida. Le vibrazioni relative devono essere rilevate il più vicino possibile ai supporti.



Le prescrizioni basilari di applicabilità della norma sono esattamente le stesse indicate dalla **ISO10816-5** per le misure assolute.

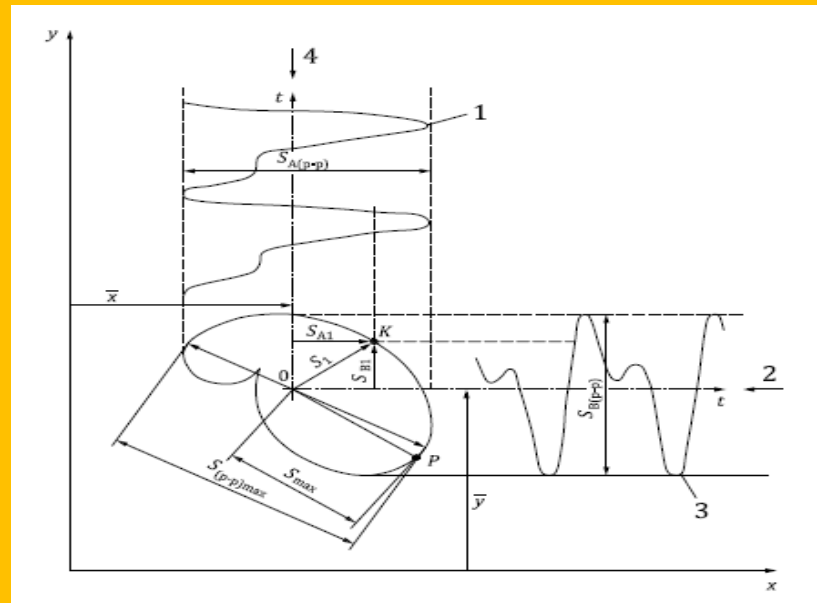
La norma non classifica i vari gruppi idroelettrici secondo alcuna tipologia di linea d'asse.

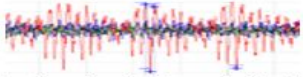


**Hydro Mechanical Specialistic Support**  
Ing. Paolo Caretti

I parametri scelti per l'analisi dello stato vibratorio relativo sono i seguenti:

**Spostamento massimo  $S_{max}(\mu m)$       Spostamento picco-picco  $S_{p-p}(\mu m)$**





**Hydro Mechanical Specialistic Support**  
Ing. Paolo Caretti

I sensori utilizzati sono di tipo NON CONTATTO che utilizzano il principio fisico delle correnti parassite.



Sensibilità  $-8 \text{ mV}/\mu\text{m}$



**Hydro Mechanical Specialistic Support**  
Ing. Paolo Caretti

La norma **ISO 7919-5** prevede gli stessi 2 criteri di valutazione visti nella **ISO 10816-5** per quantificare la severità dello stato vibratorio, che sono:

Criterio dell'ampiezza di vibrazione

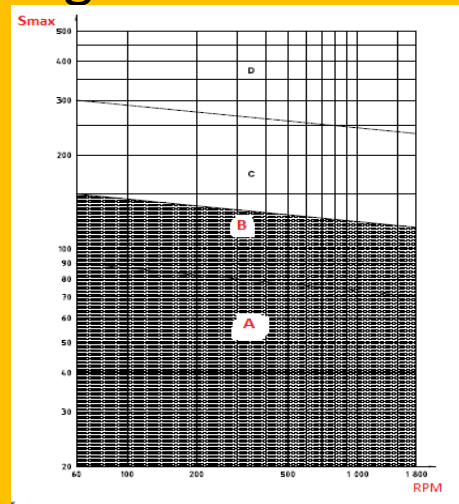
Criterio della variazione dell'ampiezza di vibrazione



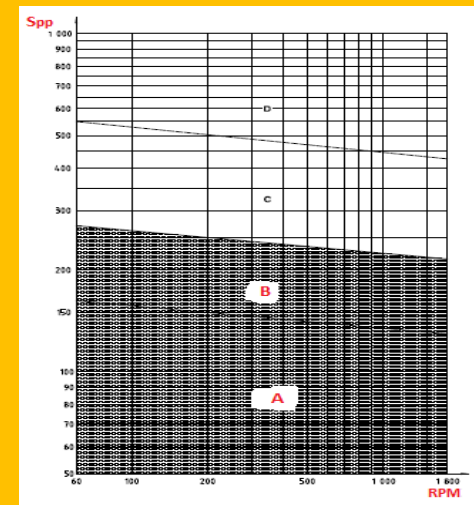
Per entrambi i parametri di misura  $S_{max}$  e  $S_{p-p}$  vengono indicati dei valori raccomandati per le 2 aree di ampiezza di vibrazione:

