

meccanica delle vibrazioni

laurea magistrale
ingegneria meccanica

parte 6.1
Manutenzione e Diagnosi

L'attività sperimentale è importante, i dati sono il tesoro di ogni azienda!

Raccoglierli ed analizzarli correttamente consente di..

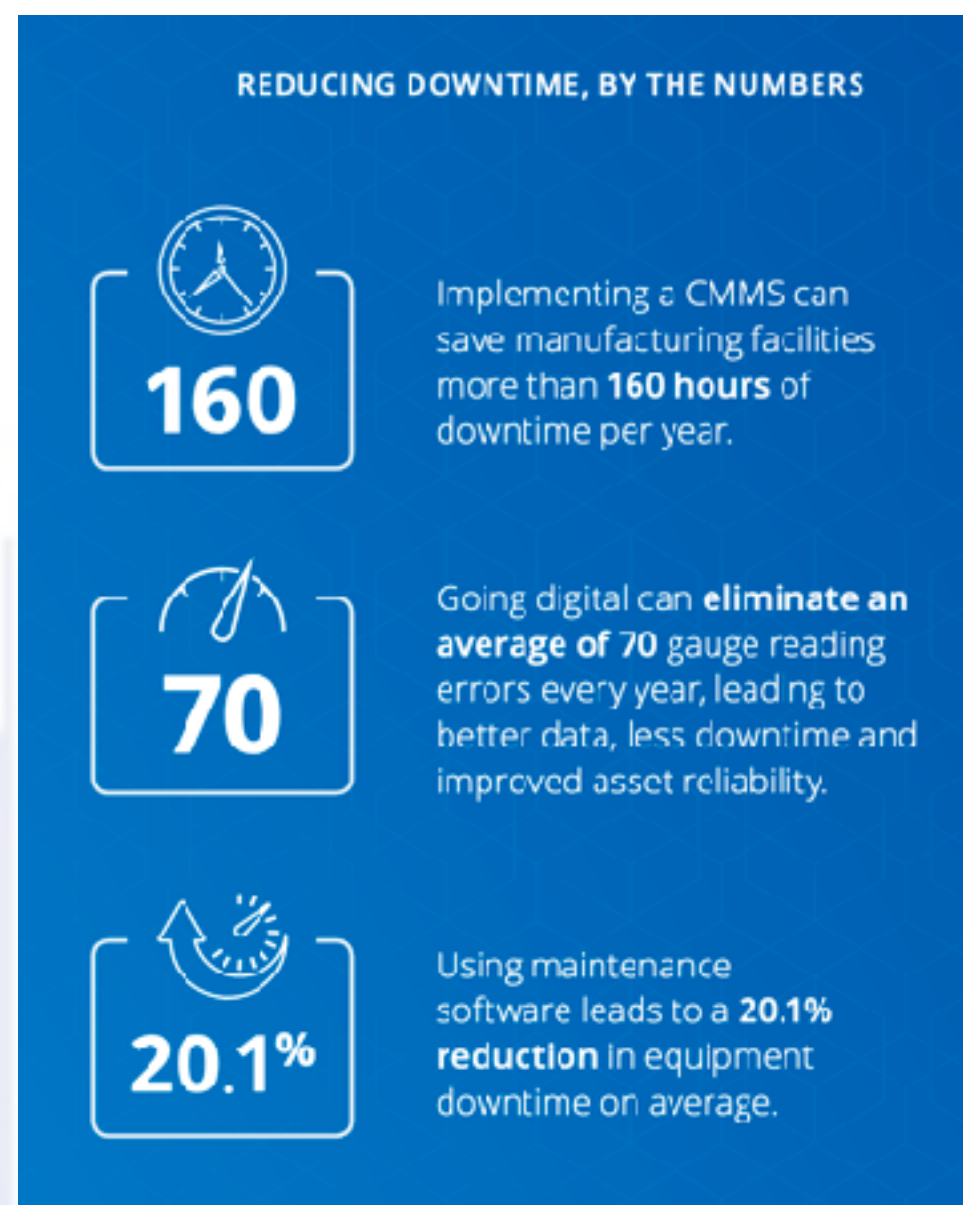
..risparmiare denaro,



uptime
manutenzione

..

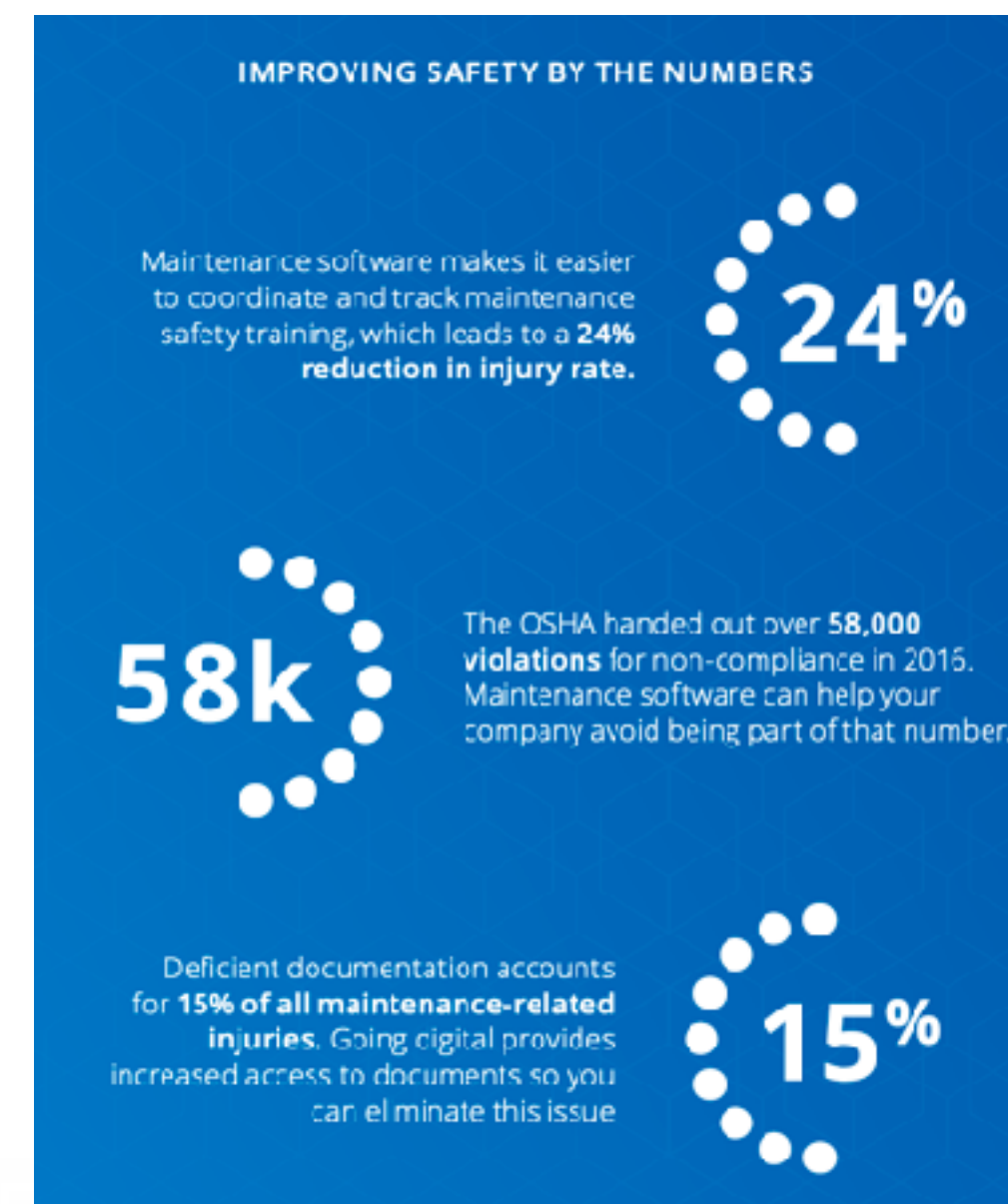
..risparmiare risorse



magazzino ricambi
energia

..

..aumentare sicurezza



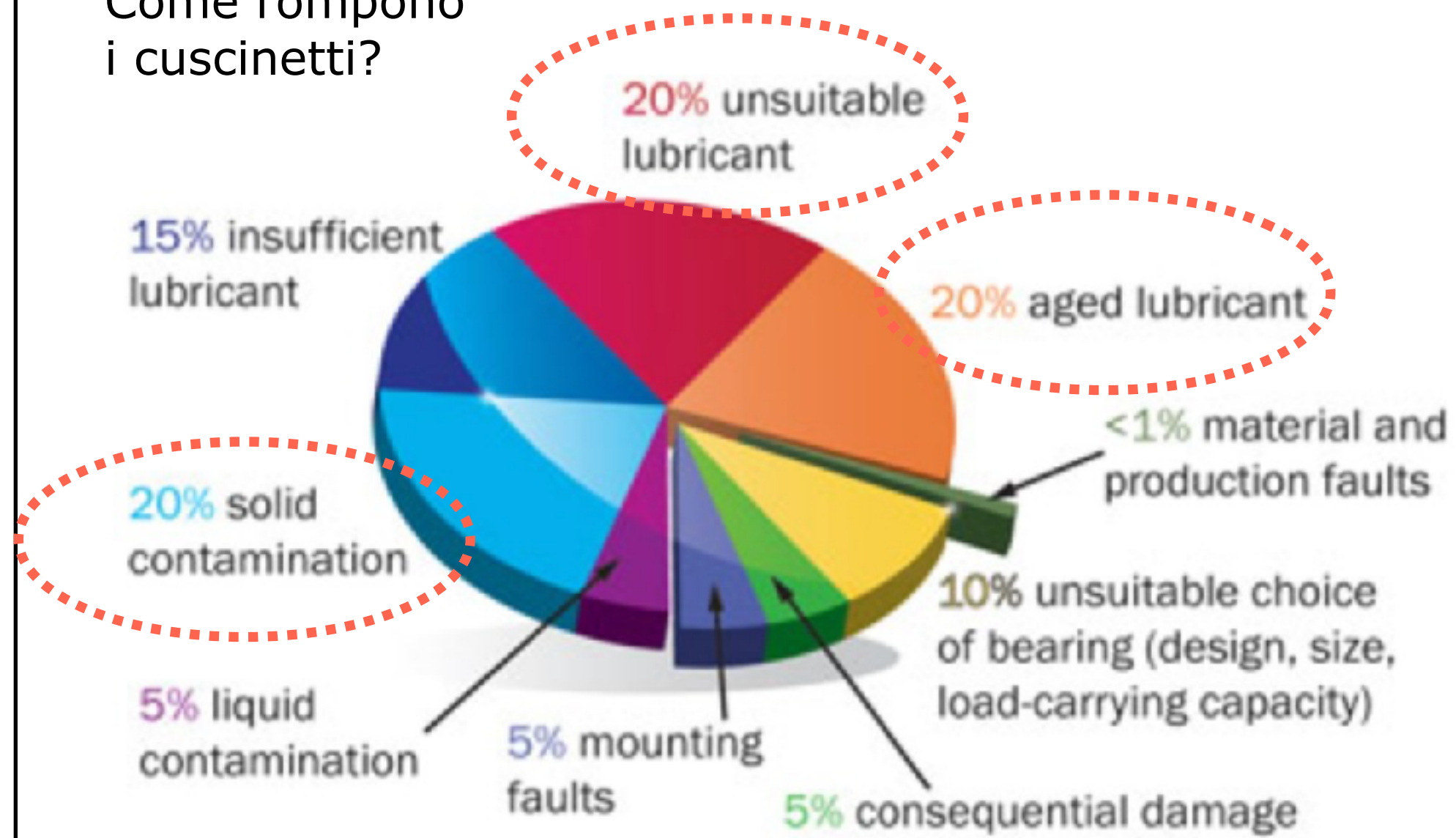
personale
macchinario

..

..e recuperare finanziamenti (es programmi Industria 4.0, Industria 5.0)

Sapere che..

Come rompono i cuscinetti?



investo sulla lubrificazione?!?

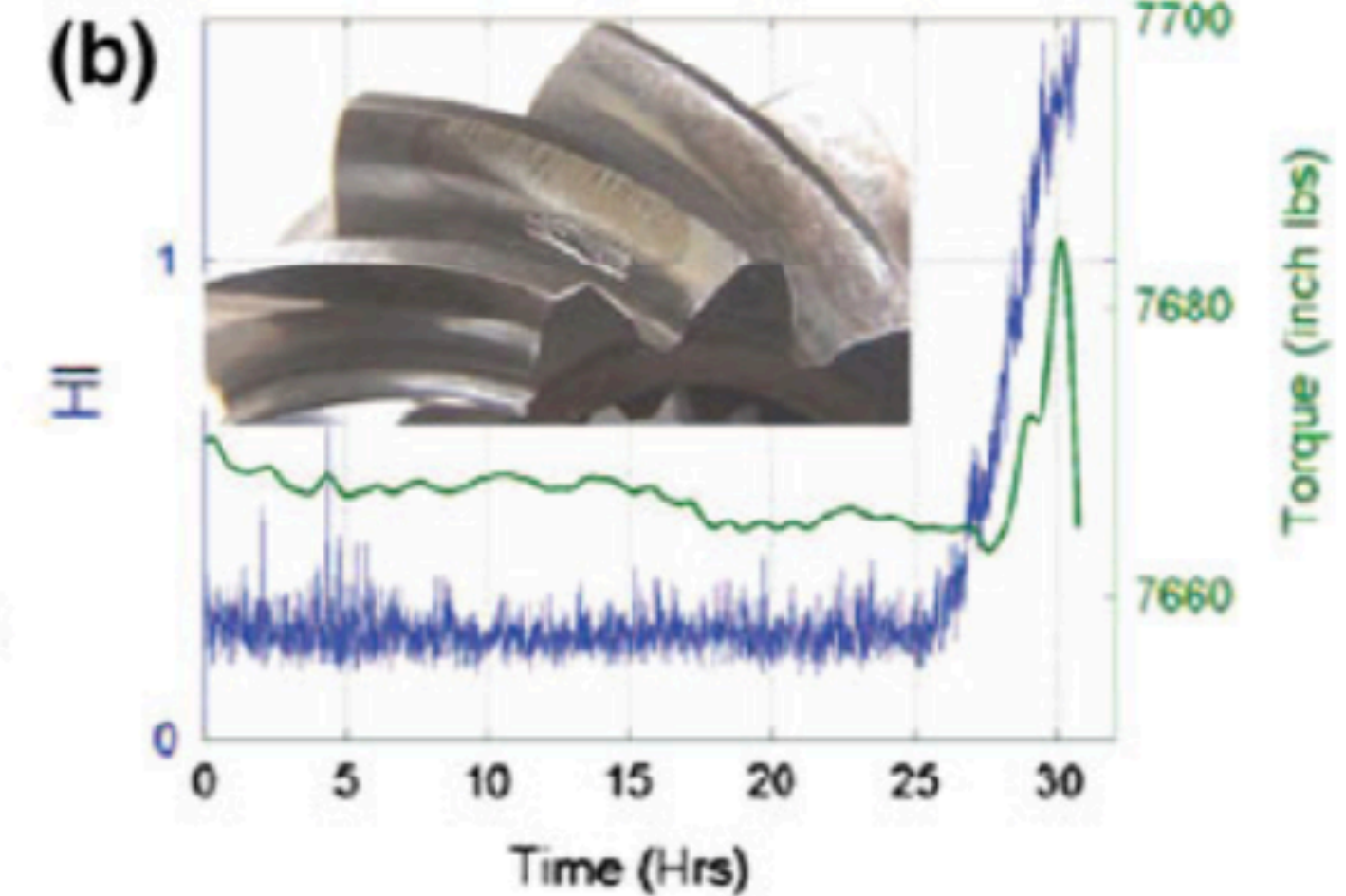
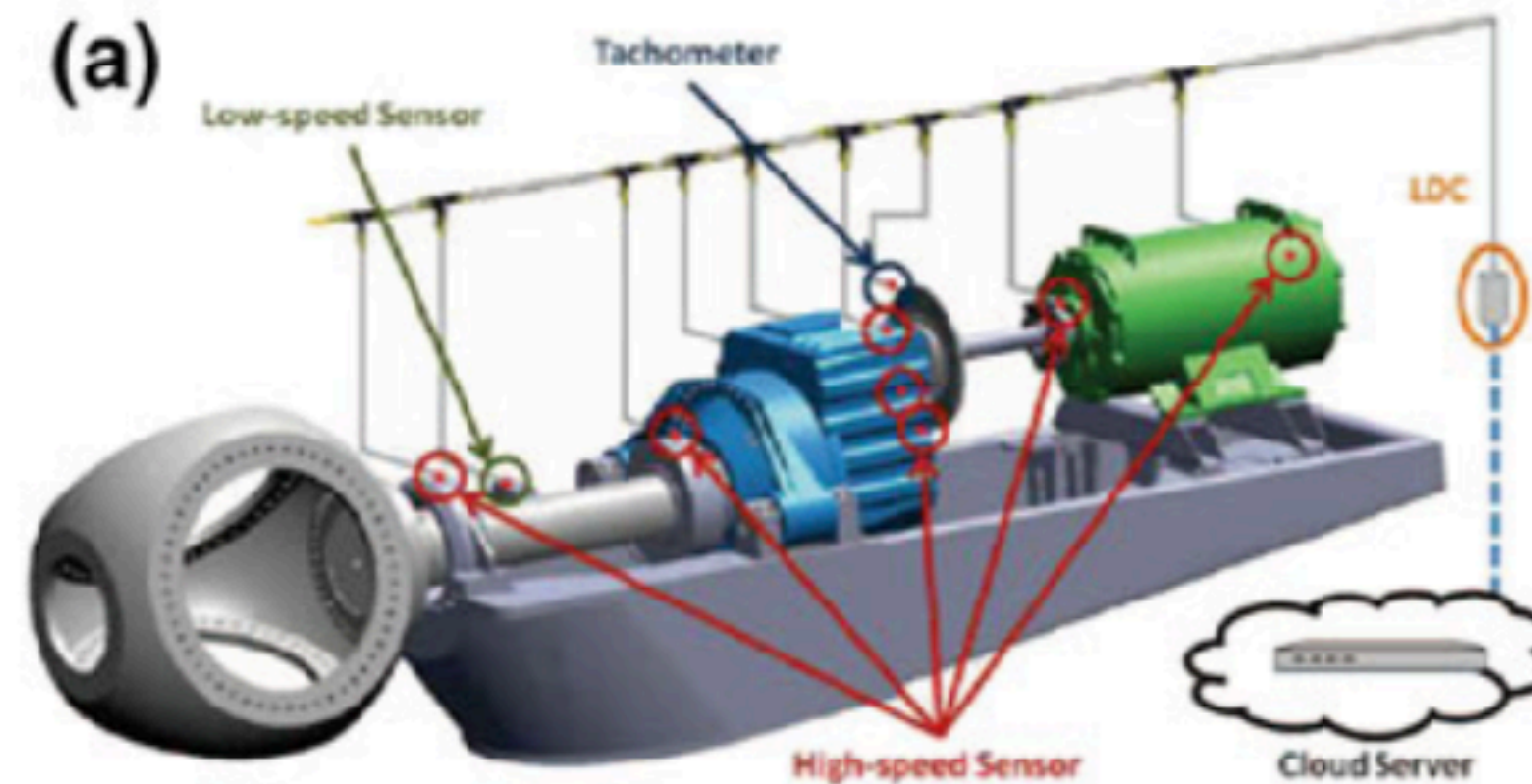
investo sulla cementazione?!?

Come cambiano le incidenti senza / con la manutenzione?

	Per 100,000 Flying Hours		Per 100,000 Sectors (Flight Stages)		
	Occupant Fatal Accident Rate	Non-Fatal Reportable Accident Rate	Occupant Fatal Accident Rate	Non-Fatal Reportable Accident Rate	
1981-1990 years	5.61	2.24	2.39	0.96	senza
1991-2000 years	1.13	0.82	0.49	0.35	con

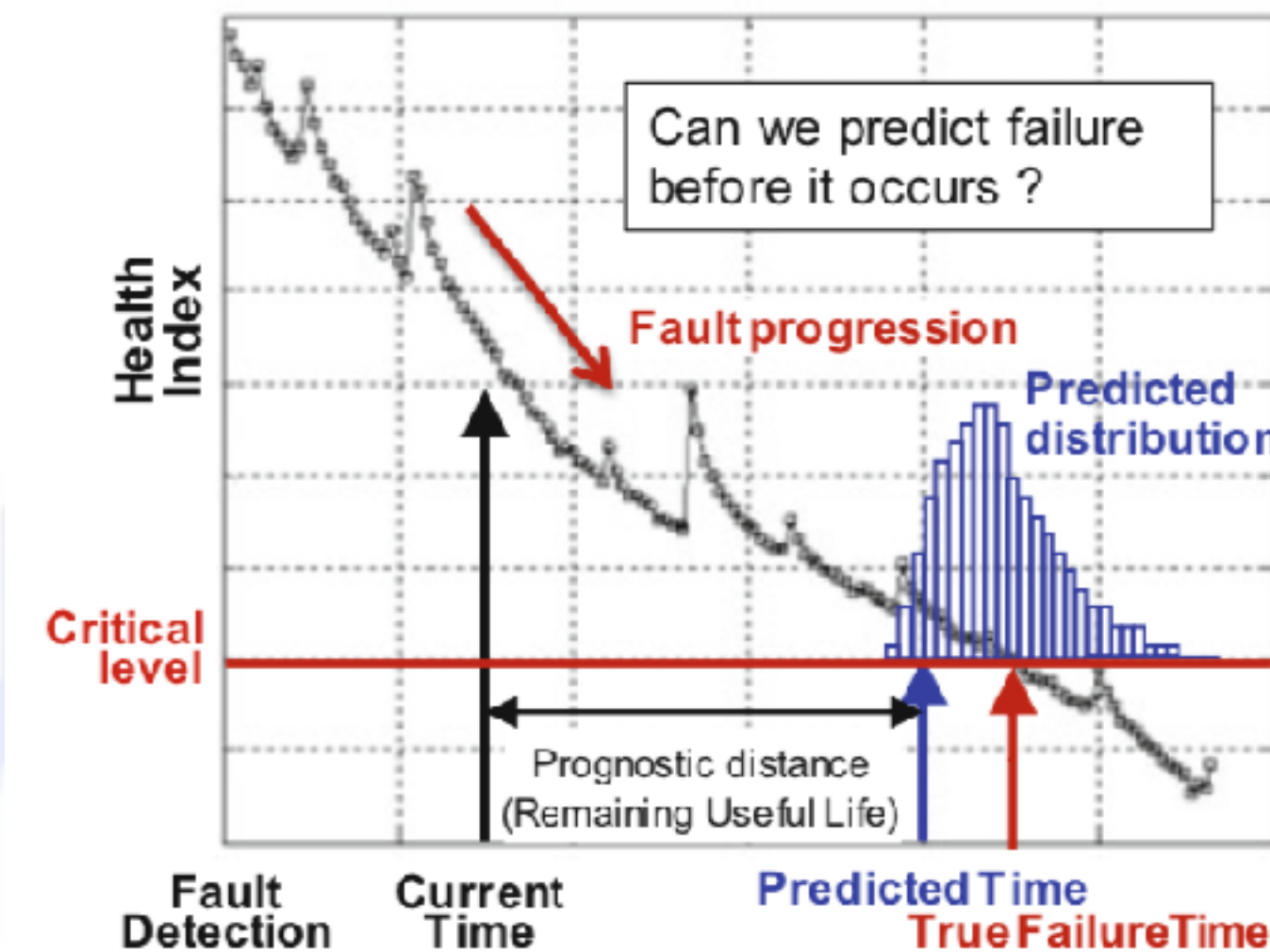
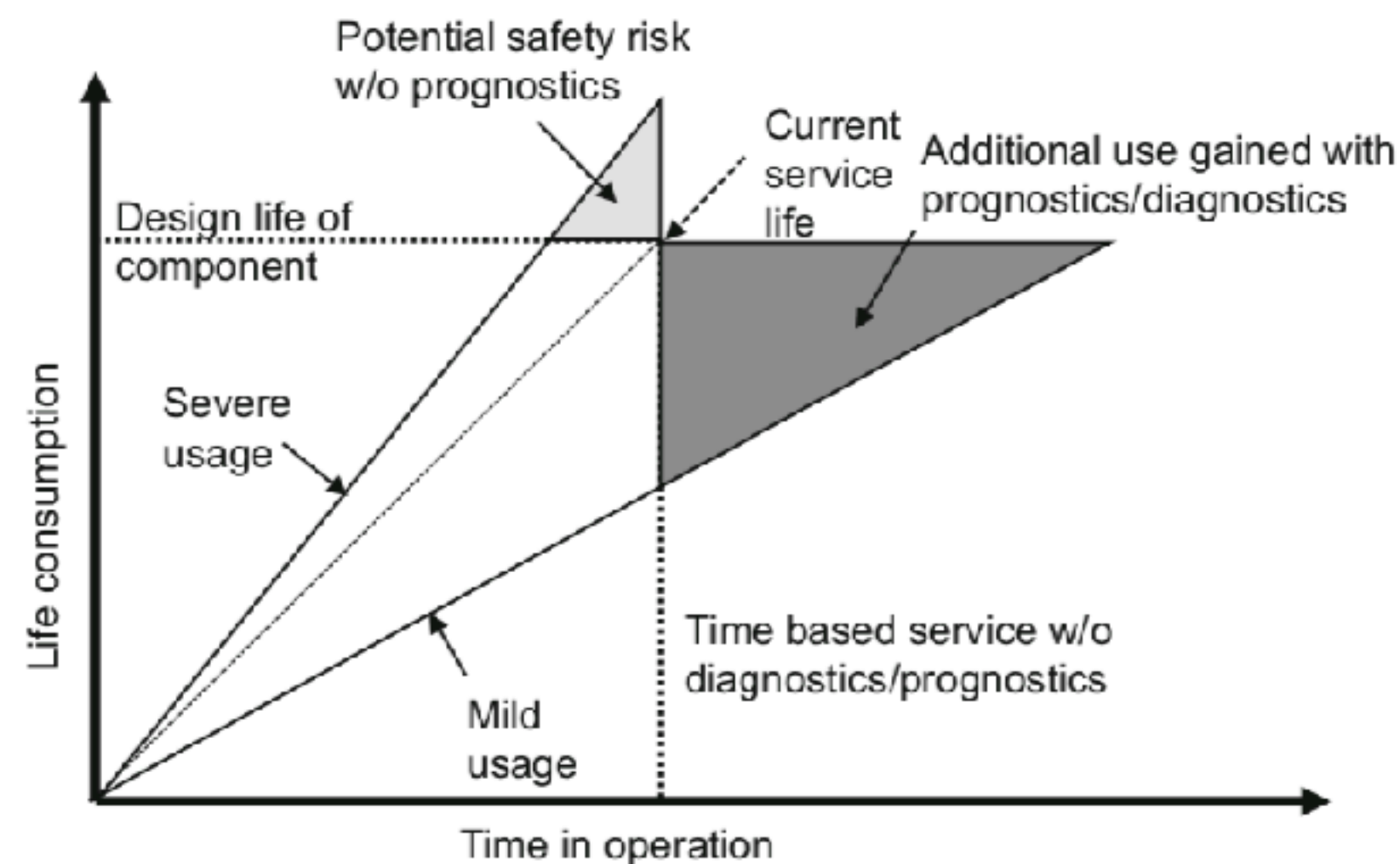
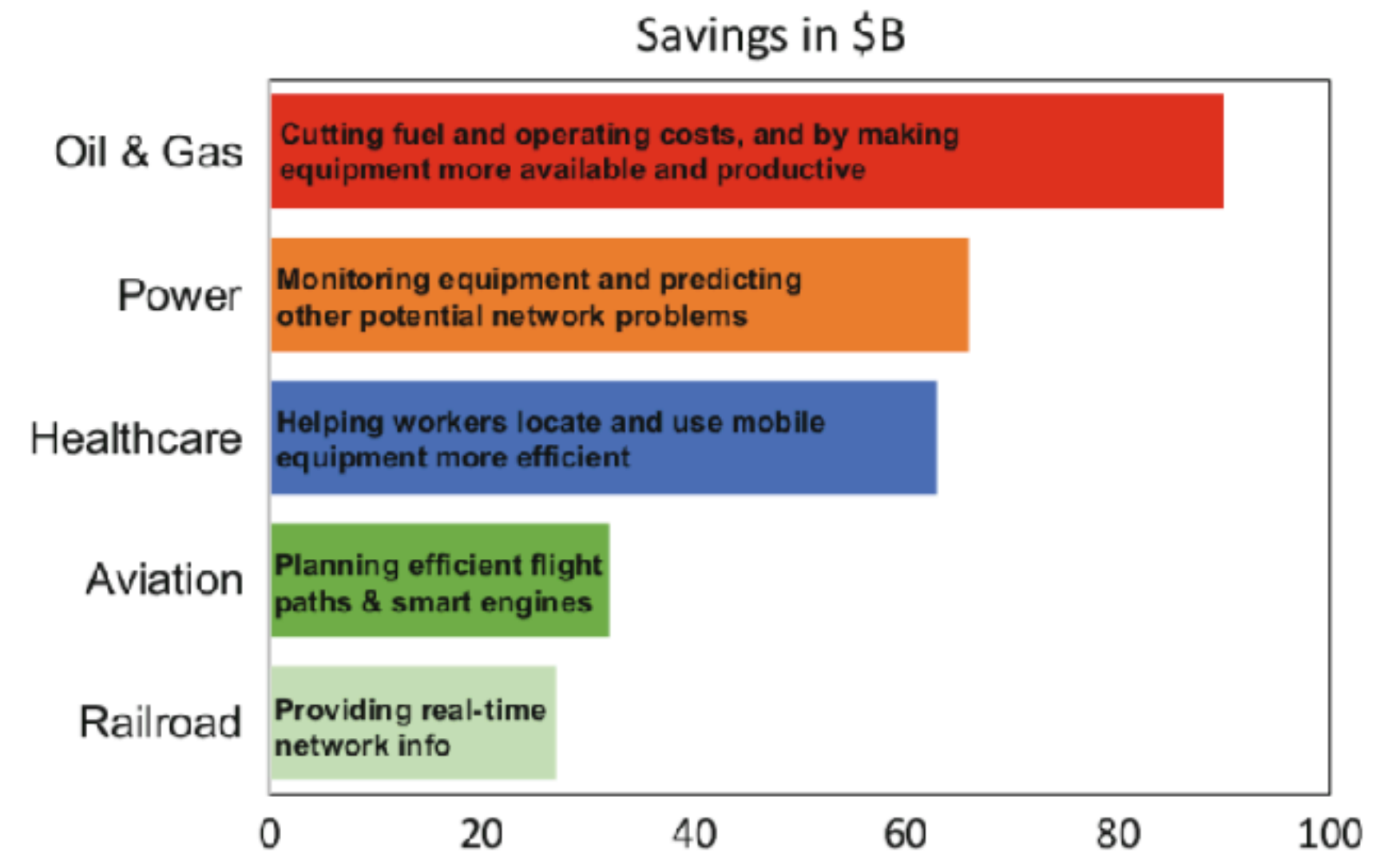
investo sulla CMMS?!?

Come cambiano le vibrazioni con il tempo?

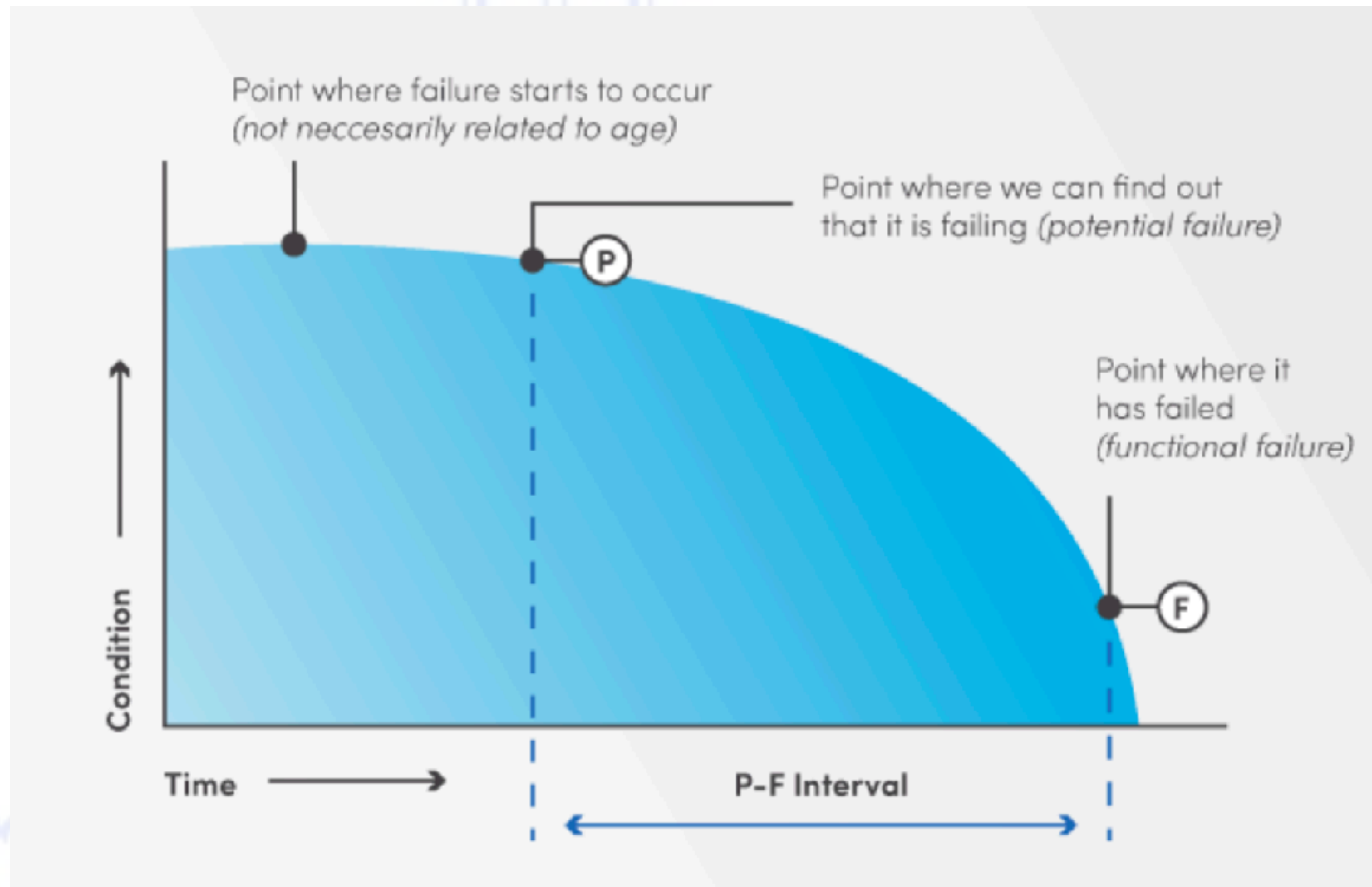


Di fatto con i dati raccolti in impianto è possibile operare per :

- riduzione dei costi operativi
- aumento dei profitti
- miglioramento del design delle macchine
- aumento dell'affidabilità
- miglioramento della logistica di supporto
- miglioramento dei processi di qualità
- miglioramento dell'integrazione dei prodotti OEM
- miglioramento della sicurezza
- miglioramento nella selezione di sensori e loro posizionamento
- miglioramento dell'accuratezza delle previsioni dei modelli numerici
- ...



Nel caso della **gestione** delle macchine, (al fine di massimizzarne l'utilizzo)
è fondamentale il concetto di condizione ..
ovvero la capacità di una macchina o di un suo singolo componente
a garantire le performance per le quali sono state progettate e costruite!



La condizione inevitabilmente si deteriora nel tempo.

Stimare periodicamente la **condizione** della macchina e conoscerne lo **sviluppo** del degrado, permettono di prevederne la vita utile residua del componente/macchina

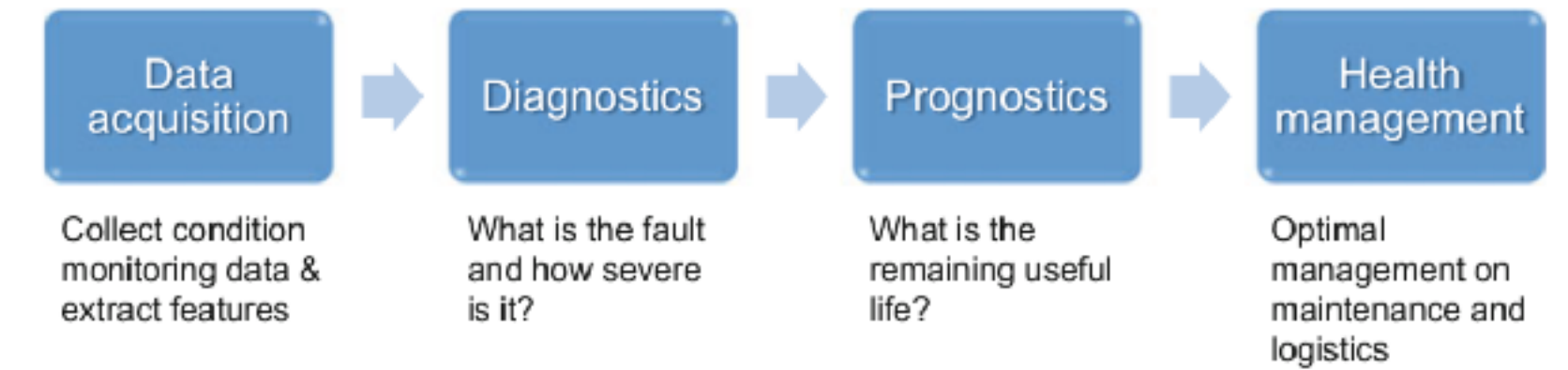
La **manutenzione** delle macchine deve gestire entrambi gli aspetti!
misurare la condizione
stimarne lo sviluppo

gestione > manutenzione

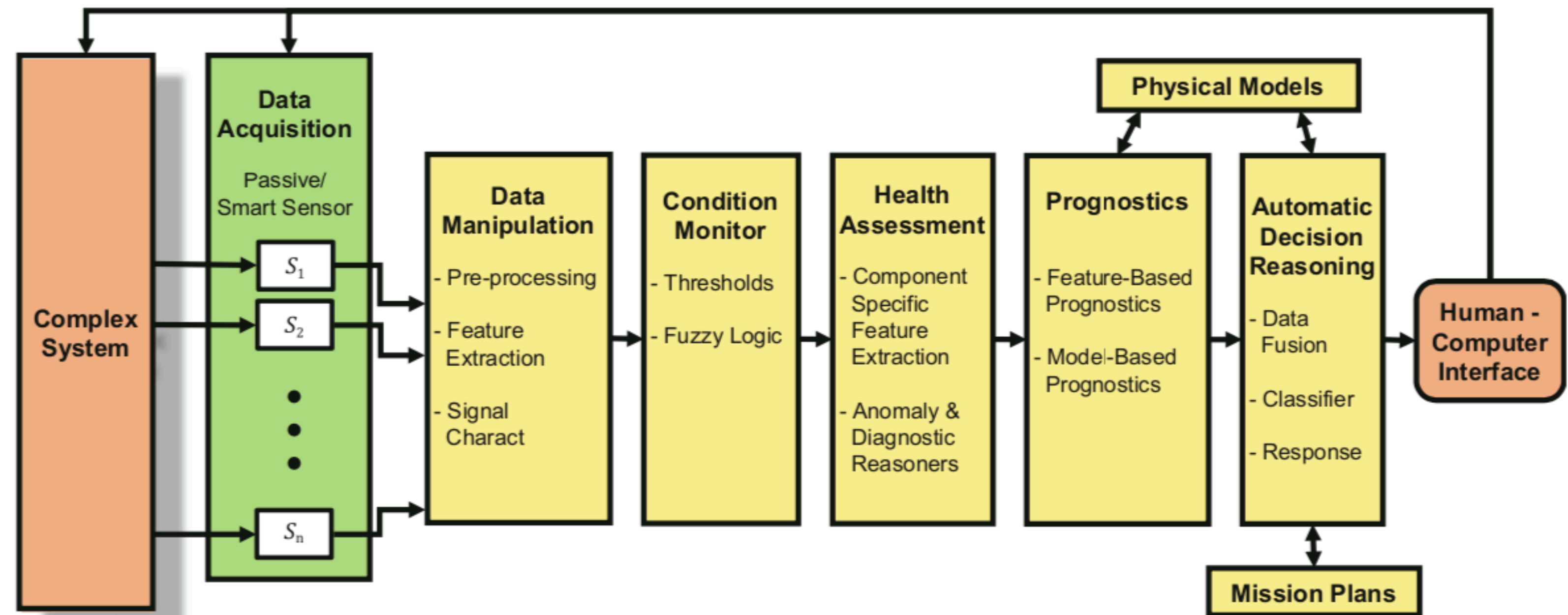
Negli anni la manutenzione si è sviluppata grandemente grazie alle migliorie nelle tecniche di misura ed analisi dei dati che consentono di

- **Diagnosticare** il danno (capire cosa si sta rompendo) e qualora sia disponibile un modello di danneggiamento
- **Prognosticare** la vita utile residua (capire quanto durerà)

L'insieme di queste attività, al giorno d'oggi, va sotto il nome di **Gestione della salute del macchinario**.



La "misura" e la "modellazione" diventano imprescindibili!



ITHACA - Information Technology for Health Assessment and Customized Analysis

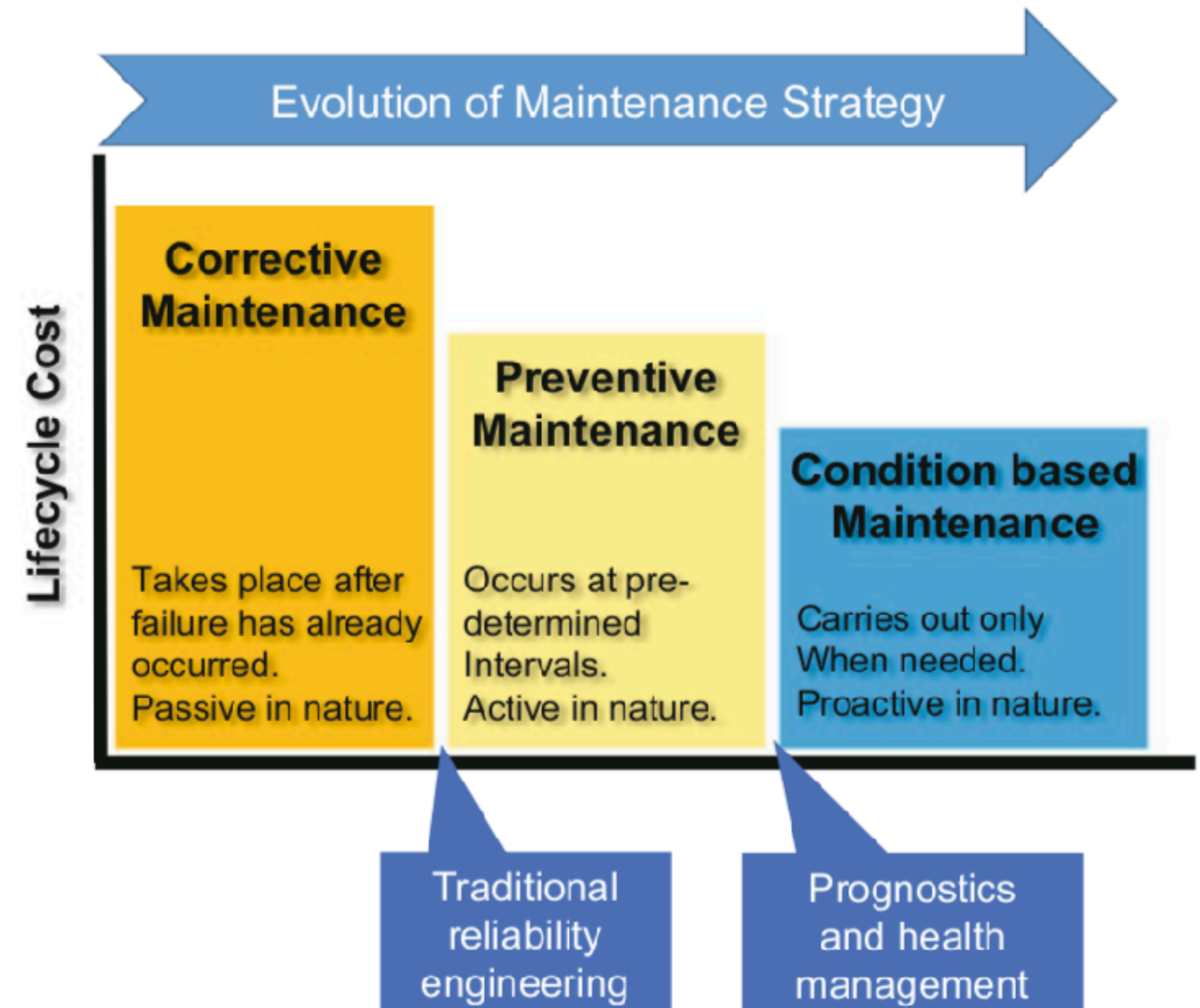
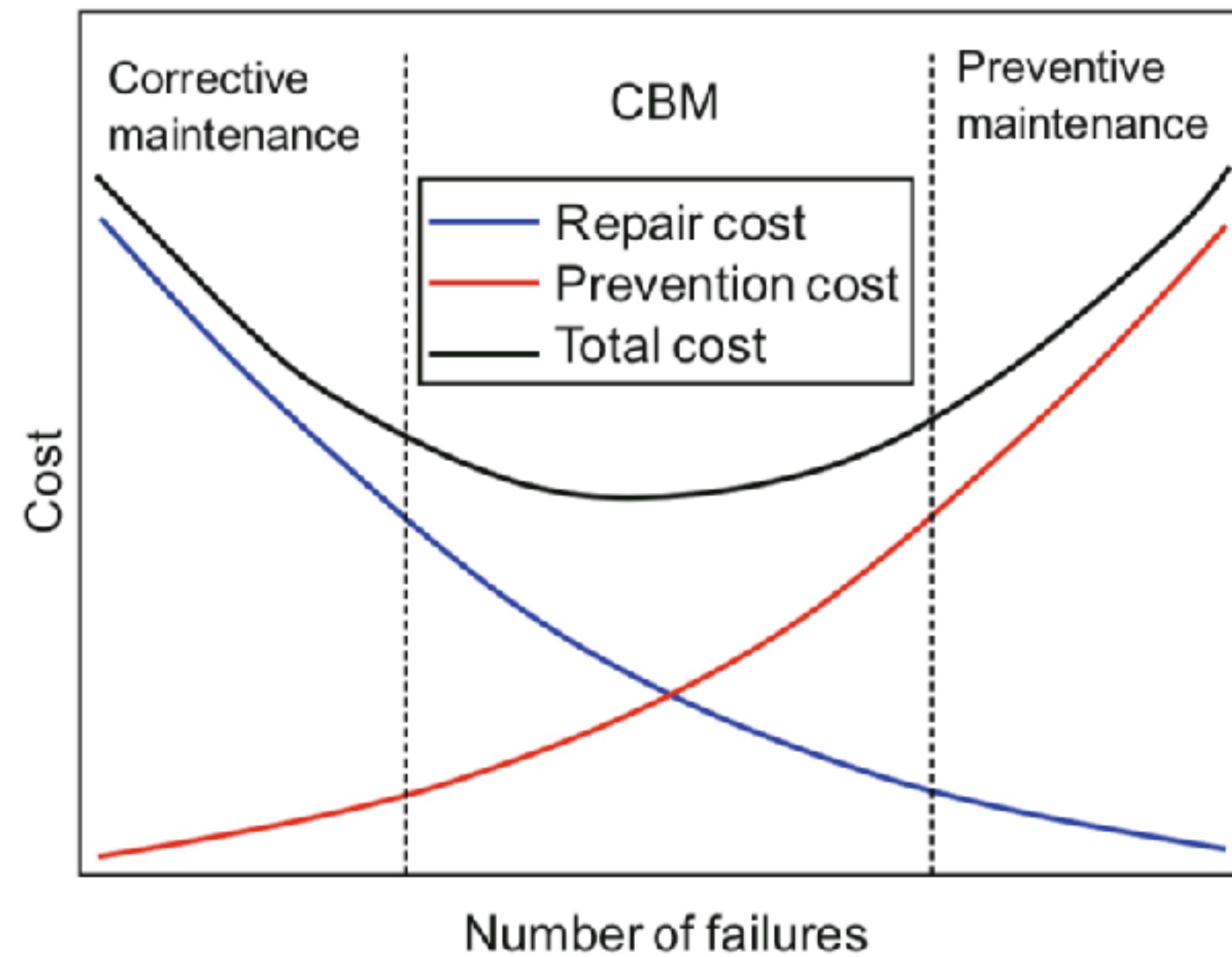
Gli approcci manutentivi si possono raggruppare in tre grandi categorie:

quelli **Correttivi** che attendono l'accadimento del guasto,

quelli **Preventivi** che prevedono l'accadimento del guasto

quelli **Condizionali** che intervengono solo in funzione della condizione della macchina

La scelta tra questi approcci, dipende dalla conoscenza della macchina, dal costo dei ricambi e delle attività di manutenzione, dalle problematiche relative alla mancata produzione, dalla sicurezza per l'impianto ed il personale..



