

ATTENTI ALLE VIBRAZIONI !

Metodi, Tecnologie e Strumenti per
l'Analisi Vibroacustica di Macchine Rotanti



ni.com



Sommario

- Introduzione
- Accenni di Tecniche di Misura delle Vibrazioni
- Tecniche di Acquisizione in RealTime
- Tecniche di Analisi in Post-Processamento
- Monitoraggio ed Analisi Macchine Rotanti
- Criteri di Diagnosi Guasti



Introduzione

- Obiettivi del seminario
 - Principi della misura ed analisi di vibrazioni e relativi sistemi
 - Guida pratica per il controllo di vibrazioni di macchine rotanti



Vibrazioni di Macchine Rotanti

- Causa più frequente ed importante nell'insorgere di vibrazioni è lo squilibrio di una parte rotante
- Le vibrazioni generate da squilibri generalmente hanno effetti su altre vibrazioni in varie parti della macchina



Cause Tipiche di Vibrazioni

- Squilibrio di Rotanti
- Disallineamenti
- Giochi
- Cuscinetti
- Ingranaggi
- Giunti e Frizioni
- Cinghie di Trasmissione
- Fenomeni Aerodinamici
- Fenomeni Idraulici
- Fenomeni Elettromagnetici



Parametri Tipici di Misura

- Misura dell'Ampiezza ad una o più Frequenze di:
 - Accelerazione
 - Velocità
 - Spostamento
- Misura della Fase relativa ad un riferimento di posizione o tachimetrico



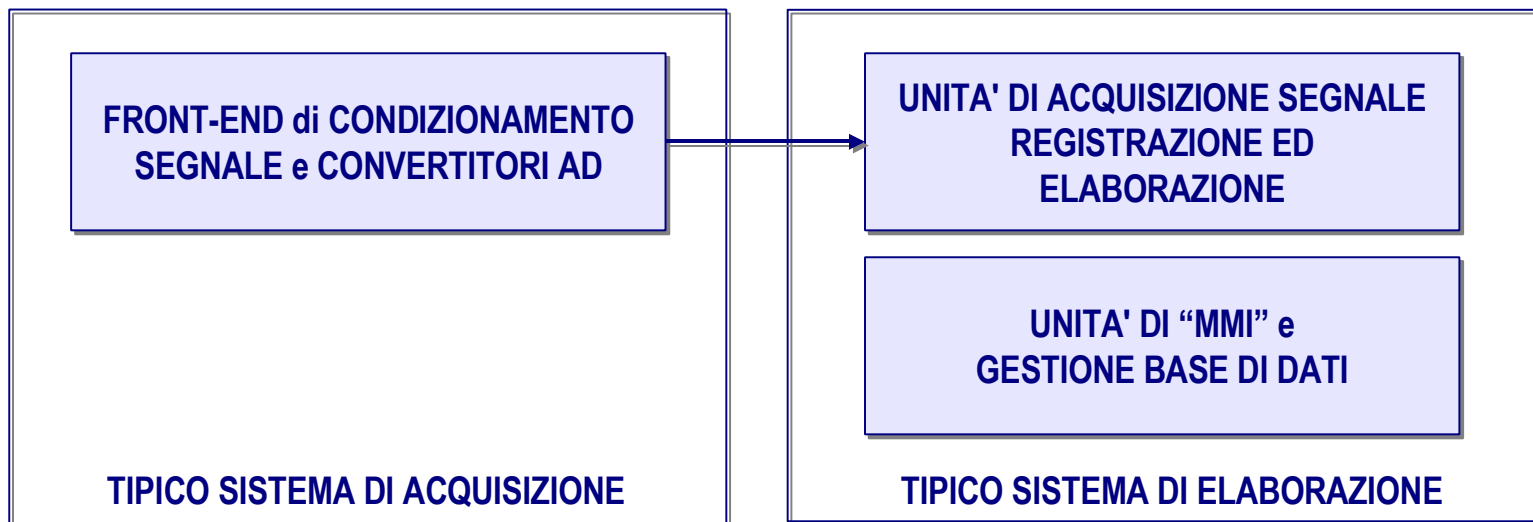
Strumenti per la Misura delle Vibrazioni

- Trasduttori
 - Accelerometri
 - Trasduttori di Posizione
- Sistemi di Acquisizione ed Elaborazione
 - Analizzatori di Livello
 - FFT Multicanale



Architettura dei Sistemi

- I moderni sistemi di analisi vibroacustica sono basati su architetture di tipo distribuito



Caratteristiche dei Sistemi Moderni

- Il medesimo front-end di acquisizione può essere accoppiato a diversi tipi di unità di elaborazione
 - PC e PXI
 - Palmari
 - Sistemi Embedded e CRIO
- Variano le prestazioni computazionali e la capacità di memoria ma non il formato dati che è uniformato a standard
- La potenza di calcolo oggi disponibile consente di realizzare anche sistemi con un elevato numero di canali



Vantaggi Strategici

- Lo stesso sistema può essere indifferentemente :
 - Registratore di Segnale
 - Analizzatore
 - Sistema di Monitoraggio
- L'architettura modulare permette di riconfigurare ogni sistema in base alle specifiche esigenze utilizzando comunque moduli standard
- Il software applicativo è l'elemento chiave che consente di “fondere” efficacemente vari componenti il sistema



Tecniche di Acquisizione in RealTime

- Acquisizione
- Registrazione
- Monitoraggio
- Analisi Temporale
- Analisi in Banda Stretta