**Area A-B:** ampiezza di vibrazione ritenuta accettabile per funzionamento continuativo senza limitazioni

**Area C-D:** l'ampiezza di vibrazione ritenuta elevata e da confrontare con il gioco diametrico disponibile per valutarne la criticità



$S_{max}$  ( $\mu\text{m}$ ) vs Velocità rotazione (RPM)

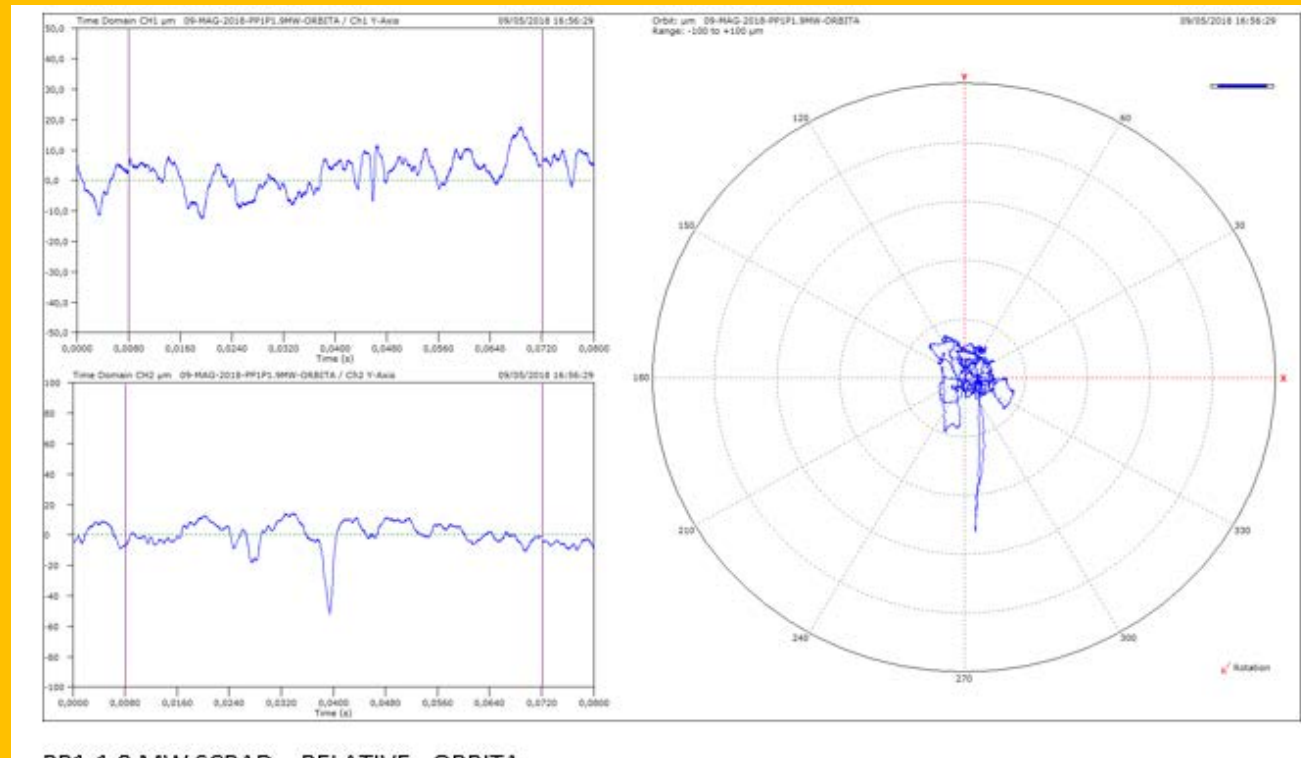


$S_{p-p}$  ( $\mu\text{m}$ ) vs Velocità rotazione (RPM)

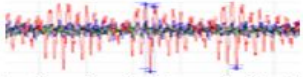


**Hydro Mechanical Specialistic Support**  
Ing. Paolo Caretti

Nella pratica attuale si utilizza sempre il riferimento dello spostamento picco-picco  $Sp-p$ , da cui si può anche calcolare l'orbita dell'albero







**Hydro Mechanical Specialistic Support**  
Ing. Paolo Caretti

## Normative internazionali in uso nel prossimo futuro

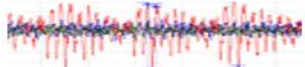
Da diversi anni è attivo il gruppo di lavoro JWG1 che riunisce specialisti ISO-IEC di tutto il mondo per il rinnovamento contemporaneo di entrambe le 2 norme ISO descritte precedentemente.