Esplicitiamo gli approcci:

run to failure si aspetta che la parte si rompa prima di intervenire (riparazione o sostituzione)
non ci sono costi di monitoraggio, ma bisogna avere pezzi di ricambio ed essere rapide nella sostituzione per non perdere troppa produzione

Vantaggi:

- nessuna pianificazione
- facile da comprendere e implementare

Svantaggi:

- imprevedibile
- inconsistente
- costosa*
- magazzino ricambi

Trigger:

- rottura della parte

Esempio:

sostituzione lampadina



run to failure ha senso nel caso in cui il costo totale della riparazione costa meno del costo di altri tipi di manutenzione, quando c'è ridondanza di macchinario ed il costo della mancata produzione è stimabile e noto

* dalle 3 alle 9 volte la manutenzione programmata

preventive maintenance si effettua a scadenze periodiche, anche se le parti sono ancora funzionanti per minimizzare la probabilità che qualcosa si danneggi

Vantaggi:

- si può pianificare l'intervento
(in termini di produzione..faccio nelle pause stagionali
in termini di parti di ricambio.. ordino tutto prima
in termini di tempo.. parto quando ho tutto disponibile)
- facile da comprendere e implementare
- non necessita di sistemi di monitoraggio

Svantaggi:

- richiede pianificazione
(investimento, tempo, risorse)
- la frequenza di intervento può essere troppo elevata
(sostituisco parti perfettamente utilizzabili)
- se si hanno tanti assets, farlo senza un CMMS diventa impegnativo
(Computerized Maintenance Management Software)

Trigger:

- tempo
(come giornate, o come ore di funzionamento)

Esempio:

manutenzione periodica autovettura



preventive maintenance ha senso per le macchine critiche nel processo, quanto le rotture aumentano con il tempo o con l'utilizzo

predictive maintenance si effettua utilizzando le informazioni fornite da sistemi di monitoraggio sulle "performance", e sulla salute del macchinario

Vantaggi:

- evita sorprese (manutenzione a rottura)
- evita costi (manutenzione periodica)
- consente di conoscere il funzionamento della macchina (migliorare design, migliorare prodotto, migliorare processo)
- minimizzare interventi (downtime)
- minimizzare ricambi (magazzino, immobilizzazione capitale..)
- massimizzare ROI*

Svantaggi:

- richiede sistema di monitoraggio (investimento, tempo, risorse)
- richiede expertise specifico

Trigger:

- indicatori dedicati di performance e danno

Esempio:
manutenzione riduttori



predictive maintenance ha senso per le macchine critiche nel processo, quando le rotture possono essere previste, con affidabilità e costi "contenuti"

*10x ROI, 25-30% riduzione costo manutenzione 70-75% riduzione rotture, 35-45% riduzione fermate

proactive maintenance si effettua utilizzando le informazioni fornite da sistemi di monitoraggio sulle "performance", e sulla salute del macchinario e dei modelli numerici per prevedere come si comporterà il sistema in futuro.

Vantaggi:

- evita sorprese (manutenzione a rottura)
- evita costi (manutenzione periodica)
- consente di conoscere il funzionamento della macchina (migliorare design, migliorare prodotto, migliorare processo)
- minimizzare interventi (downtime)
- minimizzare ricambi (magazzino, immobilizzazione capitale..)
- massimizzare ROI*
- prevede il "futuro".. **pianificazione di utilizzo del macchinario!!**

Svantaggi:

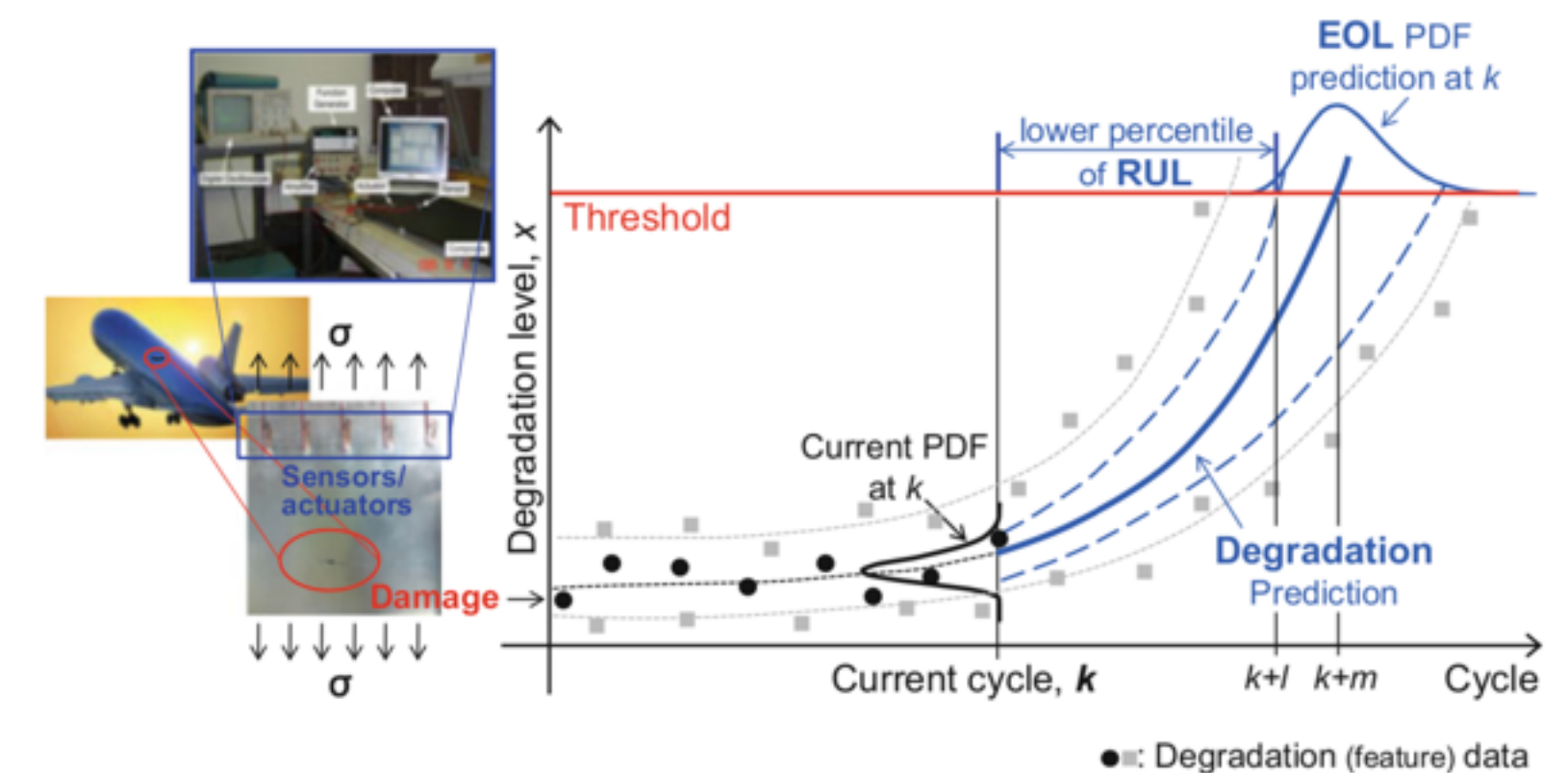
- richiede sistema di monitoraggio (investimento, tempo, risorse)
- richiede expertise specifico
- richiede la costruzione di modelli descrittivi

Trigger:

- indicatori dedicati di performance e danno

Esempio:

manutenzione componenti aeronautici



predicative maintenance ha senso per le macchine critiche nel processo, quando le rotture possono essere previste, con affidabilità e costi "contenuti"



run to failure

preventive maintenance

predictive maintenance

proactive maintenance

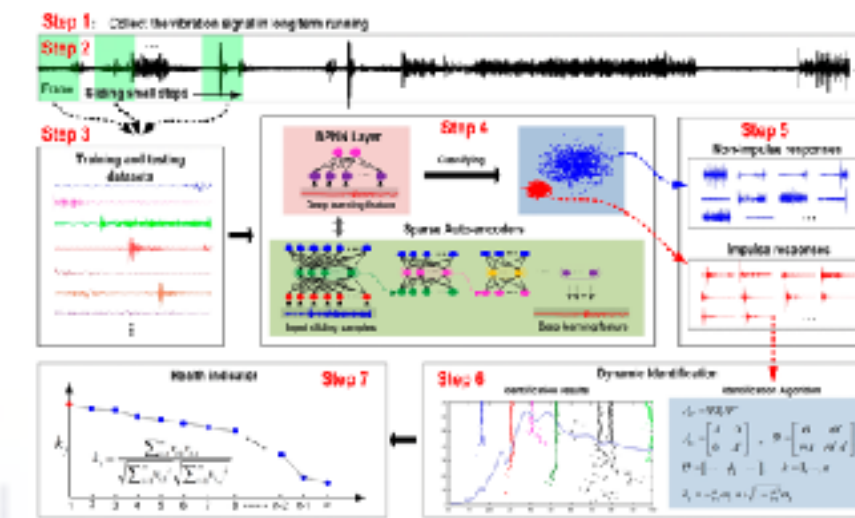
uptime

complessità

cmms

cmms*
monitoraggio

cmms*
monitoraggio
modelli



costo ricambi

costo magazzino

perdite produzione

L'implementazione di tecniche predittive procede per gradi.. migliorando all'aumentare dei dati raccolti e dello sviluppo e della validazione dei modelli numerici!

Non è un processo immediato!

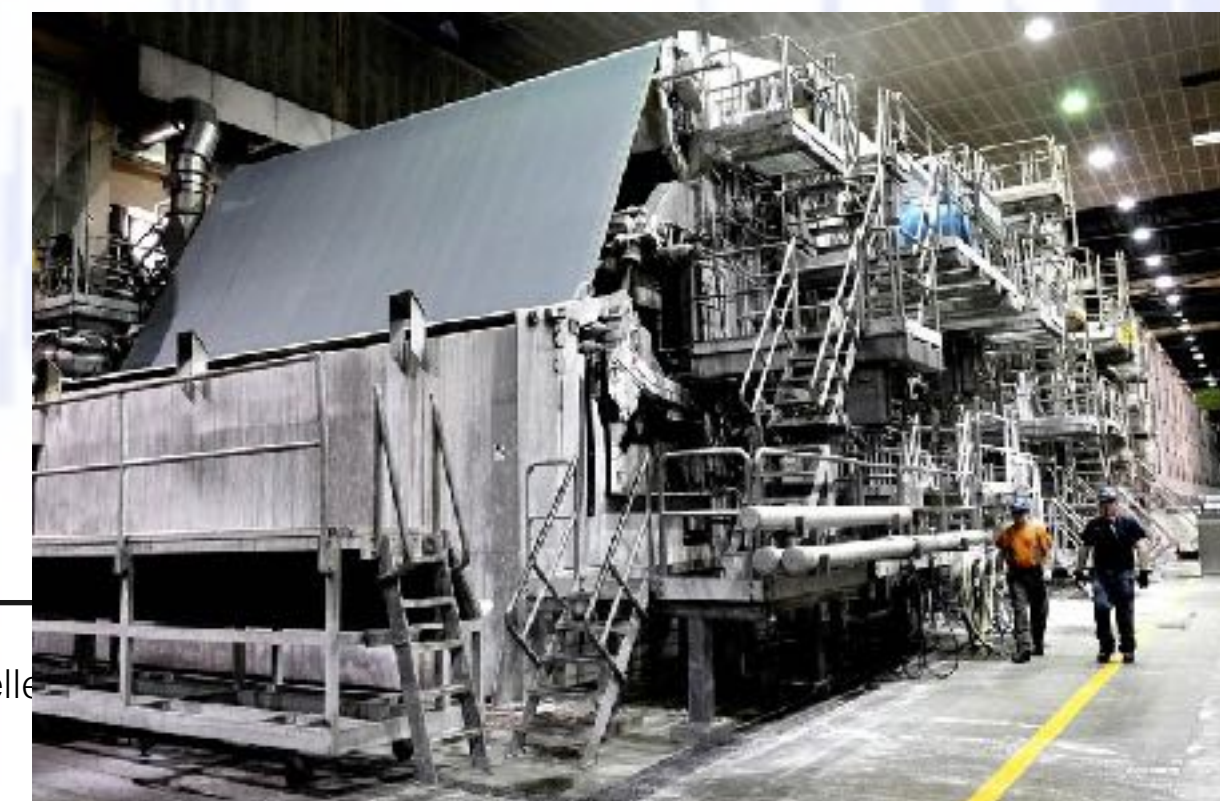
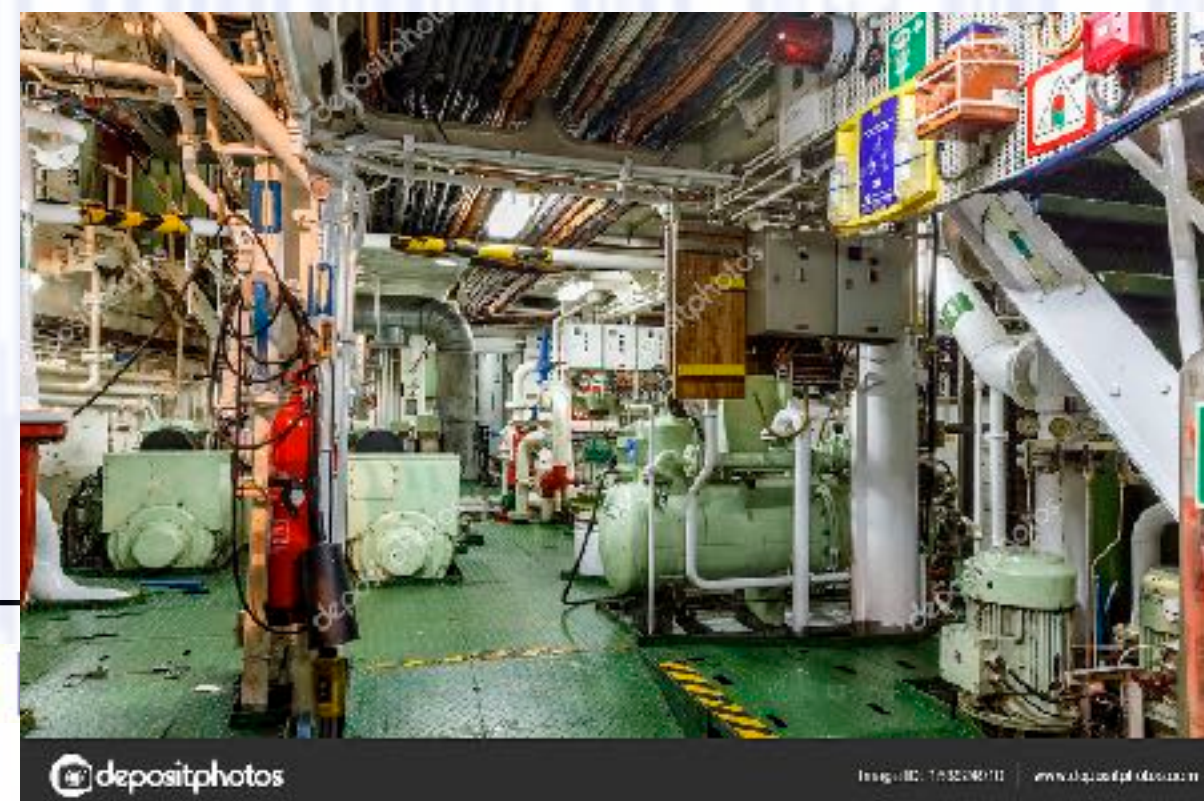
*computerized maintenance management system



Con il dato acquisito (nella miglior maniera possibile) si può tentare l'identificazione e la diagnosi del malfunzionamento/danno

“miglior maniera possibile” perché (soprattutto su macchine nuove) esiste un margine di incertezza (su come e dove fare le misure) (sul corretto posizionamento tra sensore e componente più debole, sul comportamento effettivo della macchina, sulla definizione dei trigger e parametri di acquisizione ed analisi sulle presenza di interferenze di processo, installazione...)

“tentare l'identificazione e la diagnosi del danno”, perché bisogna interpretare i risultati .. questo processo può essere estremamente chiaro e lineare, ma anche complesso e frustrante! (trending vs troubleshooting)



Da cosa si parte?

Solitamente si parte dalla conoscenza aziendale pregressa, (quali parti si rompono più facilmente / quale processo crea più problemi in impianto, difetti...) per individuare le zone di macchina da monitorare

Cosa si misura? Dove si misura?

Solitamente si parte da

- l'identificazione di un certo numero di indicatori (globali o locali, nel tempo, nella frequenza nell'ordine) collegati allo stato di salute della macchina o di un componente
- la definizione di un valore di soglia per detti indicatori, al di là del quale la macchina non performa più come previsto (attenzione o allarme)
- il confronto dell'indicatore nel tempo (con campionamento periodico dilazionato o continuo) rispetto al valore di soglia per questo definito

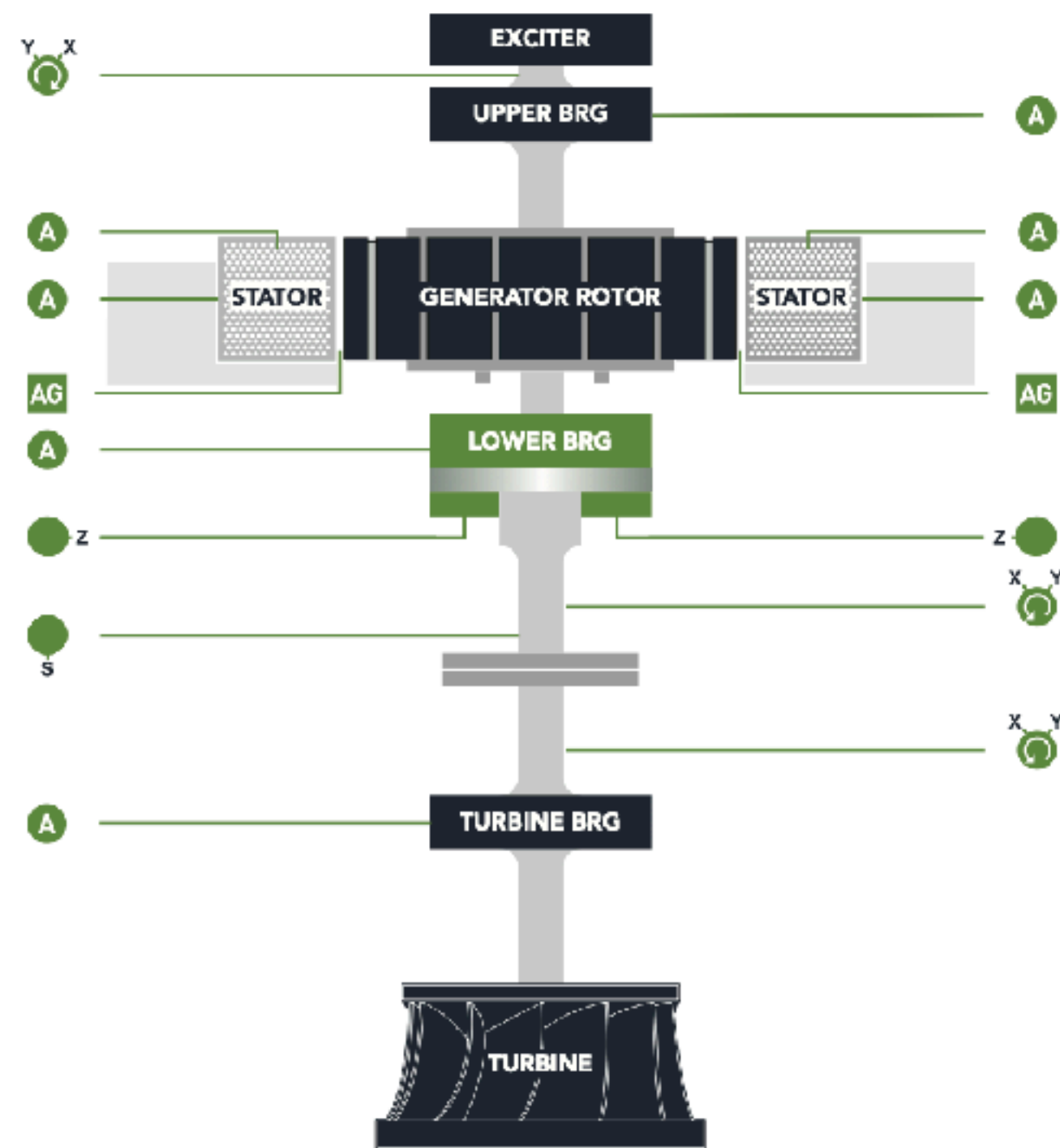
Come si scelgono i valori di soglia?

Il punto di partenza posso essere le norme dedicate!!

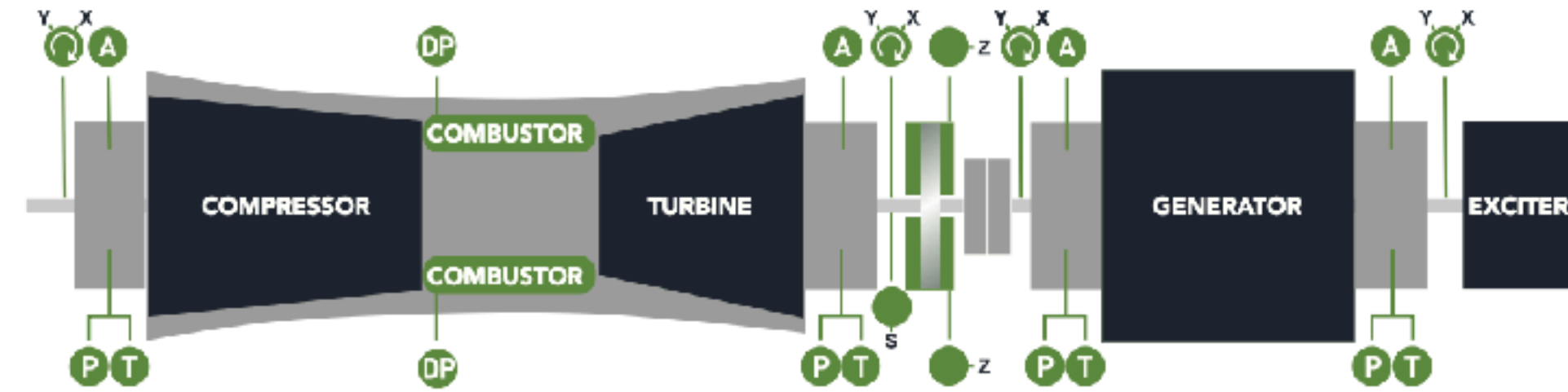
es la norma ISO 10816 Vibrazioni meccaniche - Valutazione delle vibrazioni delle macchine mediante misurazioni sulle parti non rotanti -

suggerisce dove misurare il valore RMS delle vibrazioni in una banda di frequenza definita, in base alla tipologia di macchina fornisce livelli di vibrazioni di buon funzionamento / d'attenzione / da evitare..

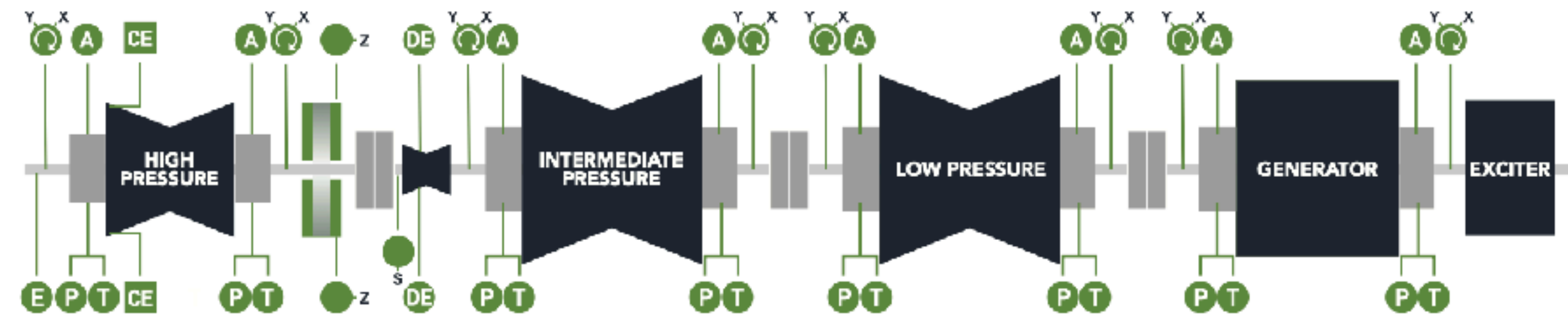
Hydro Turbine



Gas Turbine



Steam Turbine



AG Air gap
CE Case expansion
A Case (absolute) vibration

DP Dynamic pressure [combustor chamber]
E Eccentricity
P Lube oil pressure *

T Lube oil pressure temperature *
DE Rotor differential expansion
x, y Shaft relative vibration [x,y]

s Speed/phase reference
z Thrust/axial position
Thrust bearing

Da cosa si parte?

Ci sono filosofie/norme differenti di misura se si vuole procedere per proteggere la macchina o per effettuare manutenzione programmata basata su condizione..



API Standard 670 Machinery Protection Systems

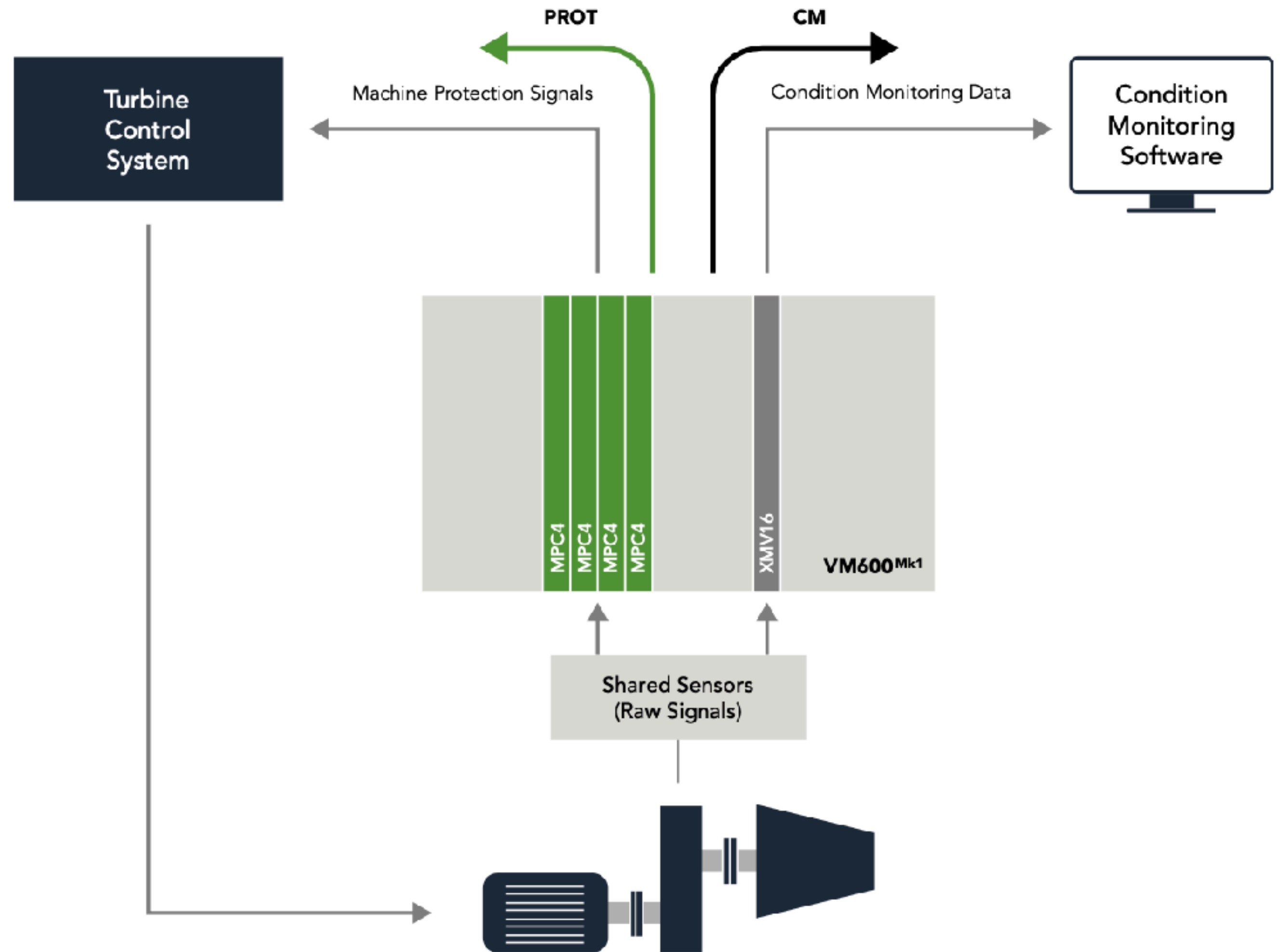
FIFTH EDITION | NOVEMBER 2014 | 244 PAGES | \$195.00 | PRODUCT NO. C57005

ISO 17359:2018

Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines

Published (Edition 3, 2018)

This publication was last reviewed and confirmed in 2023. Therefore this version remains current.



es:
 Macchina 25Kw,
 Fondazioni Rigide
 Indicatore : mm/s
 valore di soglia
 accettabile 4.5mm/s

Figure 1 Vibration Severity ISO 10816-3 : 2009

Vibration Severity		Goodness judgement for machine group			
Value of Velocity -boundary-		Group2		Group1	
0.71	mm/s	A	A	A	A
1.4		B	A	A	A
2.3		B	B	B	A
2.8		C	B	B	A
3.5		C	C	C	B
4.5		D	C	C	B
7.1		D	D	D	C
11.0		D	D	D	D
Base state of Machine		Rigid	Flexible	Rigid	Flexible

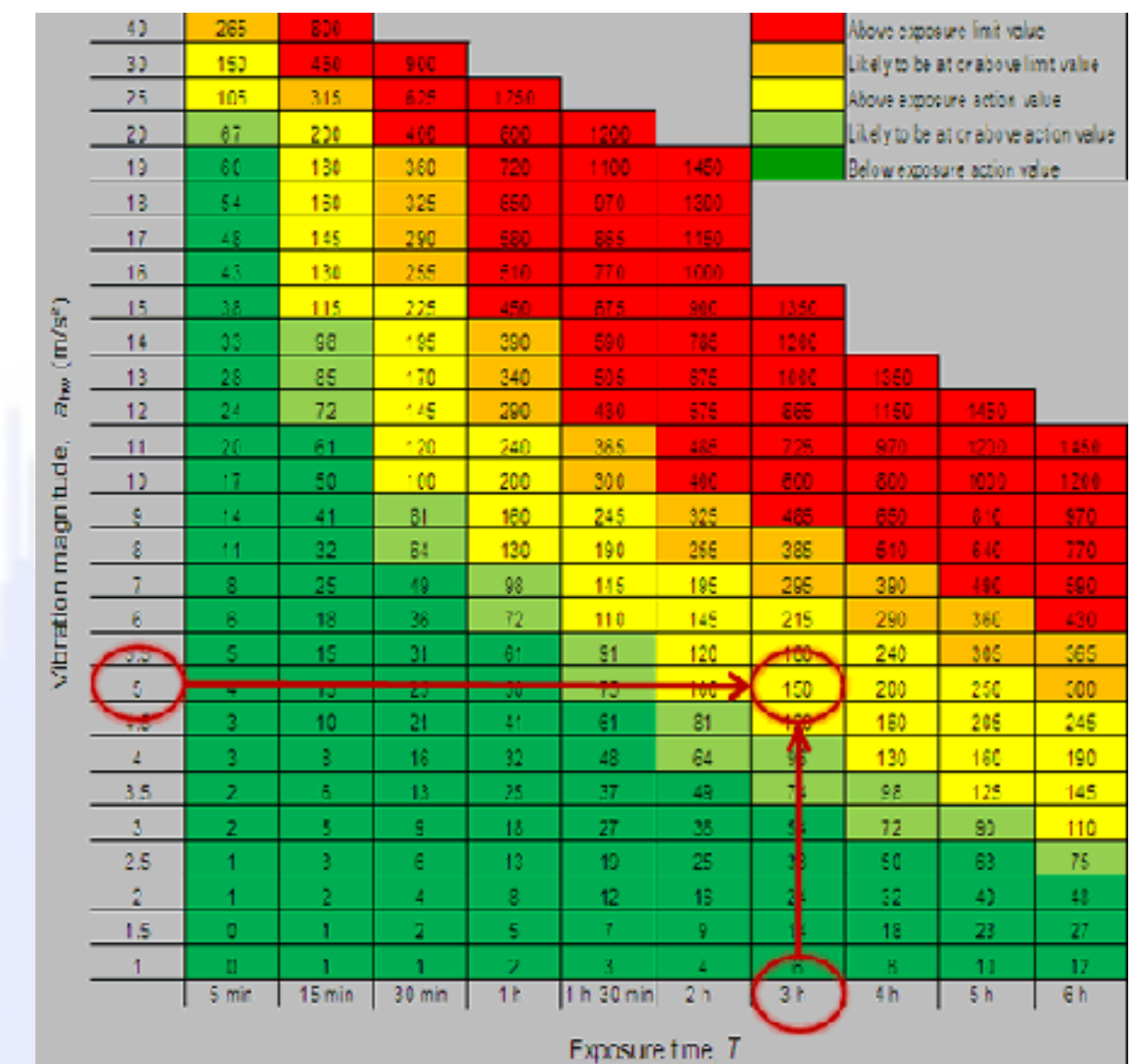
Example of Goodness A: Good B: Satisfactory C: Unsatisfactory D: Unacceptable

Group 1 Huge Machine Output, 300kW~50MW

Group 2 Middle Machine Output, 15kW~300kW

Questo concetto vale anche per
 l'esposizione delle persone alle vibrazioni ed
 al rumore con norme differenti!
 es. UNI1608519

es:
 Uomo
 Vib.- ManoBraccio
 Indicatore : m/s²
 durata esposizione:
 3h
 valore di soglia
 accettabile: 5mm/s



- Part1 **Guidelines** > ISO:20816:2016
- Part2 **Land Based Steam turbines**
>50MW > ISO:20816:2017
- Part3 **Industrial machines** > 15kW
- Part4 **Gas turbines on fluid film bearing**
- Part5 **Machine in hydraulic power generation**
- Part6 **Reciprocating machine** >100kW
- Part7 **Rotodynamic pumps**
- Part8 **Reciprocating compressors**

Esistono molte norme che danno delle indicazioni analoghe tra loro:

BS (British Standard)

VDI (Verein Deutsche Ingenieure)

API (American Petroleum Industry)

GOST (Gosudarstvennyy Standart)

UNI (Ente Nazionale Italiano di Unificazione)

ANSI America National Standard Institute

ASA Acoustic Society of America

AGMA America Gear Manufacturer Association

Bisogna fare attenzione all'utilizzo delle indicazioni contenute nelle norme, capendo quale è lo spirito per il quale la norma è stata scritta!

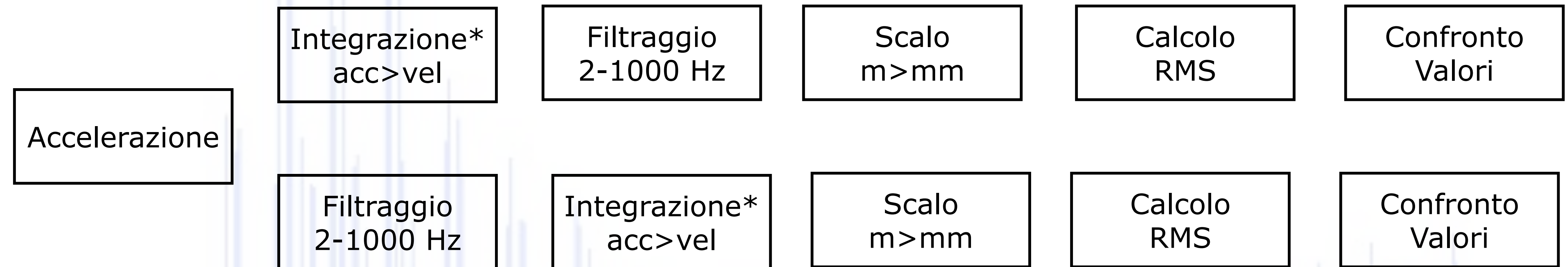
Bisogna scegliere la norma in funzione della macchina, della nazione in cui è installata, alle richieste del cliente finale..

es. API 670 Machinery Protection System

è una norma che copre i requisiti minimi per i sistemi di misura per
vibrazioni radiali/assiali di alberi,
vibrazioni di carcasse
velocità angolare di alberi
sovra-velocità
piston drop
pressure surge
ed assicurarne il funzionamento in impianto durante le normali operazioni ..
non a a che vedere con la protezione della macchina durante la vita utile!

Le indicazioni contenute nelle norme non sono sempre univoche!

Esempio la norma prevede di calcolare il valore RMS del segnale in velocità (mm/s) in una banda di frequenza 2-1000Hz.. come si fa a calcolare questo valore dal segnale accelerometrico?



a quanti Hz acquisisco il segnale?

come si filtra? (nel dominio del tempo o della frequenza), con che tipo di filtro? con quanti poli?..

come si integra? (nel dominio del tempo o della frequenza), a quanti Hz si filtra con passa alto?

...

ad ogni step si possono e devono fare delle scelte che modificano il risultato finale..

* l'integrazione prevede un filtraggio per eliminare la componente DC, che effetto ha?

Gli indicatori più comuni utilizzati dalle norme sono i seguenti :

Valore di Picco

$$x_M \quad x_m$$

Valore della Varianza
O Deviazione Standard

$$\sigma_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^N [x_i(t) - \bar{x}]^2}{N}$$

Valore Medio

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

Valore della Skewness
(MSO3)

$$\mu_3 = \frac{\sum_{i=1}^N [x_i(t) - \bar{x}]^3}{N} \left(\frac{1}{\sigma_x^3} \right)$$

Valore RMS

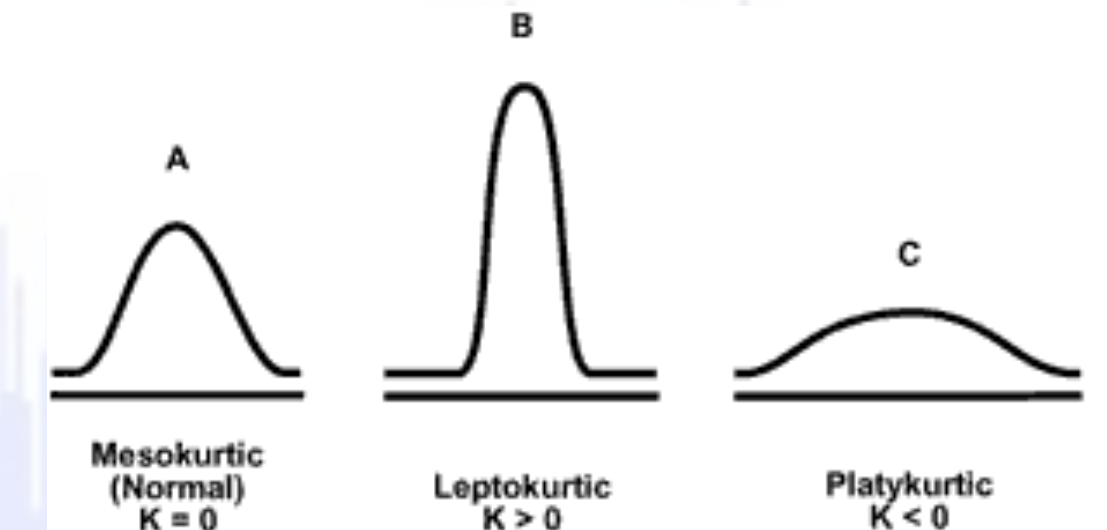
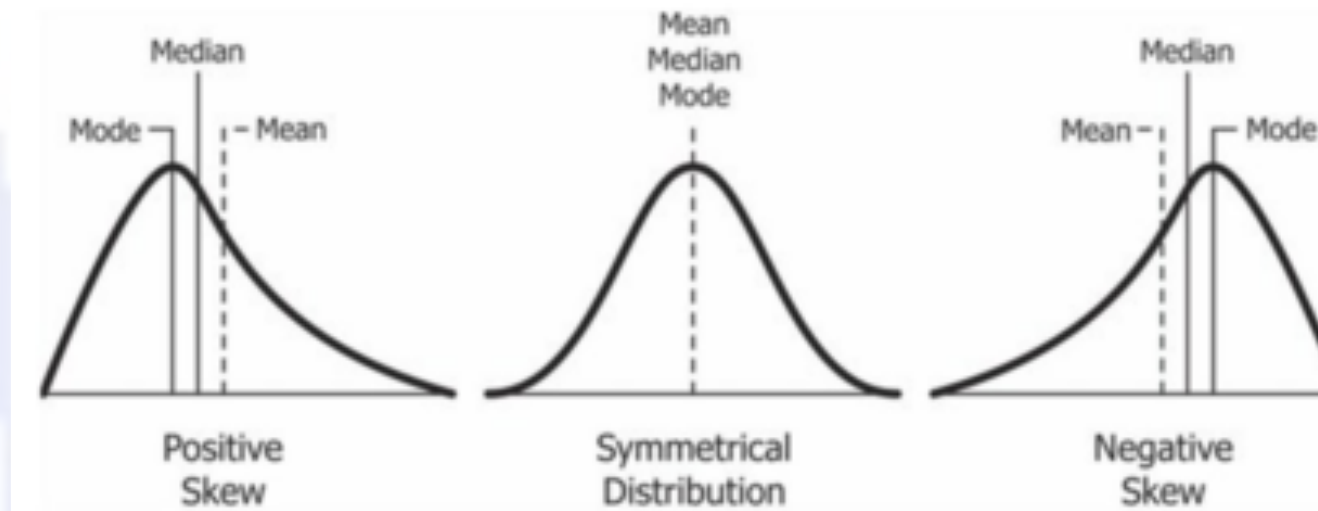
$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t)^2}$$

Valore della Kurtosis
(MSO4)

$$\mu_4 = \frac{\sum_{i=1}^N [x_i(t) - \bar{x}]^4}{N} \left(\frac{1}{\sigma_x^4} \right)$$

Valore Picco Picco

$$x_{pp} = x_M - x_m$$



Valore di Cresta

$$x_C = \frac{x_M}{x_{RMS}}$$

Questi sono parametri globali!
Da questi è difficile derivare informazioni
di tipo diagnostico !
(interpretare cosa si sta danneggiando)

Per compensare questa difficoltà ogni settore industriale ha cercato di definire indicatori specifici in grado di evidenziare qualche particolarità sulla distribuzione del dato in grado di aiutare nella stima dello stato di salute della macchina!

Zero Crossing

Cambio di pendenza

Ampiezza di Wilson

Fattore di forma

Fattore di margine

Fattore di clearance

Fattore d'impulso

*Cumulanti di
ordine superiore
(5, 6, 7, 8, 9)*

*Valori di Distribuzione
Normale, Weibull,
Log-Likelihood*

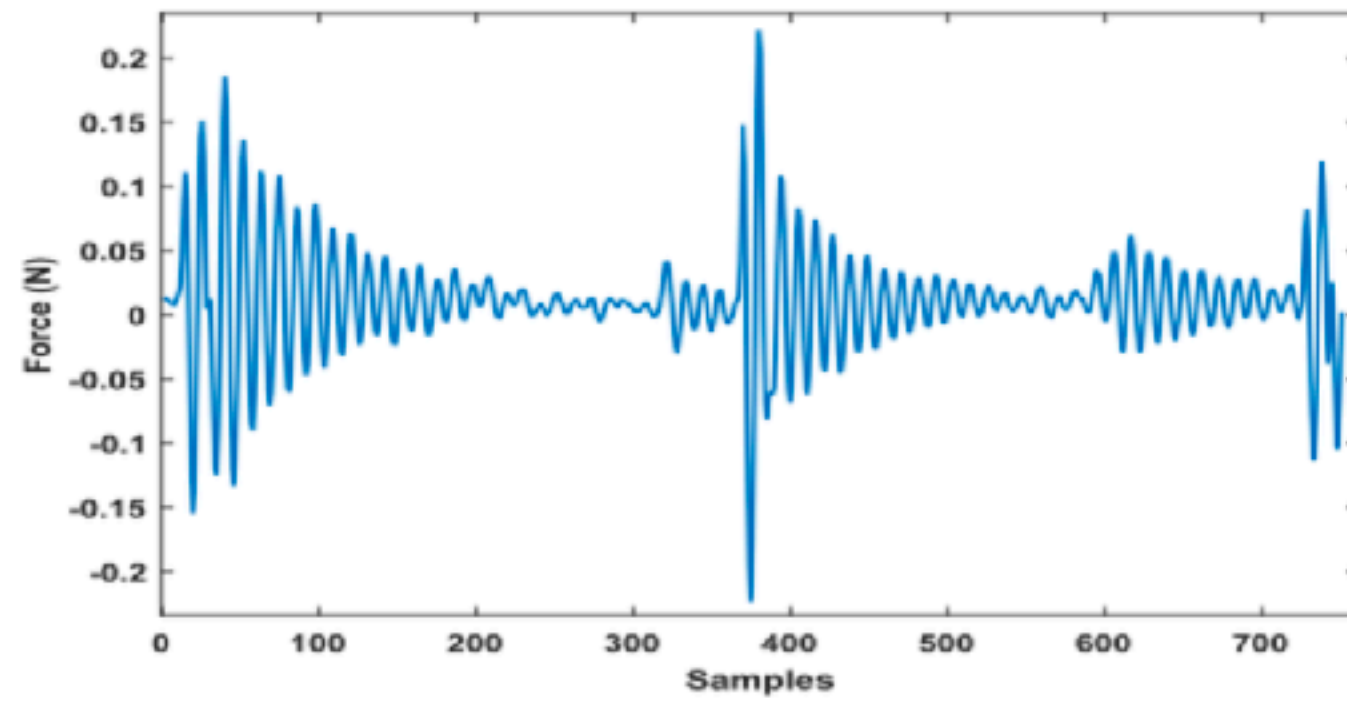
*Momenti statici di
ordine superiore
(5, 6, 7, 8, 9)*

Entropia

..la cui usabilità ed interpretazione sono abbastanza discutibili
l'applicabilità rimane ristretta a casi molto particolari!