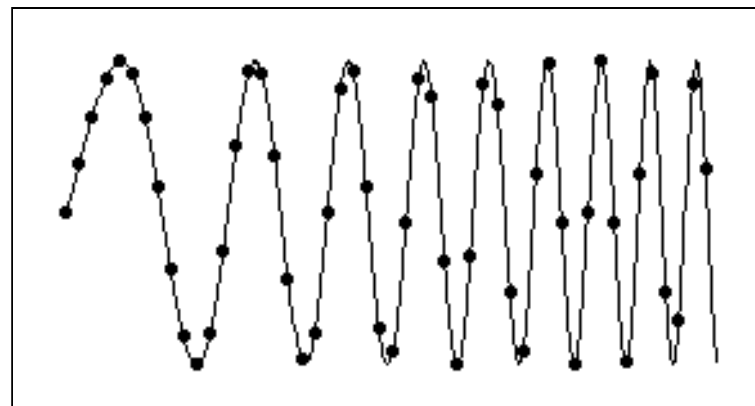
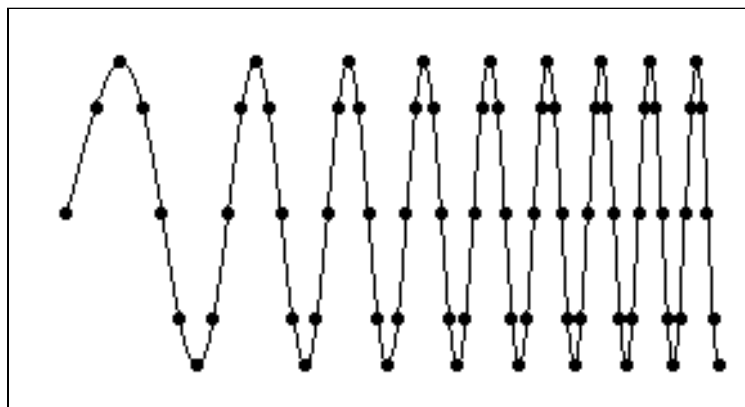
Acquisizione

- La scelta dell'architettura del sistema di acquisizione dipende da:
 - Tipo di Campionamento
 - Caratteristiche Trasduttori
 - Numero dei Canali
 - Banda Passante
 - Range Dinamico



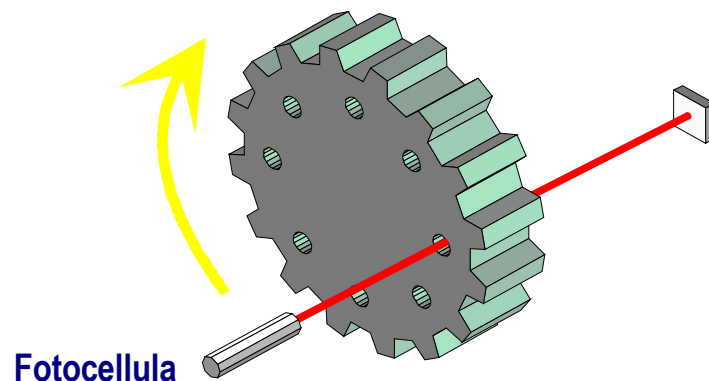
Tipo di Campionamento

- Campionamento Sincrono
- Campionamento Asincrono



Tecniche di Campionamento

- Sincrono : ad ogni impulso corrisponde un valore del convertitore AD
- Asincrono : il segnale della fotocellula è acquisito contemporaneamente al segnale di vibrazione ed in seguito post-elaborato



Trasduttori

- A Contatto
 - Accelerometri, Velocimetri, Strain-Gauges, ...
- Non Contatto
 - di Spostamento Laser a Triangolazione, Proximity, ...
- Trasduttori per Rif.Tachimetrici e di Posizione
 - Encoders, Fotocellule a Retroriflessione, Proximity, ...



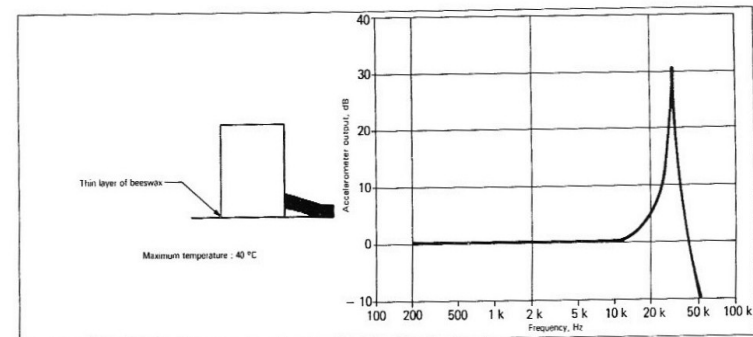
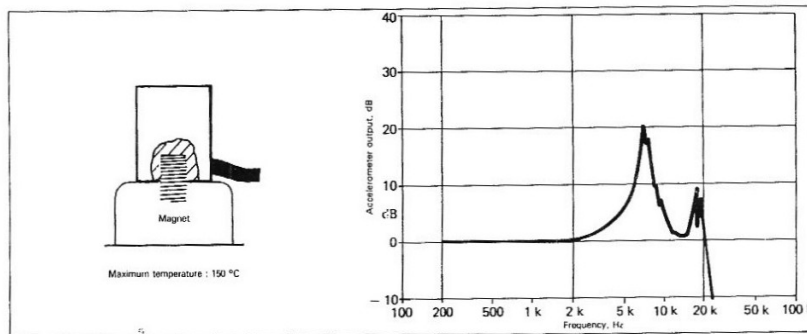
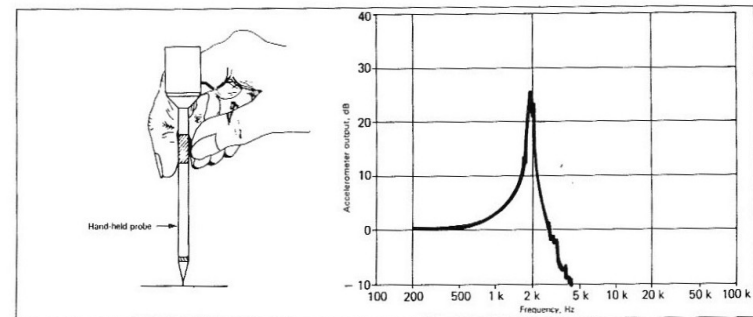
Banda Passante del Sistema di Acquisizione