In questo gruppo di lavoro hanno partecipato attivamente anche gli specialisti del CT4 CEI.

La nuova norma **ISO 20816-5**, che entrerà in vigore alla fine del 2018, cancellerà e rimpiazzerà le attuali **ISO 10816-5** e **ISO 7919-5**.

La norma **ISO 20816-5** prende in considerazione in contemporanea sia la misura delle vibrazioni radiali assolute delle parti non rotanti, che la misura delle vibrazioni radiali delle parti rotanti relative alle parti fisse.

La norma si basa sull'analisi statistica dei dati di vibrazione di più di 7000 gruppi idroelettrici di tutto il mondo, tra cui circa 100 gruppi italiani.



**Hydro Mechanical Specialistic Support**  
Ing. Paolo Caretti

Le modifiche più importanti rispetto alle norme precedentemente descritte sono le seguenti:

- per le misure assolute si fa riferimento alla sola velocità efficace  $V_{rms}$  (mm/s), mentre per le misure relative si fa riferimento al solo spostamento picco-picco  $S_{p-p}(\mu m)$ .
- sono chiaramente identificati i valori di vibrazione di riferimento per le diverse tipologie di macchine idrauliche
- viene fortemente raccomandato di analizzare in contemporanea sia le vibrazioni dell'albero che quella delle parti non rotanti.
- per ogni tipologia di turbina viene definito il normale campo operativo di funzionamento entro il quale valgono le indicazioni fornite per l'interpretazione dello stato vibratorio.



**Hydro Mechanical Specialistic Support**  
Ing. Paolo Caretti

Le prescrizioni basilari di applicabilità della norma sono:

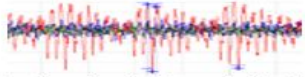
- velocità dei gruppi compresi tra 60 e 1000 RPM
- presenza di supporti a strisciamento, escludendo l'applicazione ai gruppi equipaggiati con supporti a rotolamento e ad acqua
- rispetto alla **ISO 10816-5** non viene indicata una potenza minima per l'applicazione della norma, quindi è direttamente applicabile ai gruppi Small Hydro che ne abbiano i requisiti.



**Hydro Mechanical Specialistic Support**  
Ing. Paolo Caretti

Oltre a valere i medesimi criteri dell'ampiezza di vibrazione e della variazione dell'ampiezza di vibrazione, la norma **ISO 20816-5** mette in evidenza il fatto che si devono considerare i seguenti aspetti in contemporanea:

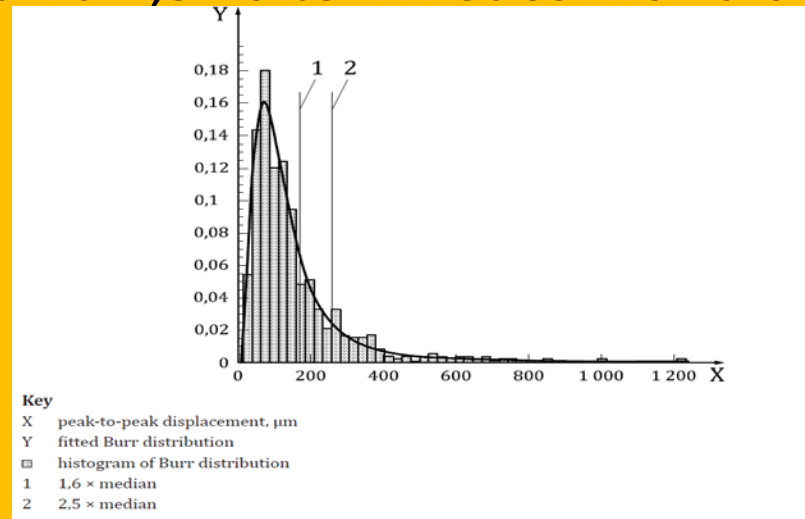
- ampiezza della vibrazione relativa dell'albero
- ampiezza della vibrazione assoluta dei supporti
- percentuale del gioco diametrico del cuscinetto utilizzata dalla vibrazione d'albero
- temperatura delle parti di metallo bianco del cuscinetto
- valutazione della condizione operativa del gruppo