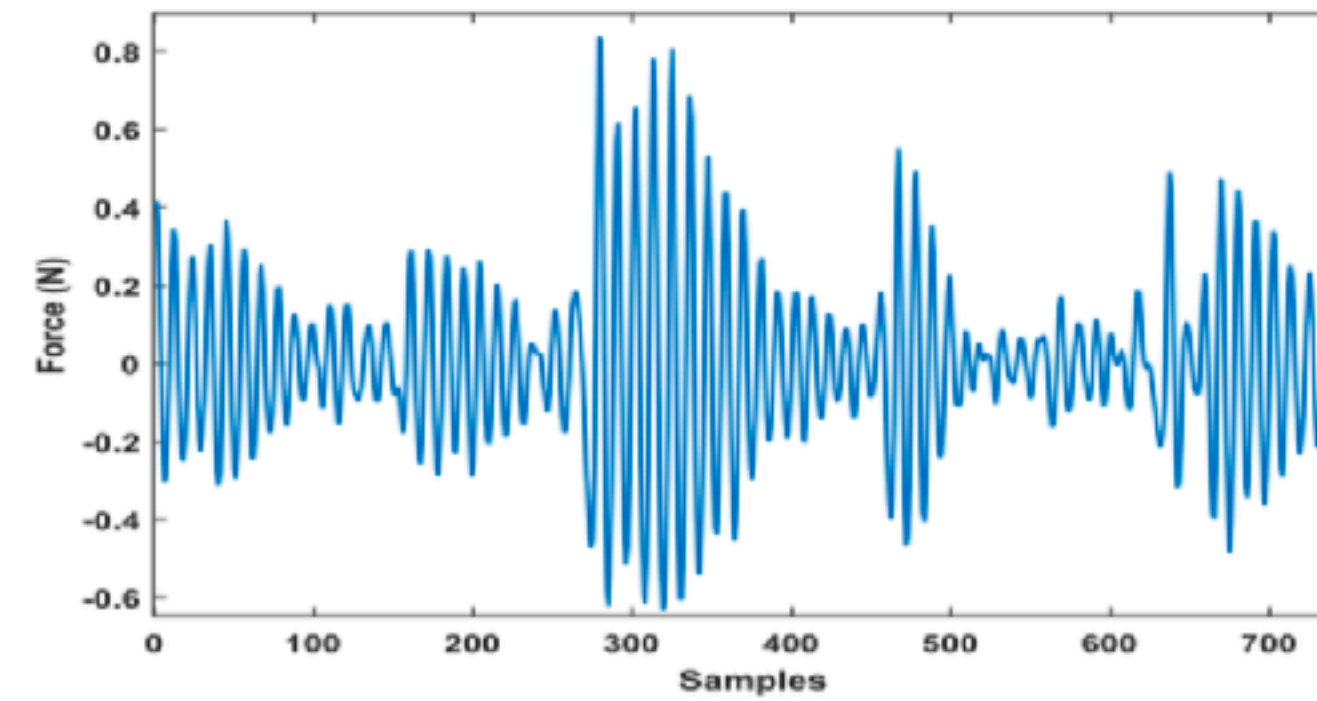
Esempio quali indicatori utilizzare per interpretare (diagnosi) segnali di questo tipo...

Cuscinetto
Danno Assiale



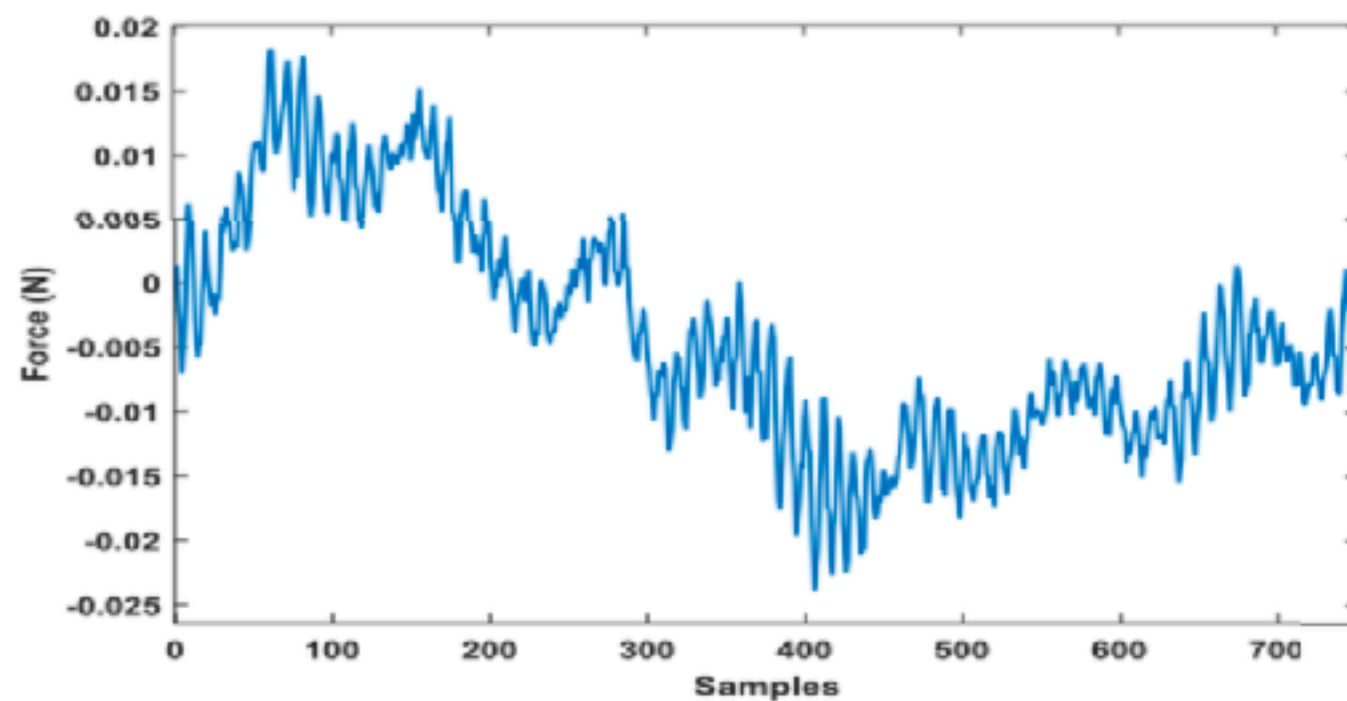
(a)

Cuscinetto
Contaminanti lubirificazione



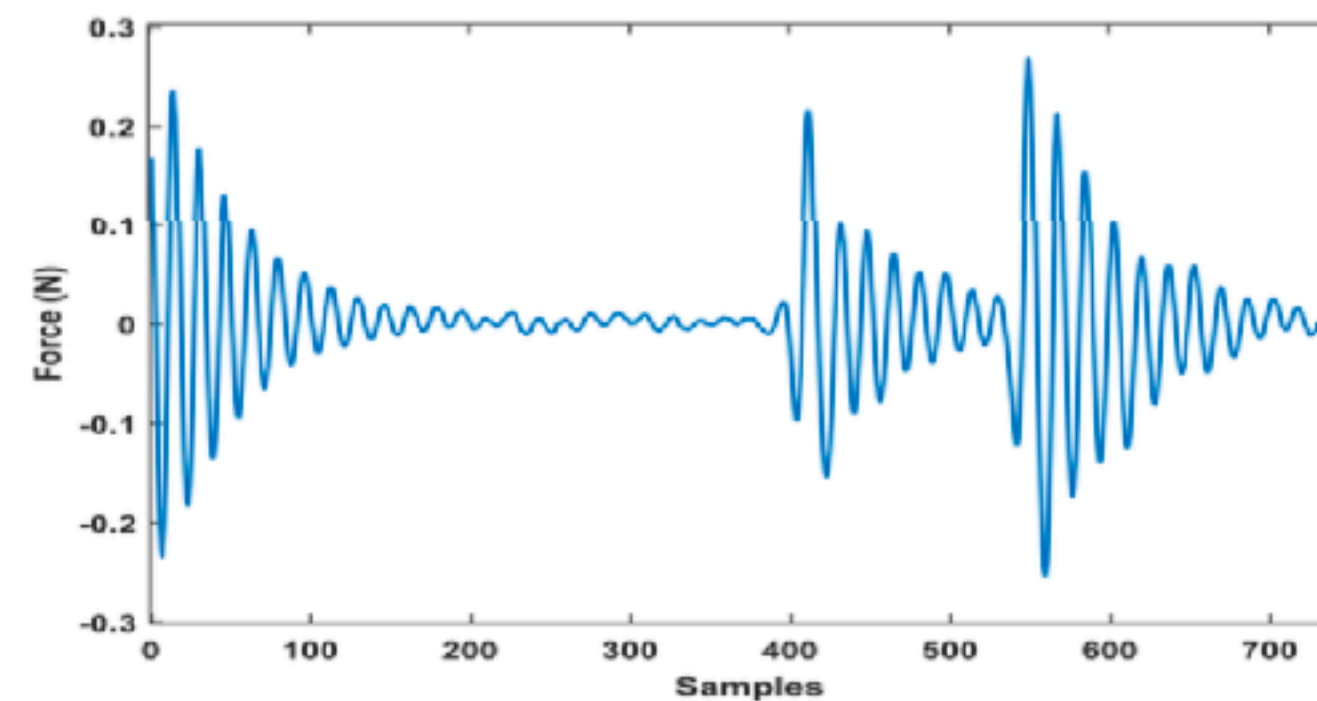
(b)

Cuscinetto
Nuovo



(c)

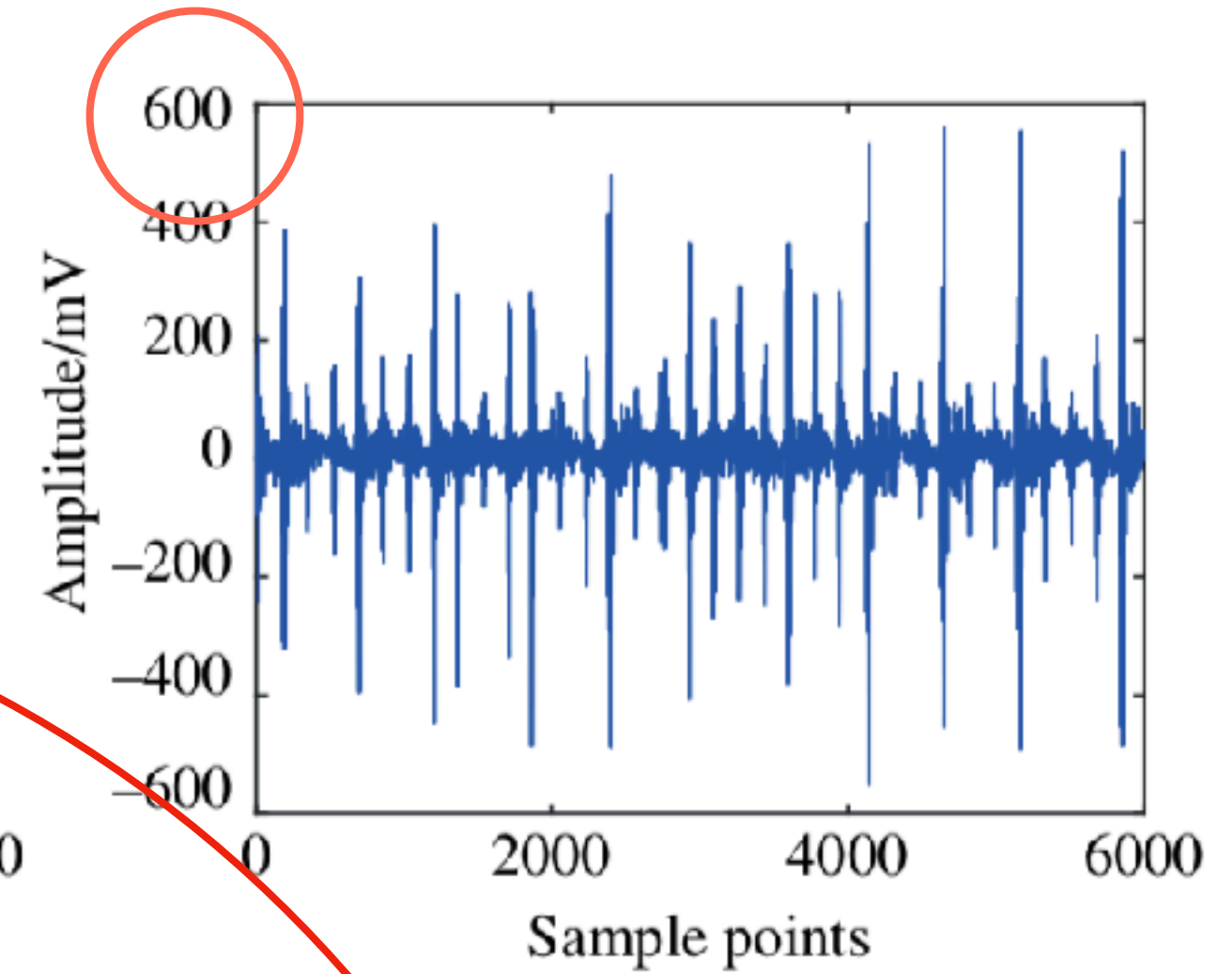
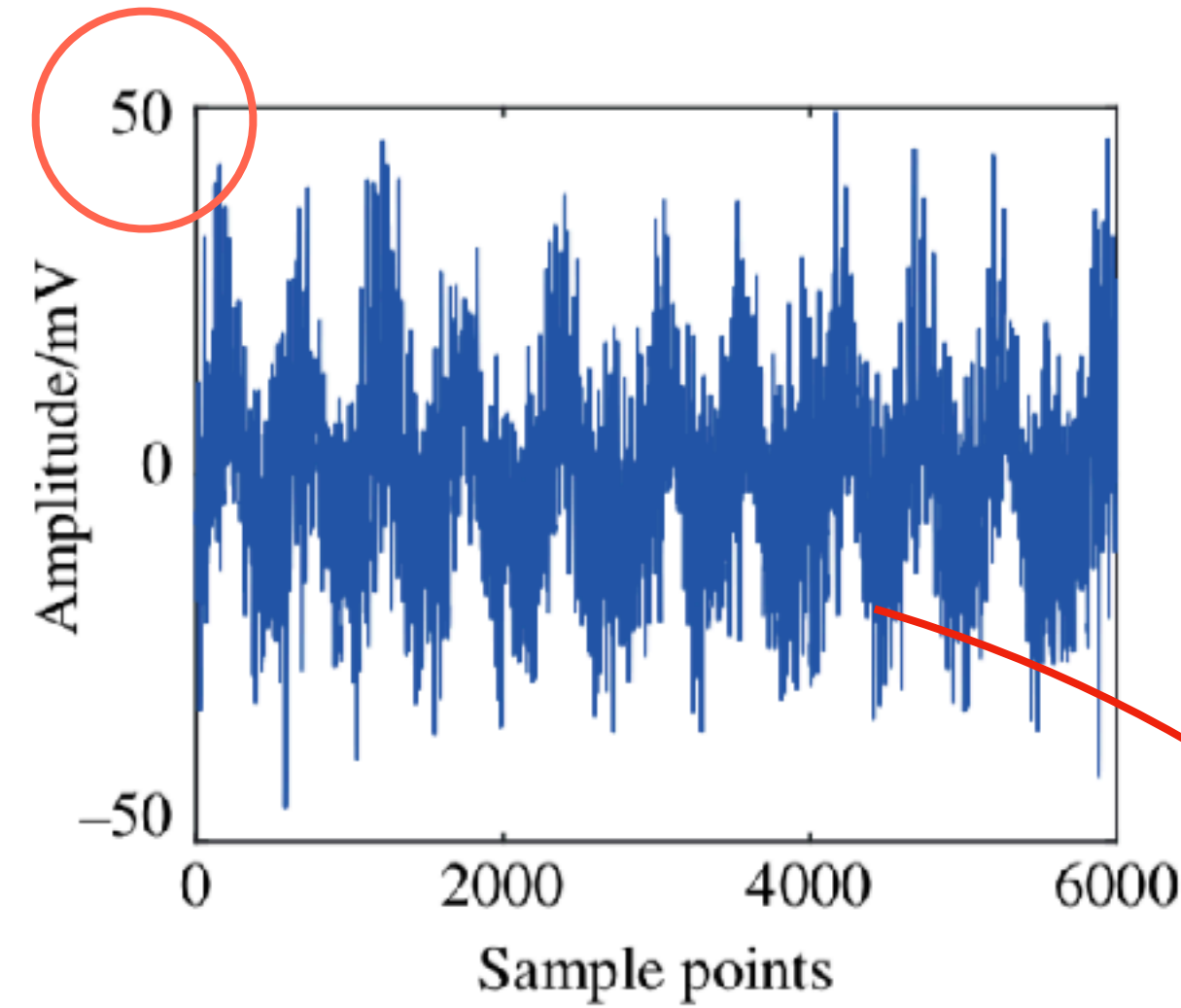
Cuscinetto
Danno Radiale



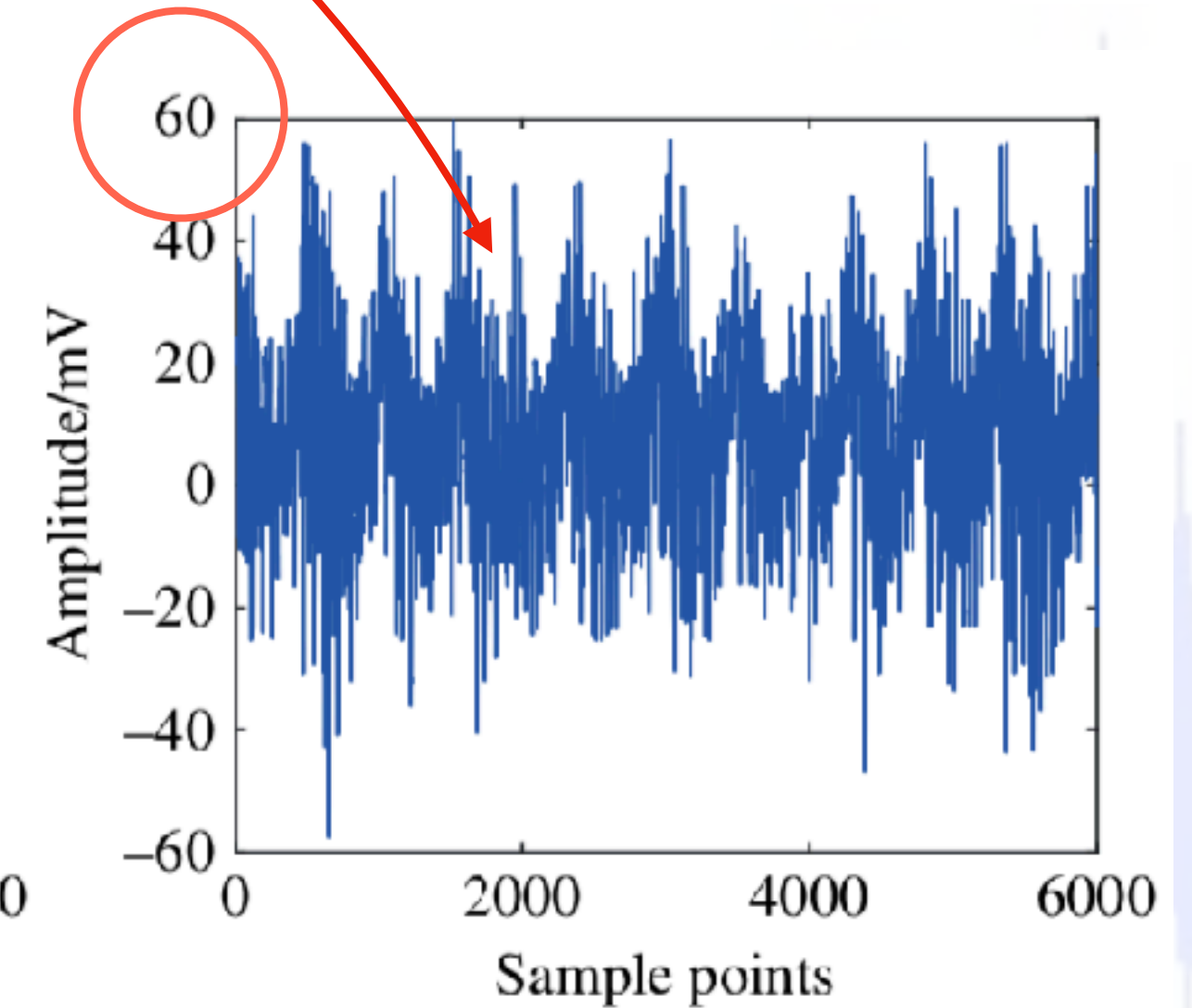
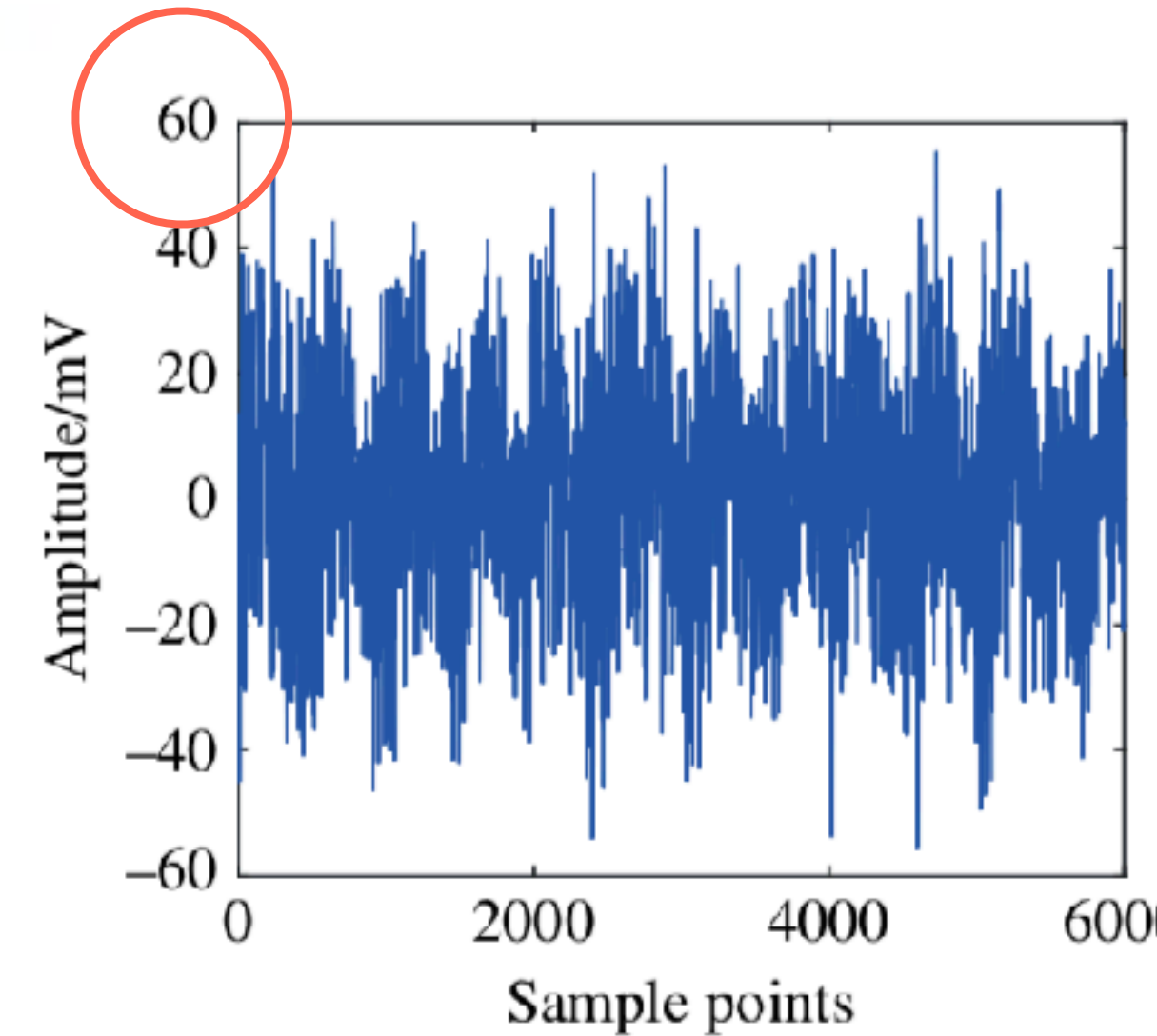
(d)

Esempio quali indicatori utilizzare per interpretare (diagnosi) segnali di questo tipo...

Misura Vibrazioni
Cuscinetto Nuovo
Vs
Cuscinetto danno Guida interna



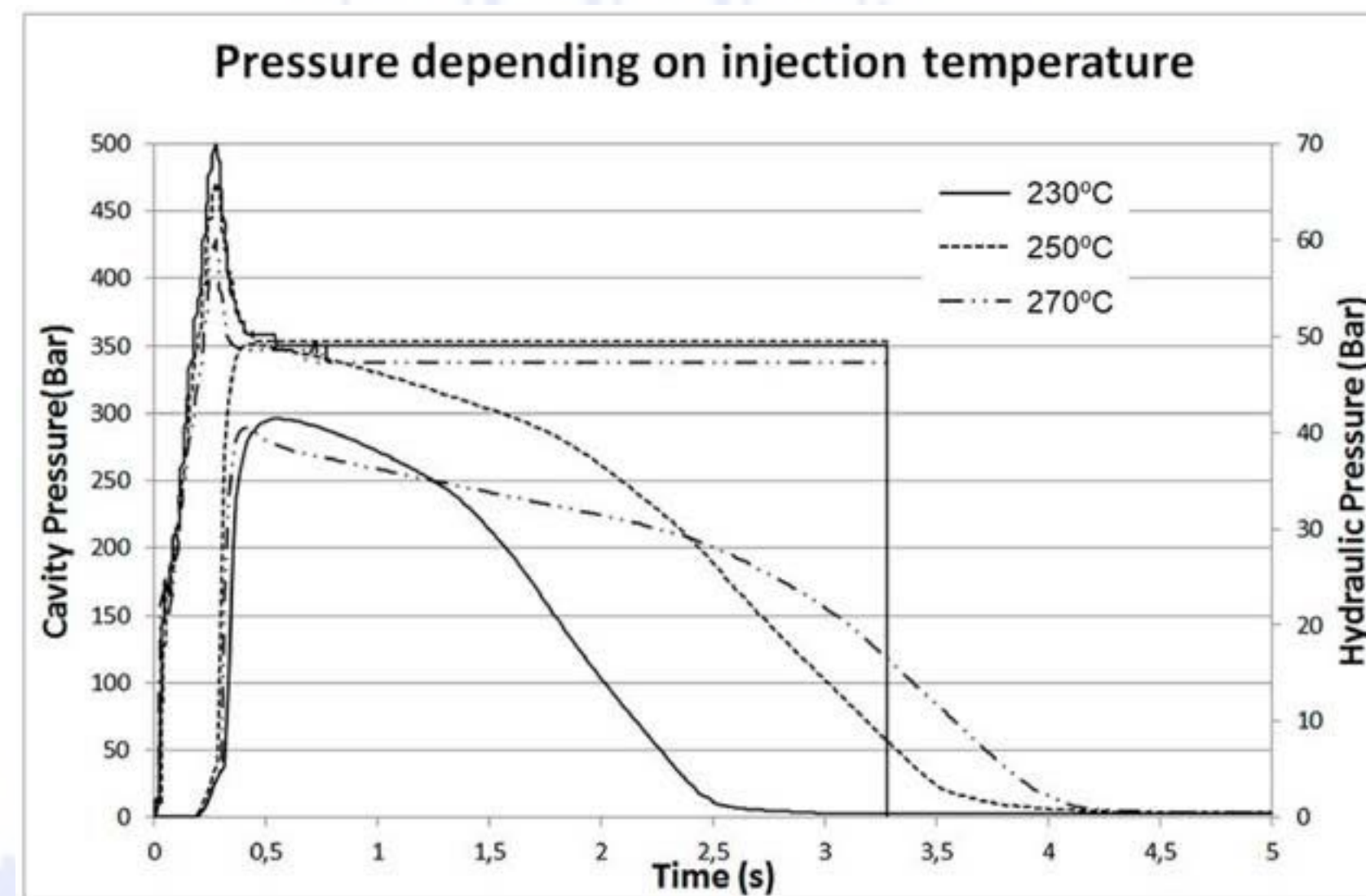
Misura Vibrazioni
Cuscinetto danno Guida esterna
vs
Cuscinetto usurato



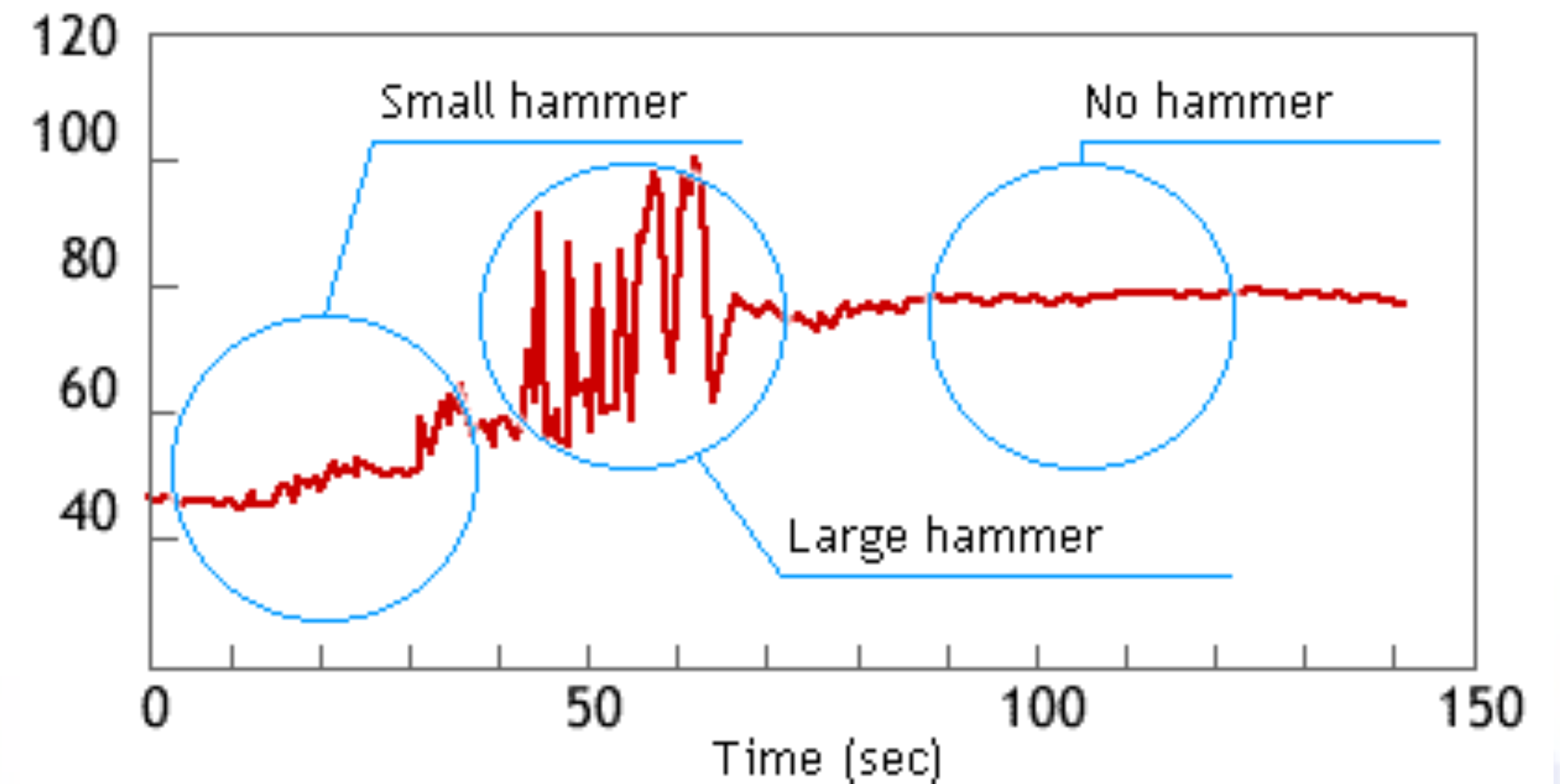
Servono tecniche di analisi un po' più raffinate, in grado di estrarre informazioni sia nel dominio del tempo che in quello della frequenza, seguendo le loro variazioni nel tempo.

Due cose sono importanti da considerare: la "statistica" utilizzata e "l'intervallo di tempo" in cui si valutano le misure!

Quest'ultimo deve contenere le informazioni di tutto il processo!



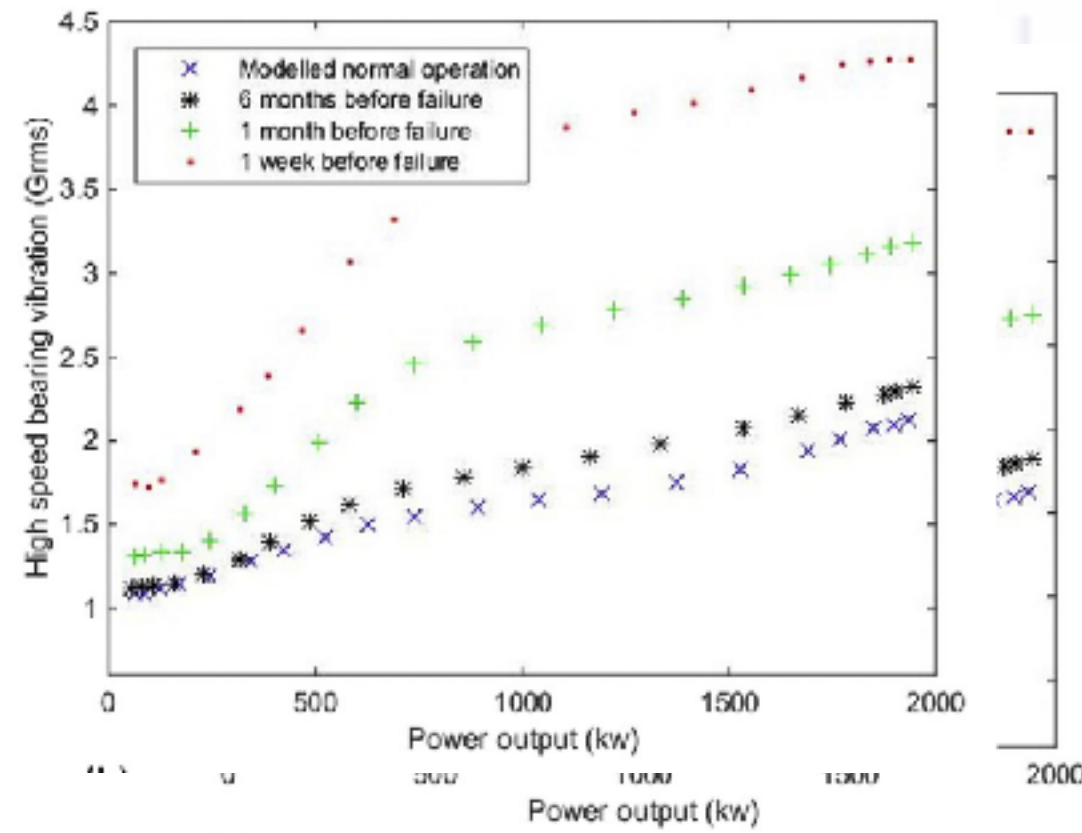
es. Pressofusione alluminio
cosa interessa? il picco? la durata? la pendenza? l'area?



es. Colpo d'ariete
cosa interessa?
la frequenza? l'ampiezza?
il numero dei picchi?

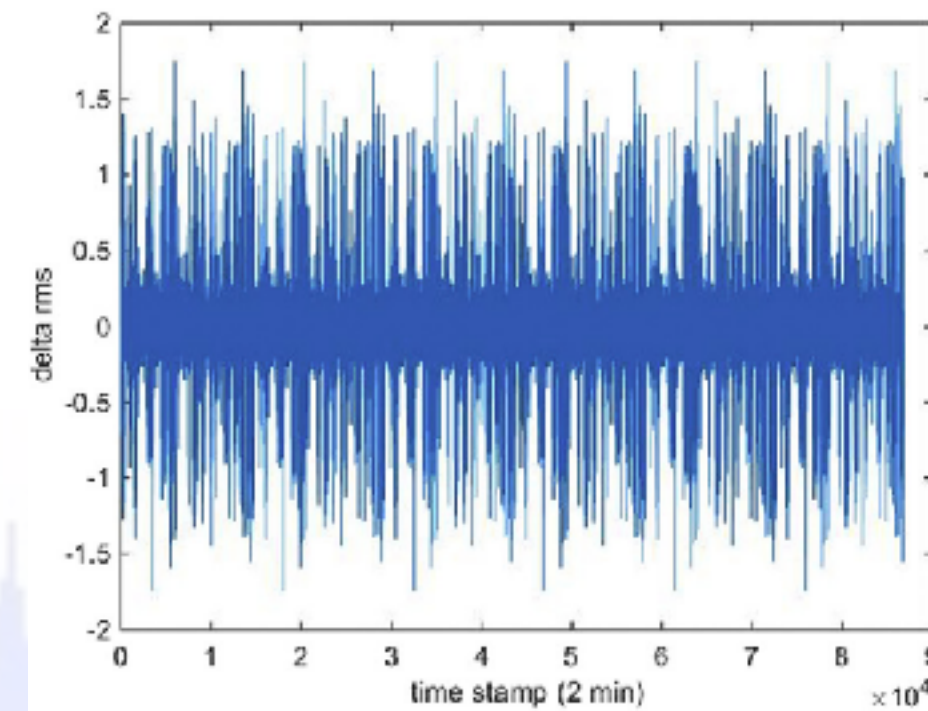
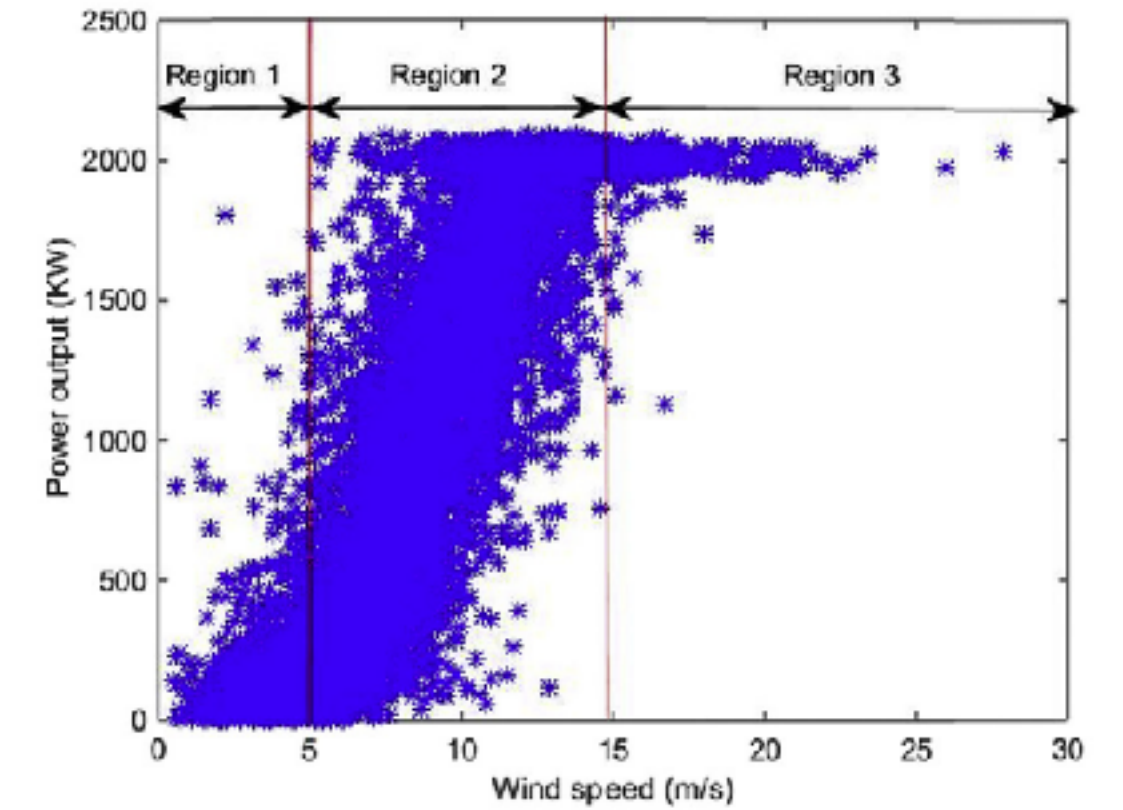


I segnali e gli indicatori cambieranno nel tempo,
bisogna saper trovare le variazioni significative!

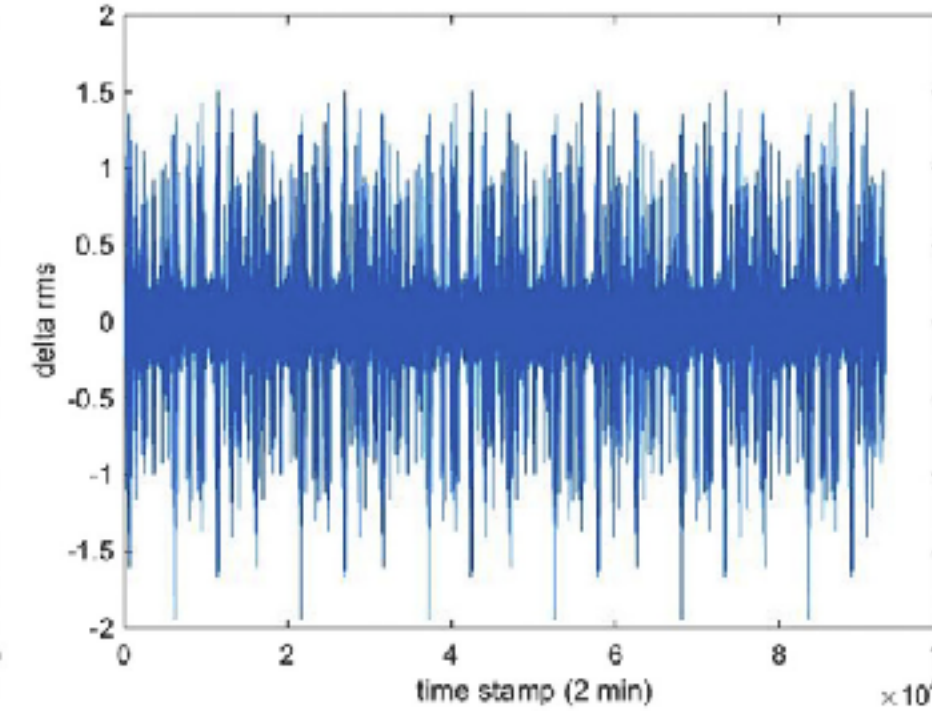


L'esperienza specifica su un macchinario/
processo permette di diagnosticare un malfunzionamento
in maniera più efficace ..
ma richiede tempo! e rotture! AI?