- La frequenza massima misurabile è normalmente un multiplo della frequenza massima di rotazione della macchina
- La frequenza minima dipende sia dal tipo di accoppiamento dei trasduttori (Ac/Dc) sia dalla capacità del sistema di analizzare lunghi periodi di segnale ad elevate frequenze di campionamento



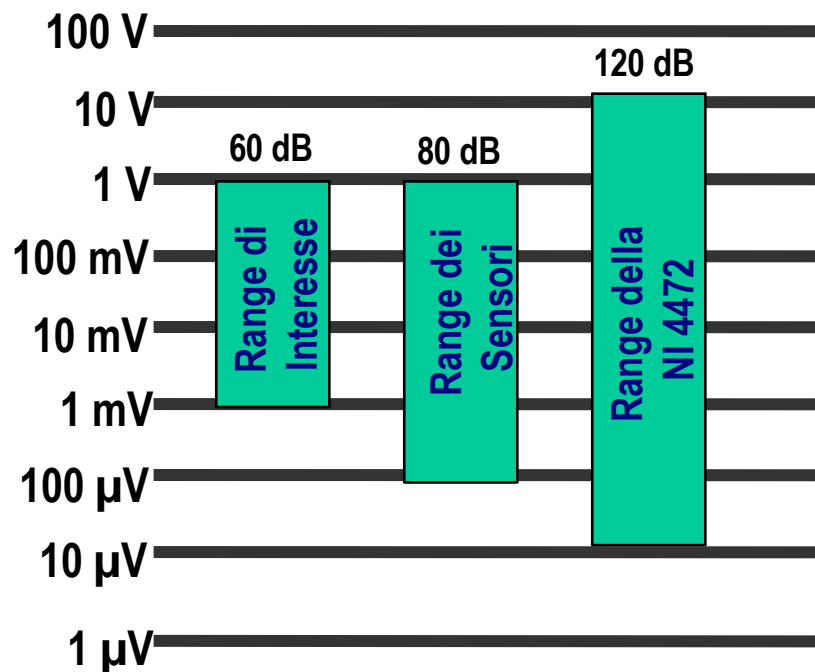
Banda Passante dei Trasduttori

- Il tipo di trasduttore ed il relativo montaggio determinano la banda passante del sistema



Gamma Dinamica

- Range di Interesse
Range Trasduttori
Range di Conversione AD
- Se possibile il range AD deve comprendere il range dei trasduttori per evitare Under ed Overload



Registrazione su Memoria di Massa

- La capacità di registrazione di segnali numerici è funzione delle prestazioni del sistema di elaborazione (throughput) e delle dimensioni della memoria di massa disponibile
- Throughput
 - “Byte/s = N.Canali * Freq.Camp * N.Byte per campione”
- Capacità di Storage
 - “Tempo Rec = N.Byte disponibili su HD / Throughput in Byte/s”



Struttura Files

STRUTTURA
FILE TIPICA

HEADER
FILE

SEQUENZA CAMPIONI CODIFICATI

- Header
 - Contiene le informazioni di acquisizione (Config. Canali, ...)
 - Formato Binario, Ascii, XML
- Segnale
 - Codifica Binaria (interi a 16 bit oppure floating a 32 bit)
 - Codifica ASCII con rappresentazione esponenziale
 - Sequenza Continua o con Struttura a Buffer
 - Formati tipici standardizzati : UFF ed SDF



Monitoraggio

- Il controllo delle vibrazioni nel tempo permette, ad esempio, di prevedere quale organo potrebbe essere soggetto a deterioramento
- **Controllo Periodico**
Sono effettuate acquisizioni ed analisi ad intervalli di tempo regolari con eventuale registrazione del segnale
- **Controllo Continuo**
L'acquisizione e l'analisi è effettuata in modo continuo così da controllare eventi improvvisi con registrazione del segnale



Tipo di Controlli

- Durante le fasi di monitoraggio alcuni parametri possono fornire informazioni sullo stato di funzionamento della macchina e consentire la gestione allarmi
- Analisi Temporale
 - Livello RMS
 - Livello di Picco/Picco
 - Fattore di Cresta
- Analisi Spettrale
 - Analisi a Banda Stretta
 - Analisi d'Ordine
 - Analisi CPB



Analisi in Post-Processamento

- Analisi Temporale
- Analisi a Banda Stretta
- Analisi a Banda Percentuale Costante (CPB)
- Analisi Order Tracking
- Analisi Tempo-Frequenza
- Analisi Cepstrum