**Hydro Mechanical Specialistic Support**  
Ing. Paolo Caretti

La norma fornisce dei valori di riferimento di ampiezza di vibrazione intesi come “action limits” ovvero valori limite per attivare una azione di diagnosi sul macchinario.

Essendo questi valori derivati da una analisi statistica, “il valore limite 1” corrisponde a un valore pari a 1,6 volte il valore mediano della distribuzione statistica, mentre il “valore limite 2” corrisponde a un valore pari a 2,5 volte il medesimo valore mediano.



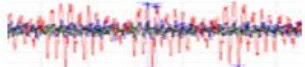


Per le 4 tipologie di gruppo idroelettrico sono quindi definite delle tabelle con i valori limite 1 e 2 per i vari tipi di turbina idraulica che costituisce il gruppo in oggetto. Si allega, a titolo di esempio, la tabella relativa ai gruppi ad asse orizzontale con supporti scaricati sulle fondazioni (tipologia 1).

**Table A.1 — Action limits for Group 1 machines:  
Horizontal machine sets with pedestal or end-shield mounted bearings**

Machine type:	Relative shaft vibration $S_{p-p}$ , $\mu\text{m}$			Bearing housing vibration $v_{\text{rms}}$ , mm/s		
<b>Francis horizontal</b>	T	GE-DE	GE-NDE	T	GE-DE	GE-NDE
Action limit 1 (A-B/C)	140	100	95	0,8	0,8	1,0
Action limit 2 (C/D)	215	150	150	1,3	1,3	1,5
Normal operating range for Francis horizontal: from 70 % to 100 % of rated power						
Machine type:	Relative shaft vibration $S_{p-p}$ , $\mu\text{m}$			Bearing housing vibration $v_{\text{rms}}$ , mm/s		
<b>Pelton horizontal</b>	T	GE-DE	GE-NDE	T	GE-DE	GE-NDE
Action limit 1 (A-B/C)	135	145	95	1,8		1,1
Action limit 2 (C/D)	205	225	150	2,9		1,8
Normal operating range for Pelton horizontal: from 10 % to 100 % of rated power						
Machine type:	Relative shaft vibration $S_{p-p}$ , $\mu\text{m}$			Bearing housing vibration $v_{\text{rms}}$ , mm/s		
<b>Pump horizontal</b>	P	GE-DE	GE-NDE	P	GE-DE	GE-NDE
Action limit 1 (A-B/C)	215	110	110	1,3 <sup>a</sup>	0,5	0,3
Action limit 2 (C/D)	330	170	170	2,0 <sup>a</sup>	0,8	0,5

<sup>a</sup> Due to the lack of statistical information, for these cells, values were calculated using the Francis horizontal bearing action limits scaled by the ratio of the Pump horizontal/Francis horizontal shaft action limits at each bearing, e.g. Action limit 1 (A-B/C) for Pump horizontal  $P = 0,8 (215/140) = 1,23$  (rounded up to 1,3 mm/s).



**Hydro Mechanical Specialistic Support**  
Ing. Paolo Caretti

Si può quindi notare come:

- vengano indicati in contemporanea i valori limite per vibrazioni assolute e relative
  - vengano indicati i valori limite per i diversi supporti che sostengono l'intera linea d'asse
  - venga indicato un campo di funzionamento normale per ogni tipologia di turbina
  - vengano indicati anche valori di riferimento per pompe di accumulo
- Qualora i valori limite 1 e 2 vengano superati, la norma **ISO 20816-5** indica due diverse procedure di investigazione, chiaramente molto più pesanti qualora siano superati i valori limite 2.



**Hydro Mechanical Specialistic Support**  
Ing. Paolo Caretti

La nuova norma **ISO 20816-5** è quindi pienamente applicabile ai gruppi Small Hydro equipaggiati con supporti a strisciamento

La norma definisce un chiaro percorso normativo per interpretare anche lo stato vibratorio assoluto dei gruppi Small Hydro equipaggiati con supporti a rotolamento.