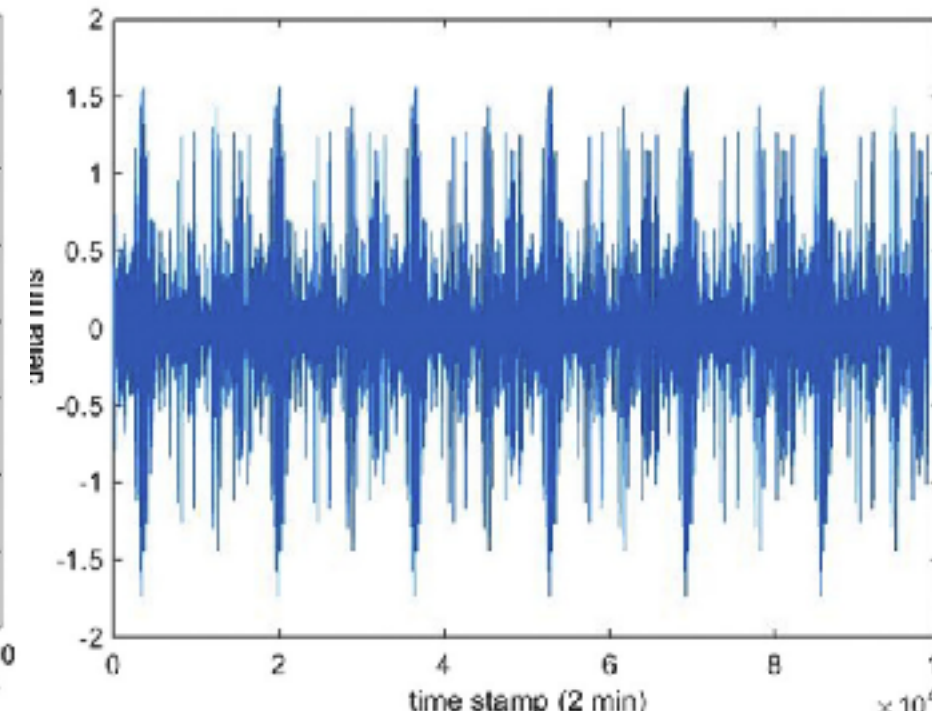
(NB quanti più dati si confrontano quanto
maggiori sono le possibilità
di identificare variazioni di comportamento)



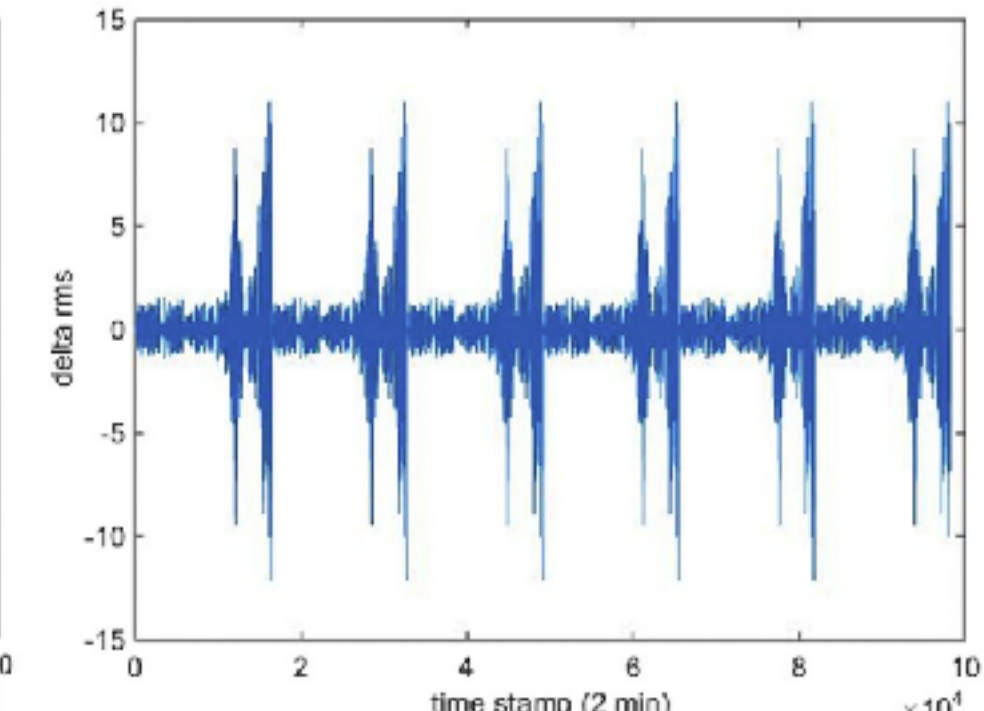
Funzionamento
Normale



6 mesi prima
della rottura



1 mese prima
della rottura



1 settimana prima
della rottura

Per la diagnostica, molto più informativa degli indicatori del dominio del tempo è l'analisi in frequenza dei segnali acquisiti (fatta la trasformata di Fourier)

Recap: di solito dal segnale del tempo $x(t) \rightarrow [U]$
si calcola il valore RMS $\rightarrow [U^2]$
si calcola la trasformata in frequenza $X(f) \rightarrow [U]$
e da questa lo spettro del segnale $S_{xx}(f) = X(f) * X(f) \rightarrow [U^2]$

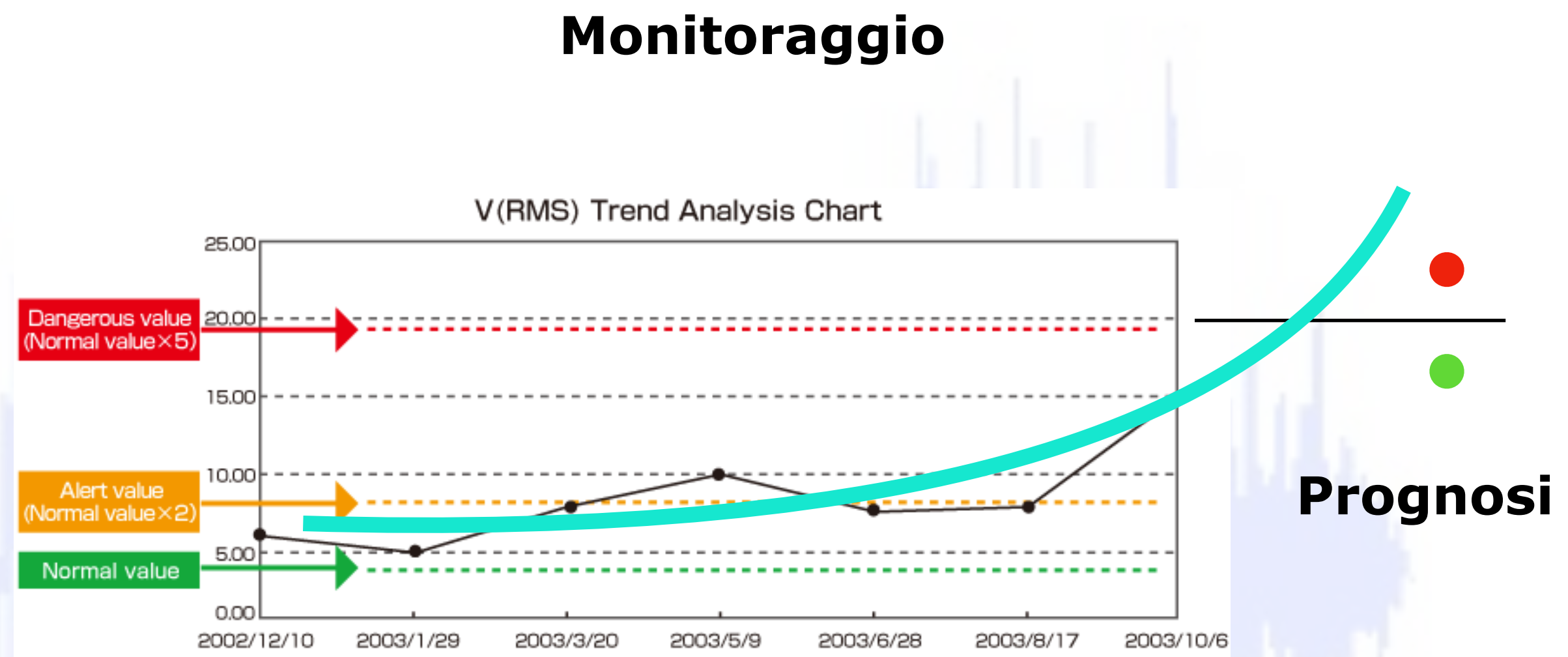
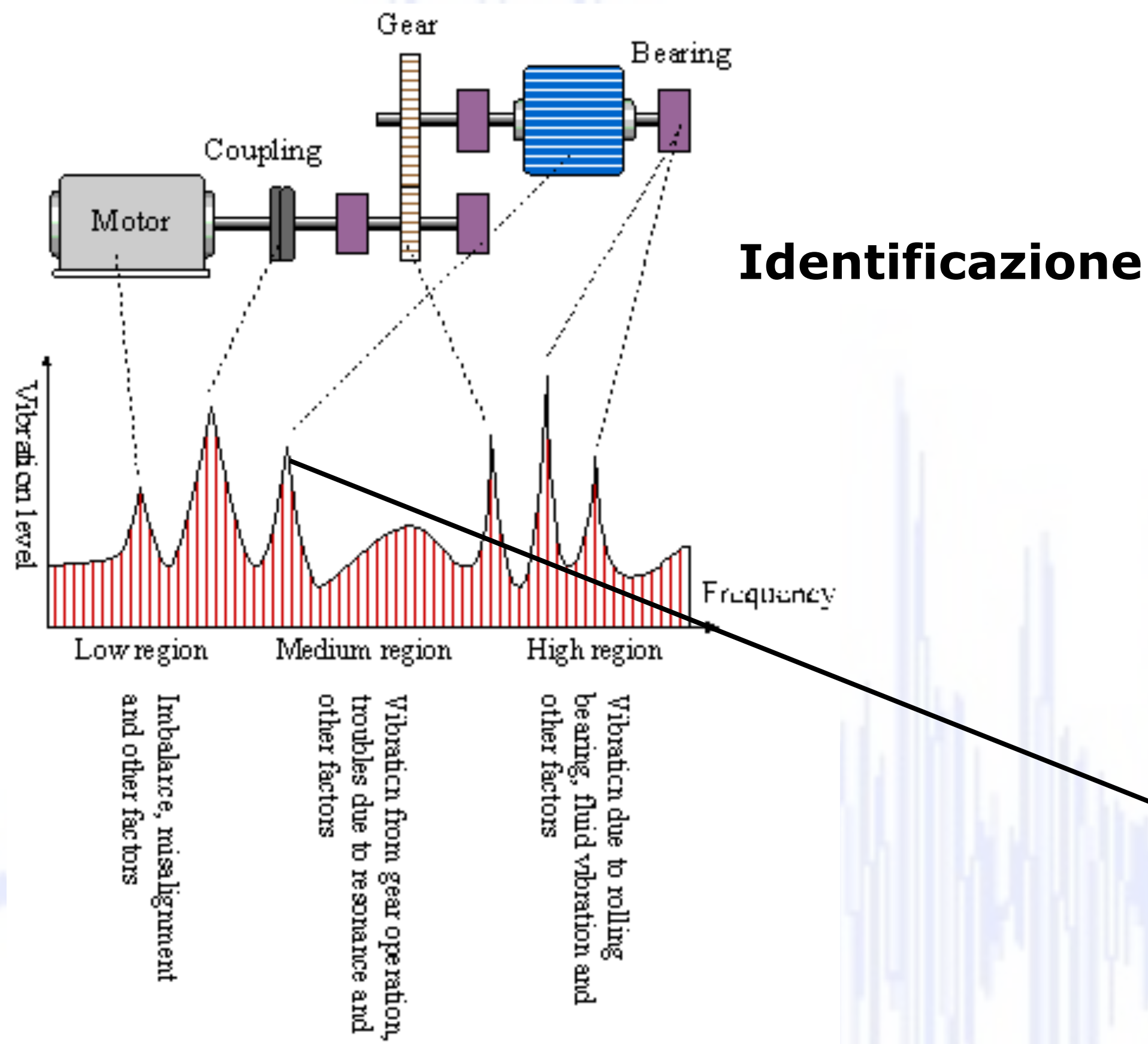
Comunemente si utilizza anche Power Spectra Density (PSD) $\rightarrow [U^2/Hz]$
(per segnali in regime stazionario) per tener conto della risoluzione del segnale

o di Energy Spectral Density (ESD) $\rightarrow [U^2s/Hz]$
(per segnali in regime transitorio) per tener conto della risoluzione e della durata del segnale

Spettro, PSD e ESD sono alla base dell'analisi in frequenza dei segnali...

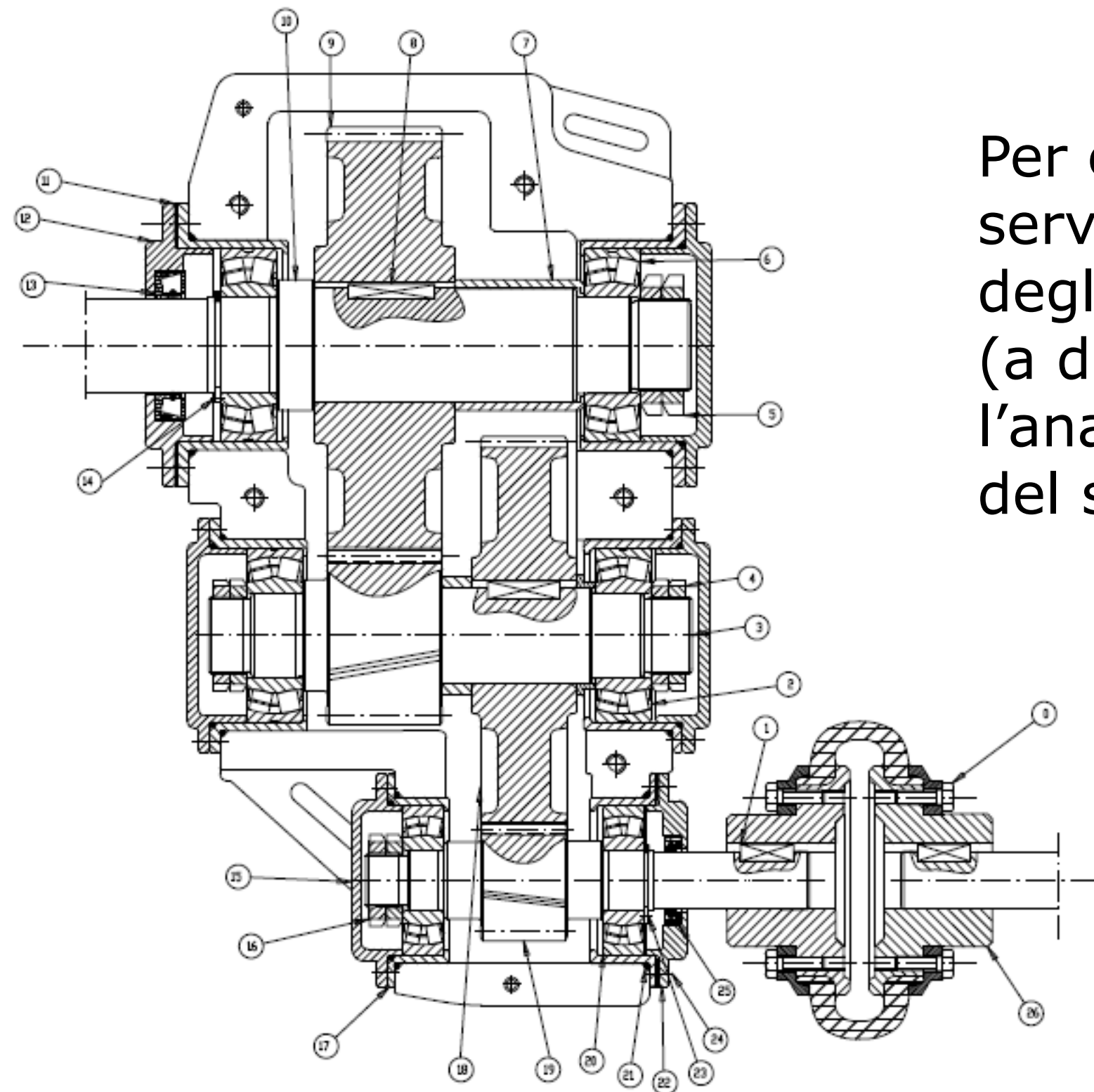
Queste funzioni permettono di identificare in maniera (quasi) univoca il contributo alla vibrazione misurate dei vari elementi del sistema e quindi diagnosticare dove si localizzano le problematiche nella macchina.

Se il monitoraggio è condotto periodicamente nel tempo è possibile derivarne la tendenza e programmare gli interventi di manutenzione!

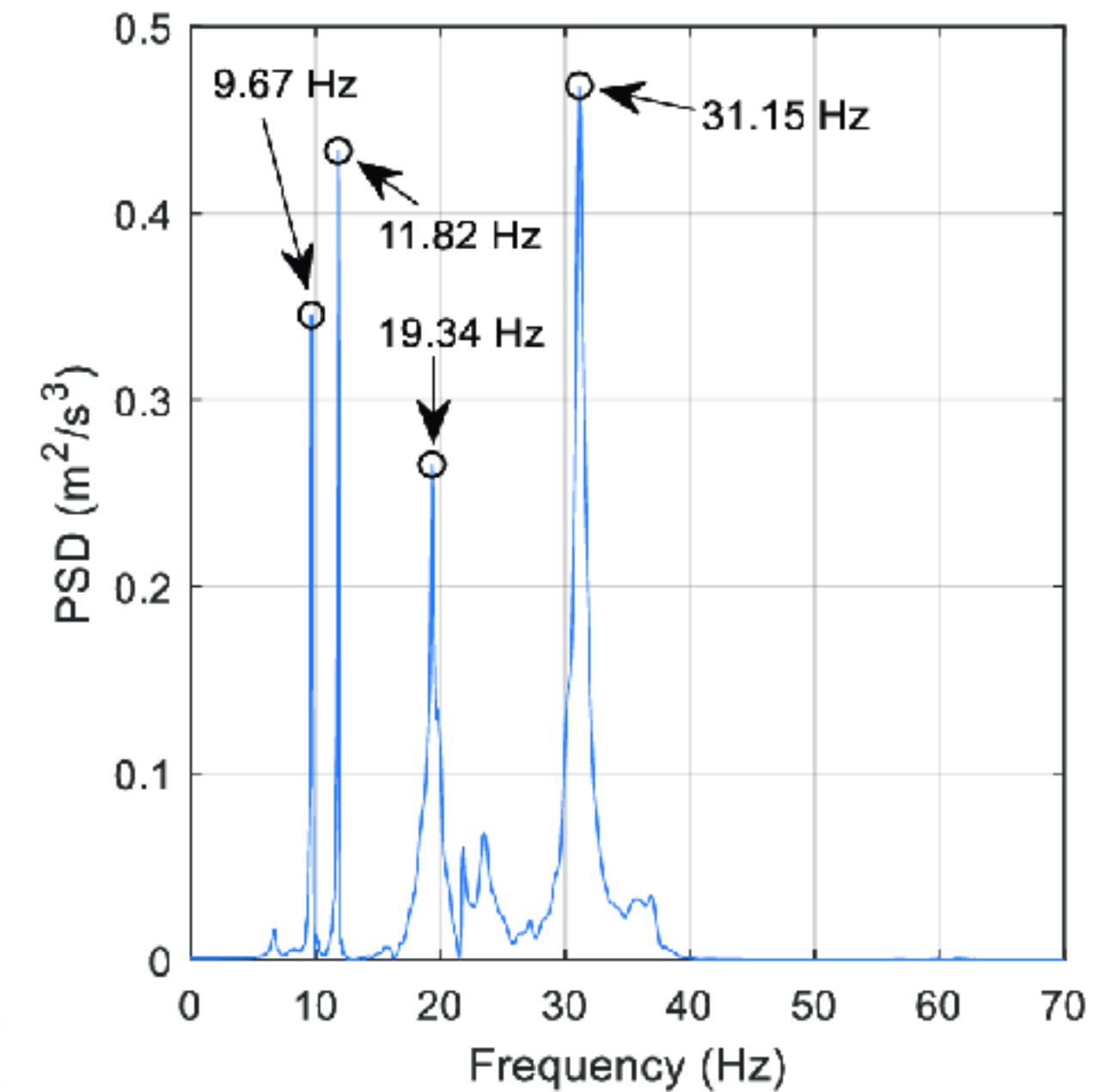


Risulta fondamentale correlare in maniera univoca i picchi delle funzioni acquisite con la cinematica del sistema che si sta analizzando

(non sempre la correlazione è univoca! Esempio è difficile distinguere lo squilibrio tra assi con gli stessi RPM)



Per effettuare la correlazione serve conoscere le caratteristiche degli organi in movimento (a distinta pezzi) ed effettuare l'analisi della catena cinematica del sistema

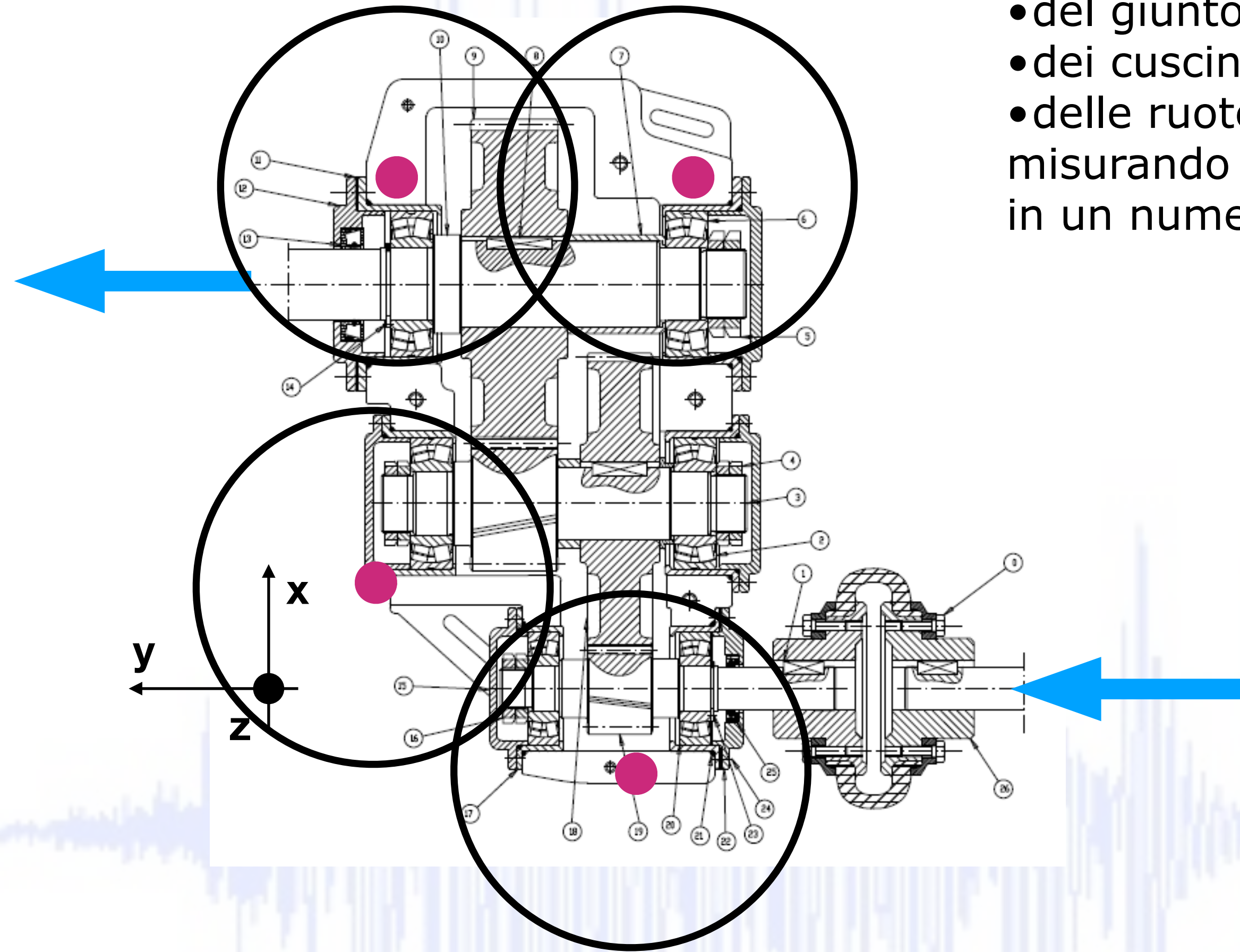


Per le misure serve porre attenzione alla posizione dei sensori (rispetto alla parte da monitorare) e i parametri di acquisizione per assicurare una banda ed una risoluzione in frequenza adeguata

Esempio si voglia monitorare il riduttore di figura

Seguendo il flusso di potenza, (freccia blu) si può monitorare il comportamento

- del giunto
 - dei cuscinetti del primo/secondo/terzo albero
 - delle ruote dentate del primo/secondo/terzo albero
- misurando vibrazioni sulla carcassa del riduttore in un numero limitato di posizioni!



Bisogna sapere:

- che tipo di giunto è?
- quali cuscinetti sono montati?
- numero di denti / modulo / angolo dell'elica
- delle ruote dentate
- quanti /quali sensori sono installati?
- quale risoluzione in frequenza si può
- avere (in funzione della durata del processo)
- ..

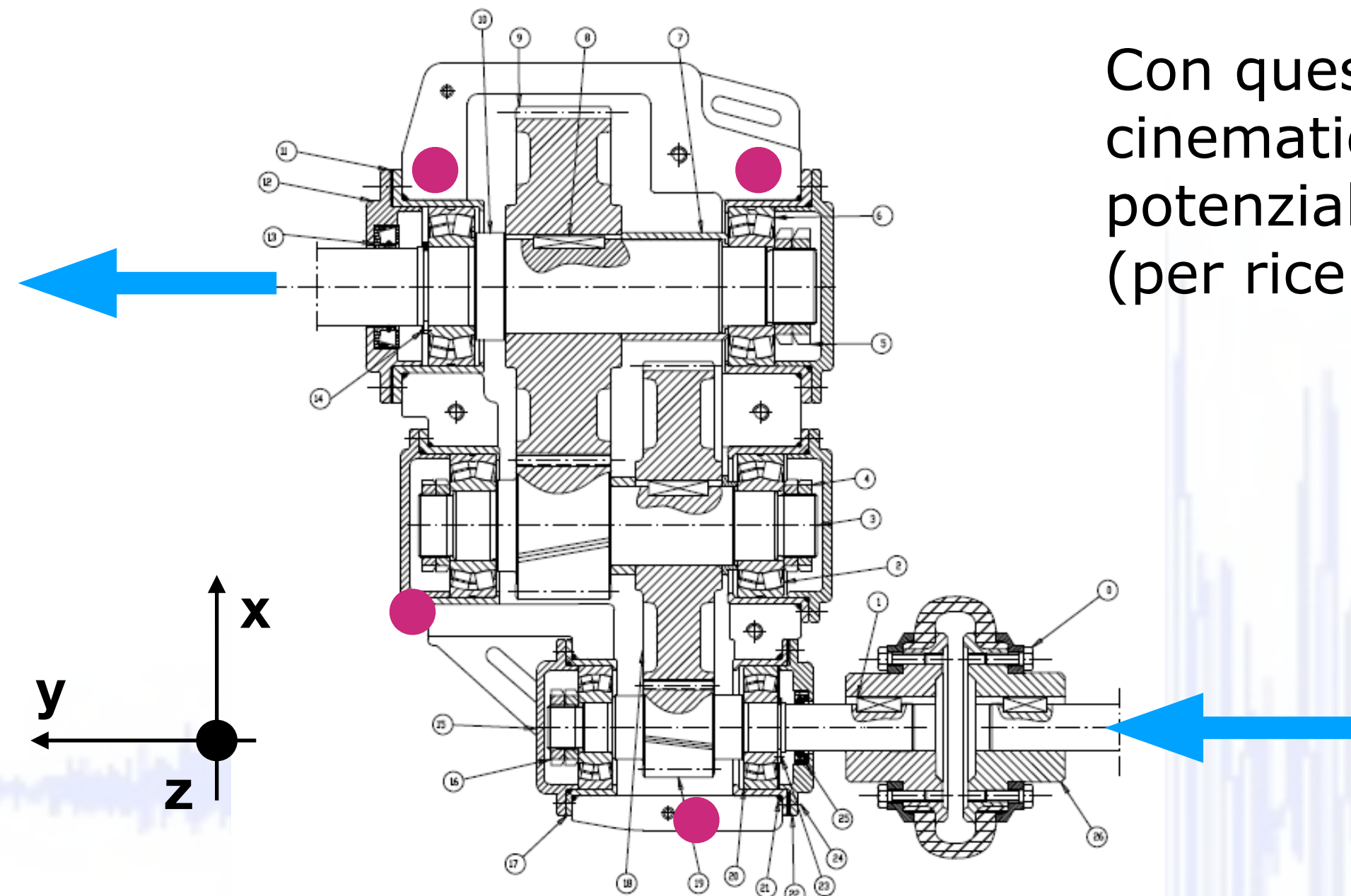
A quali velocità di rotazione gira il primario?

(buona norma definire una terna di riferimento
unica per tutto l'impianto..
o per lo meno per la macchina)

- > giunto elastico in gomma
- > cuscinetto1 23088CA /W33/C3
- cuscinetto2 24092CA /W33/C3
- ..
- > ruota1 $z=34$, $m=20$, $\beta=13^\circ$
- ruota2 $z=138$, $m=20$, $\beta=13^\circ$
- ..

- > velocità ingresso 300, 458, 613rpm
- in funzione del prodotto
- > sensore1 PCB triassiale mod. 356A16
- sensore2 PCB triassiale mod. 356A16
- ...
- > acquisizione @1000Hz da 10s
- $f_{max}= 390\text{Hz}$, risoluzione 0.1Hz

Basterà come risoluzione?



Con queste informazioni si procede all'analisi cinematica andando a cercare tutte le potenziali frequenze di danno del sistema (per ricercarle poi negli spettri vibrazionali acquisiti)

Quanti decimali servono?

- 1. velocità di rotazione albero 1
- 300 rpm > 5Hz
- 458 rpm > 7.6333333Hz
- 618 rpm > 10.3Hz
- velocità di rotazione albero 2
- 300 rpm * z_1/z_2 > 1,23188Hz
- 458 rpm * z_1/z_2 > 1,88059 Hz
- 618 rpm * z_1/z_2 > 2,53768Hz
- ...

2. cuscinetti

bisogna trovare sul sito del produttore le frequenza caratteristiche di ogni cuscinetto della macchina!

23088CA /W33/C3			
Bearing Frequencies @1Hz	PBFI - inner		15.305
	PBFO - outer		12.695
	FTF - cage		0.453
	BSF - Ball		5.262

24092CA /W33/C3			
Bearing Frequencies @1Hz	PBFI - inner		15.318
	PBFO - outer		12.682
	FTF - cage		0.453
	BSF - Ball		5.170

Per distinguere il cuscinetto 1 dal cuscinetto 2
la risoluzione di 0.1Hz non basta!

Come si aumenta la risoluzione in frequenza?

1. velocità di rotazione

300 rpm => 5Hz

458 rpm => 7.6333333Hz

618 rpm => 10.3Hz

1. velocità di rotazione

450 rpm => 7.5 Hz

458 rpm => ..Hz

618 rpm => ..Hz

Per ogni velocità di rotazione di ciascun albero
bisogna calcolare le frequenze di danno associate
(attenzione a mettere assieme
correttamente velocità/alberi/cuscinetti)

23088CA /W33/C3				
	velocità albero [Hz]	5.000	7.633	10.300
PBFI - inner	15.305	76.525	116.823	157.642
PBFO - outer	12.695	63.475	96.901	130.759
FTF - cage	0.453	2.265	3.458	4.666
BSF - Ball	5.262	26.310	40.165	54.199

24092CA /W33/C3				
	velocità albero [Hz]	5.000	7.633	10.300
PBFI - inner	15.318	76.590	116.922	157.775
PBFO - outer	12.682	63.410	96.802	130.625
FTF - cage	0.453	2.265	3.458	4.666
BSF - Ball	5.170	25.850	39.463	53.251

Per le misure effettuate in prossimità dell'albero 1 dovremmo poter identificare ed analizzare tutte queste frequenze associate al danno dei cuscinetti

Sull'albero1 però è calettata la ruota dentata1 e con questa, ingrana la ruota dentata2

	velocità albero [Hz]	5.000	7.633	10.300
z1	34	170.000	259.522	350.200
z2	136	?	?	?

come si calcolano queste frequenze?

Procedendo in questa maniera

- per ogni velocità di rotazione in ingresso
- per ogni velocità di rotazione degli alberi
- per ogni cuscinetto (con la velocità di rotazione associata)
- per ogni ruota dentata (con la velocità di rotazione associata)

è possibile calcolare le frequenze di danno potenziale che bisognerà monitorare durante il funzionamento del riduttore.

NMB il calcolo è fatto per le **velocità NOMINALI!**

ci saranno delle oscillazioni delle quali bisognerà tener conto

NMB2 il calcolo è fatto per i **componenti NOMINALI** descritti nel cartiglio!
non è sempre detto che sia possibile avere i dettagli precisi o che siano esattamente i componenti montati

Questa analisi cinematica dovrà essere fatto
per ogni macchina e per ogni organo che interessa monitorare.

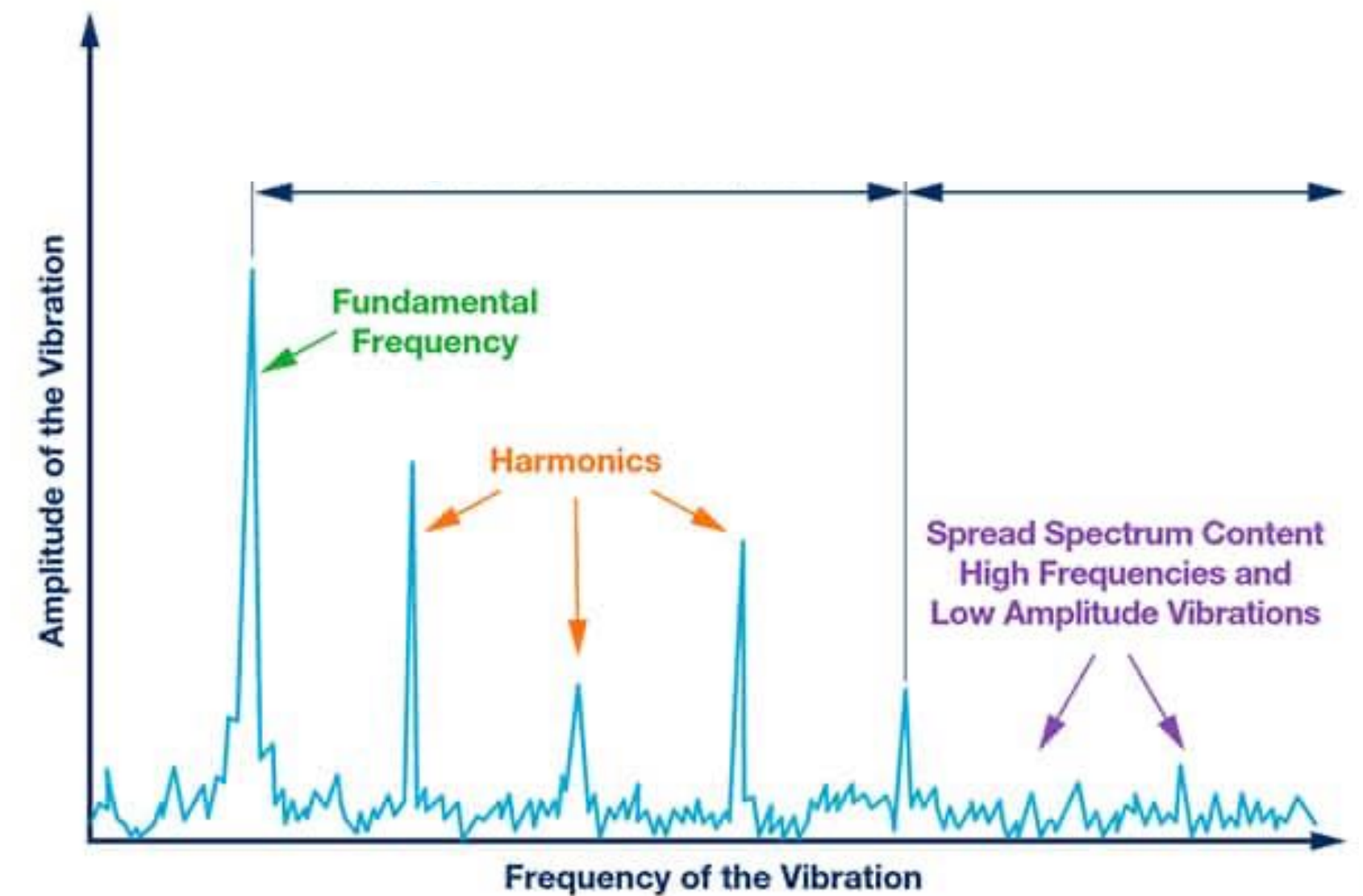
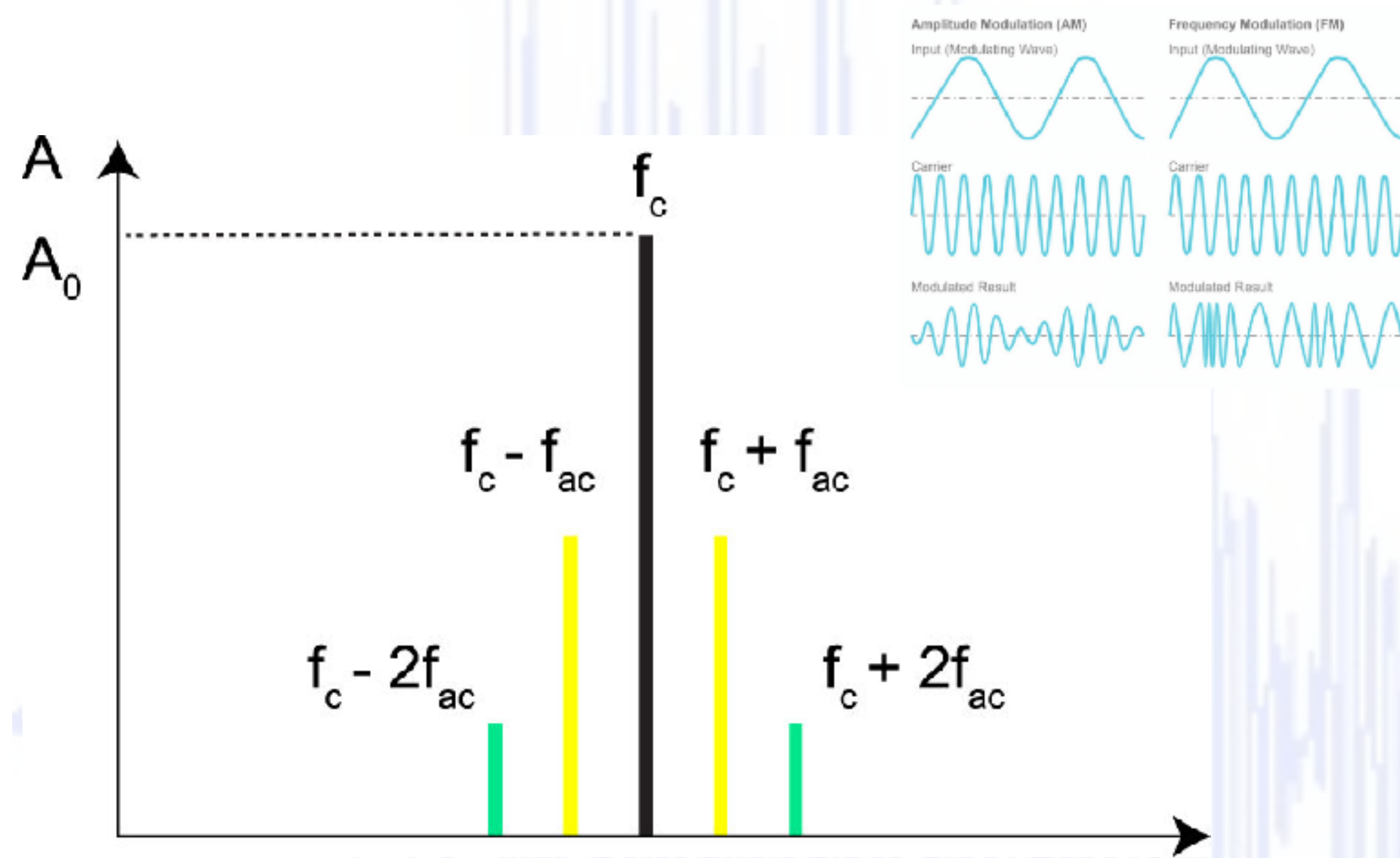
Bisogna proprio tracciare TUTTE
le frequenze di danno potenziale?

Cosa si fa quanto le velocità sono variabili?
(in transitorio piuttosto che a regime?)

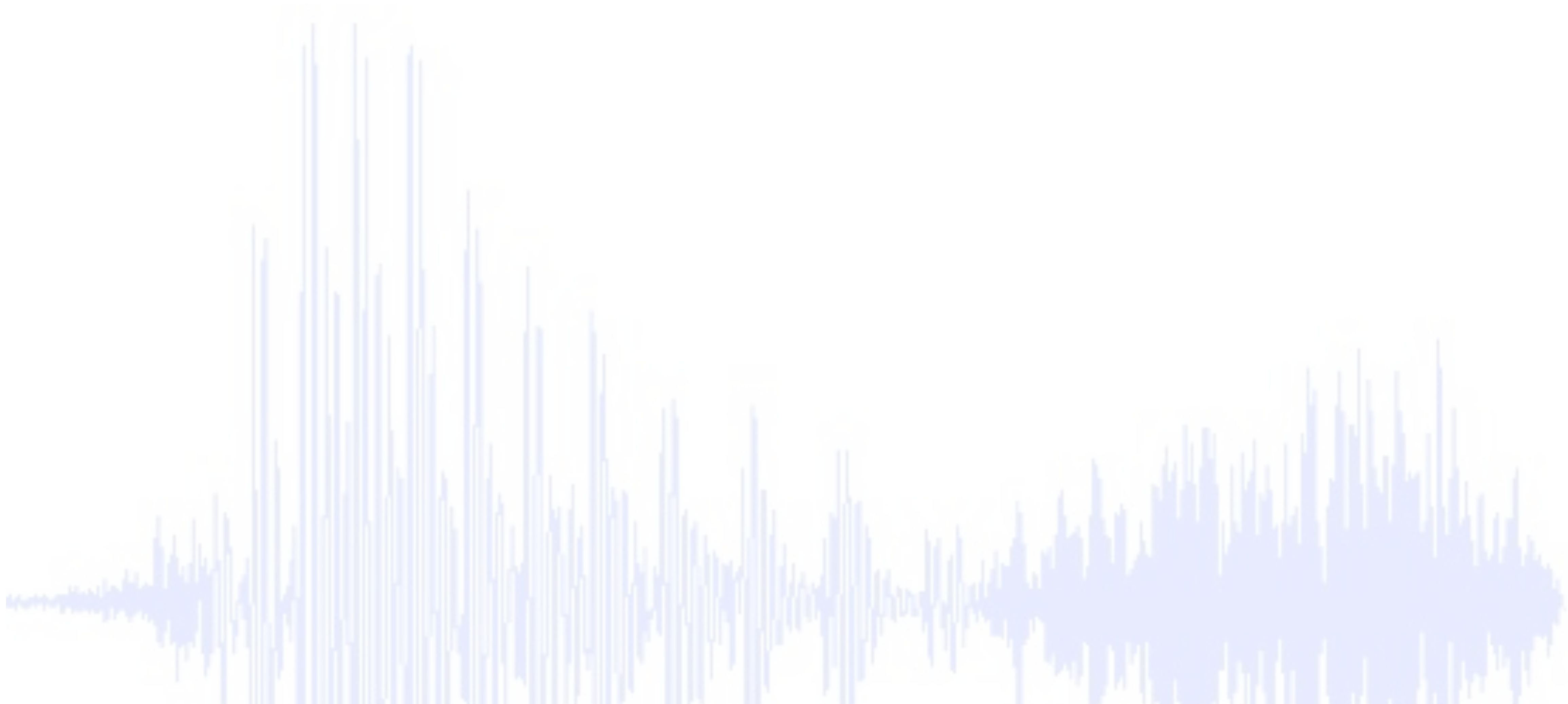
C'è ancora un due aspetti che bisogna ricordare quando si analizzo lo spettro di vibrazione

Tutte le frequenza citate sono state calcolate come fondamentali,
non è detto che nello spetto che non compaiano anche le loro armoniche
(1x fondamentale 2x, 3x, 4x,... armoniche)

non è detto che nello spetto che non compaiano
anche le loro modulazioni



..sia per la "fisica" della macchina
che per il calcolo della trasformazione FFT!



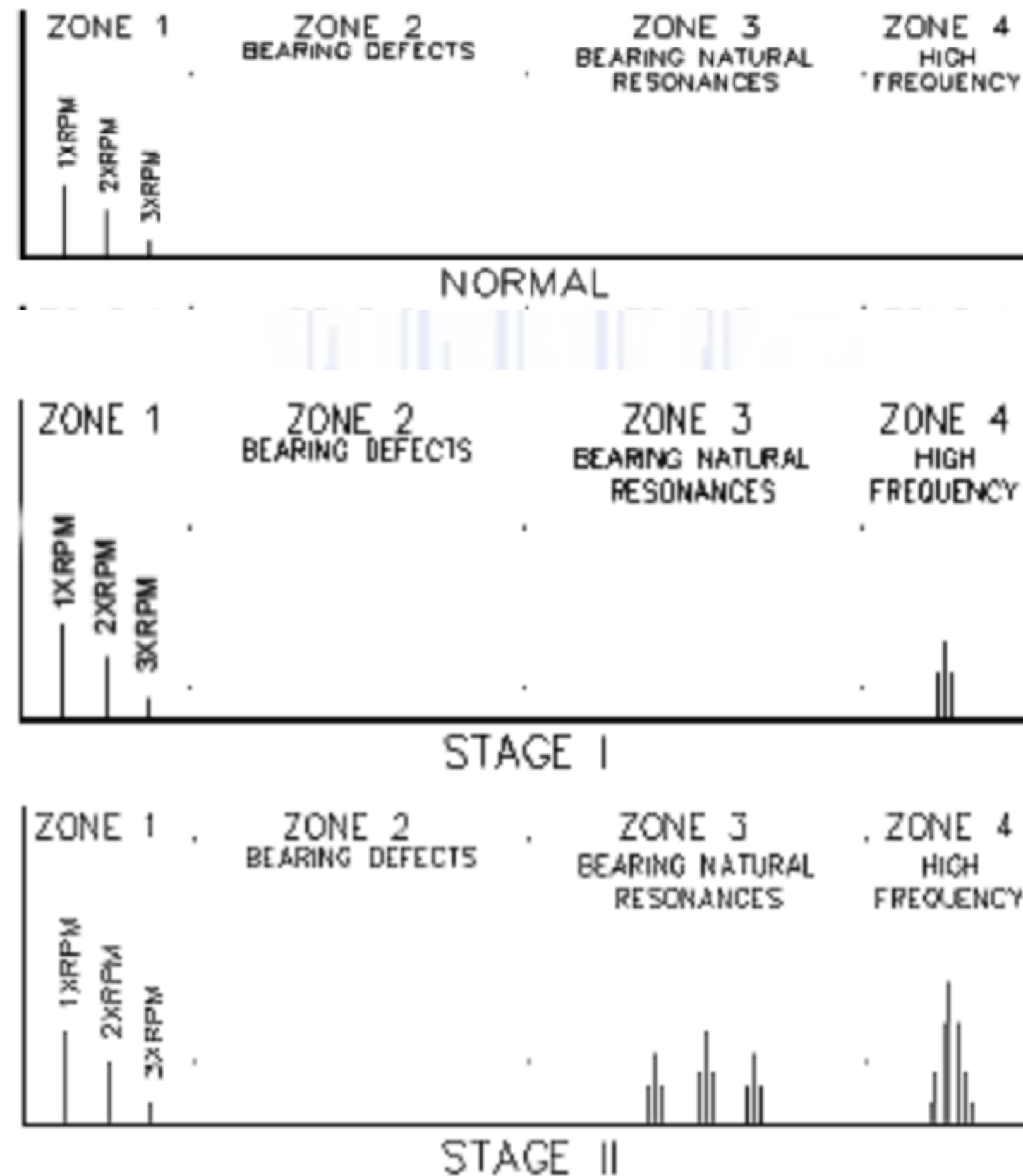
meccanica delle vibrazioni

laurea magistrale
ingegneria meccanica

parte 6.2
Manutenzione e Diagnosi

Il percorso è tracciato.. da sensore allo spettro,
Cosa cambia nel tempo?

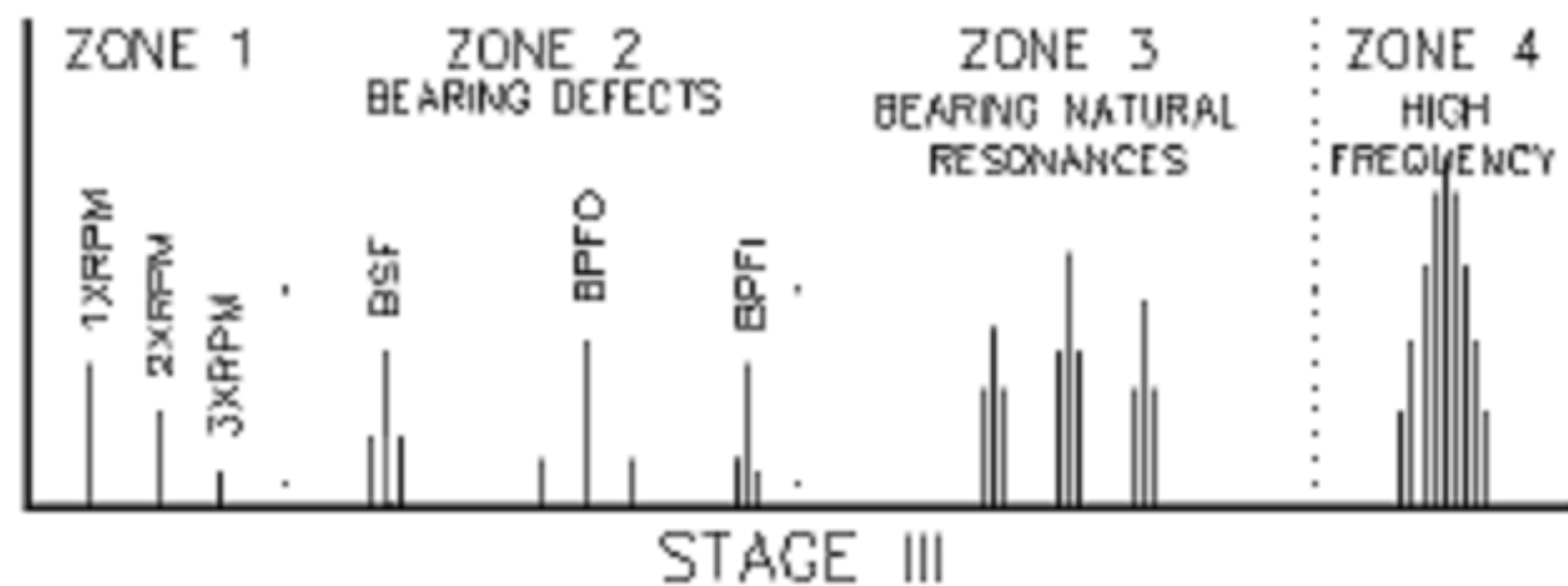
Ci sono diversi livelli di danneggiamento ciascun caratterizzato da tracce spettrali differenti



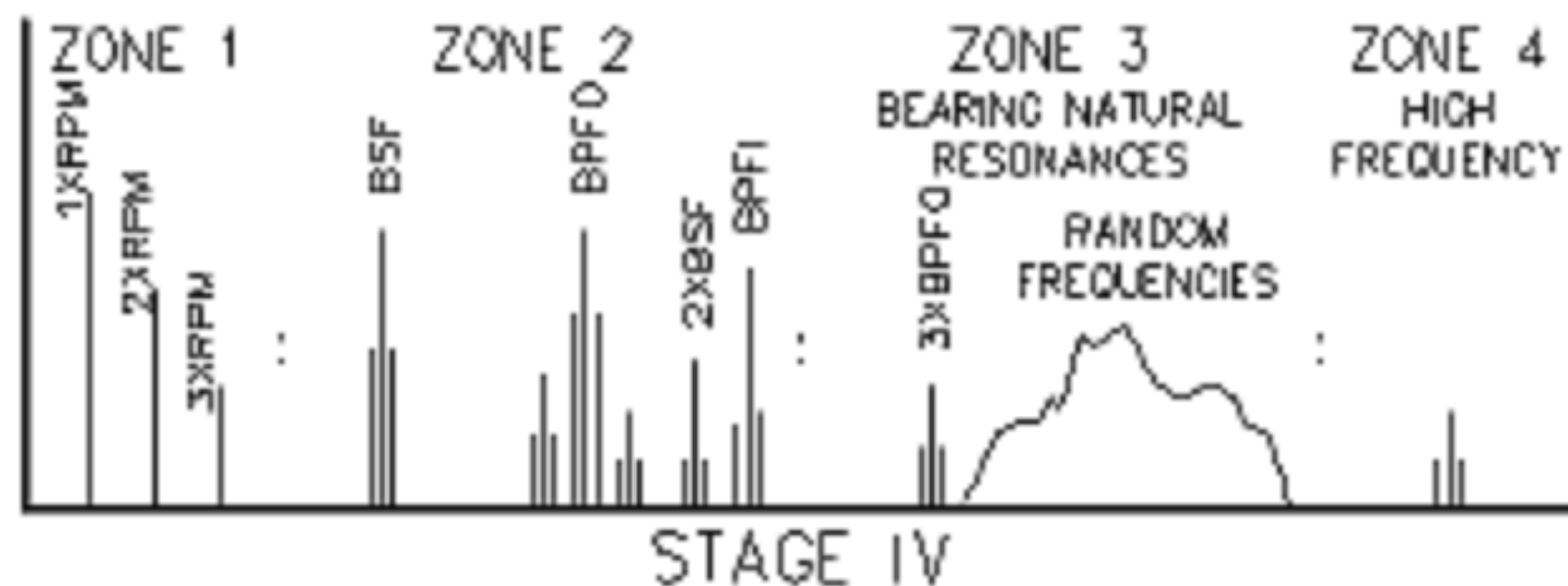
In condizioni di funzionamento normale
ci sono solo le componenti in frequenza della macchina
(c'è sempre un minimo di squilibrio, disallineamento,...)