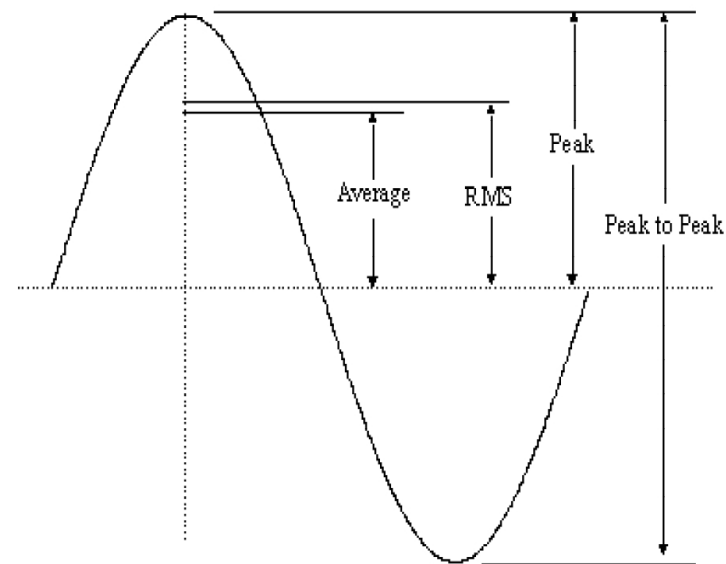


Analisi Temporale

- Il livello di “Overall Rms” rappresenta l'energia vibratoria complessiva in un certo range di frequenza

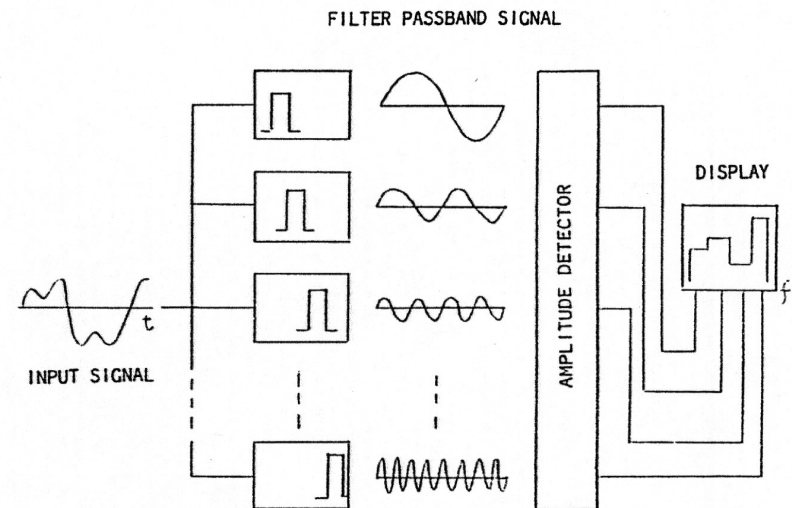
- $$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt}$$

- Il rapporto tra livello medio, di picco, picco-picco ed rms dipende dal tipo di segnale
- Fattore di Cresta = Liv. Picco / Liv. Rms



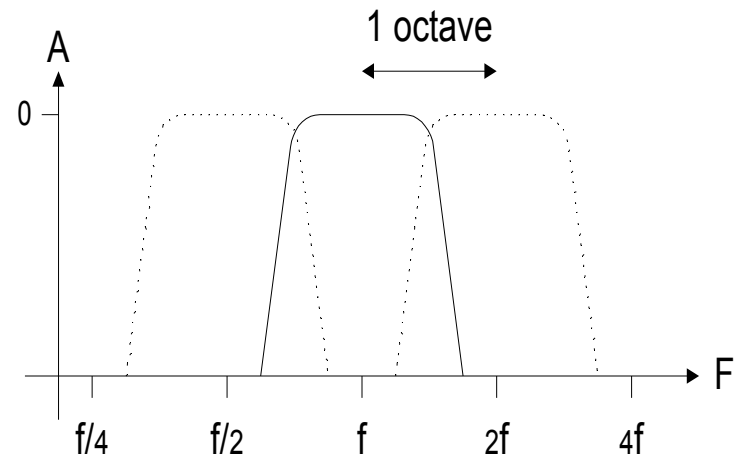
Analisi Spettrale Passa Banda

- Ogni filtro consente di ottenere il segnale corrispondente alla banda di frequenza selezionata al quale sono applicati i criteri di misura nel dominio del tempo
- I filtri nel dominio del tempo generano effetti di distorsione di fase
- Buona soluzione per controllare porzioni di banda in modo sintetico



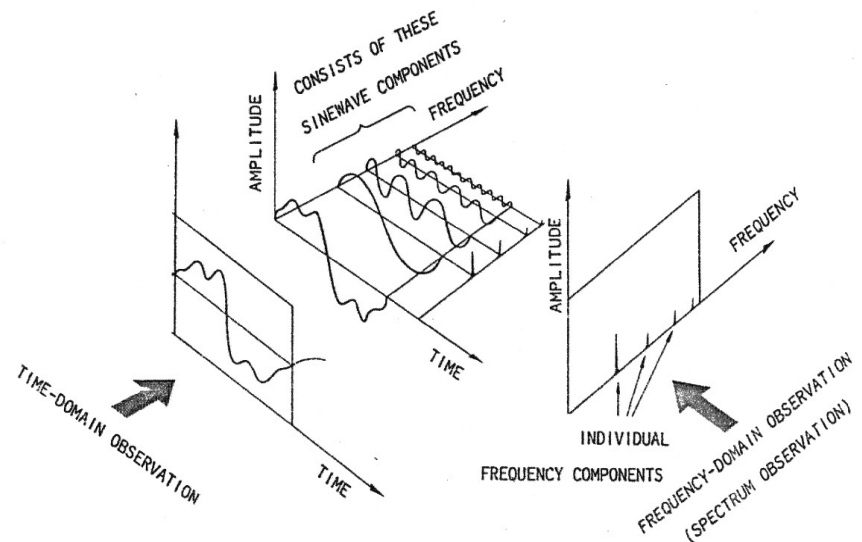
Analisi a Banda Percentuale Costante

- La larghezza di banda del filtro è proporzionale alla frequenza di centro banda
- Un numero limitato di campioni può rappresentare molte decadi in frequenza
- E' agevole il confronto fra spettri
- La rappresentazione spettrale è meno sensibile rispetto alla FFT a piccole variazioni di velocità