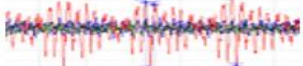
Questo percorso passa attraverso la norma :

**-CEI EN 62006 - Macchine idrauliche - Prove di accettazione per piccole installazioni idroelettriche**

e la norma

**ISO 10816-3 – Mechanical vibration- Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts – Industrial machines with nominal power above 15 KW and speeds between 120 and 15000 RPM when measured in situ.**





**Hydro Mechanical Specialistic Support**  
Ing. Paolo Caretti

## **Casi peculiari di problematiche vibratorie su gruppi Small Hydro**

La casistica delle problematiche vibratorie dei gruppi Small Hydro comprende tutto quanto normalmente trovato sui gruppi di potenza maggiore.

Come casi peculiari tipici della configurazione Small Hydro si riportano invece due casi legati ad insufficiente rigidezza della struttura portante il generatore.



**Hydro Mechanical Specialistic Support**  
Ing. Paolo Caretti

## 1) Gruppo Francis verticale da 1MW

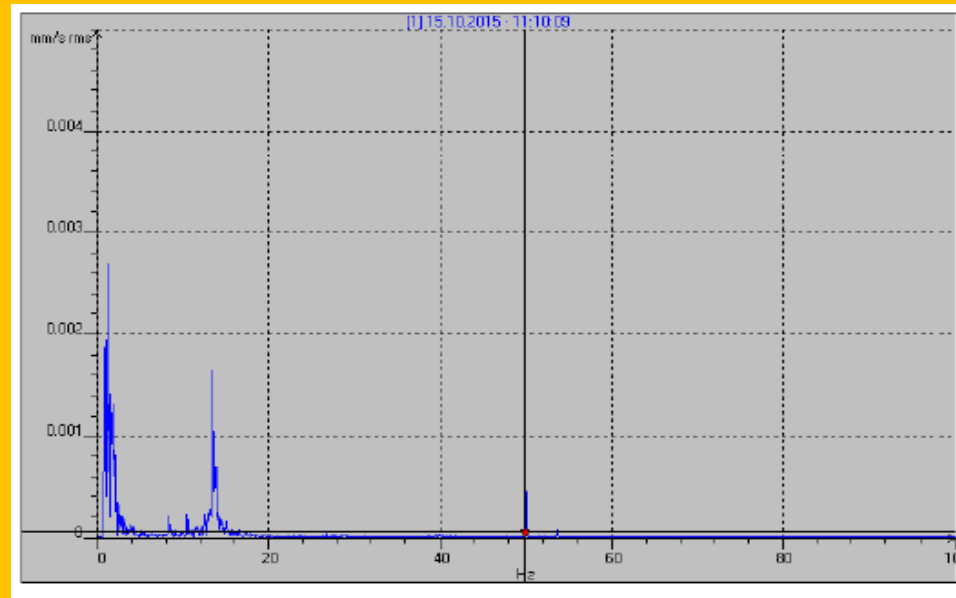
Questo gruppo ad asse verticale prevede che il generatore, con massa pari a 11000 kg, sia applicato ad una struttura che lo lega direttamente alla spirale turbina.

Alla messa in servizio il gruppo non riusciva a rimanere in marcia a vuoto (N=750 RPM,  $f=12.5$  Hz) a causa di elevate vibrazioni sul supporto superiore generatore.



**Hydro Mechanical Specialistic Support**  
Ing. Paolo Caretti

Una prova di impatto per mezzo di martello con testa morbida verificava che, nella direzione ortogonale all'asse imbocco spirale, la struttura avesse una frequenza naturale appena superiore a 13 Hz.



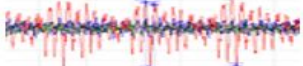


**Hydro Mechanical Specialistic Support**  
Ing. Paolo Caretti

Per poter effettuare la messa in servizio entro i tempi stabiliti, la struttura portante del generatore è stata irrigidita tramite alcuni puntoni messi nella direzione di maggior cedevolezza, così come è stata effettuata una raffinata bilanciatura in campo del generatore.



Con questa configurazione il gruppo ha potuto concludere le prove di messa in servizio ed anche superare le prove di rendimento.