Dopo un po' appaiono componenti ad altissima frequenza
rilevabili solo con sensori agli ultrasuoni.
Una ispezione sui cuscinetti non rileverebbe danni di sorta

Successivamente appaiono le frequenze naturali dei cuscinetti
cominciano a "cantare"
Una analisi sui cuscinetti rileverebbe dei giochi
e dei minimi danni



Appaiono le frequenze di danneggiamento caratteristiche con le loro armoniche e modulazioni, cresce la parte ad altissimi frequenza
Una analisi sui cuscinetti rileverebbe danni evidenti



Poco prima di una rottura catastrofica aumentano le frequenze di macchina, aumentano il numero di armoniche e modulazioni, i giochi diventano ampi ed le frequenze fondamentali si confondono in una zona molto ampia.
L'altissima frequenza ha una diminuzione di ampiezza evidente

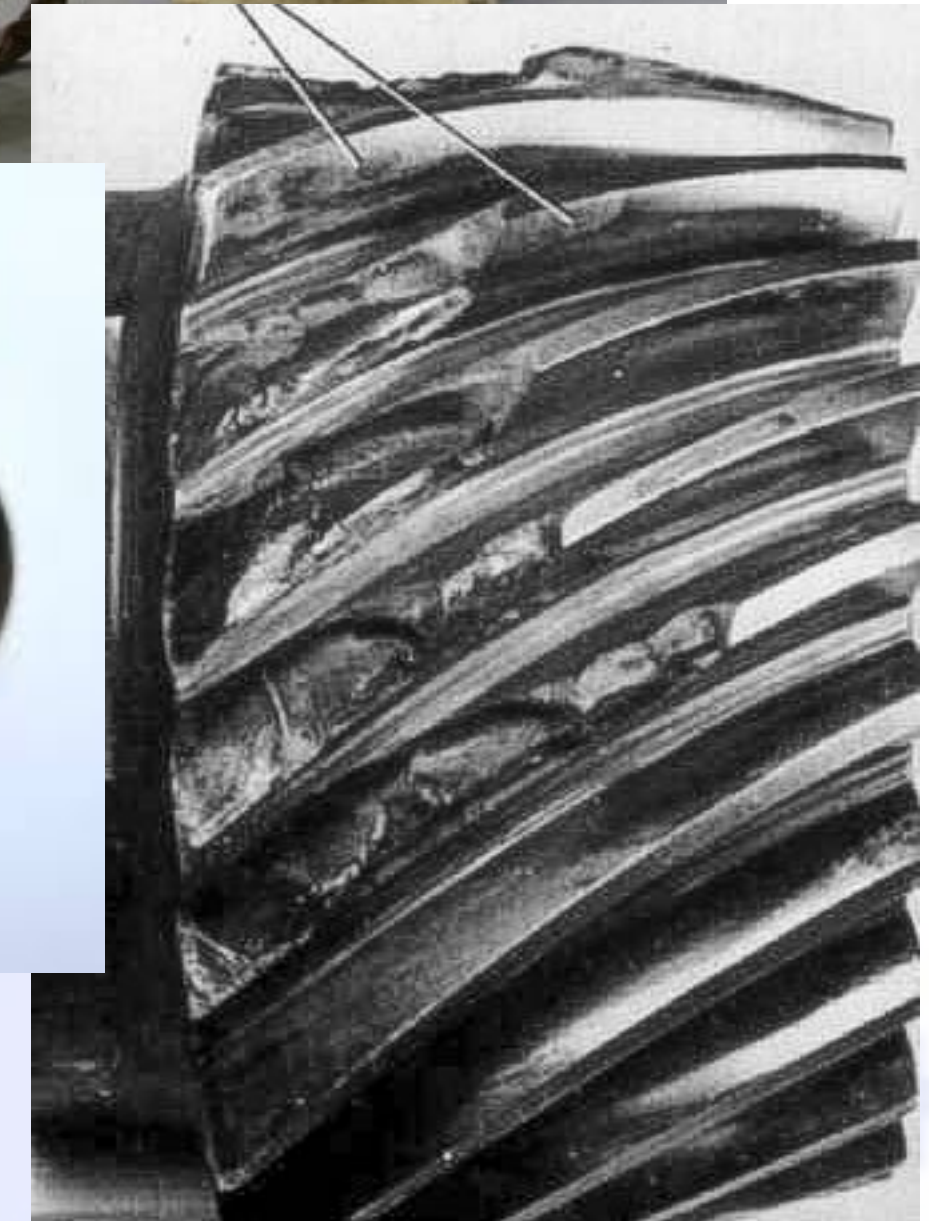
L'analisi dei cuscinetti non serve più..
è necessaria una sostituzione immediata!

..ma cosa si può monitorare, con sufficiente accuratezza e ripetibilità con l'analisi dei segnali vibrazionali nel dominio della frequenza?

..ecco una lista dei più comuni problemi analizzabili

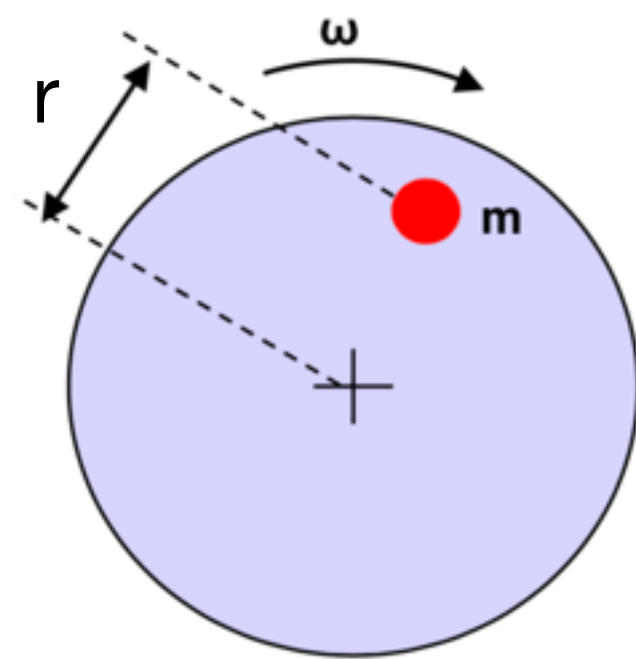
- Unbalance
- Misalignment
- Bent Shaft
- Loosensess
- Resonances
- Journal Bearing
- Rolling Bearing
- Blades&Vanes
- Hydraulic/aerodynamic force
- Belt drive
- Gear
- Electrical

- Cavitation*
- Shaft crack*
- Rotor rub*

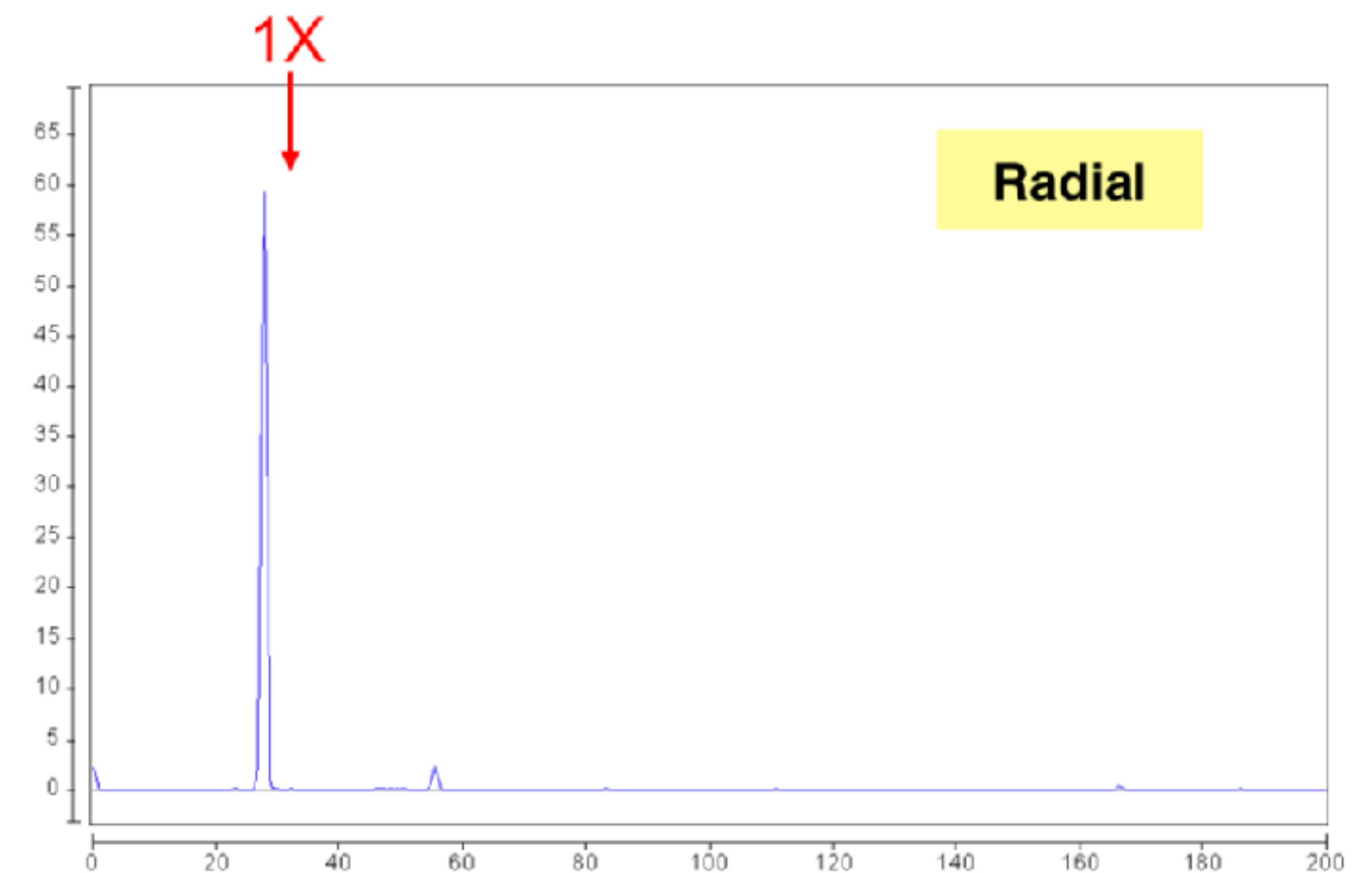
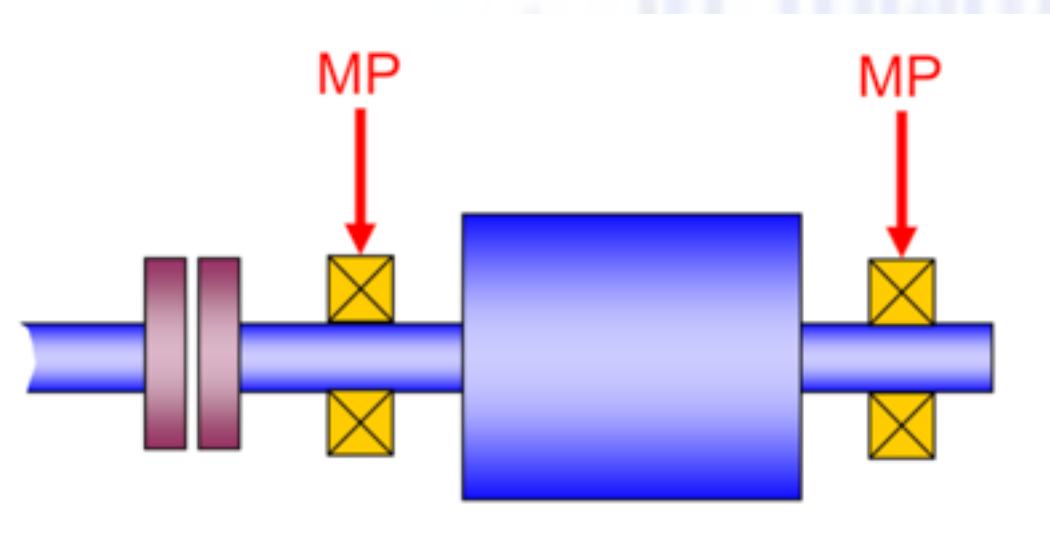


Squilibrio.. ogni rotore ha sempre un certo quantitativo di squilibrio residuo. questo genera una forza radiale F appare come una componente 1x con dominante in direzione radiale

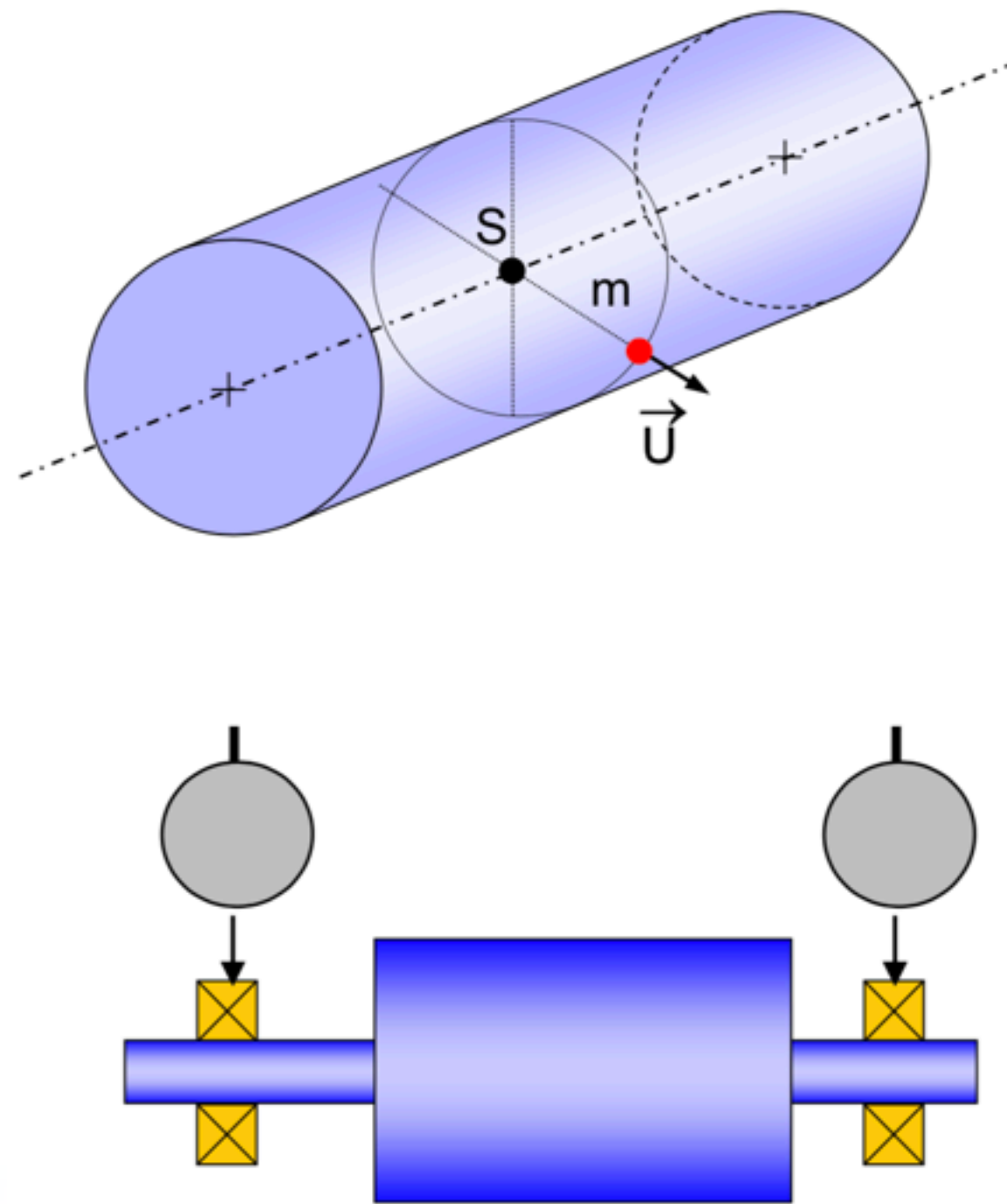
Dall'analisi della fase tra il segnale dei due supporti si identifica il tipo di squilibrio!



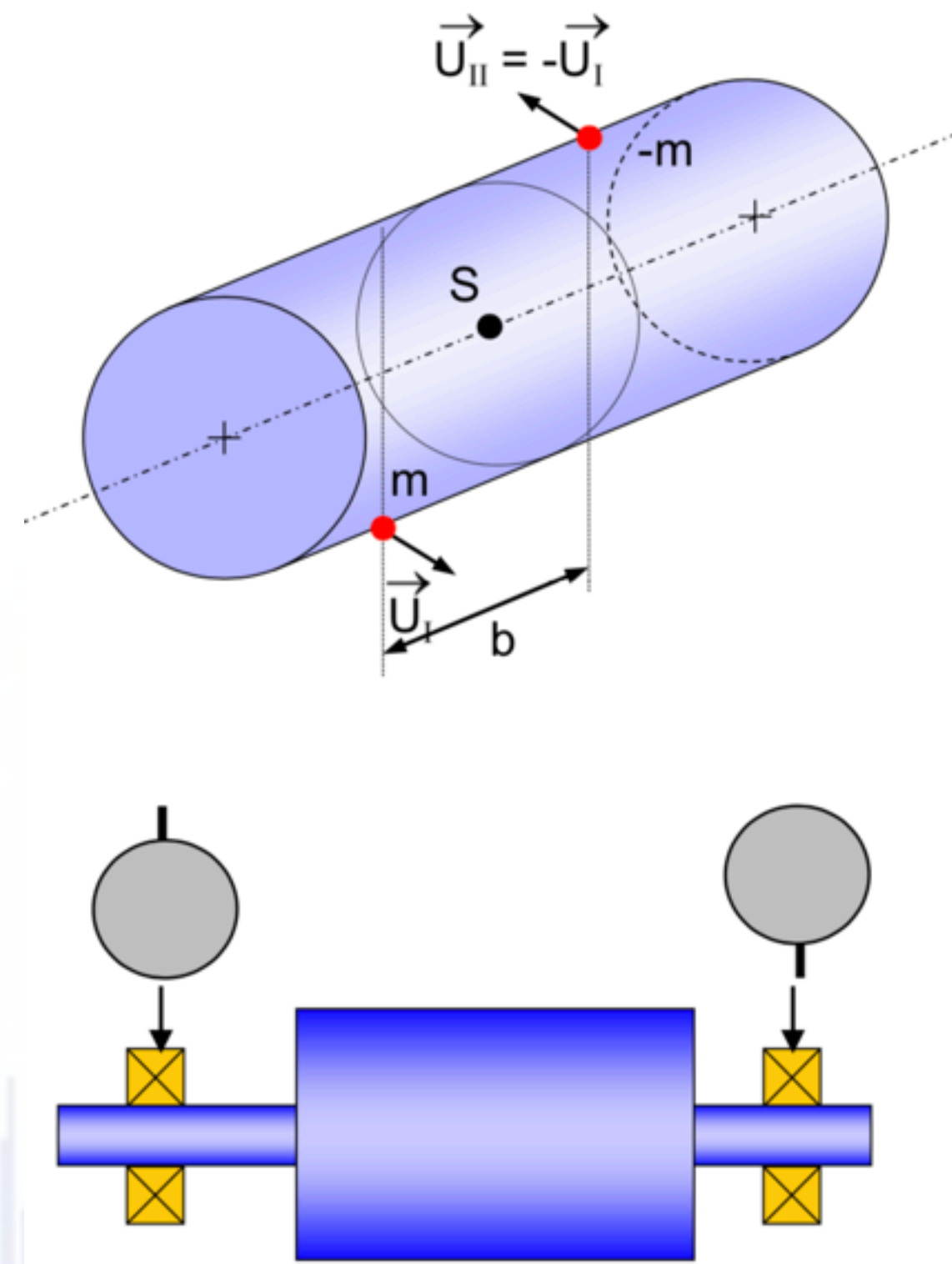
$$F = (mr)\omega^2$$



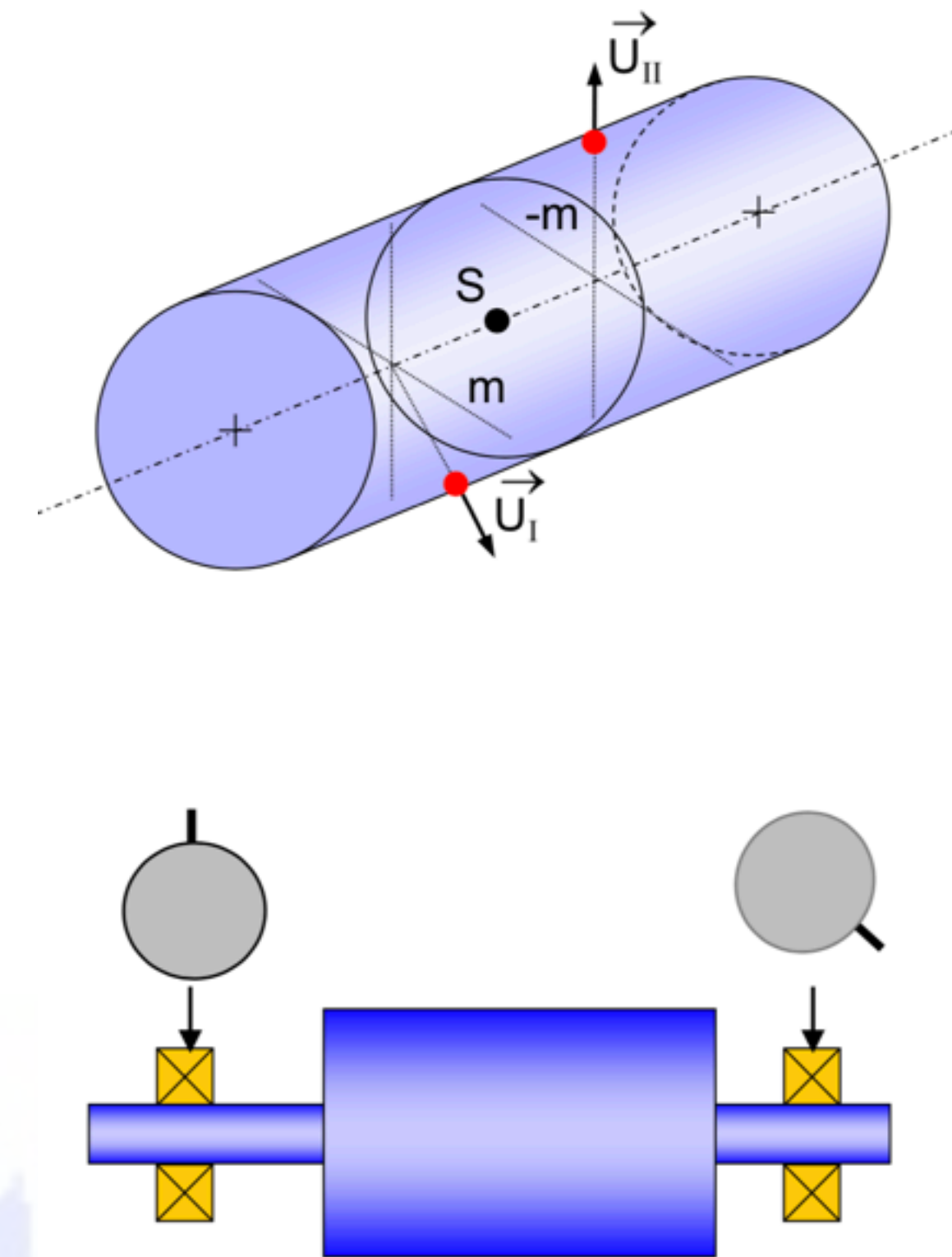
Squilibrio Statico



Squilibrio di Coppia

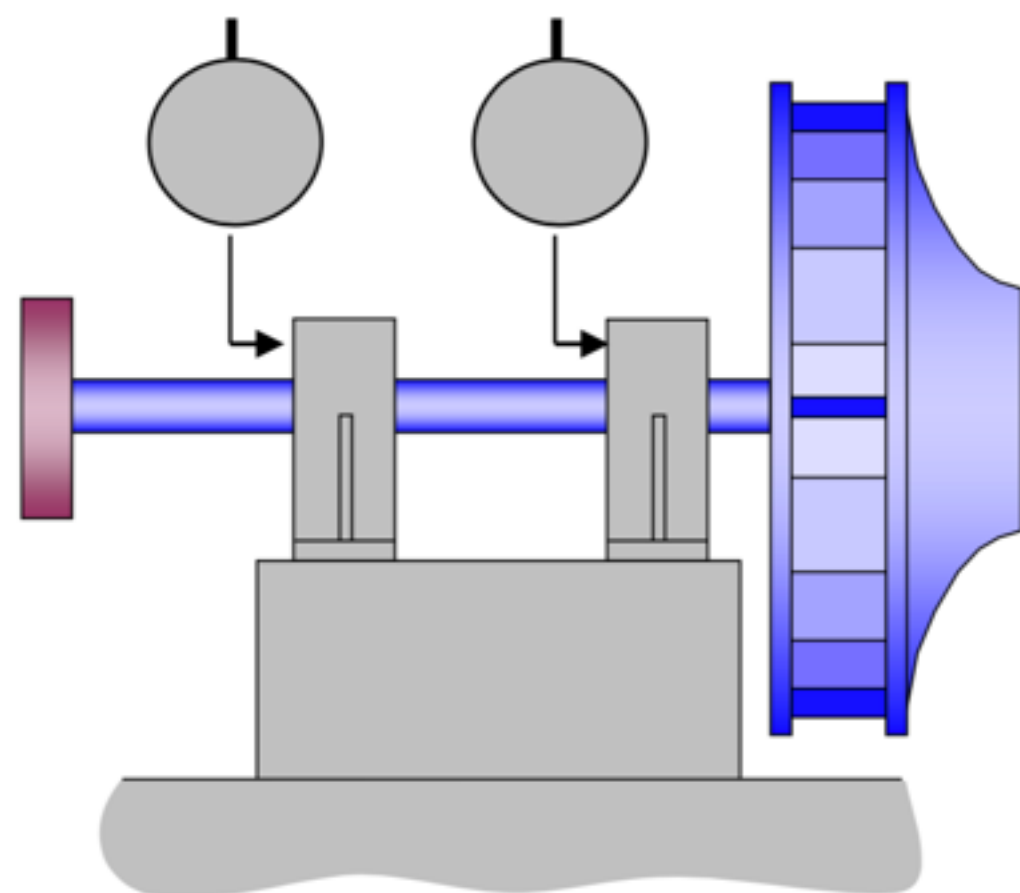


Squilibrio Dinamico

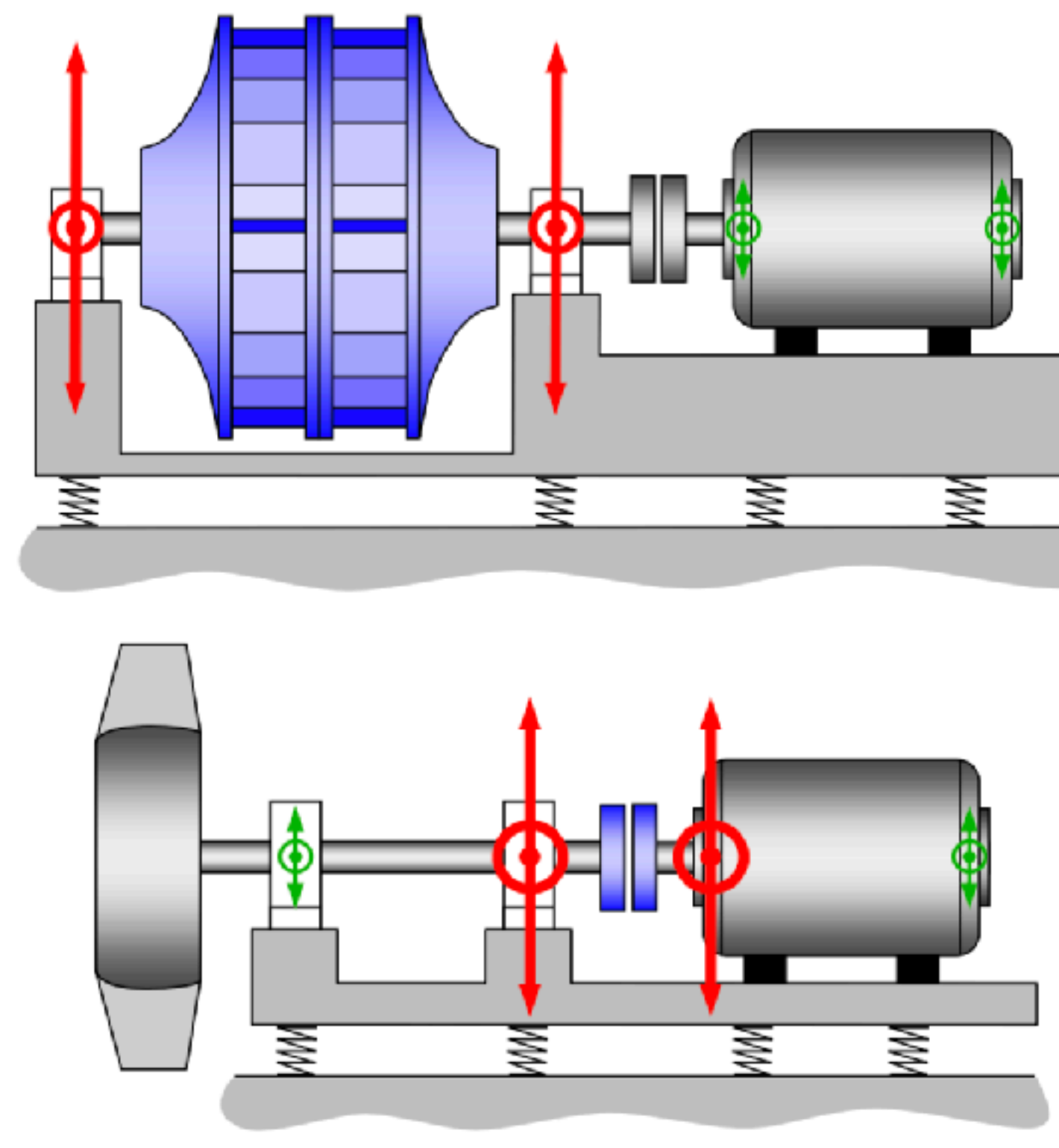


E' vietato ogni utilizzo diverso da quello inerente la preparazione dell'esame del corso di Meccanica delle Vibrazioni @Units
E' espressamente vietato l'utilizzo per qualsiasi scopo commerciale e/o di lucro

Il bilanciamento riduce l'ampiezza del picco nello spettro ma non ne modifica la posizione in frequenza



Se i rotori sono "a sbalzo" ci sarà una componente radiale dovuta alla flessione dell'albero

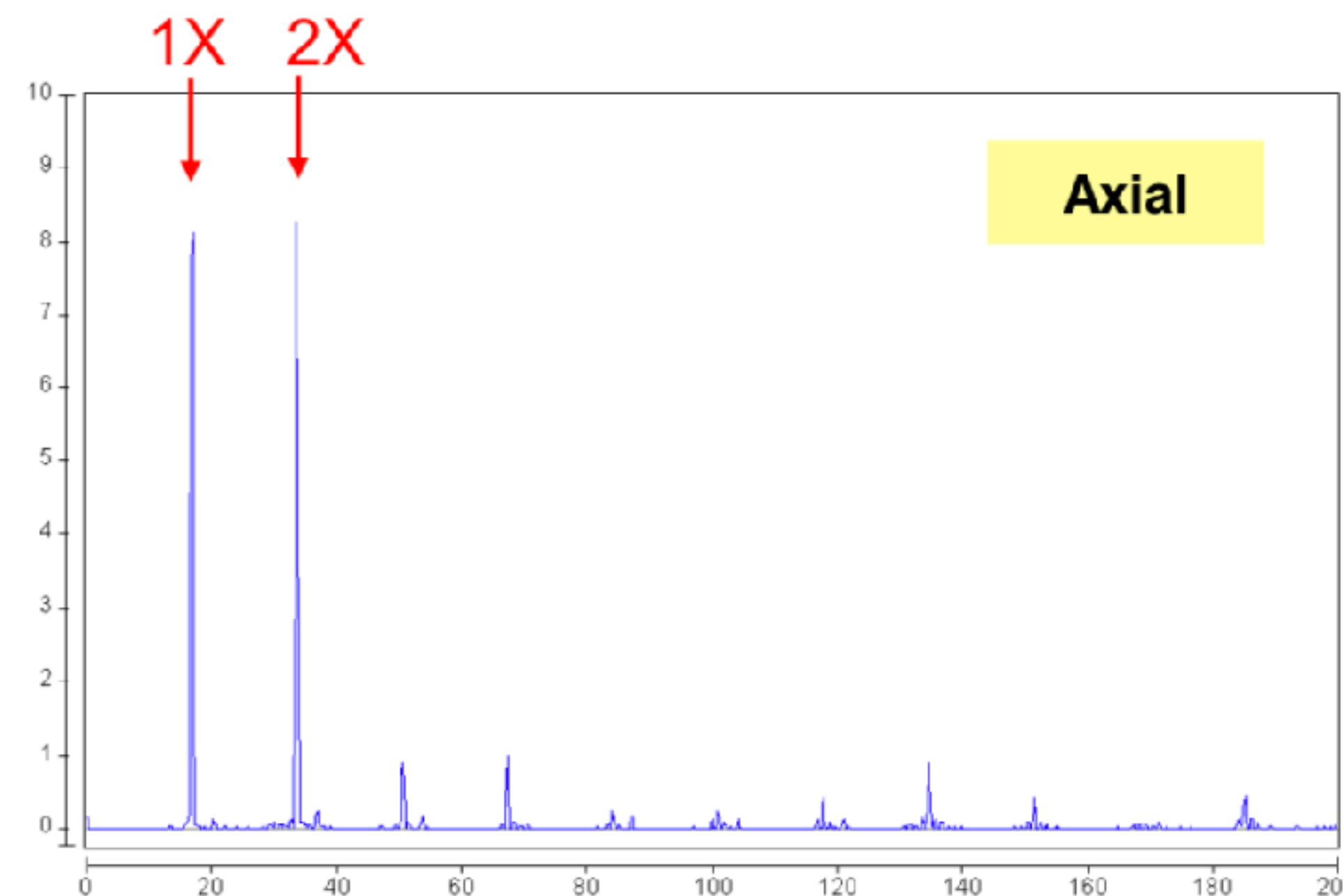
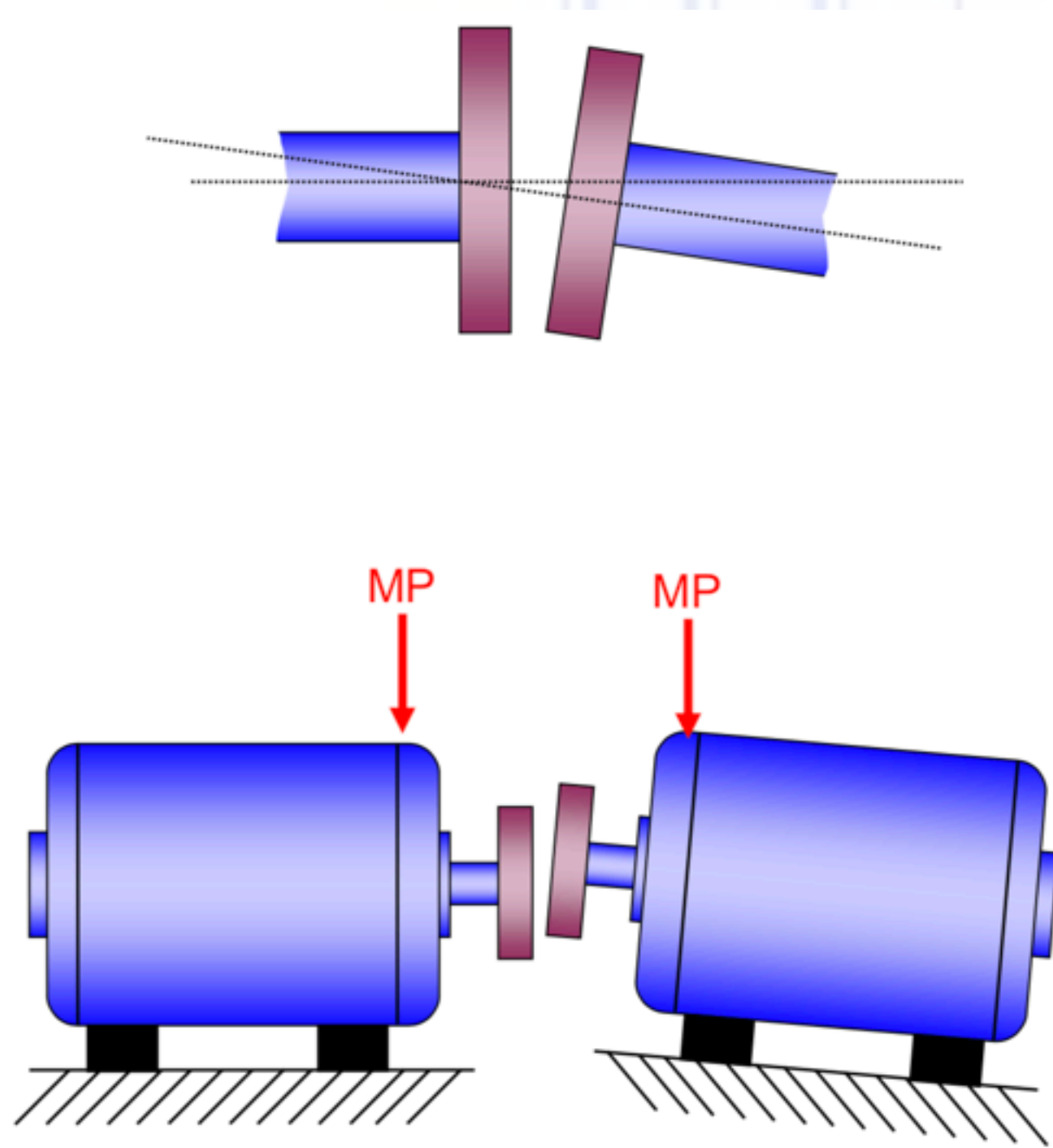


L'ampiezza relativa dei valori degli spettri dipende dalla posizione dell'elemento squilibrante

Disallineamento.. accade ogniqualvolta l'asse di rotazione di due macchine collegate non è coincidente!

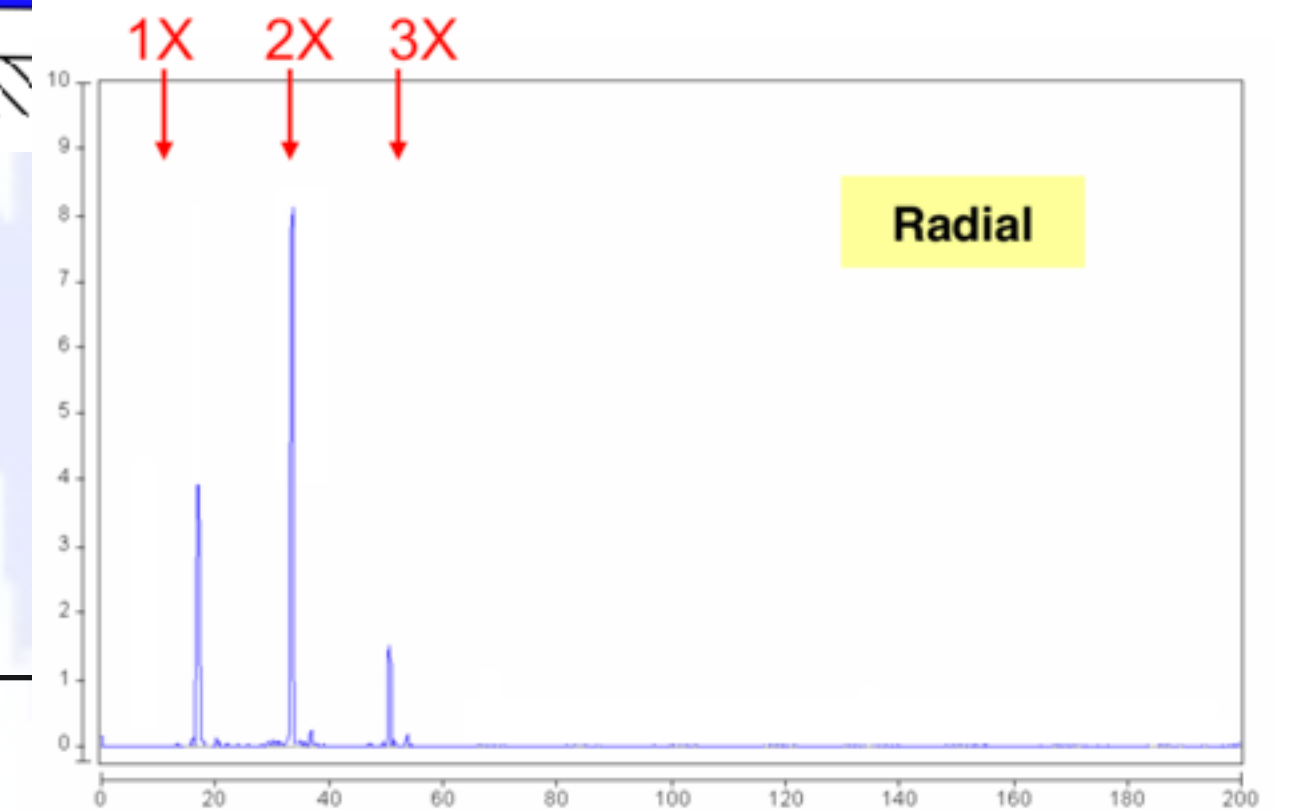
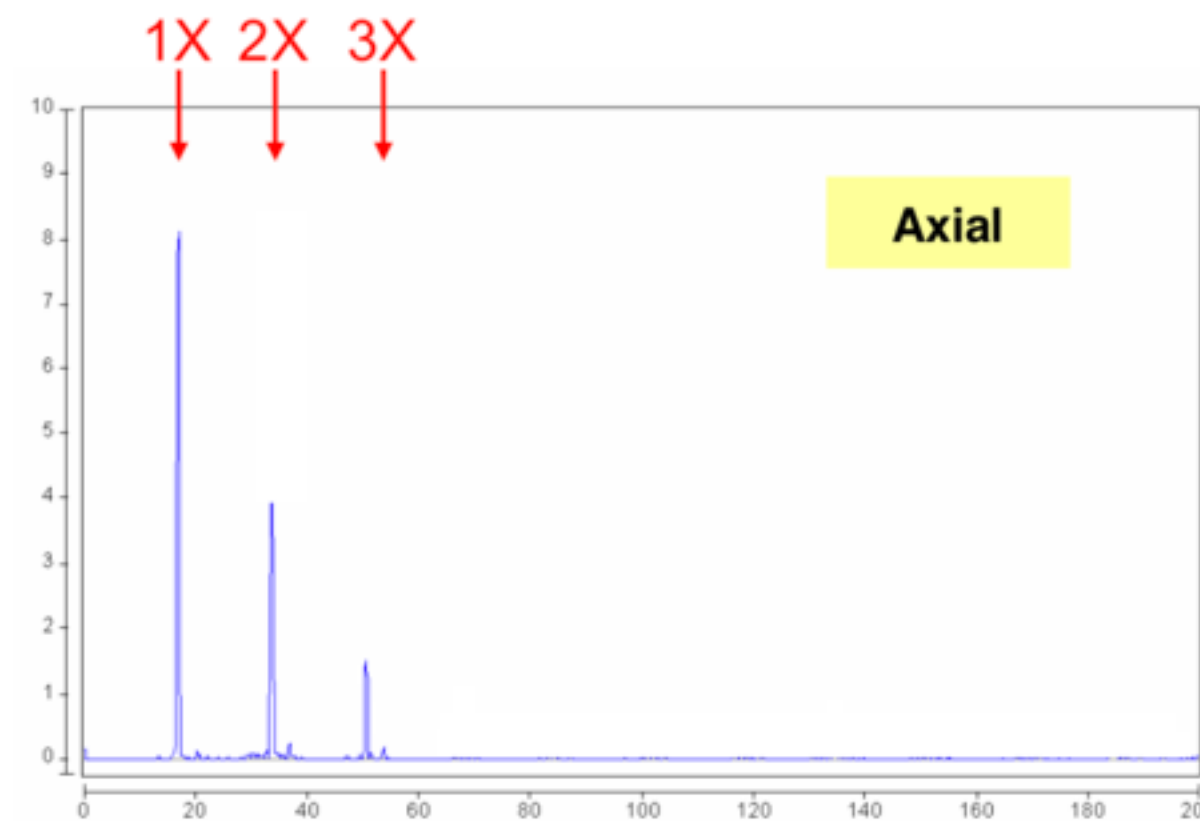
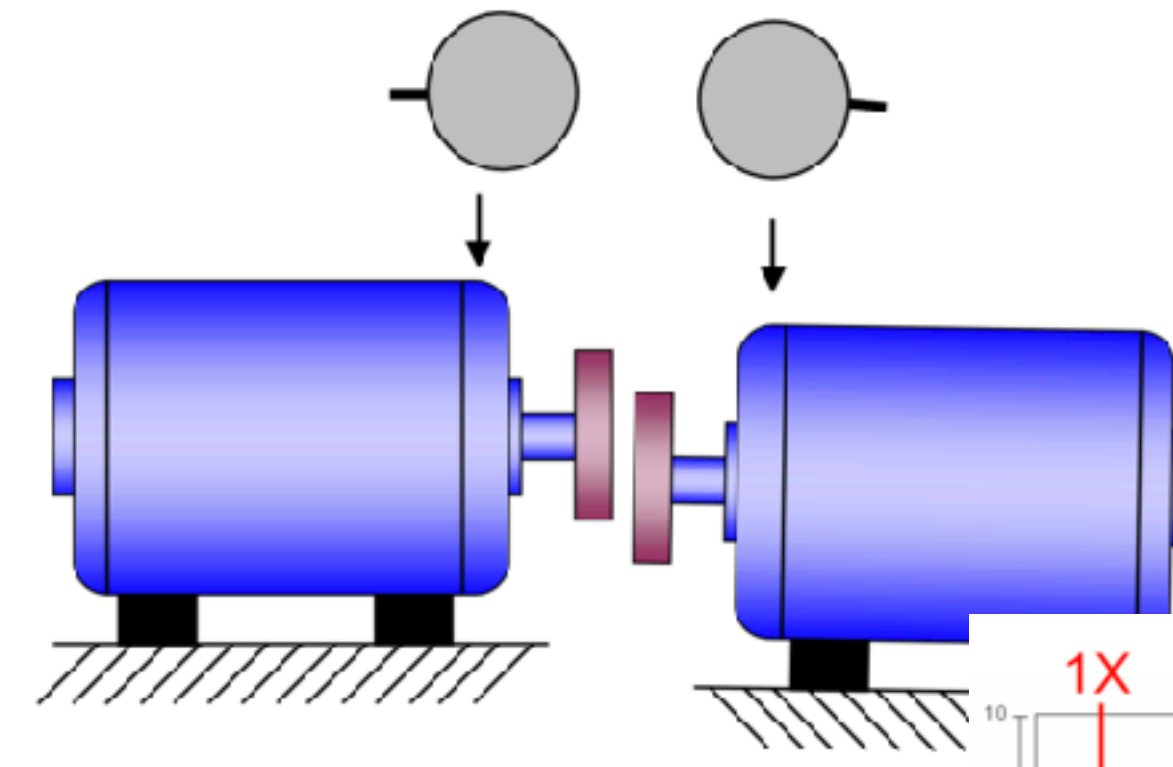
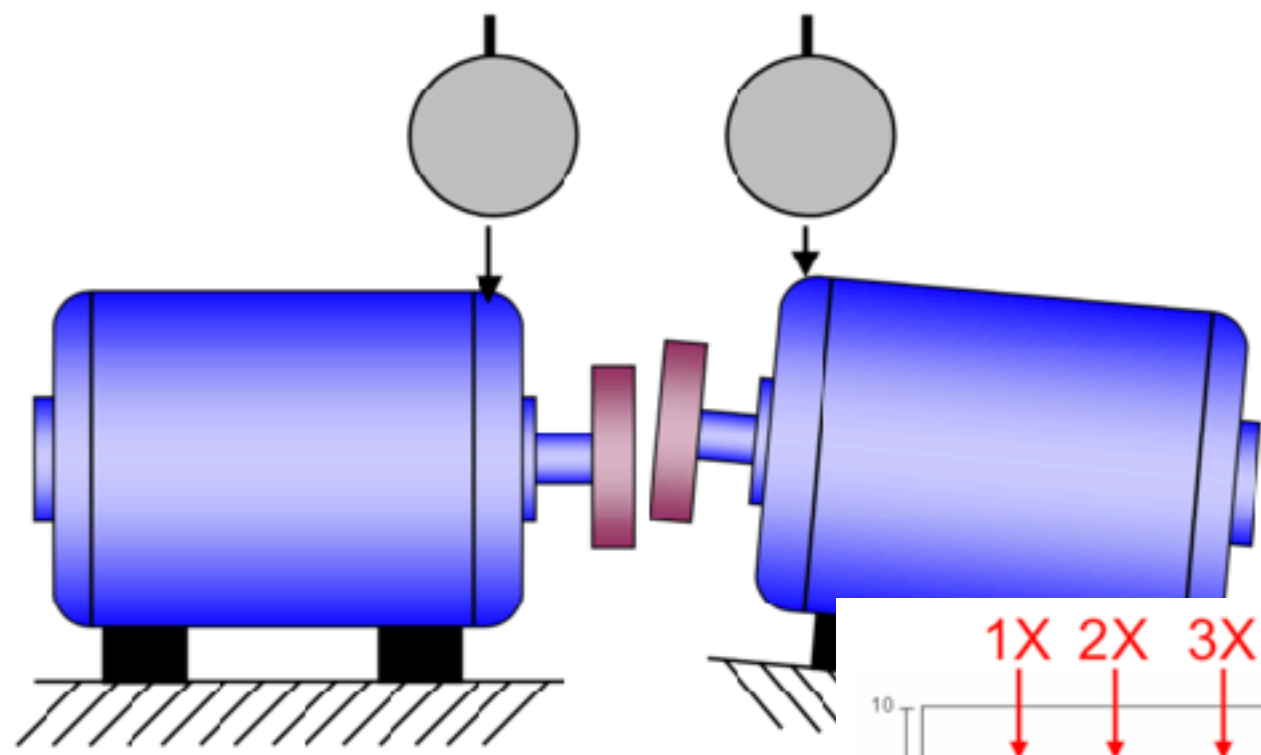
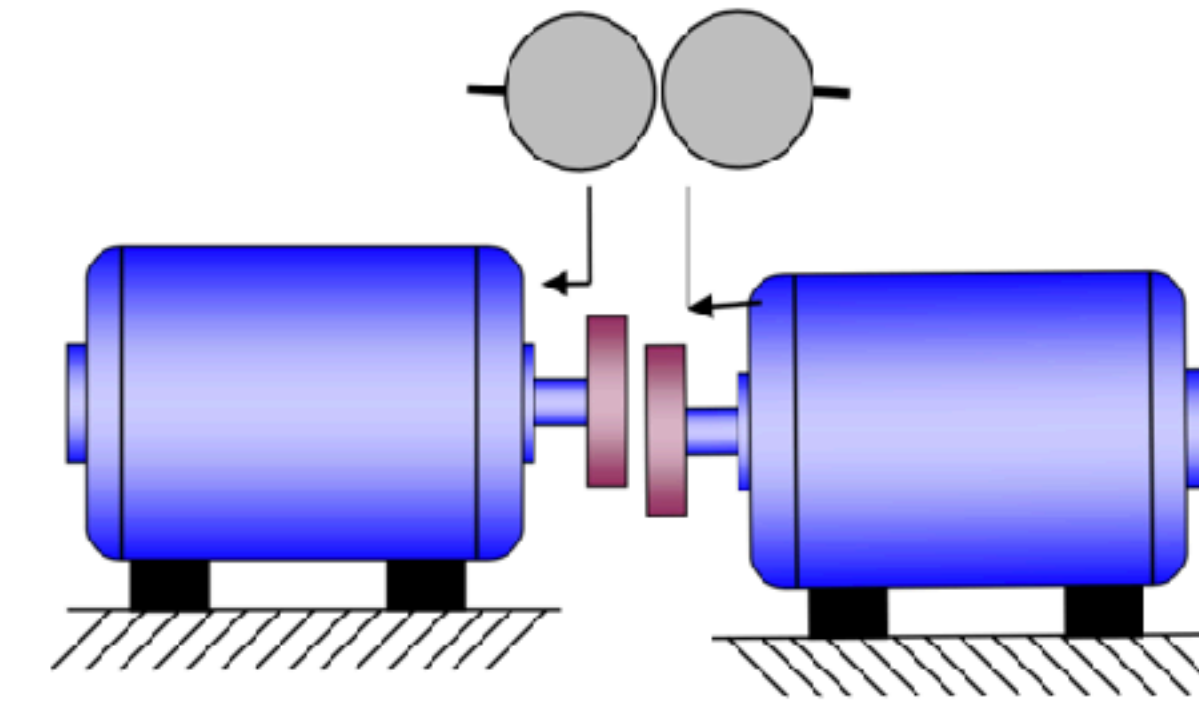
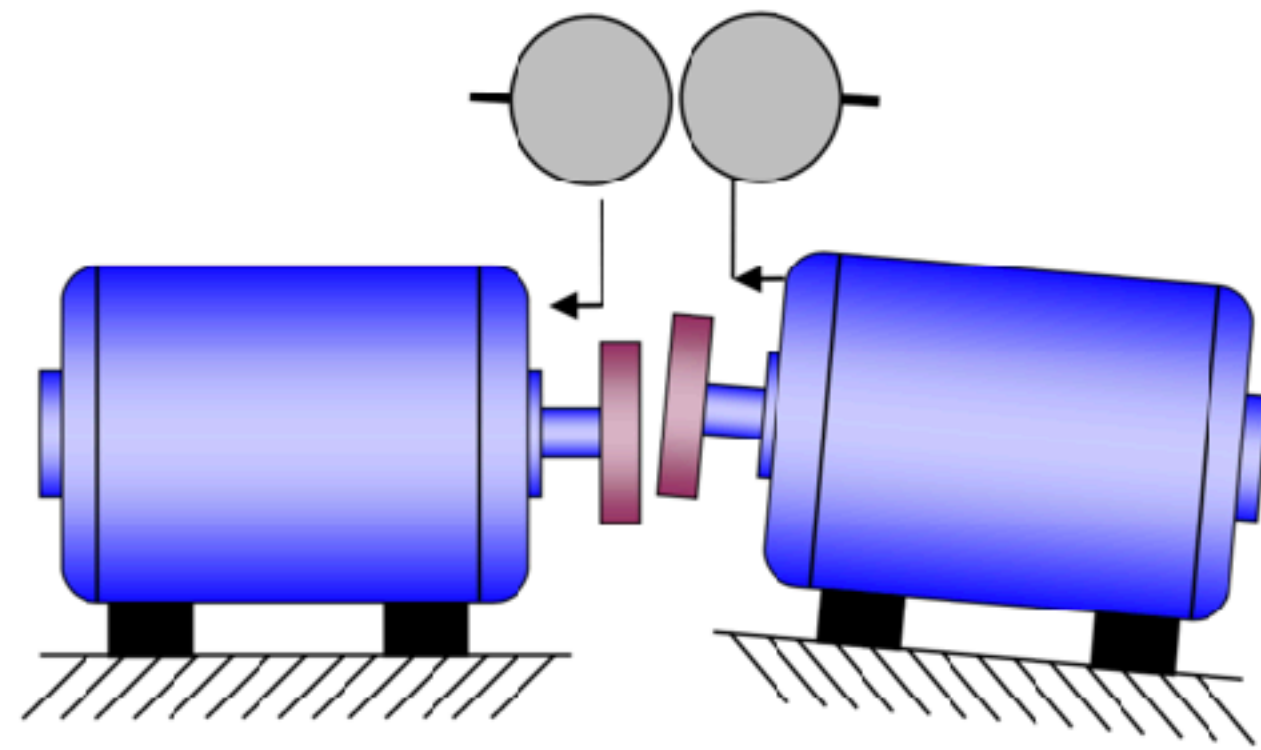
Solitamente compaiono in maniera predominante le componenti 1x e 2x in direzione assiale.