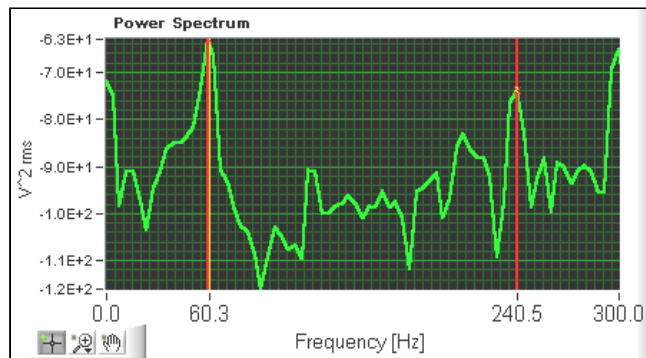
Analisi Spettrale in Banda Stretta

- La Trasformata di Fourier consente di ottenere la rappresentazione di un segnale come somma di sinusoidi ognuna di livello e fase noti
- Risoluzione Spettrale [Hz]
 $F_{\max} [\text{Hz}] = \text{Freq di Camp.} / 2$
 $dF [\text{Hz}] = \text{Freq di Camp.} / N. \text{ Punti}$
- A parità di frequenza di camp. la risoluzione spettrale è inversamente proporzionale alla durata del periodo temporale considerato



Order Tracking

- L'analisi spettrale è normalizzata rispetto alla frequenza di rotazione principale del dispositivo



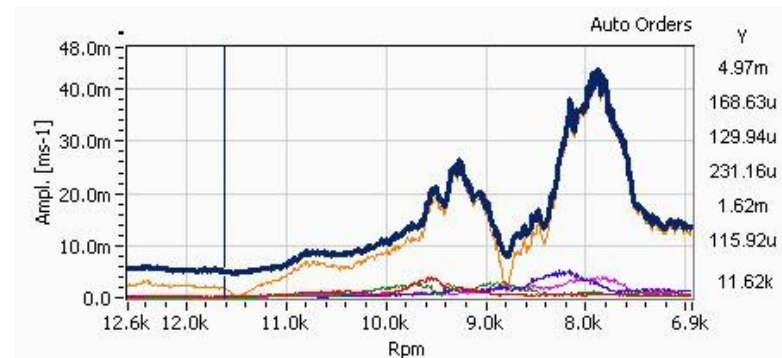
Freq. Fondamentale = 60 Hz



Ordine 1 : Freq = 60 Hz
Ordine 4 : Freq = 240 Hz

Analisi Order Tracking

- Al variare del regime di rotazione è possibile misurare il livello delle armoniche (ordini) corrispondenti
- La frequenza centrale dei filtri è proporzionale alla frequenza di rotazione
- E' indispensabile l'acquisizione simultanea del segnale tachimetrico e di vibrazione



Analisi Tempo Frequenza

- Offre una visione sintetica del processo vibratorio al variare della frequenza di rotazione
- Rappresenta una cascata di spettri ad intervalli di tempo costanti con rappresentazione del livello in scala colore

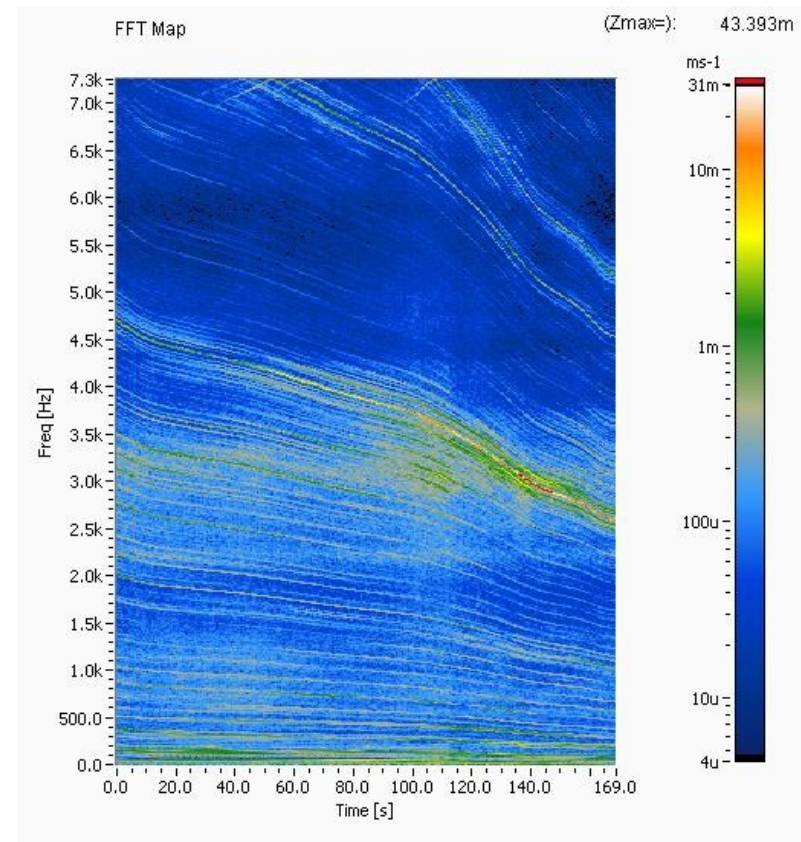
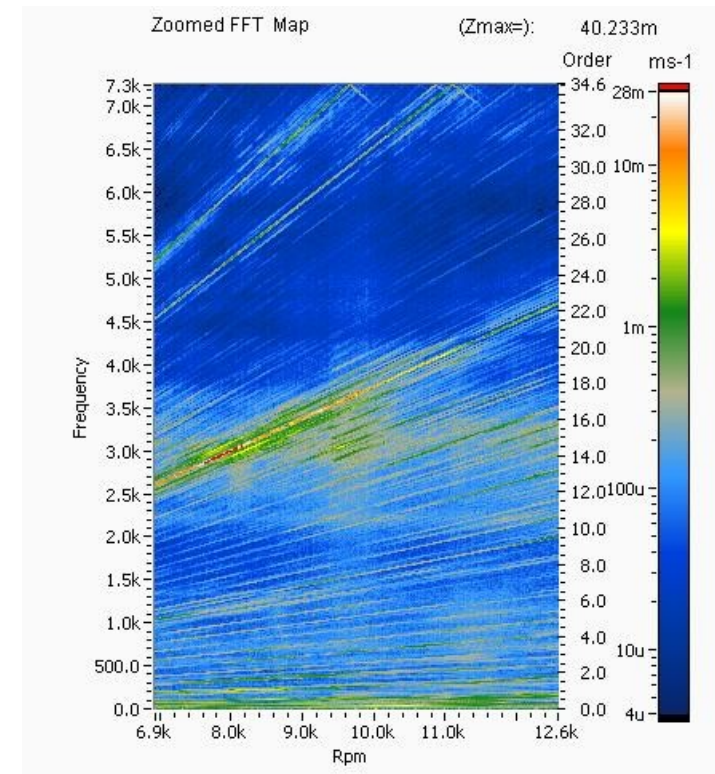