**Hydro Mechanical Specialistic Support**  
Ing. Paolo Caretti

## 2) Gruppo assiale tubolare monoregolante da 80 kW

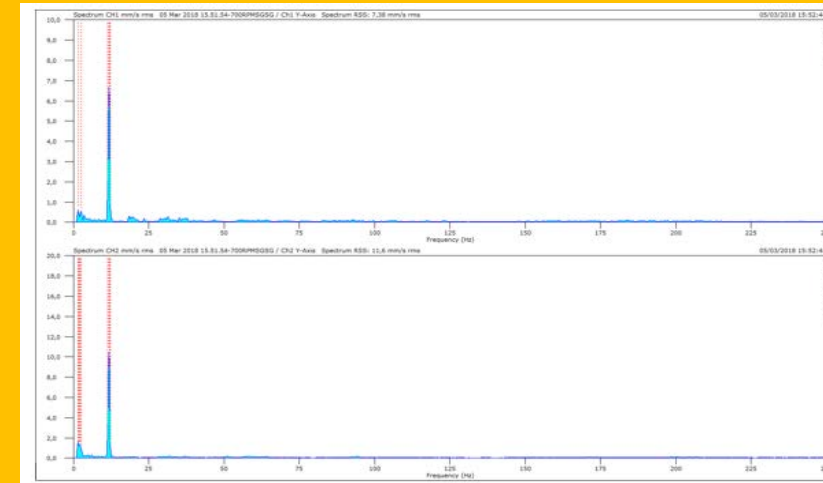
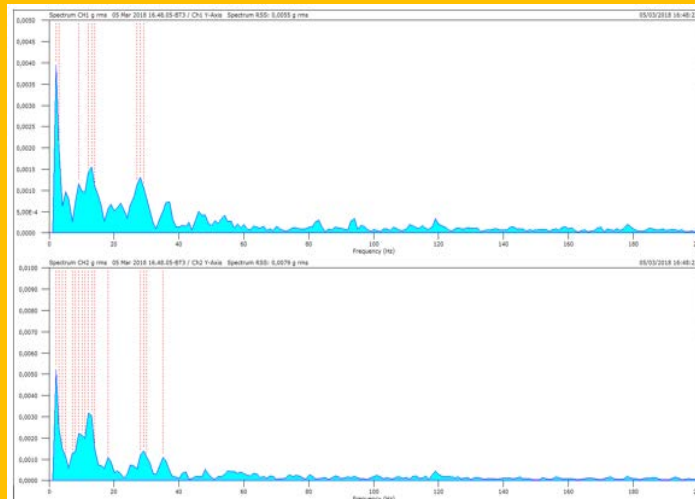
Anche questo gruppo ad asse verticale ( $N=600$  RPM) prevede il generatore applicato su una struttura che lo lega direttamente all'imbocco turbina.

Anche in questo caso le vibrazioni in marcia a vuoto erano alte e durante uno stacco di carico dal 25% di potenza si sono raggiunte vibrazioni molto elevate, dell'ordine di 25 mm/s.



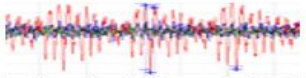
**Hydro Mechanical Specialistic Support**  
Ing. Paolo Caretti

E' stata quindi effettuata una prova di impatto tramite martello con testa morbida, prova che ha mostrato l'esistenza di una frequenza naturale della struttura portante vicina a 12 Hz (720 RPM), situazione confermata da una prova di fuga parziale a 700 RPM





**Hydro Mechanical Specialistic Support**  
Ing. Paolo Caretti



Si è irrigidita la struttura portante, migliorando la situazione vibratoria alla velocità nominale di rotazione, ma non risolvendola completamente in condizioni transitorie durante gli stacchi di carico.

E' stato necessario effettuare una analisi flessionale della linea d'asse turbina – generatore.

Imponendo una elevata cedevolezza radiale del supporto superiore si è trovata una prima frequenza naturale flessionale pari a circa 12.3 Hz (732 RPM).





**Hydro Mechanical Specialistic Support**  
Ing. Paolo Caretti

Questa situazione veniva esaltata dalla notevole entità della massa (150 kg) dell'assieme servomotore pale girante-ruota fonica e colonnetta, direttamente applicato sul ramo a sbalzo superiore dell'albero generatore.

E' quindi in corso un nuovo studio dell'applicazione di questo assieme con massa ridotta e irrigidendo il serraggio del cuscinetto superiore generatore, permettendo ora di raggiungere una prima frequenza naturale flessionale attorno a 1600 RPM.