Dall'analisi dei segnali acquisiti ai due lati del giunto si identifica il tipo di disallineamento presente



Disallineamento Angolare

Disallineamento Parallelo



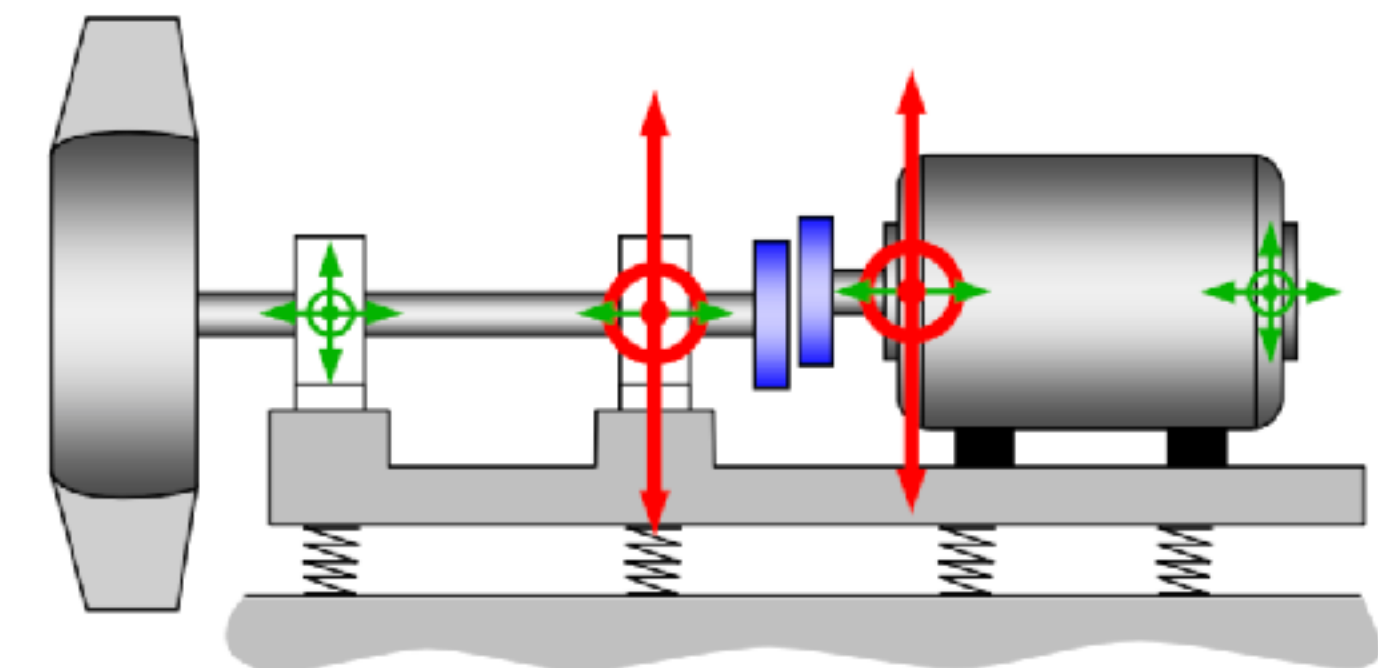
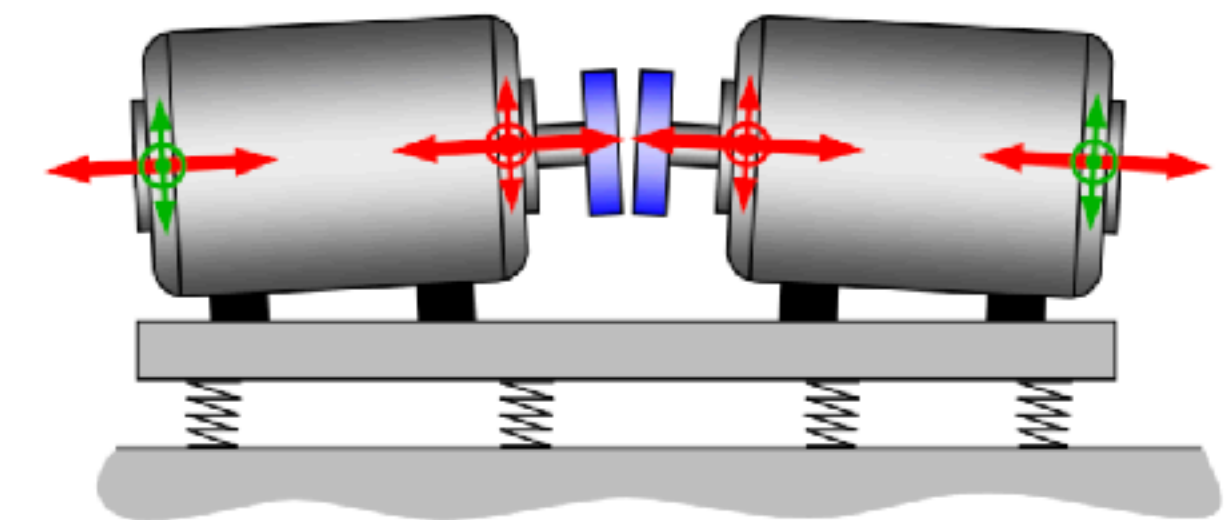
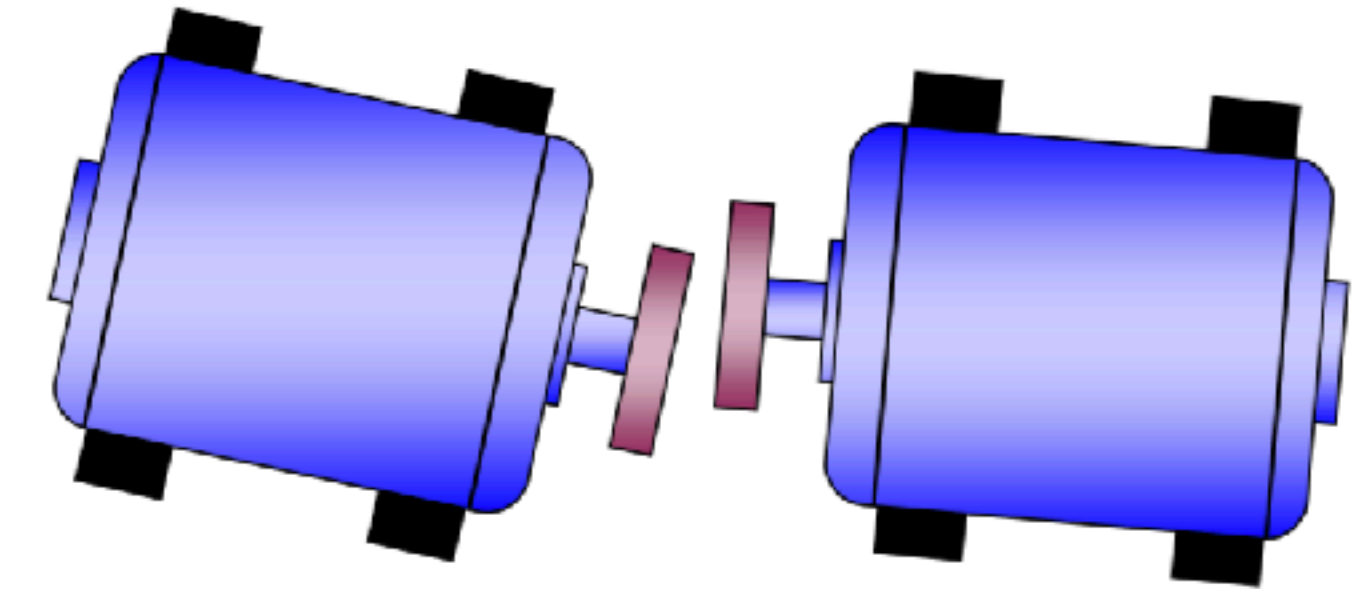
E' vietato ogni utilizzo diverso da quello inerente la preparazione dell'esame del corso di Meccanica delle Vibrazioni @Units
E' espressamente vietato l'utilizzo per qualsiasi scopo commerciale e/o di lucro



Disallineamento.. di solito è una combinazione dei precedenti!

Si distingue dallo squilibrio facendo test a differenti velocità o provando le macchine disaccoppiate!

La dilatazione termica può aumentare o diminuire il disallineamento.. attenzione come si fanno le misure

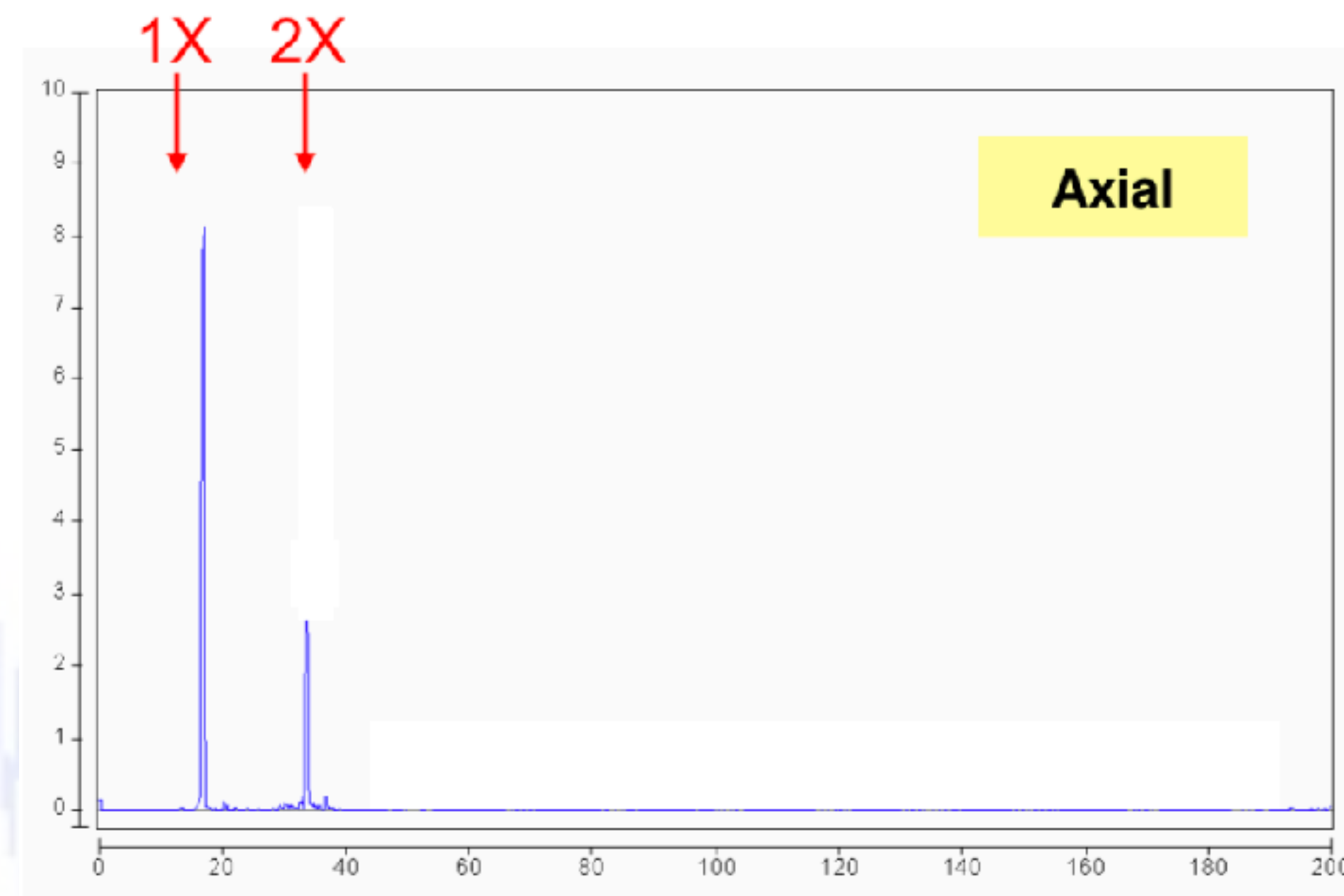
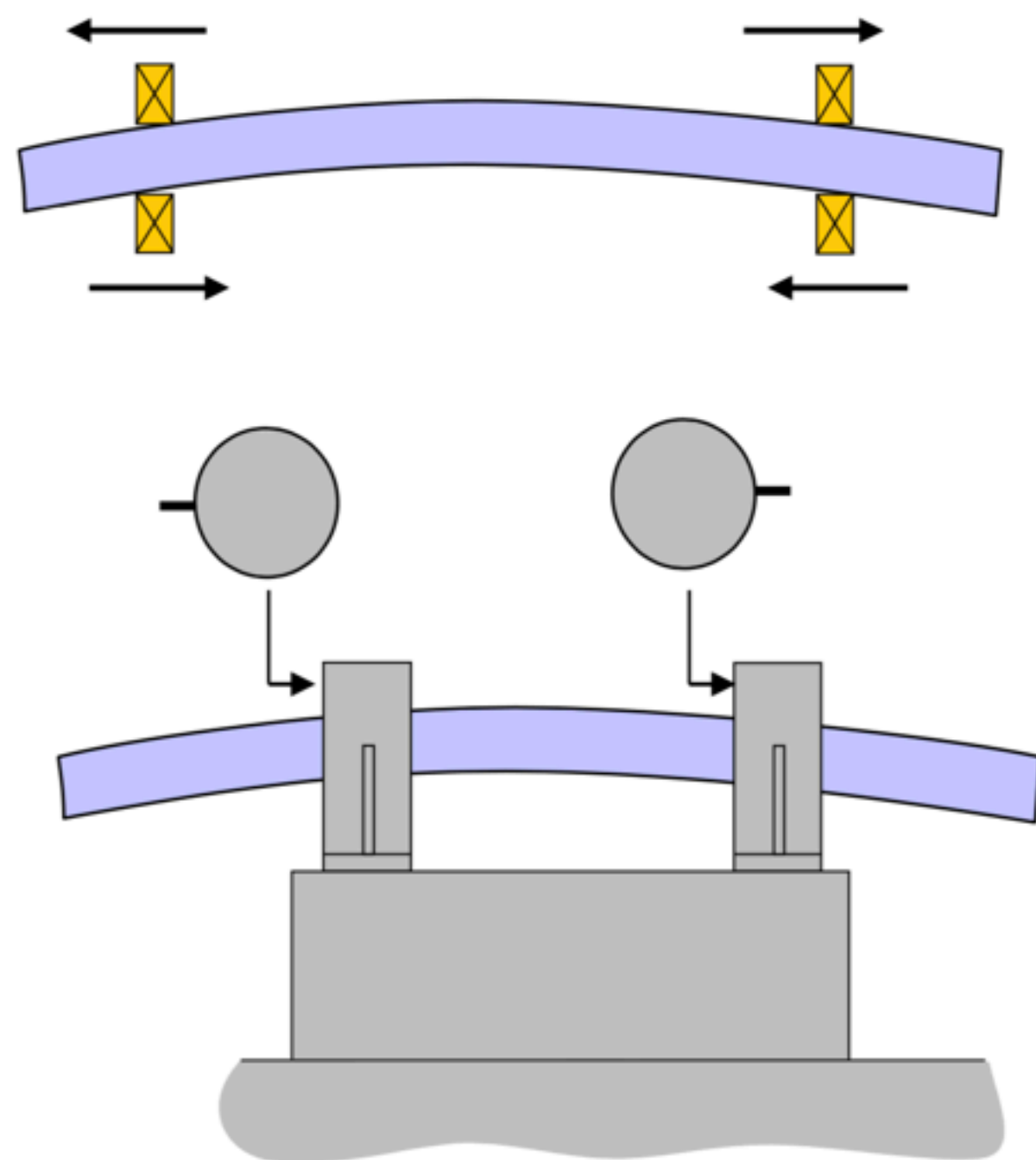


		Alignment Tolerance inch [mils] 😊	
		RPM	acceptable excellent
Short "flexible" couplings			
Offset 	900	6.0	3.0
	1200	4.0	2.5
	1800	3.0	2.0
	3600	1.5	1.0
Angularity (gap difference at coupling edge per 10" diameter) 	900	10.0	7.0
	1200	8.0	5.0
	1800	5.0	3.0
	3600	3.0	2.0
Spacer shafts and membrane (disk) couplings			
Offset (per inch spacer length) 	900	2.0	1.2
	1200	1.5	0.9
	1800	1.0	0.6
	3600	0.5	0.3
Angularity [mrad] 	900	2.0 [mrad]	1.2
	1200	1.5	0.9
	1800	1.0	0.6
	3600	0.5	0.3
Soft foot	any	2.0 mils	

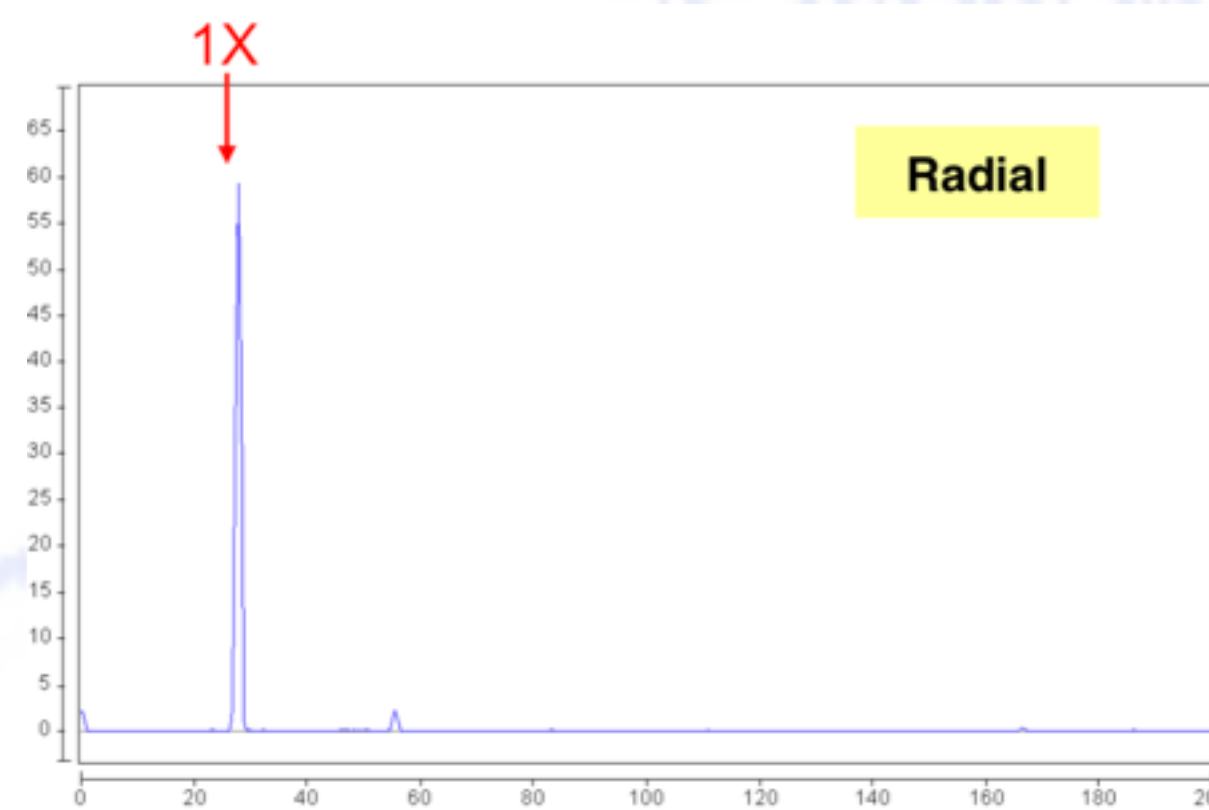
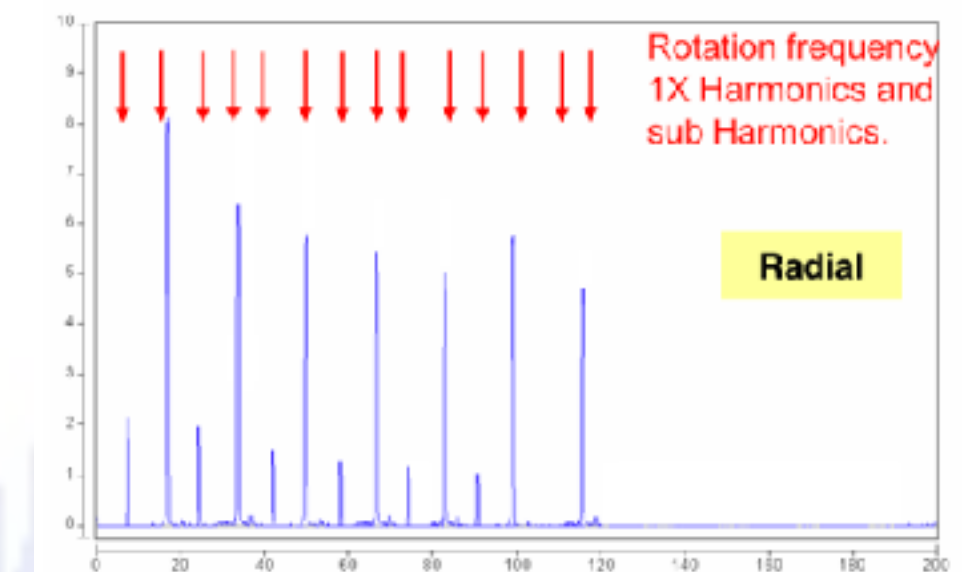
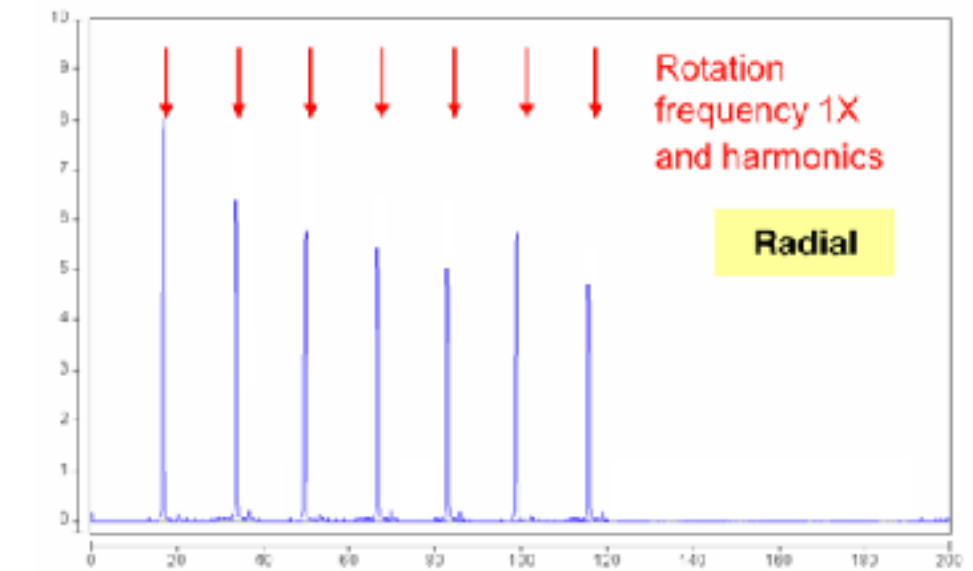
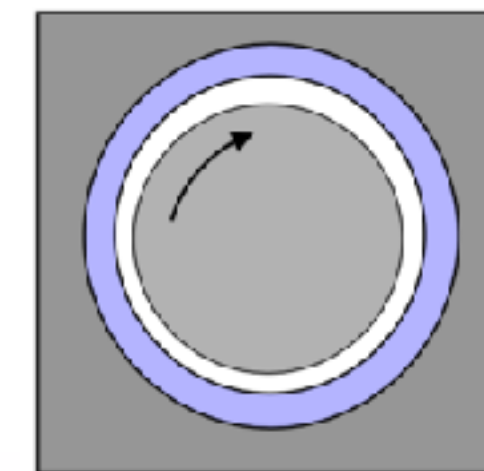
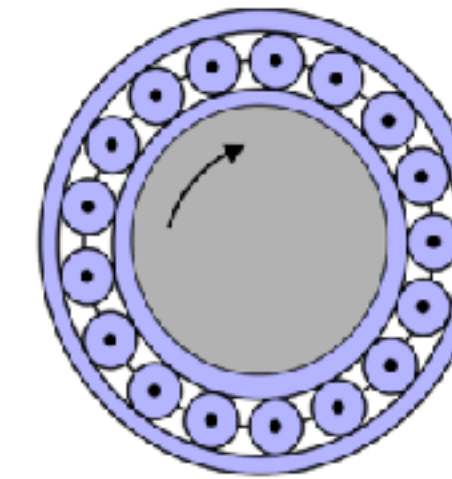
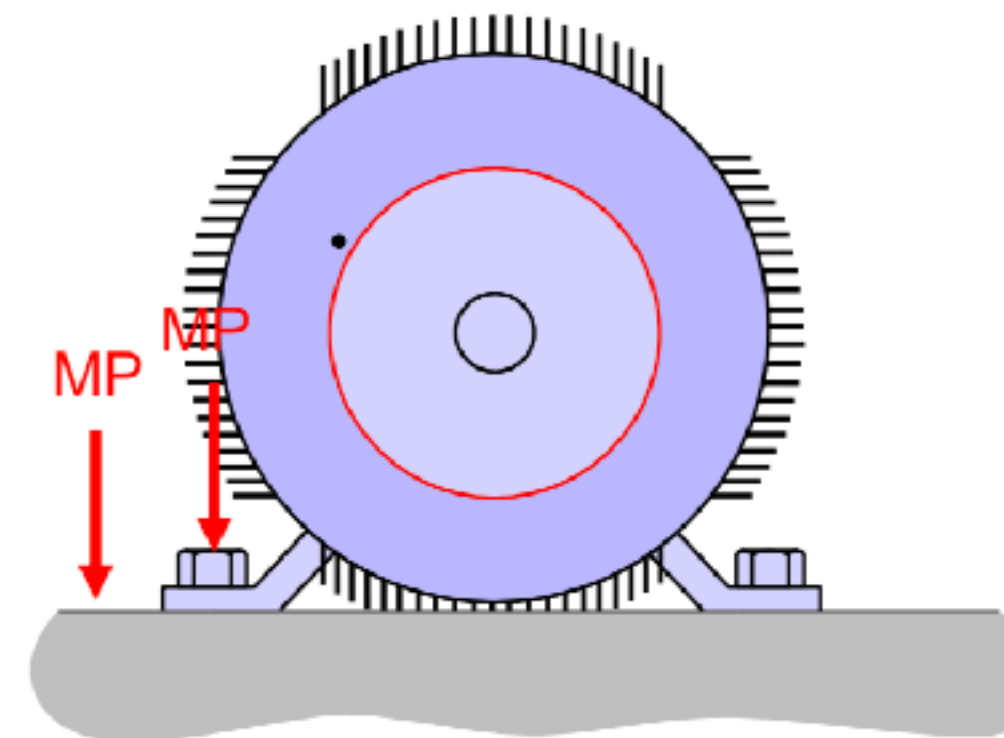
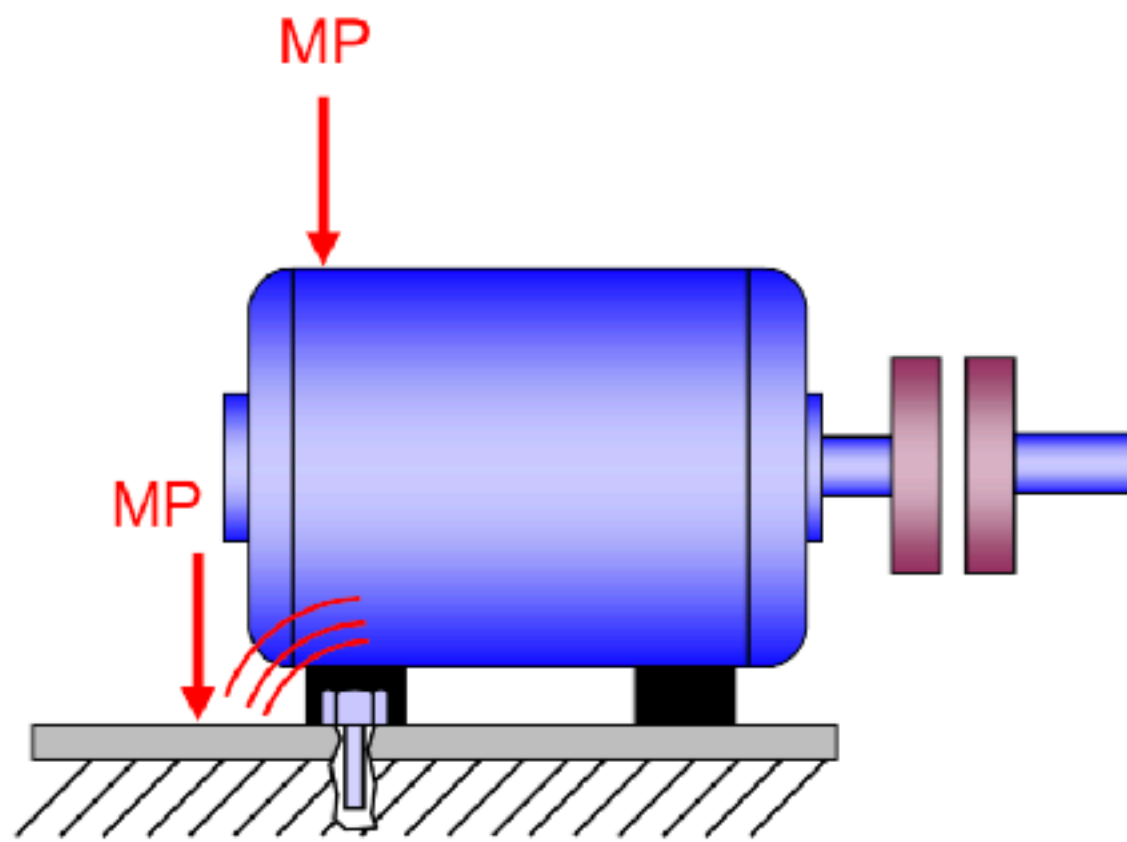
mils
= 1/1000 di pollice
= 0,0245 mm

Flessione dell' albero.. accade ogniqualvolta l'asse di rotazione non è rettilineo
 Può essere congenito con l'albero, o imposto da carichi esterni.

I supporti sono eccitati assialmente ed in controfase



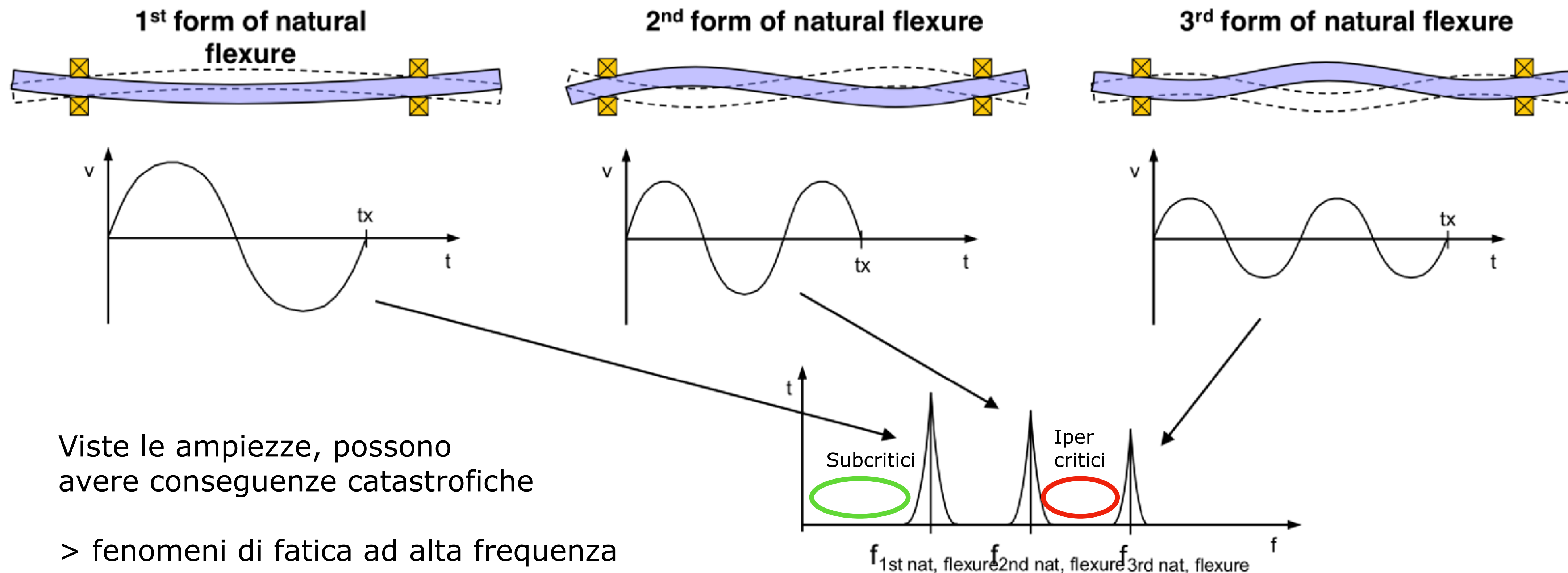
Allentamenti.. possono essere di diversi tipi, degli organi interni alla macchina (cuscinetto) o nelle connessione tra la macchina ed il resto del mondo



Soft foot:
allentamenti, cedimenti della base
misurare la macchina e la fondazione
Saranno in fase o in opposizione?

Membri interni:
armoniche e sub-armoniche

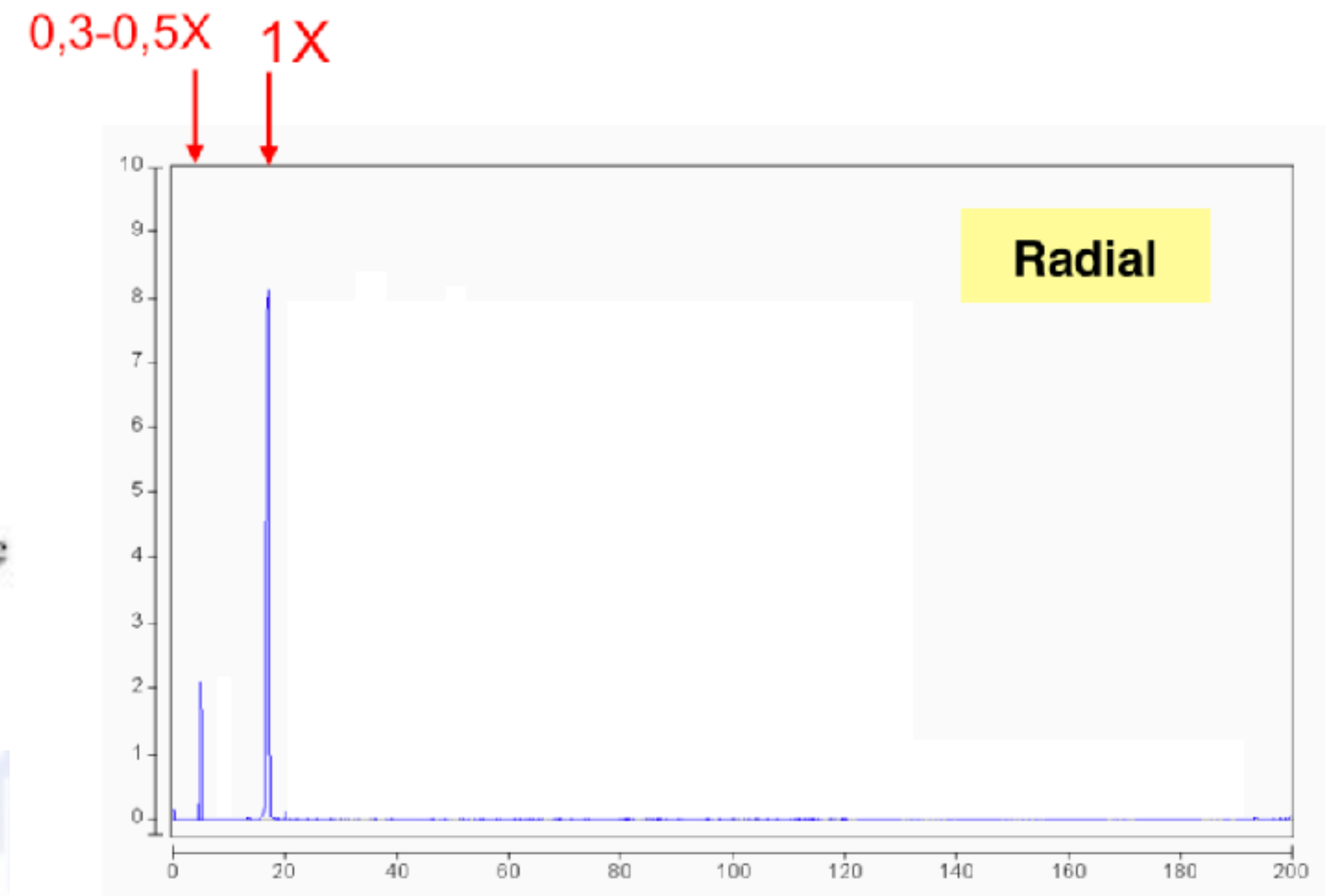
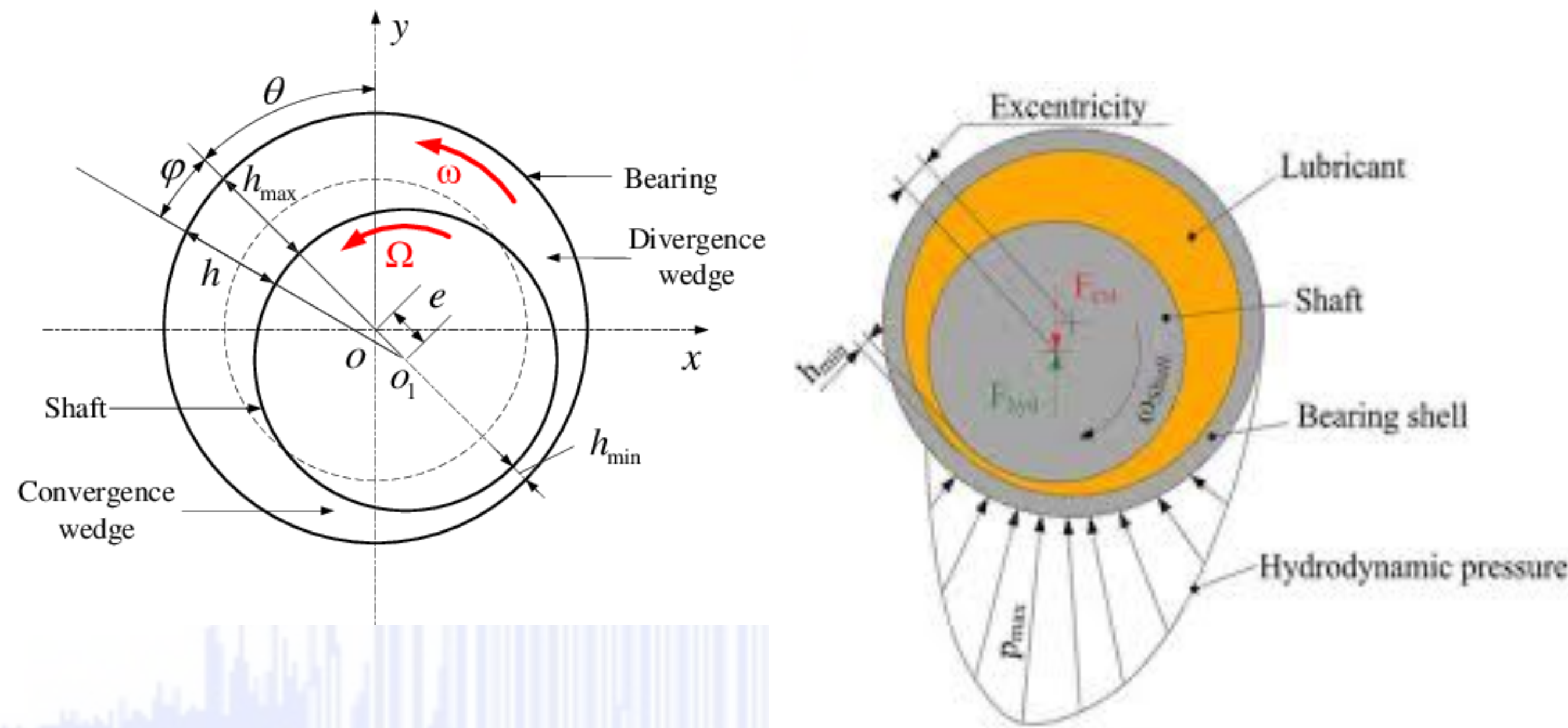
Risonanze.. ogniqualvolta una forzante eccita una risonanza del sistema, genererà elevati livelli di vibrazioni (le risonanze non hanno relazione armonica!)