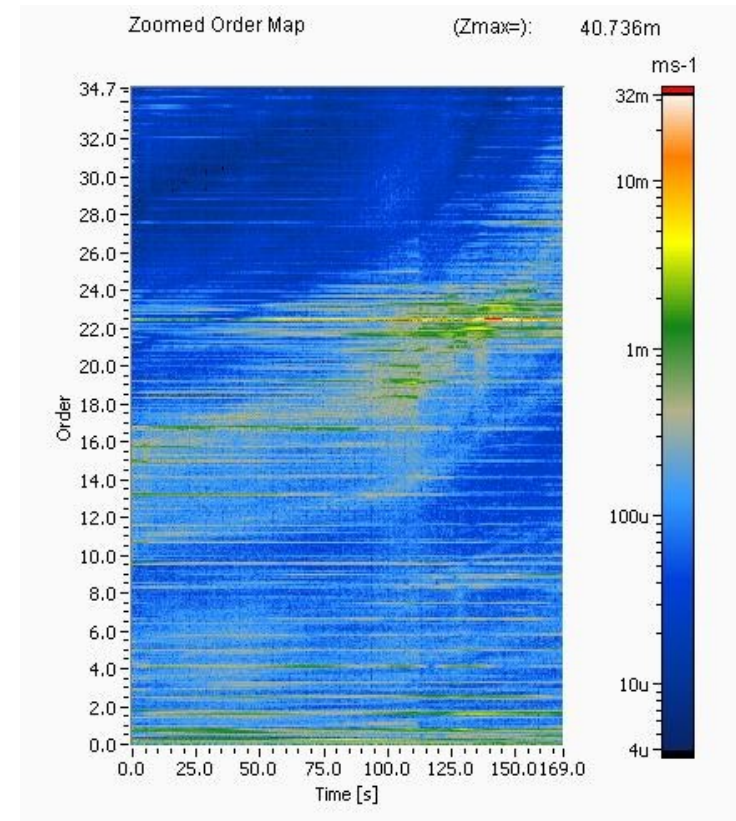
Diagramma di Campbell

- E' il risultato della rappresentazione di una cascata di spettri in frequenza sincroni con la velocità di rotazione
- Consente agevolmente di identificare frequenze naturali eccitate dal processo vibratorio



Order Colormap

- E' il risultato della rappresentazione di una cascata di spettri in ordini sincroni con la velocità di rotazione
- Consente agevolmente di identificare fenomeni legati in modo sincrono con la frequenza di rotazione



Monitoraggio di Macchine

- Raccomandazioni per la Misura di Vibrazioni
- Misura dell'Intensità di Vibrazione
- Norme per l'Applicazione dei Criteri di Giudizio



Raccomandazioni

- **Punti di Misura**
Devono essere scelti punti significativi non sempre quelli con ampiezza di vibrazione massima
- **Direzione di Misura**
La direzione di misura viene scelta in funzione degli obiettivi (Verticale – Orizzontale - Assiale)
- **Velocità di Rotazione**
Le misure possono essere confrontabili se sono eseguite alla stessa velocità di rotazione
- **Condizioni Generali della Macchina**
E' importante procedere al monitoraggio in condizioni operative di servizio
- **Vibrazioni Estranee**
Possono essere indotte dall'ambiente esterno mediante trasmissione dal basamento o dalle fondazioni



Avvertenze

- Condizioni Variabili di Servizio
 - Analizzare le vibrazioni durante le fasi di avviamento e rallentamento macchina ad a velocità variabile (run-up e/o coast-down)
- Macchine con Parti Rotanti a Diverse Velocità
 - Misurare o calcolare le velocità di rotazione per individuare quella critica
 - Se possibile provare separatamente le varie parti rotanti



Misura dell'Intensità di Vibrazione

- L'uso di misure in accelerazione, velocità o spostamento dipende dagli obiettivi d'indagine e dalle caratteristiche della macchina
- Accelerazione, Velocità e Spostamento sono legati, al variare della frequenza (f), da una semplice relazione
 - Spostamento = Velocità / $2\pi f$
 - Velocità = Accelerazione / $2\pi f$



Norme di Giudizio

- Le macchine rotanti vengono suddivise in varie categorie (vedi ISO 2372)
- In funzione delle frequenze caratteristiche si utilizzano tipicamente ranges di ammissibilità in spostamento (basse frequenze), velocità (medie) ed accelerazione (alte)
- Il confronto con curve limite determina lo stato di funzionamento della macchina (ottimo, buono, ammissibile, tollerabile, ...)
- E' comunque buona norma procedere all'analisi di funzionamento di un sistema così da ricavare criteri di tipo sperimentale

Vibration Severity	Velocity Range Limits and Machinery Classes ISO Std. 2372-1974			
	Small Machines	Medium Machines	Large Machines	
	Class I	Class II	Rigid Supports Class III	Flexible Supports Class IV
in/s RMS				
0.011	good	good		
0.018			good	good
0.028				
0.044	satisfactory			
0.071		satisfactory		
0.110	unsatisfactory		satisfactory	
0.177		unsatisfactory		satisfactory
0.28			unsatisfactory	
0.44				unsatisfactory
0.71				
1.10	unacceptable	unacceptable	unacceptable	unacceptable
1.77				
2.79				

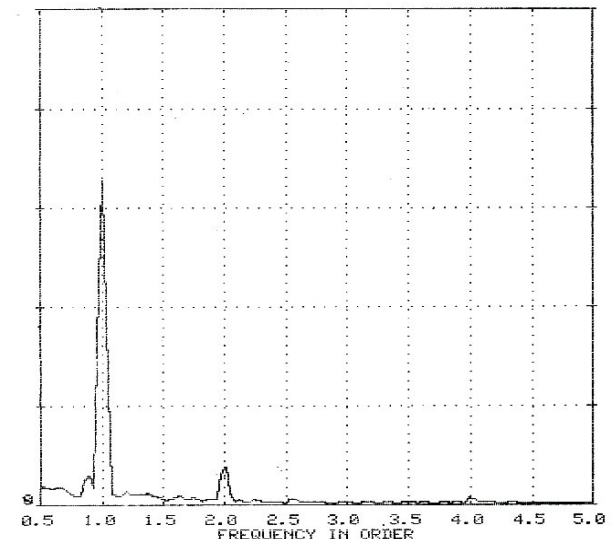
Criteri di Diagnosi Guasti

- Squilibrio di Corpi Rotanti
- Cuscinetti a Rotolamenti
- Cinghie di Trasmissione
- Ingranaggi
- Disallineamenti
- Macchine Elettriche
- Giranti con Pale



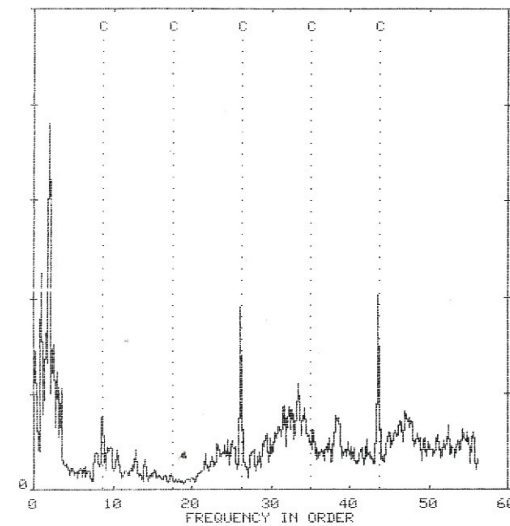
Squilibrio di Corpi Rotanti

- La vibrazione dominante ha frequenza uguale a quella di rotazione, è costante in ampiezza e fase e cresce linearmente con la velocità
- Un rotante è squilibrato quando la disposizione delle masse è tale che l'asse di rotazione non coincide con uno dei suoi assi principali di inerzia



Cuscinetti a Rotolamento

- Difetti di piste, sfere o rulli danno origine a differenti fenomeni vibratori
 - vibrazioni a frequenze armoniche di una o più frequenze caratteristiche del cuscinetto
 - vibrazioni impulsive ad intervalli regolari di tempo indicano la presenza di urti con spettro di accelerazione a larga banda



Frequenze Caratteristiche Cuscinetti

- F_{ord} = Freq Difetto Pista Esterna = $n/2 * F * (1 - B_d/P_d * \cos\varphi)$
- F_{ird} = Freq Difetto Pista Interna = $n/2 * F * (1 + B_d/P_d * \cos\varphi)$
- F_{bd} = Freq Difetto Sfere = $n/2 * F * (1 - (B_d/P_d * \cos\varphi)^2)$
- F_c = Freq Difetto Gabbia = $1/2 * F * (1 - B_d/P_d * \cos\varphi)$

dove :

- n = Numero di sfere
 B_d = Diametro Sfera
 P_d = Diametro Primitivo Cuscinetto (Pitch)
 φ = Angolo di Contatto



Cinghie di Trasmissione

- Giunte, irregolarità di superficie o tagli danno origine a vibrazioni tipicamente nella direzione di tensione della cinghia ad una frequenza o armoniche di essa pari alla frequenza di cinghia