Cuscinetti Idrodinamici.. nei cuscinetti è il lubrificante nel meato (convergente divergente) che supporta il carico.

Si instaurano movimenti a bassa frequenza correlati al movimento dell'albero nella sede ed alla continua instabilità del meato.

Le sub-armoniche sono tipiche !!

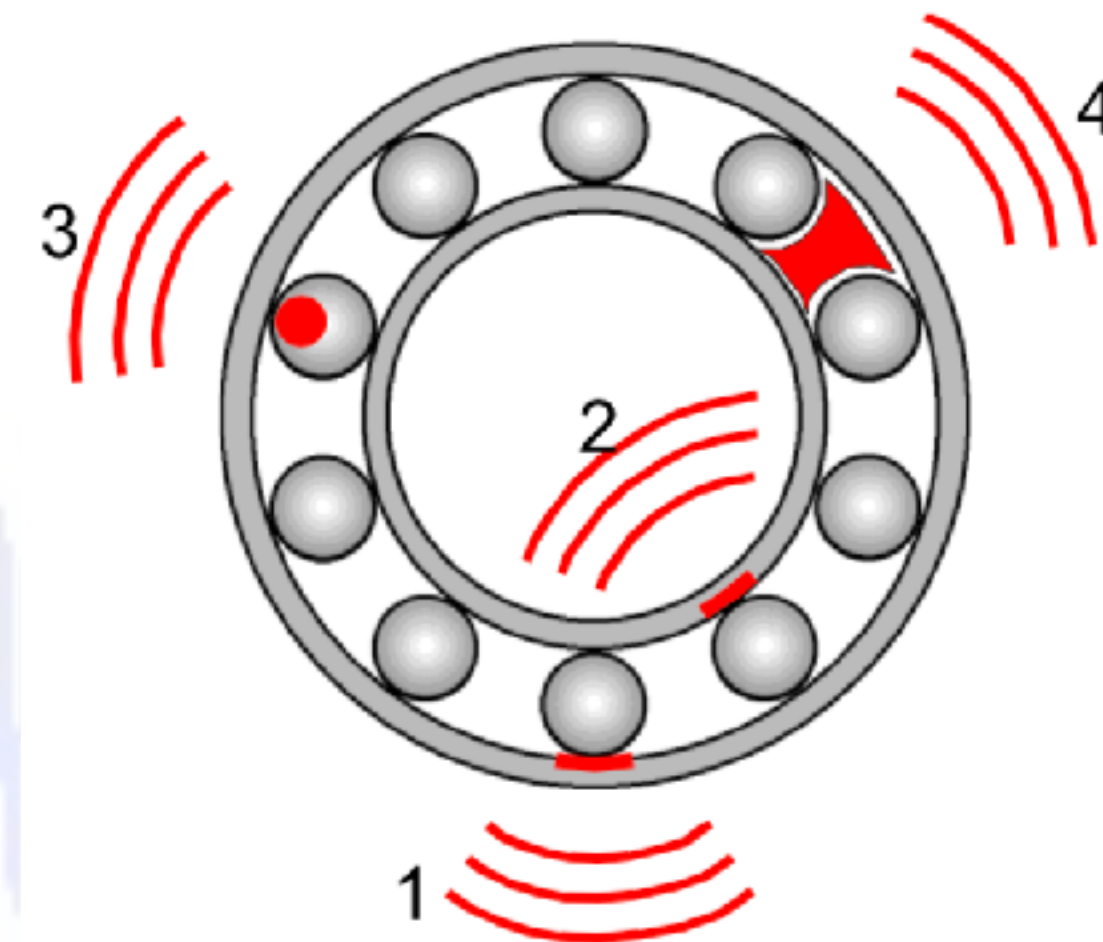
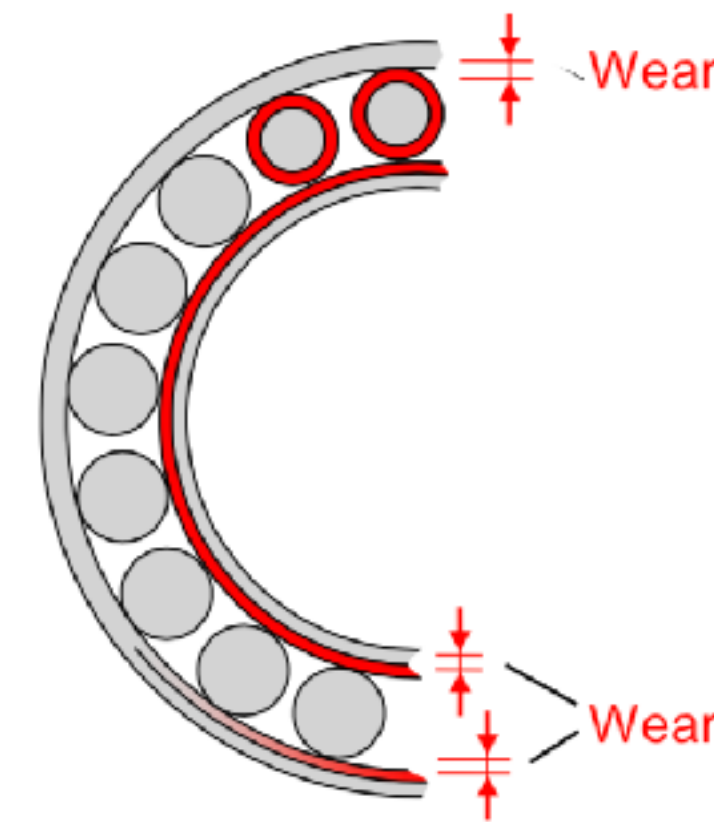


Cuscinetti volventi.. nei cuscinetti a strisciamento si instaurano diversi fenomeni che possono cambiare l'impronta vibrazione registrata

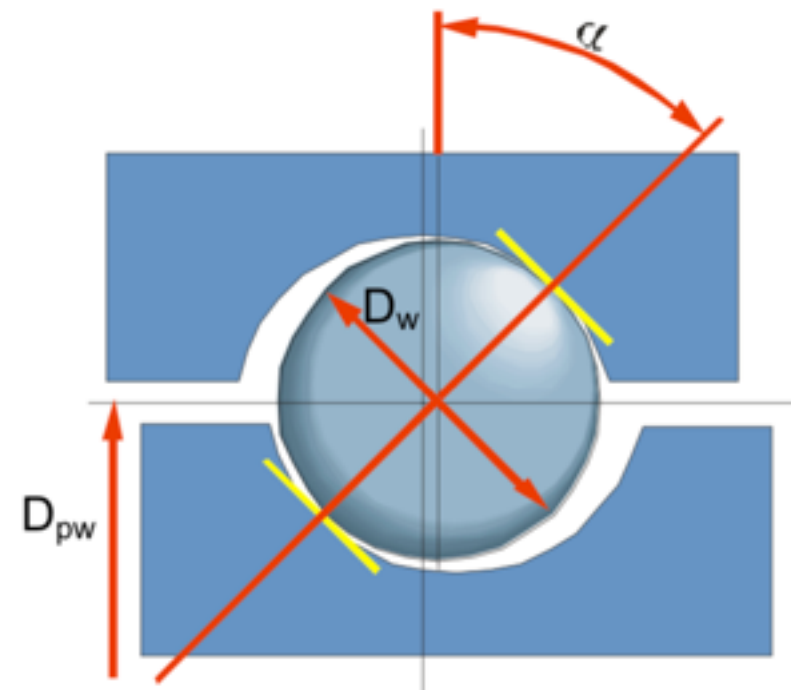
In generale c'è usura con conseguente aumento dei giochi, che fa aumentare le vibrazioni. Questa è dovuto a sovraccarichi, a sbagliati dimensionanti e montaggi a mancanza di lubrificazione

..

In seconda battuta ci sono di danneggiamenti delle parti (piste interne o esterne, elementi volventi, gabbie) ciascuno associato alla geometria del cuscinetto ed alla sua cinematica



Cuscinetti volventi.. i calcoli sono non sono troppo complessi, ma richiedono la precisa conoscenza della geometria e delle dimensioni delle parti



Più facile è sfruttare i calcolatori di frequenza messi a disposizione dei produttori dei cuscinetti stessi

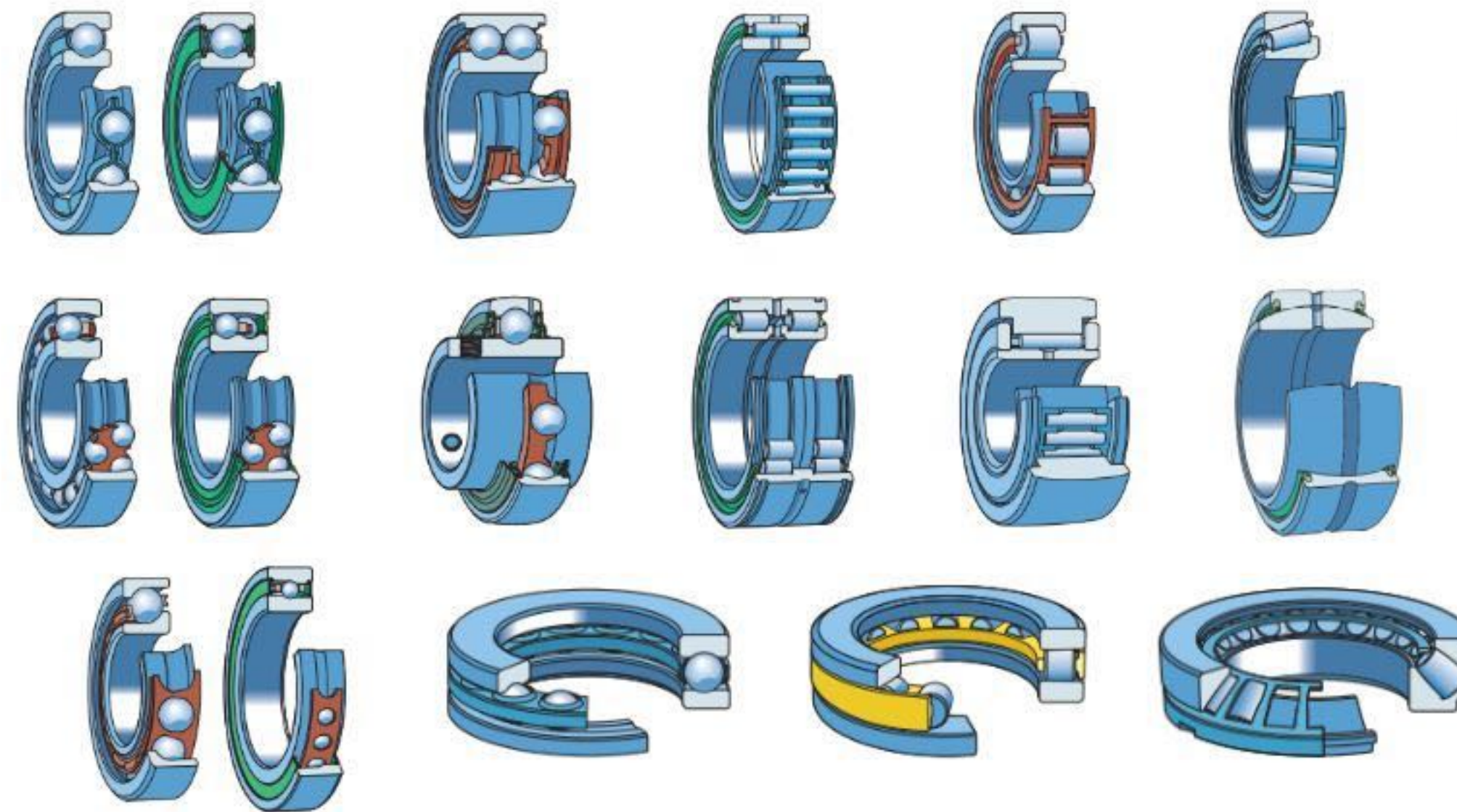
(soprattutto quanto i tipi di cuscinetti installati è numeroso e differente dai cuscinetti radiali a sfere con una sola pista)

$$BPFO = \frac{Z \cdot n}{2 \cdot 60} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$$

$$BPFI = \frac{Z \cdot n}{2 \cdot 60} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$$

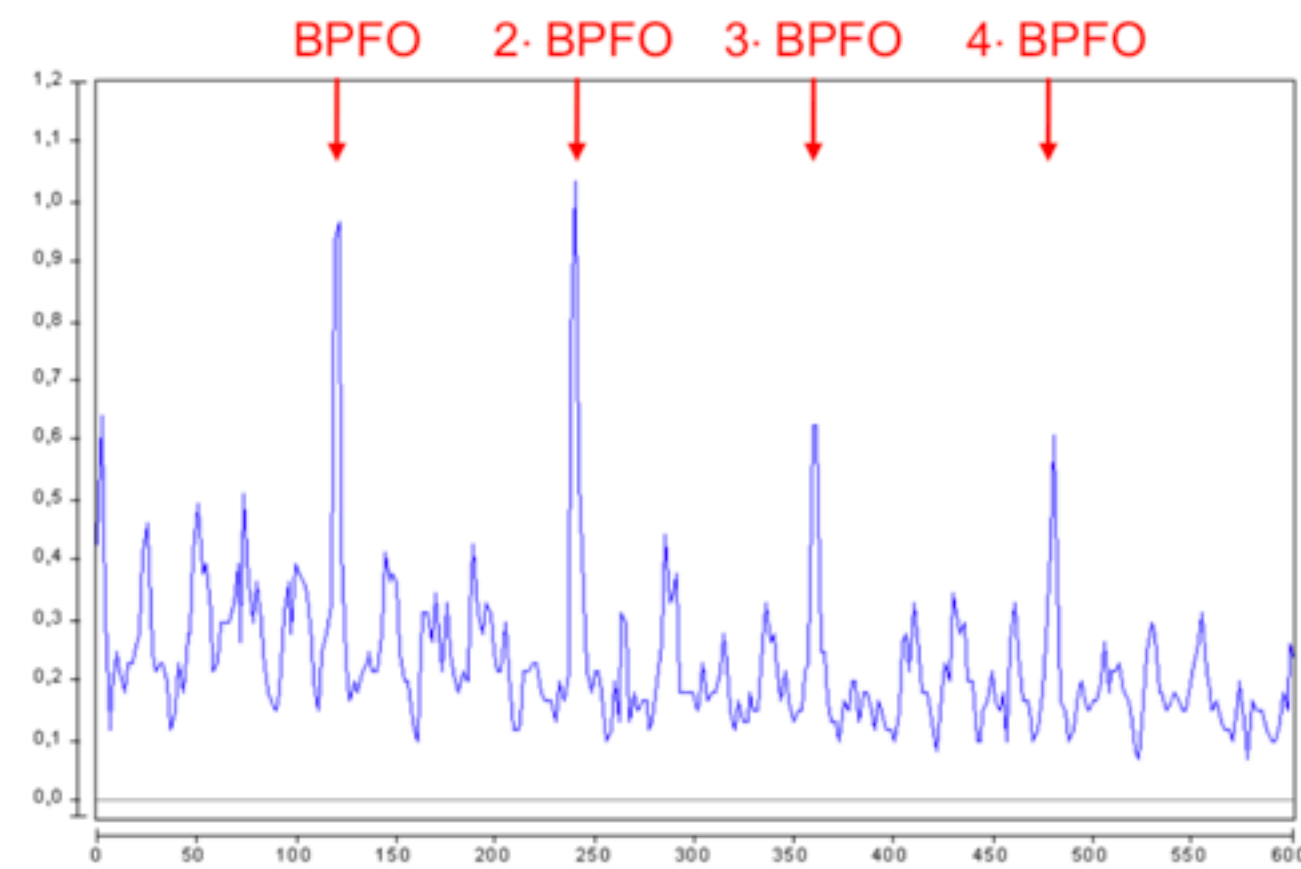
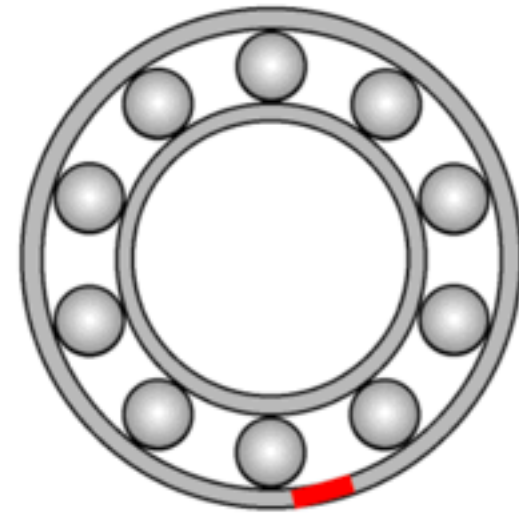
$$BSF = \frac{D \cdot n}{d \cdot 60} \left(1 - \left[\frac{d}{D} \cos \alpha \right]^2 \right)$$

$$TFT = \frac{n}{2 \cdot 60} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$$

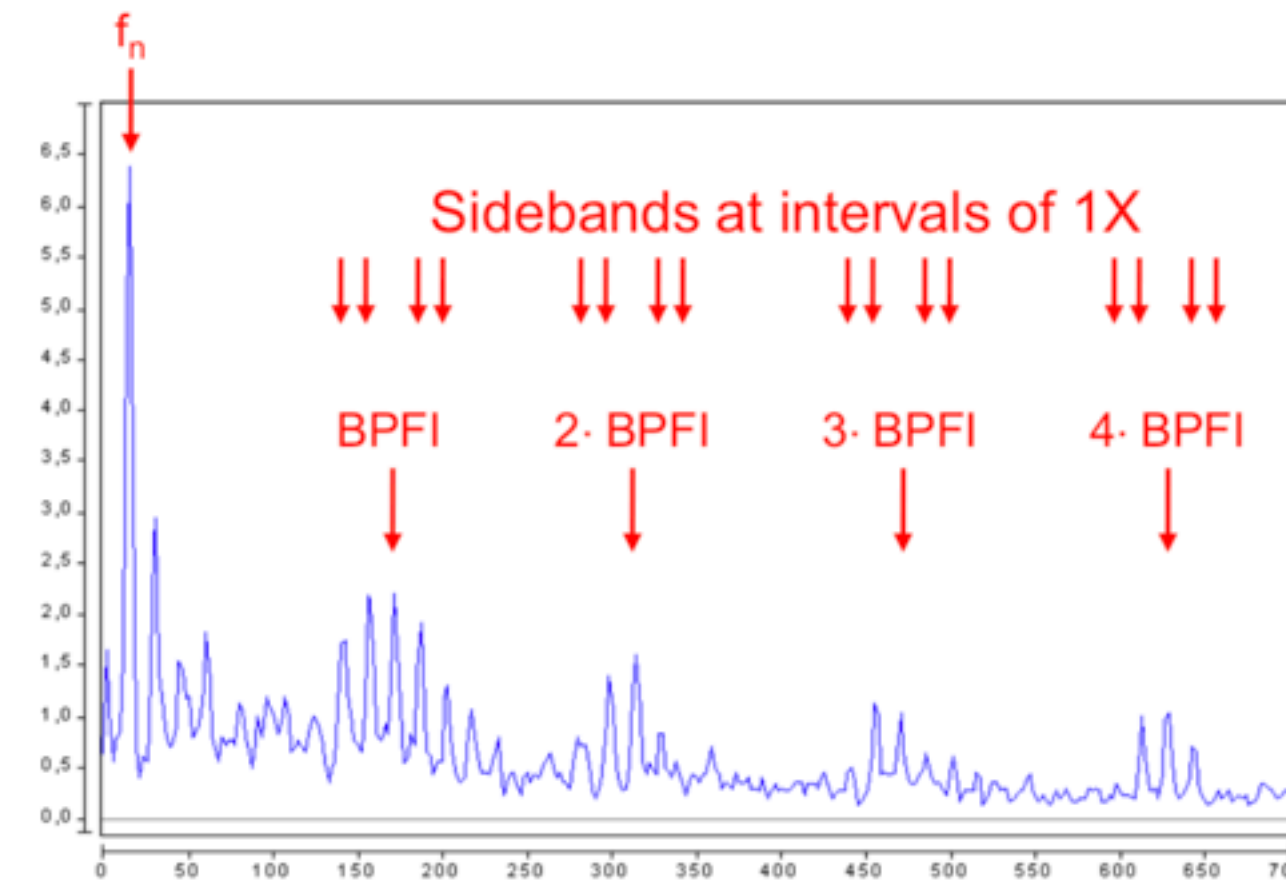
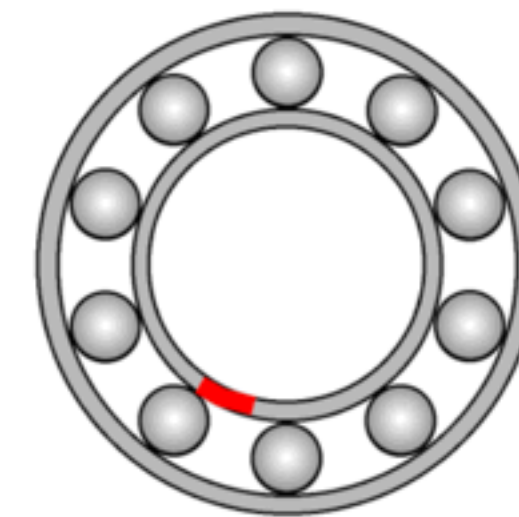


Cuscinetti volventi.. la localizzazione del danno è facilitata dalla forma dello spettro

Danno guida esterna
BPFO

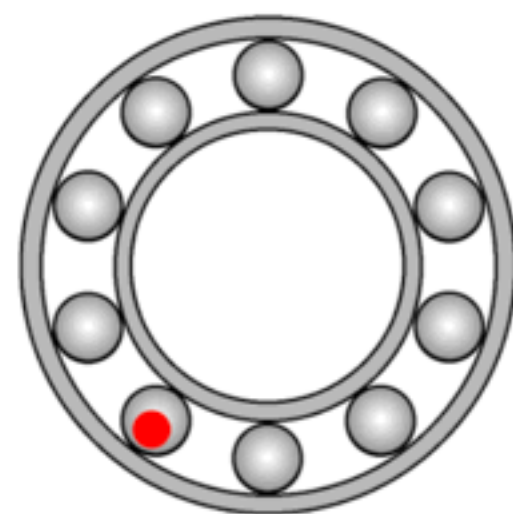


Danno guida interna
BPFI

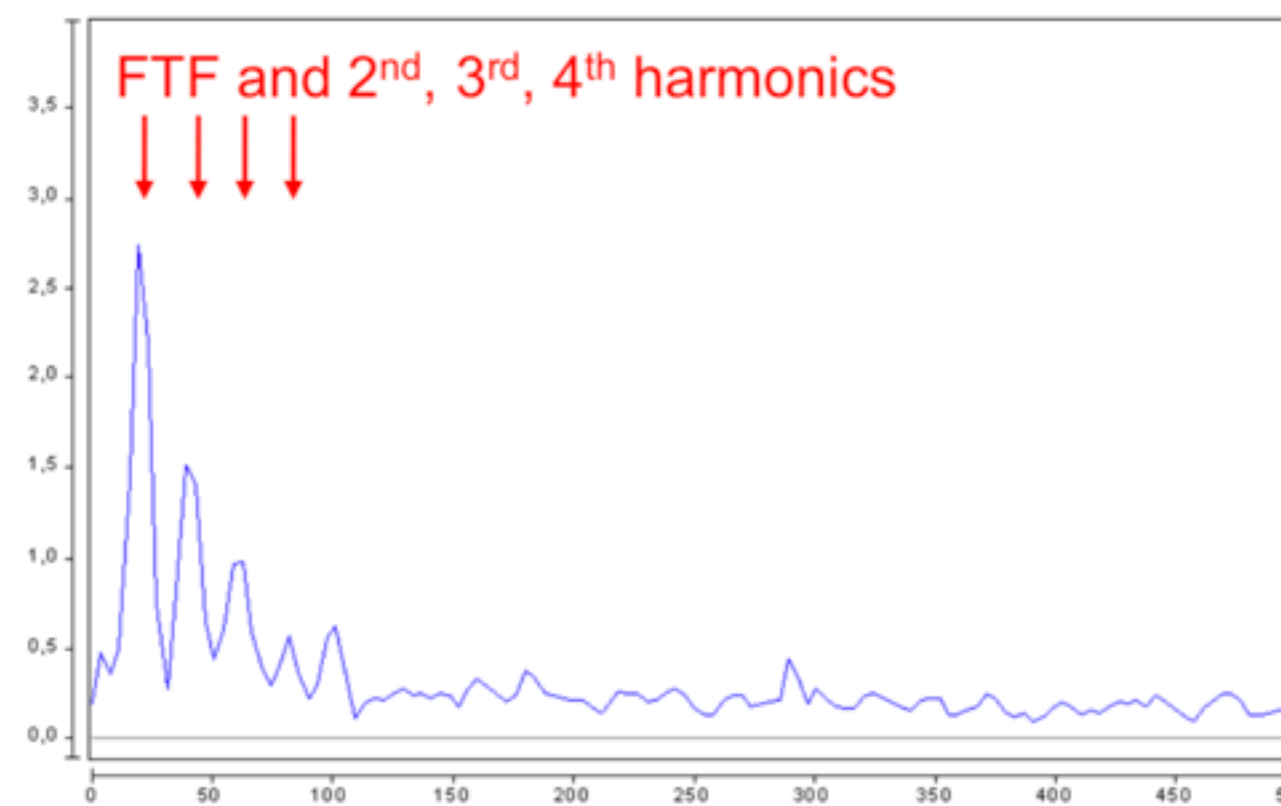
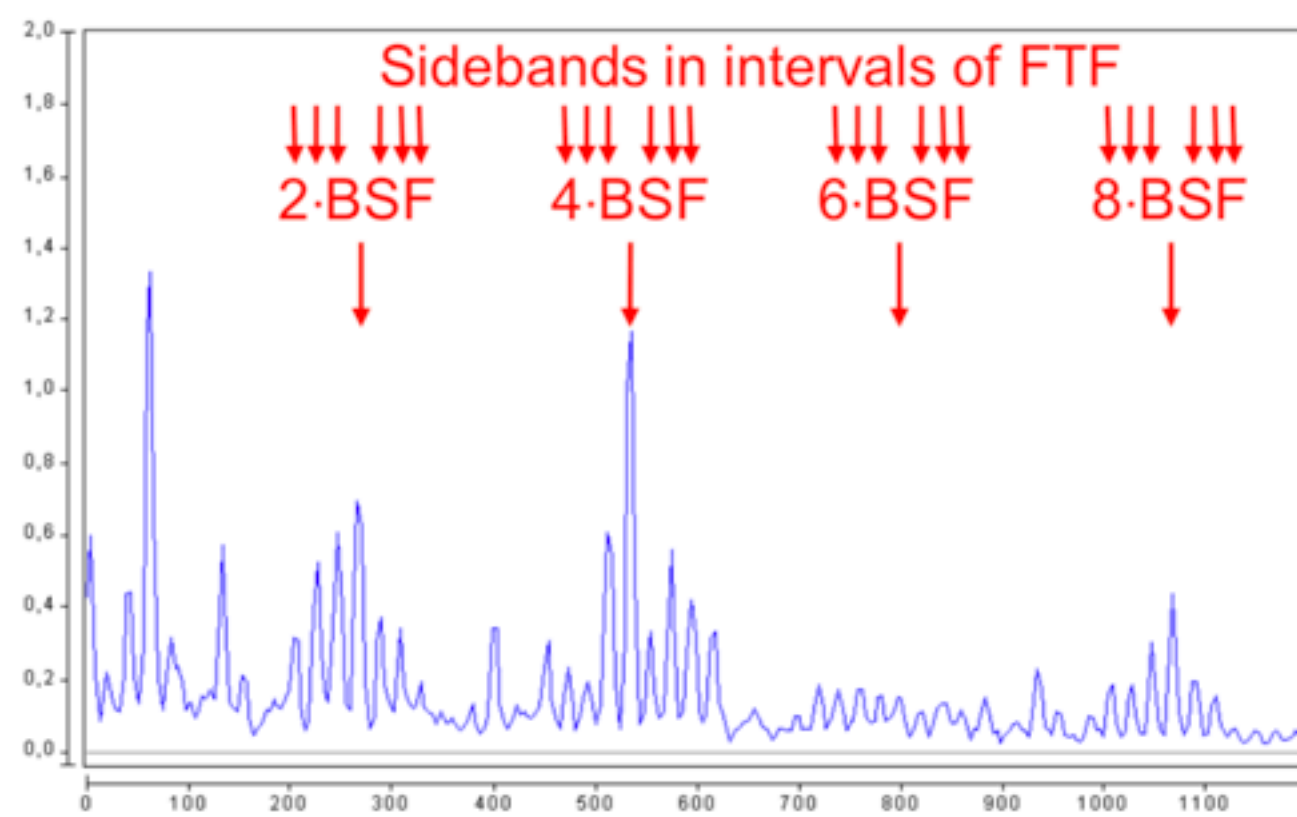
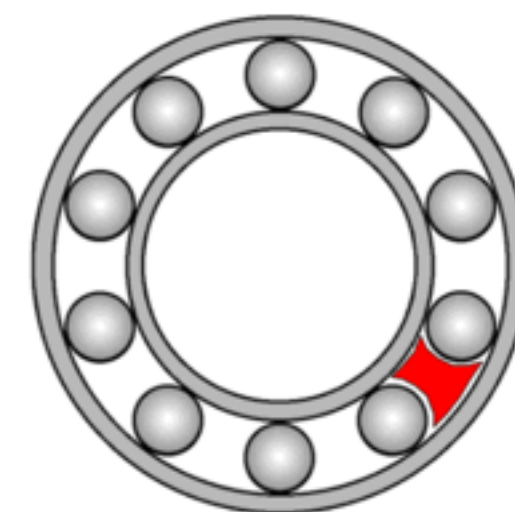


Cuscinetti volventi.. la localizzazione del danno è facilitata dalla forma dello spettro

Danno elemento volvente
BSF



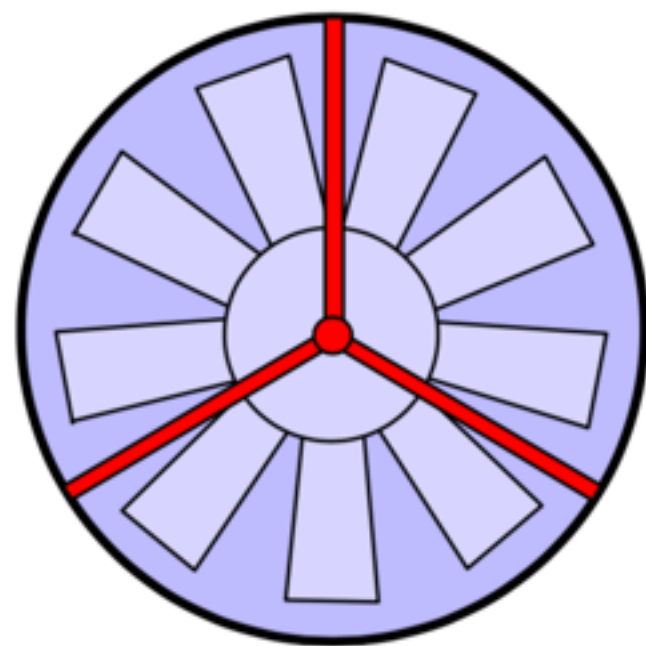
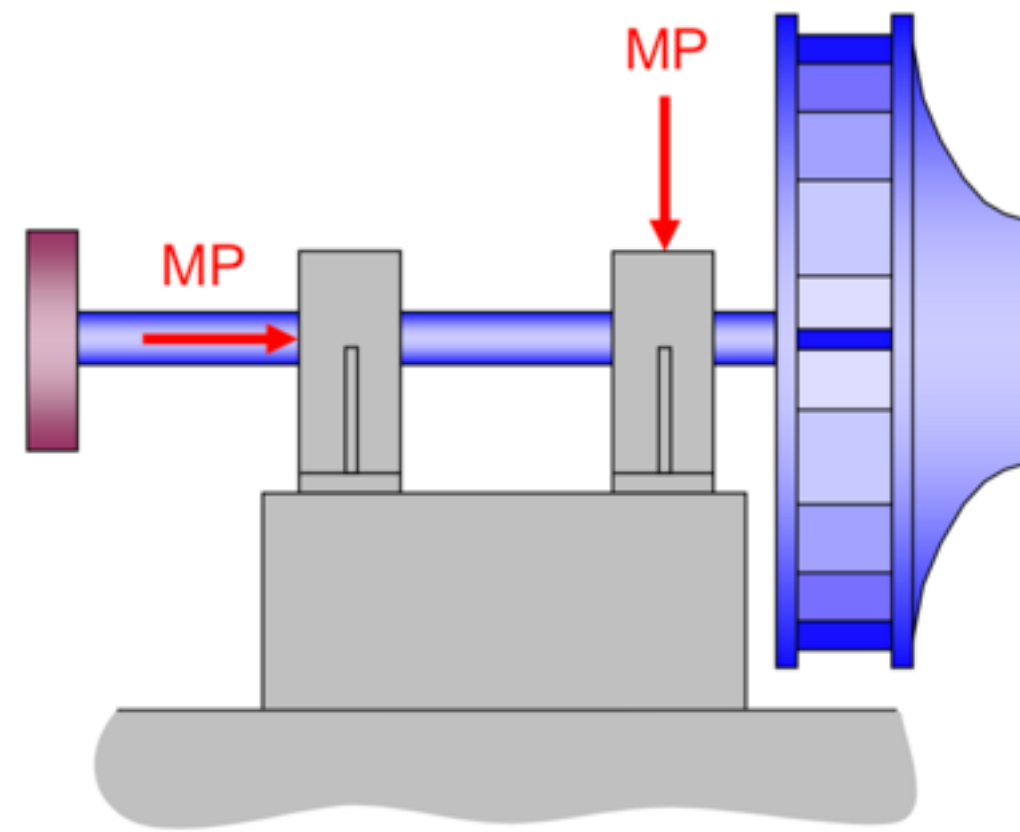
Danno gabbia
TFT



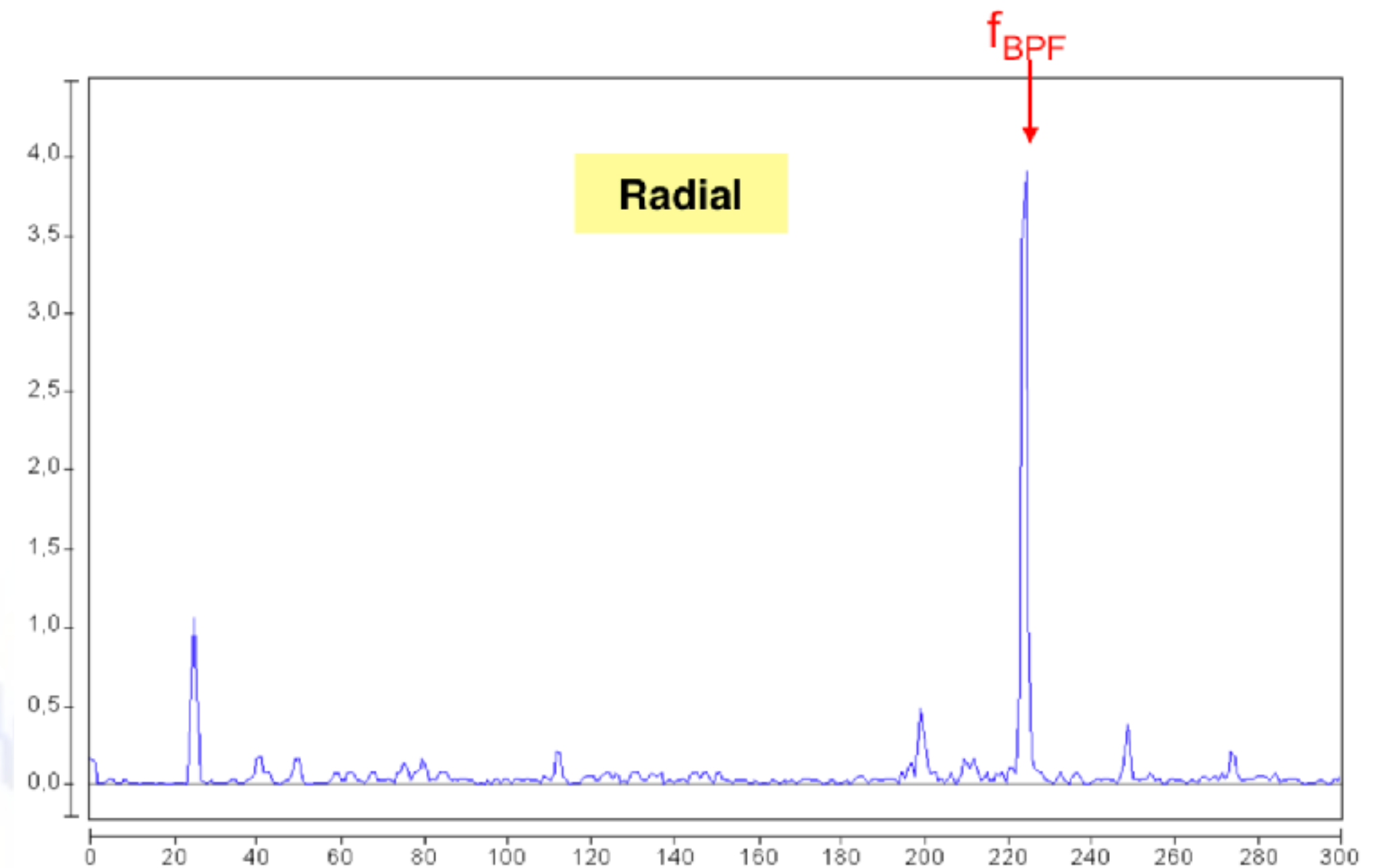
E' vietato ogni utilizzo diverso da quello inerente la preparazione dell'esame del corso di Meccanica delle Vibrazioni @Units
E' espressamente vietato l'utilizzo per qualsiasi scopo commerciale e/o di lucro

Pale e Vani.. Le palettature delle giranti caricano periodicamente la macchina (un numero di volte al giro pari al numero di pale > armoniche proporzionali a $N_p \times$)

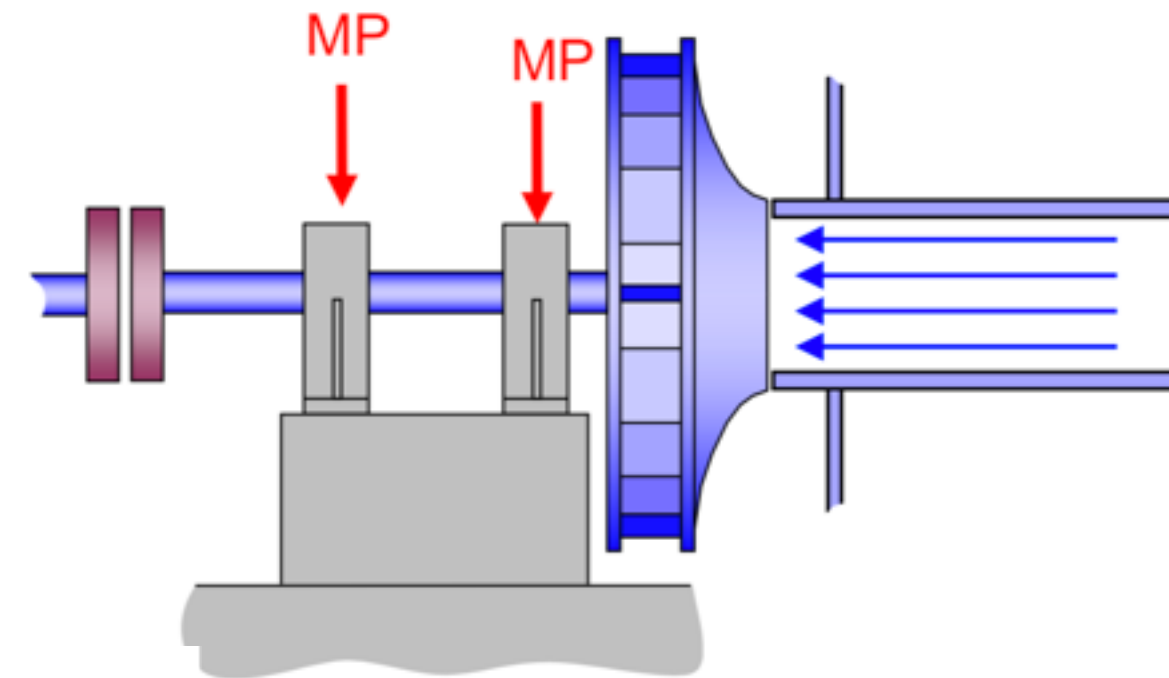
In funzione dell'aeraulica della girante, saranno rilevabili maggiormente in direzione radiale o assiale



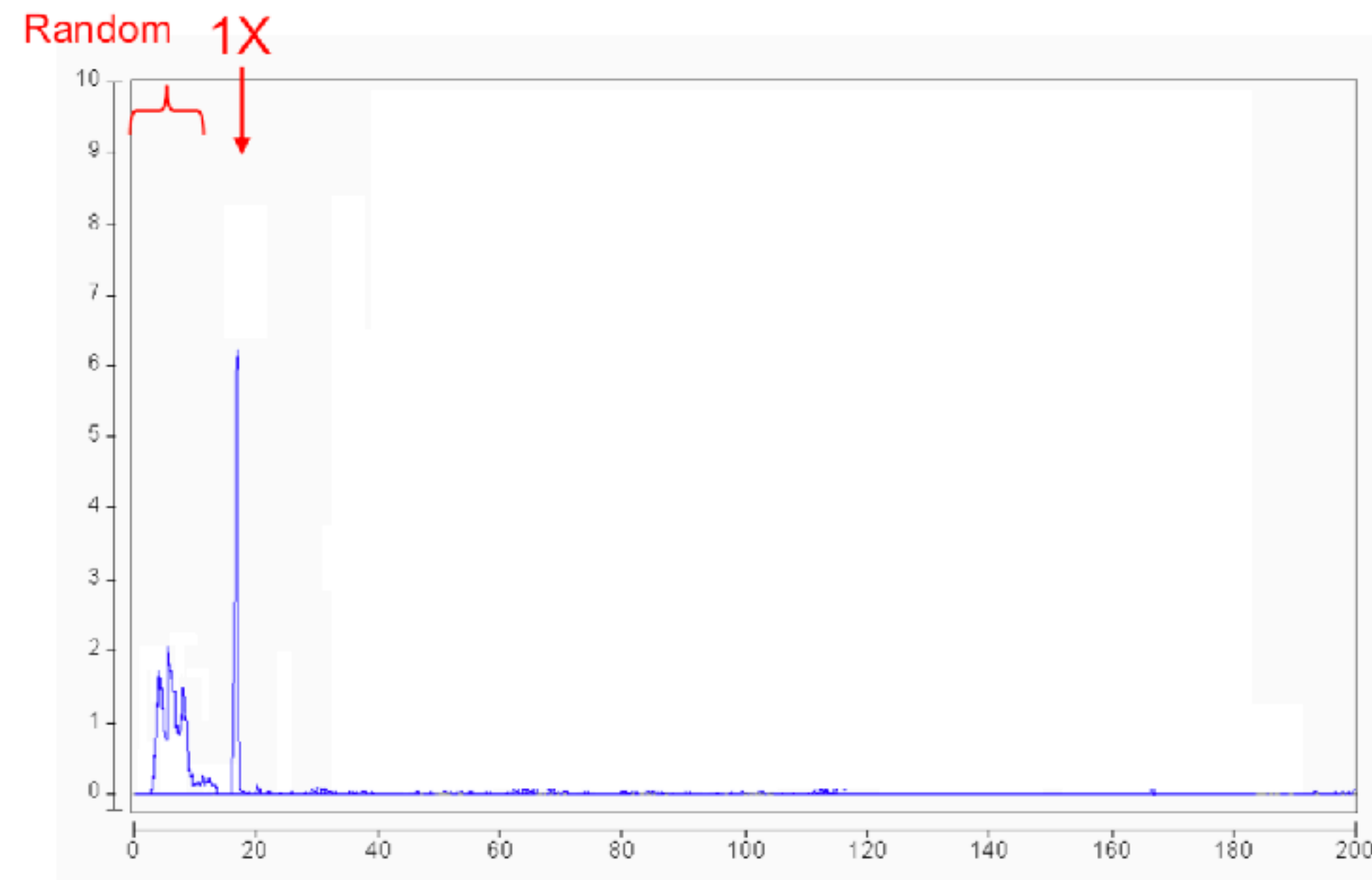
Con 9 pale e 3 supporti..
quali saranno le frequenze
caratteristiche del sistema?