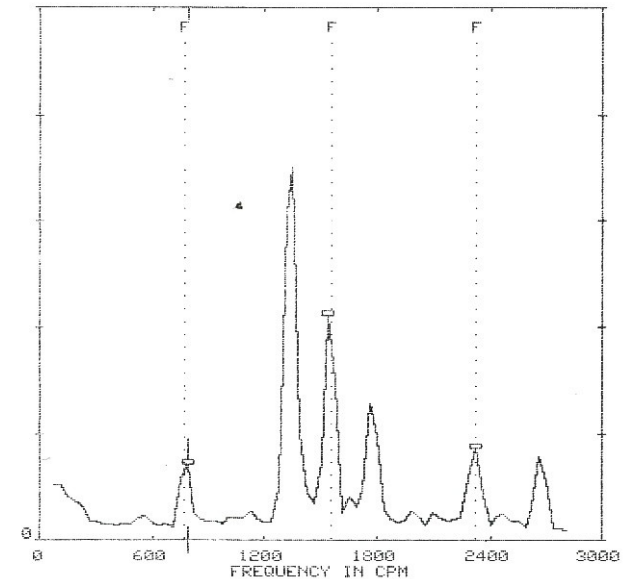
- $F_{\text{cinghia}} = \pi * d * n / l$

dove

d = diametro puleggia

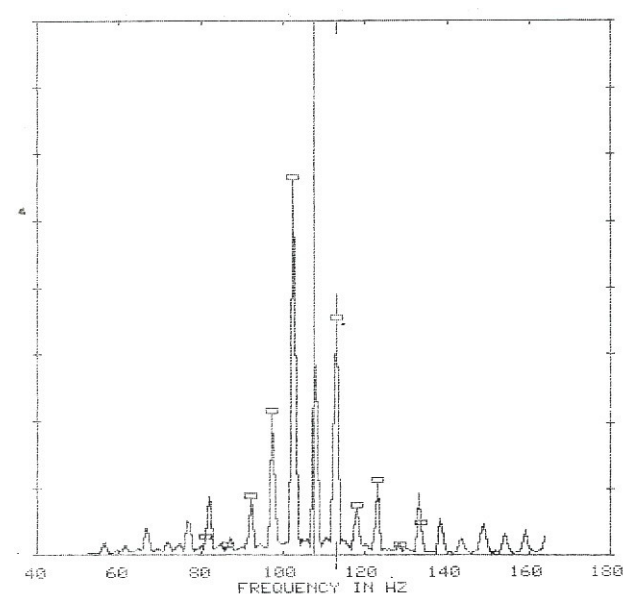
n = velocità di rotazione

l = lunghezza cinghia



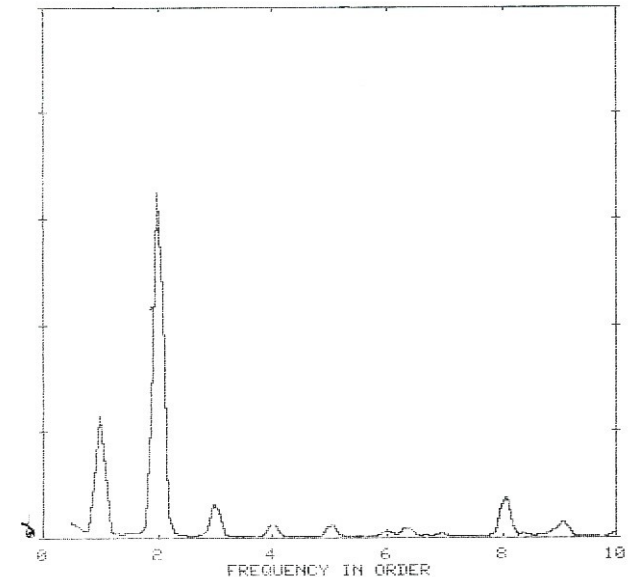
Ingranaggi

- Le vibrazioni su ingranaggi sono dovute a fenomeni complessi e tipicamente possono essere dovute ad usura denti, interferenze, lubrificazione
- Lo spettro è molto complesso e sono presenti frequenze armoniche della frequenza di ingranamento e frequenze laterali dovute a fenomeni di modulazione



Disallineamenti

- Qualora il livello di vibrazione in direzione assiale è paragonabile a quello in direzione trasversale è possibile la presenza di disallineamenti fra alberi di trasmissione
- In generale la vibrazione assiale presenta picchi significativi ad una frequenza pari al secondo ordine



Macchine Elettriche

- Vibrazioni per Origine Meccanica
 - Squilibrio del Rotante
- Vibrazioni per Origini Elettriche (variazioni delle forze magnetiche tra rotore e statore)
 - Eccentricità Rotore e Superficie Interna Statore
 - Centraggio Rotore
 - Avvolgimenti in Corto Circuito



Macchine Elettriche

- F_r = Frequenza di Rotazione
 P = Numero Poli
 F_l = Frequenza di Rete
- F_s = Frequenza Magnetica Sincrona = $2 * F_l / P$
- S = Scorrimento = $1 - F_r / F_s$



Giranti Con Pale

- Le vibrazioni possono essere dovute ad impatti con il fluido ($Fr \cdot n$) oppure a squilibrio del rotante (Fr)
- Nel caso di fenomeni di cavitazione e turbolenze si possono osservare fenomeni a largo spettro ad alta frequenza
- Tipicamente sono anche presenti frequenze laterali dovute a fenomeni di modulazione



Per Informazioni

WINTEK sas

Via Val Seriana, 3 – 20052 Monza MI

Tel 039.740106 – Fax 039.740156

www.wintek-it.com - info@wintek-it.com



ni.com