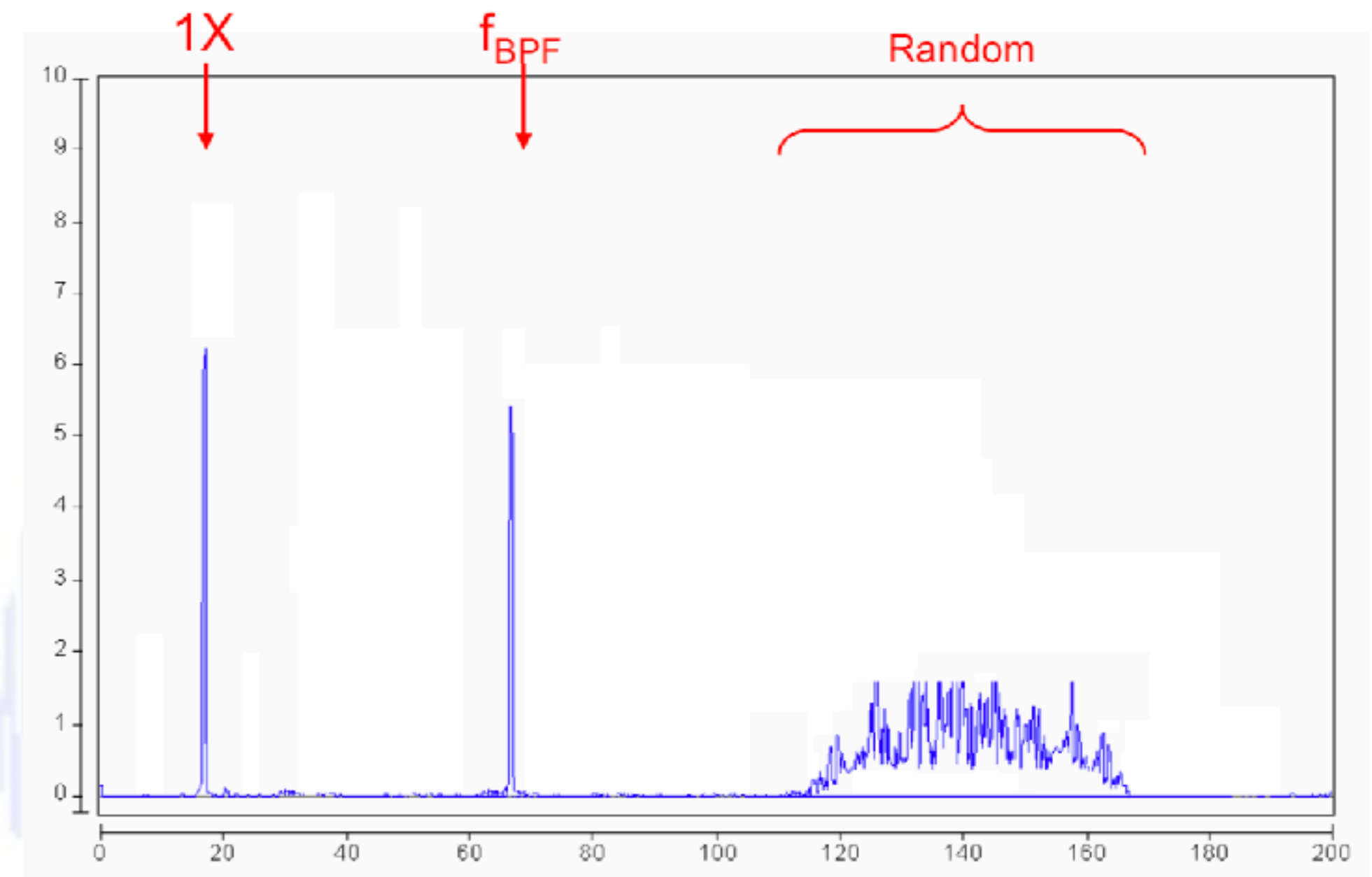
Forze idrauliche/aerodinamiche.. il fluido che si muove nella macchine aerauliche eccita a sua volta la struttura. I fenomeni rilevabili sono Turbolenza e Cavitazione che hanno spettri con contenuto in frequenza differente



Turbolenza



Cavitazione



Cinghie. le cinghie sono elementi flessibili che collegano pulegge di diametro differente

La trasmissione di potenza con le cinghie presenta problemi legati al montaggio, all'allineamento delle pulegge, all'eccentricità delle pulegge alle risonanze del ramo non teso della cinghia, all'usura.. ciascuno con uno spettro particolare!<

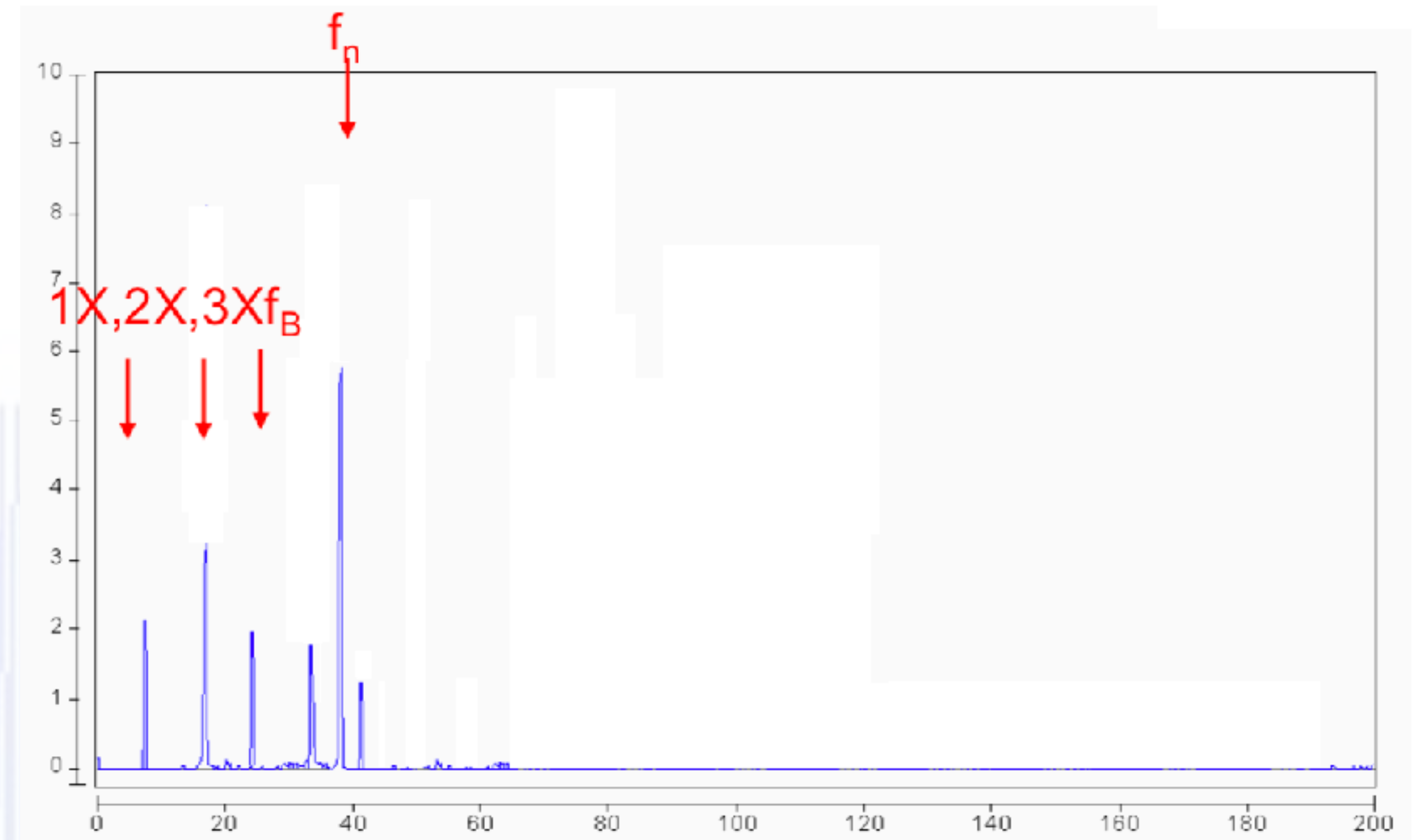
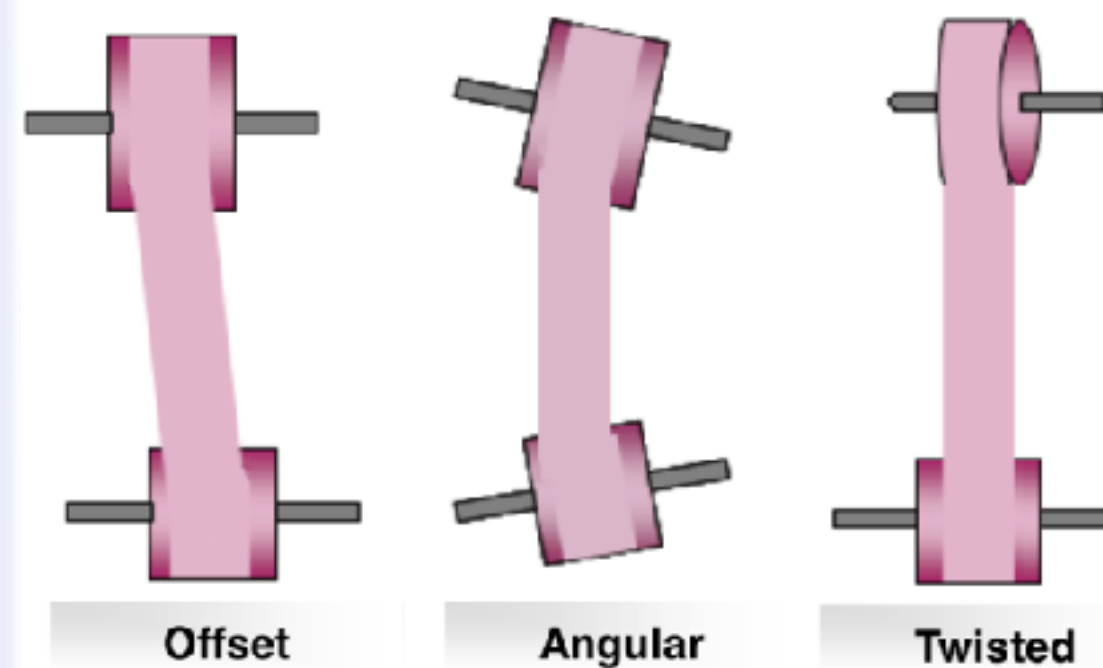
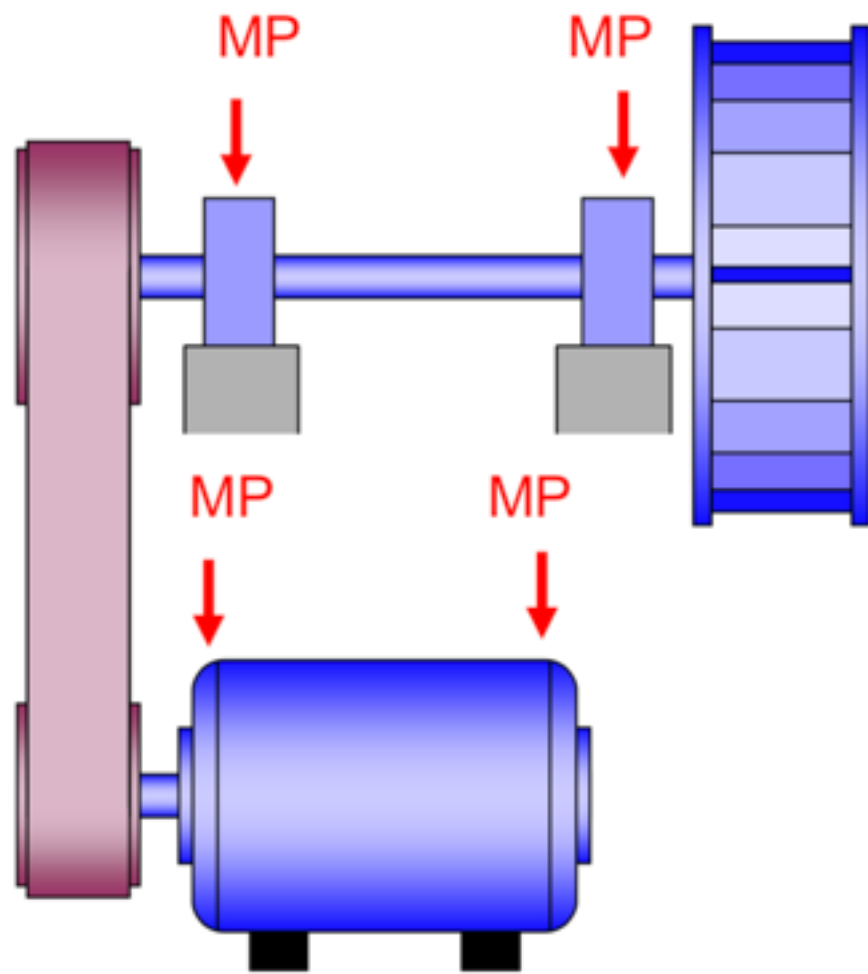
$$f_B = \pi \frac{\omega_1 \phi_1}{l}$$

angolo di abbraccio

lunghezza cinghia

montaggio > 1x
usura 1x 2x 3x di f_B

...



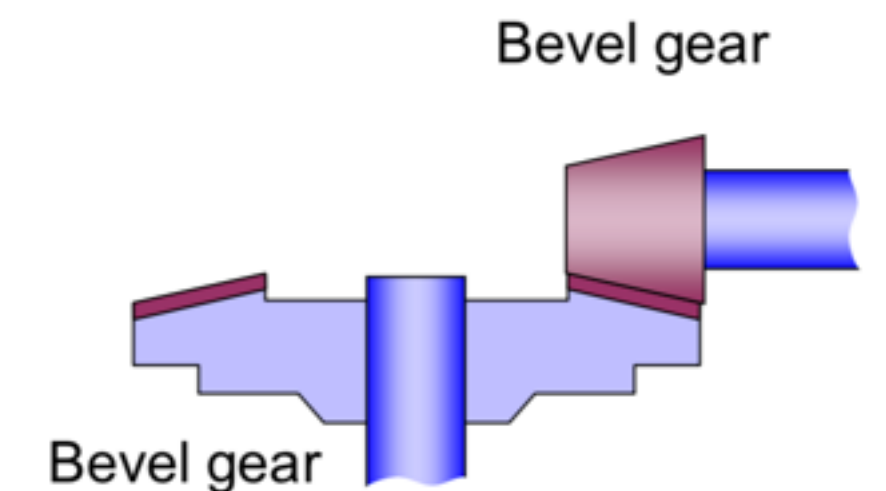
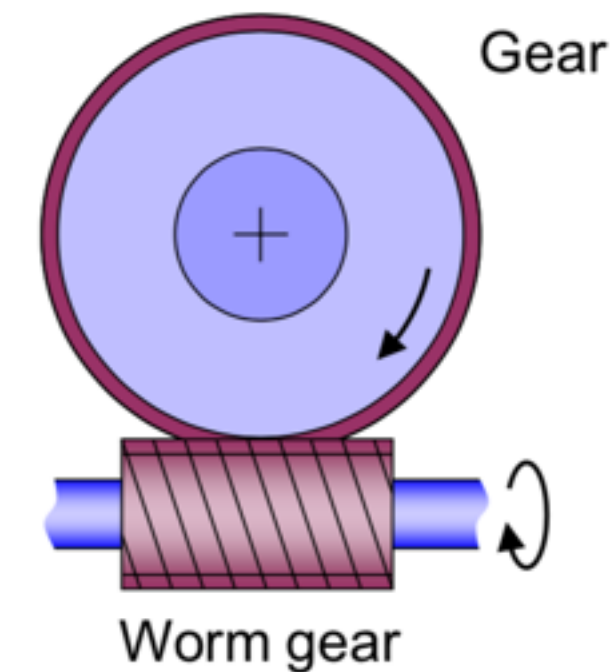
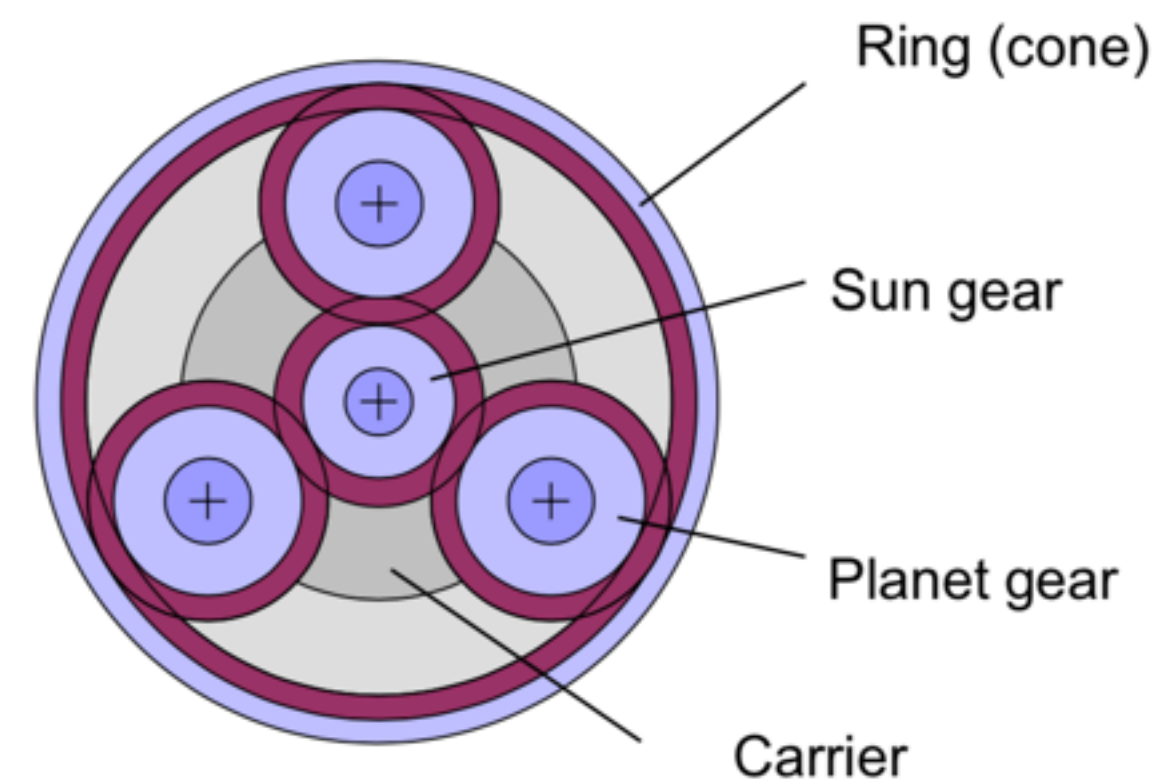
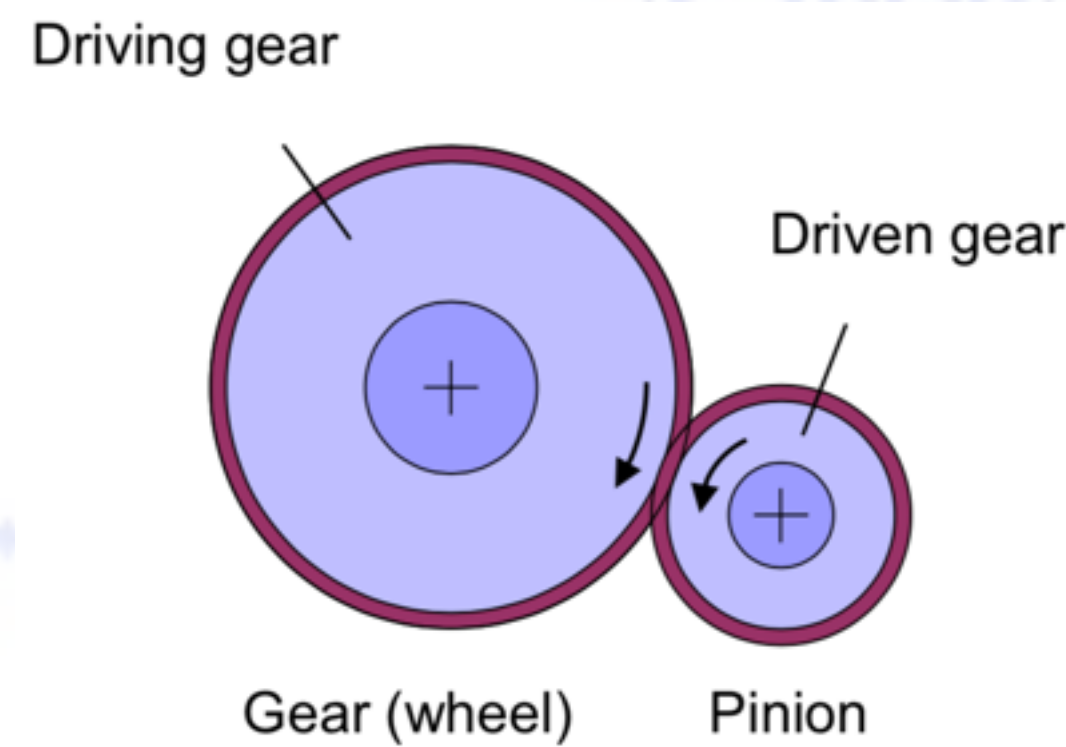
Ingranaggi.. gli ingranaggi un comune dispositivo di trasmissione della coppia

Si distinguono ruotismi
Ordinari
Epicycloidali
A vite senza fine
A ruote coniche
...

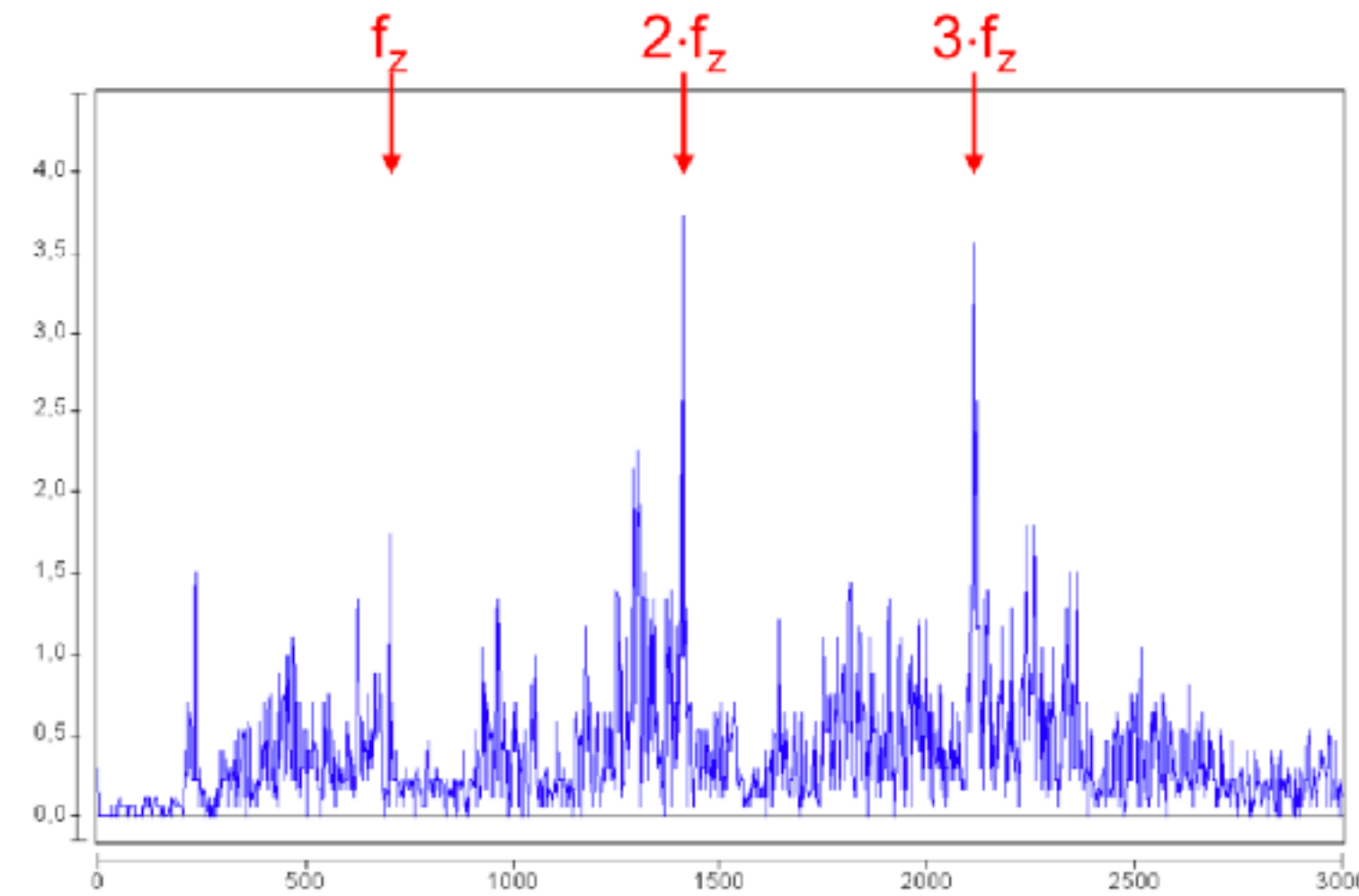
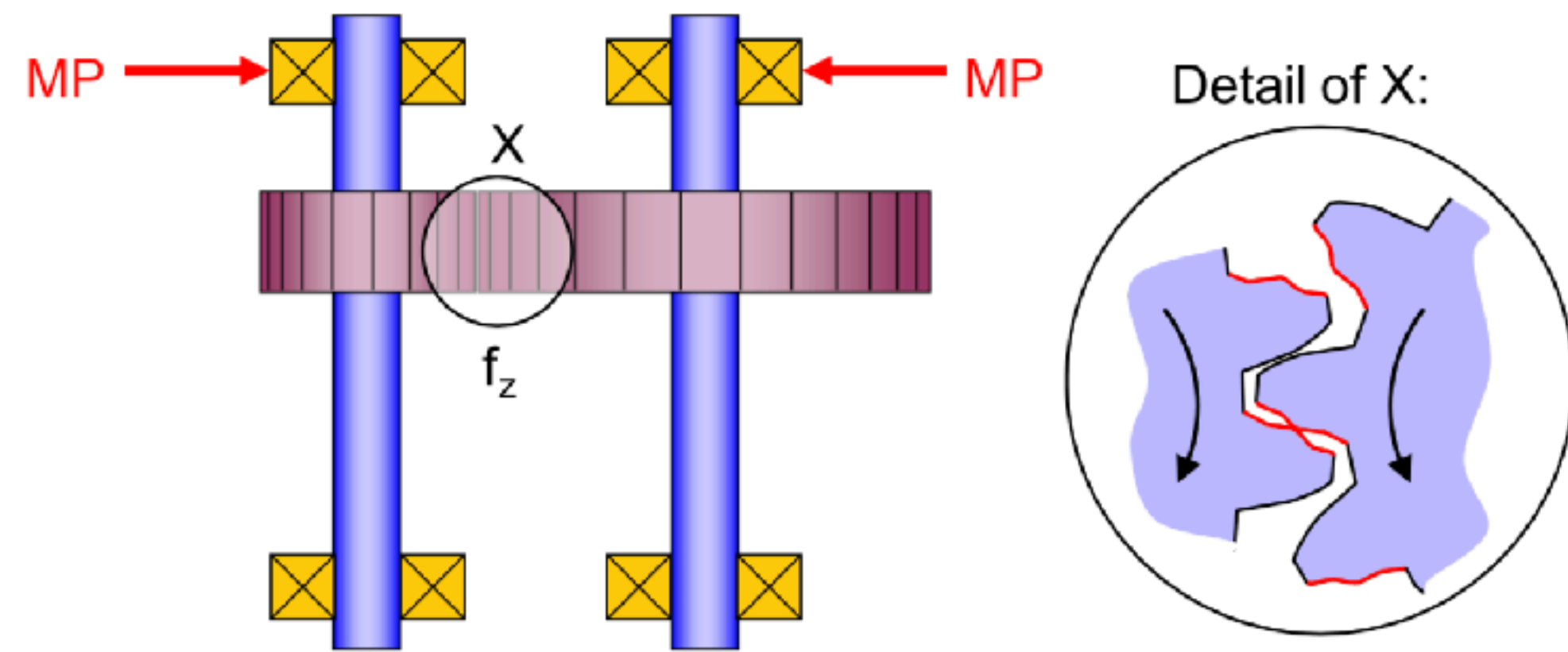
Con ruote a denti
Dritti
Elicoidali
...

A funzionamento
Continuo
Intermittente
Reversibile
..

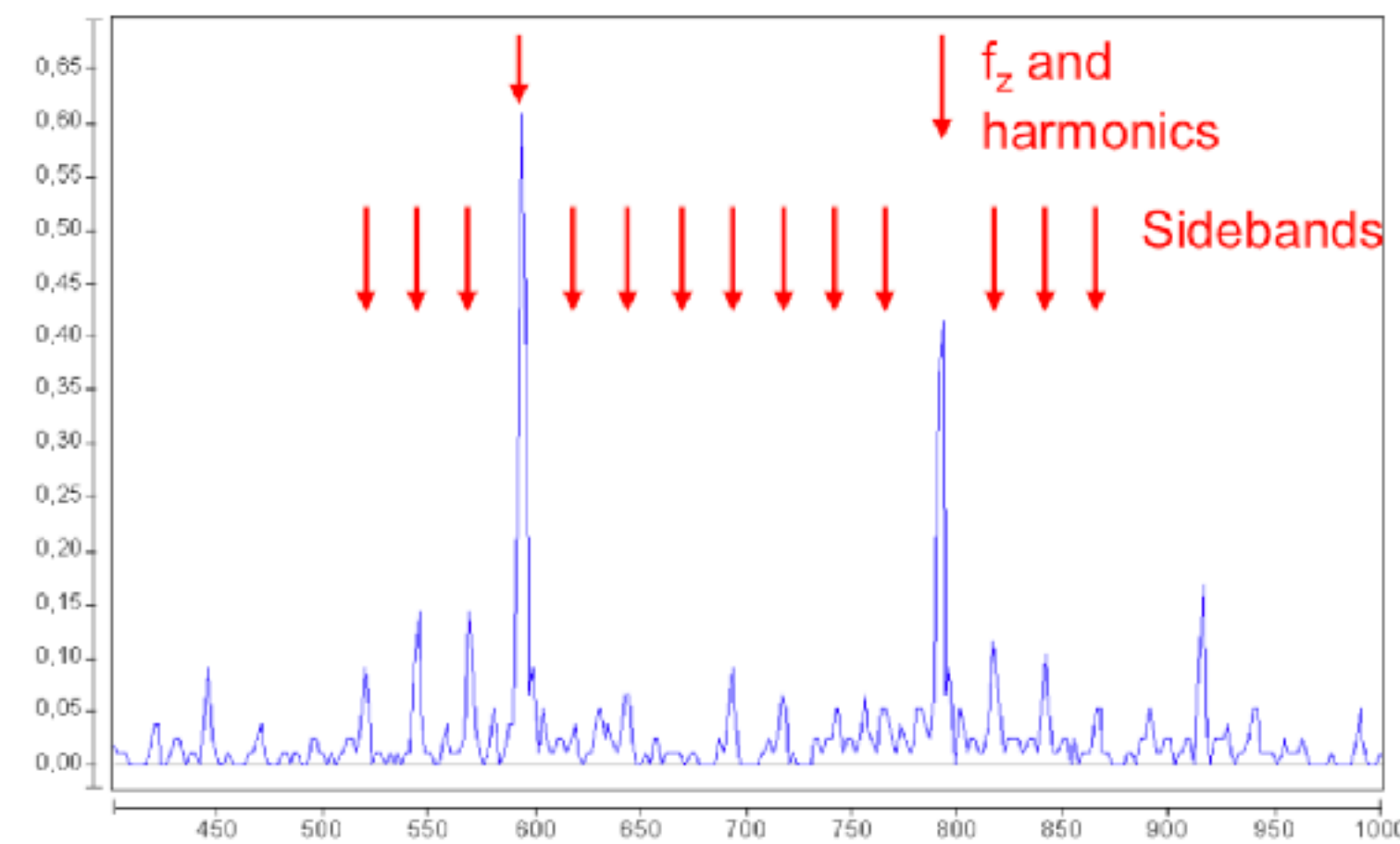
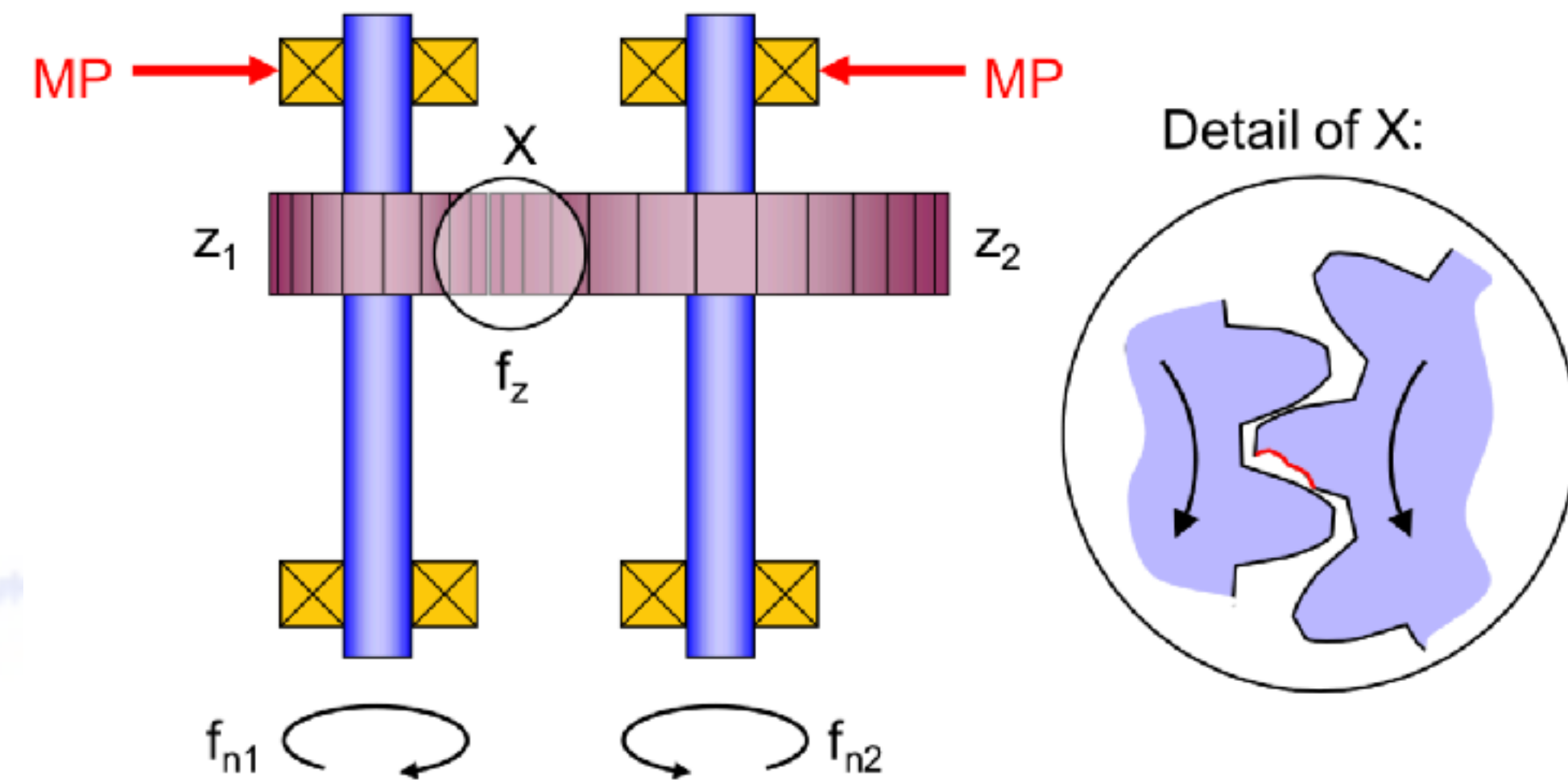
.. sarà necessario porre attenzione alla tipologie,
alla cinematica, alla tipologia di danneggiamento per aver le corrette frequenze di danno potenziale!



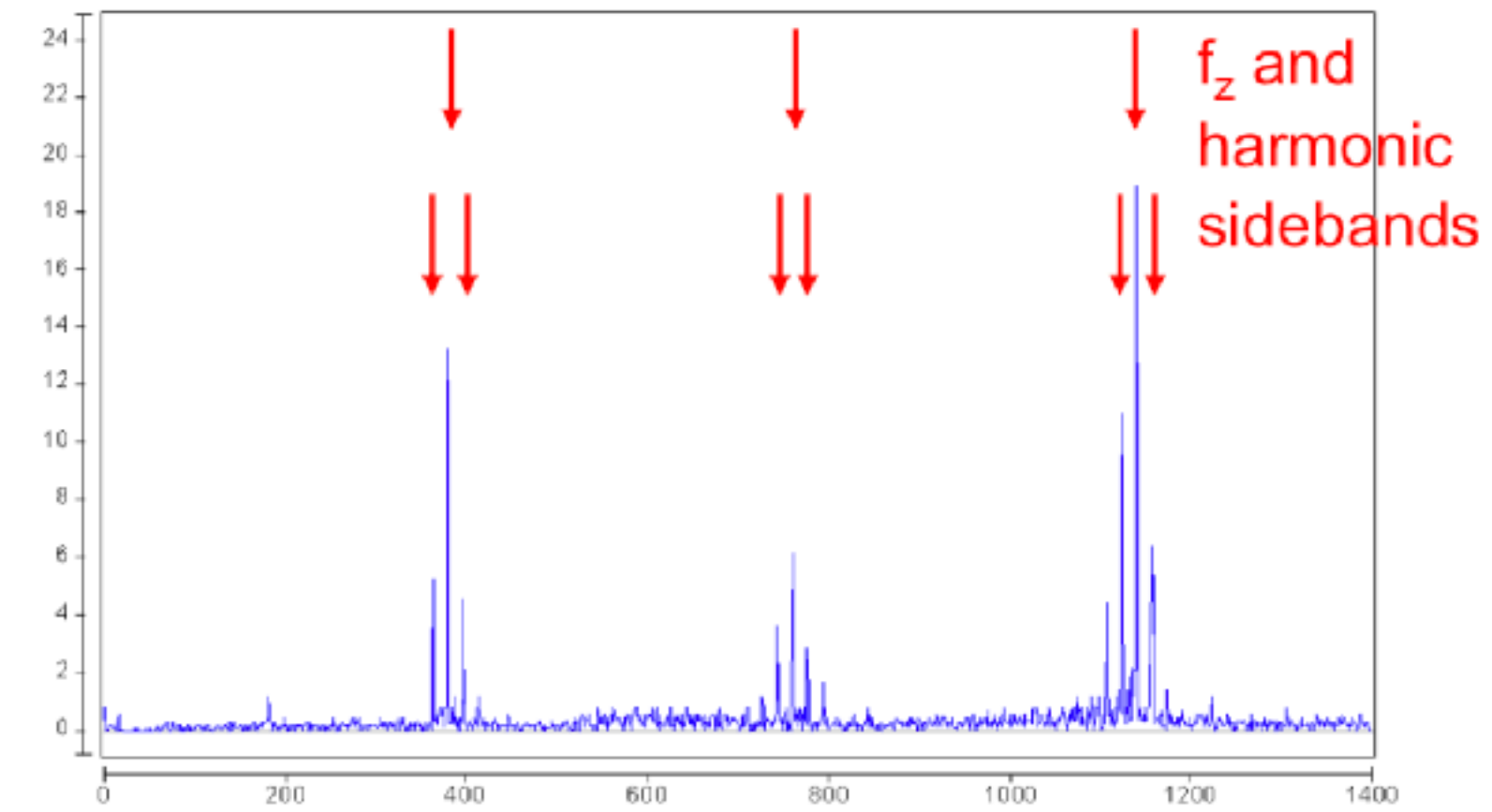
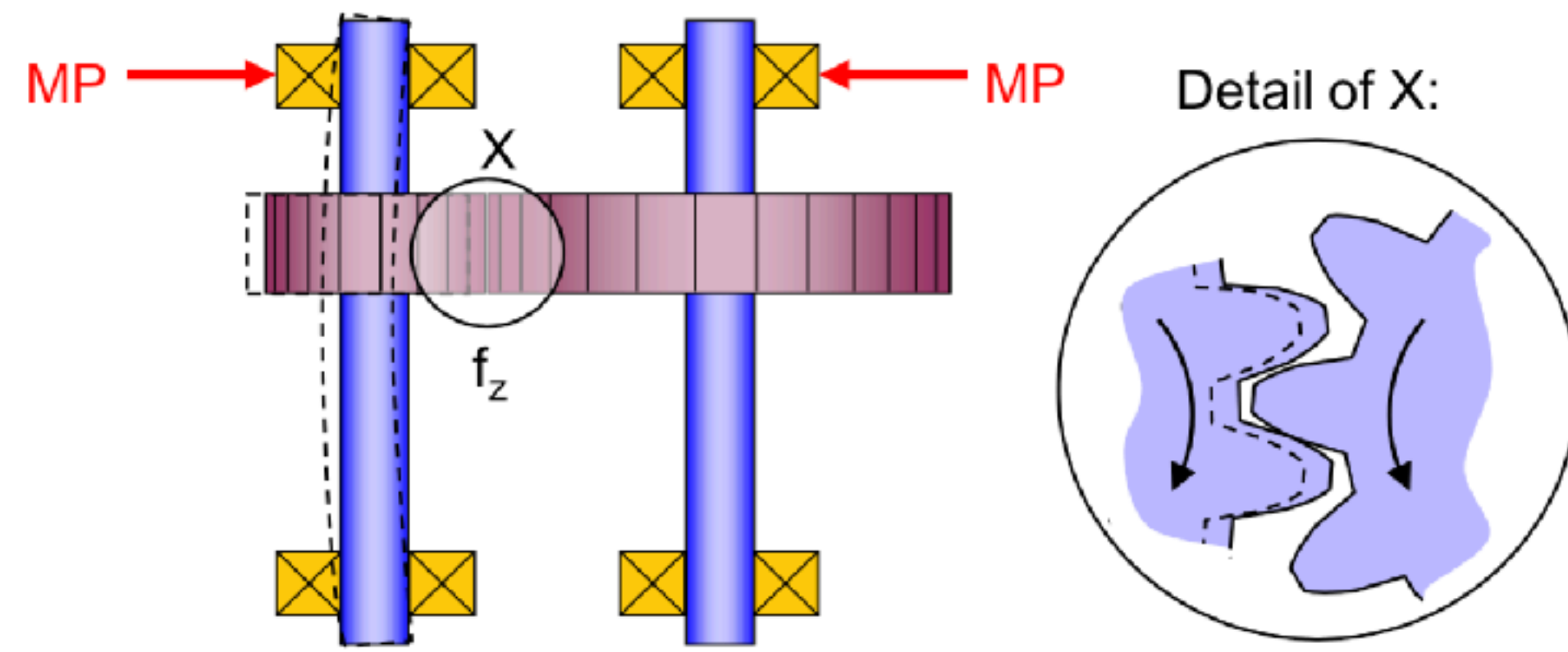
Diagnostica



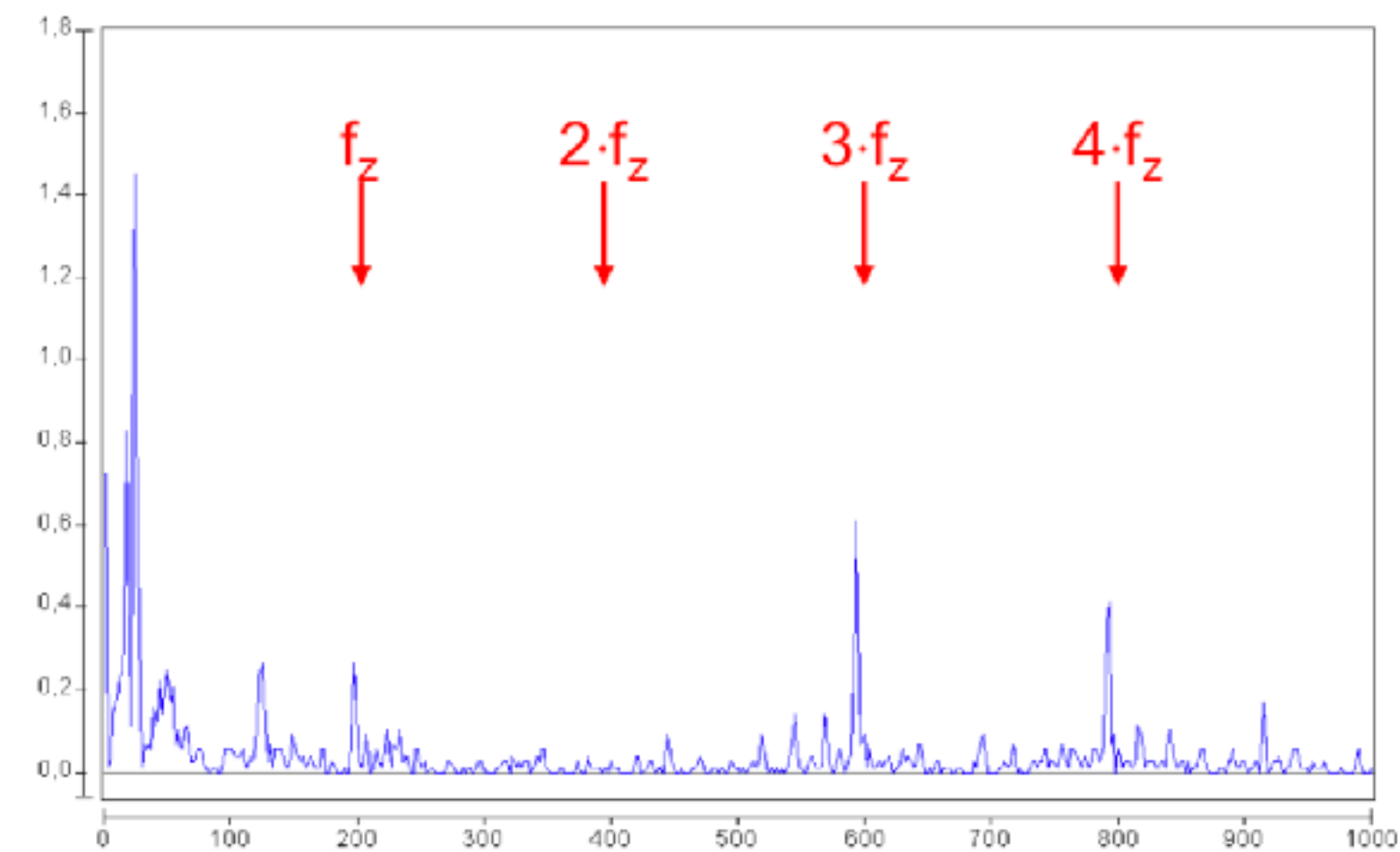
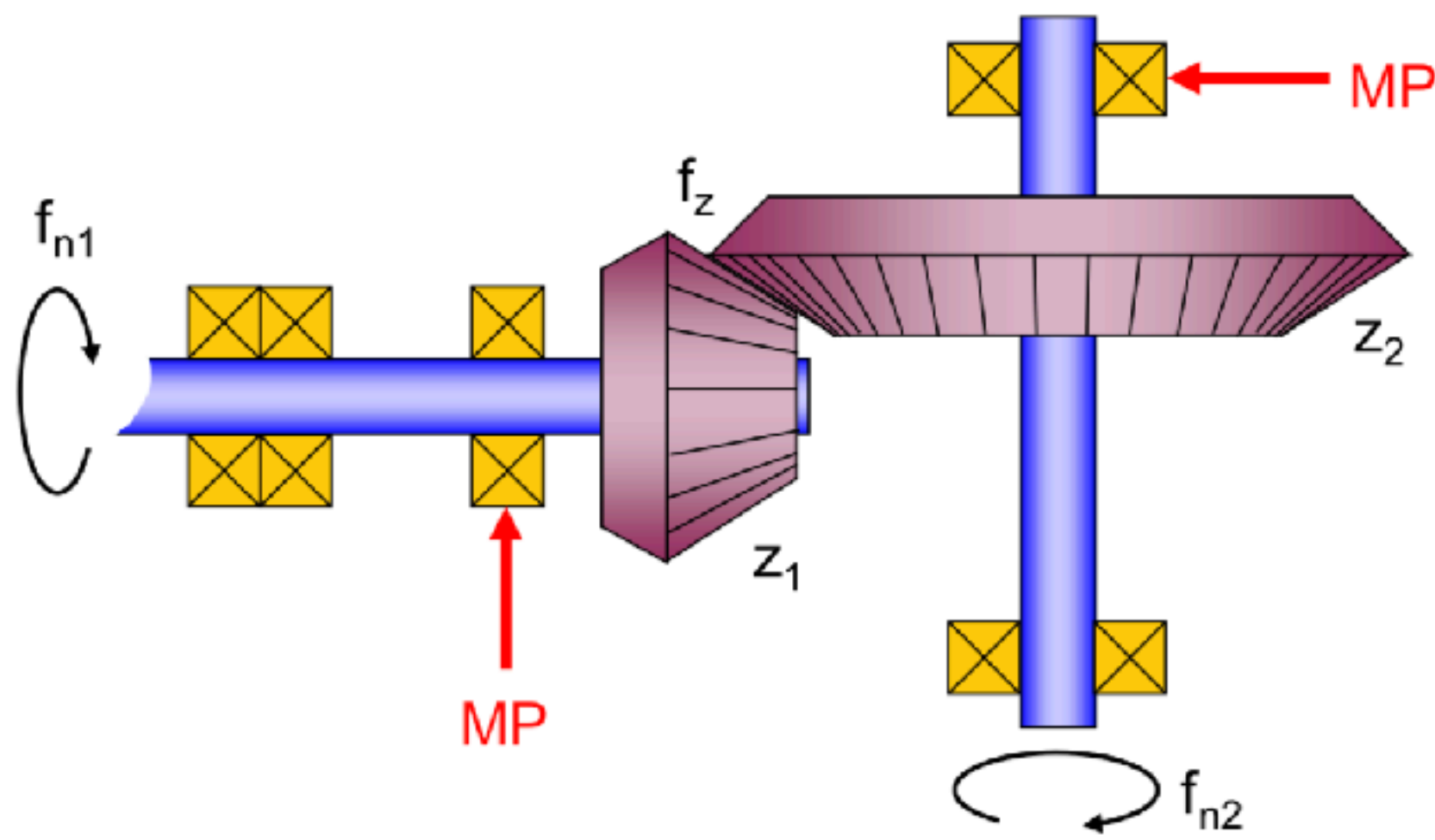
Usura



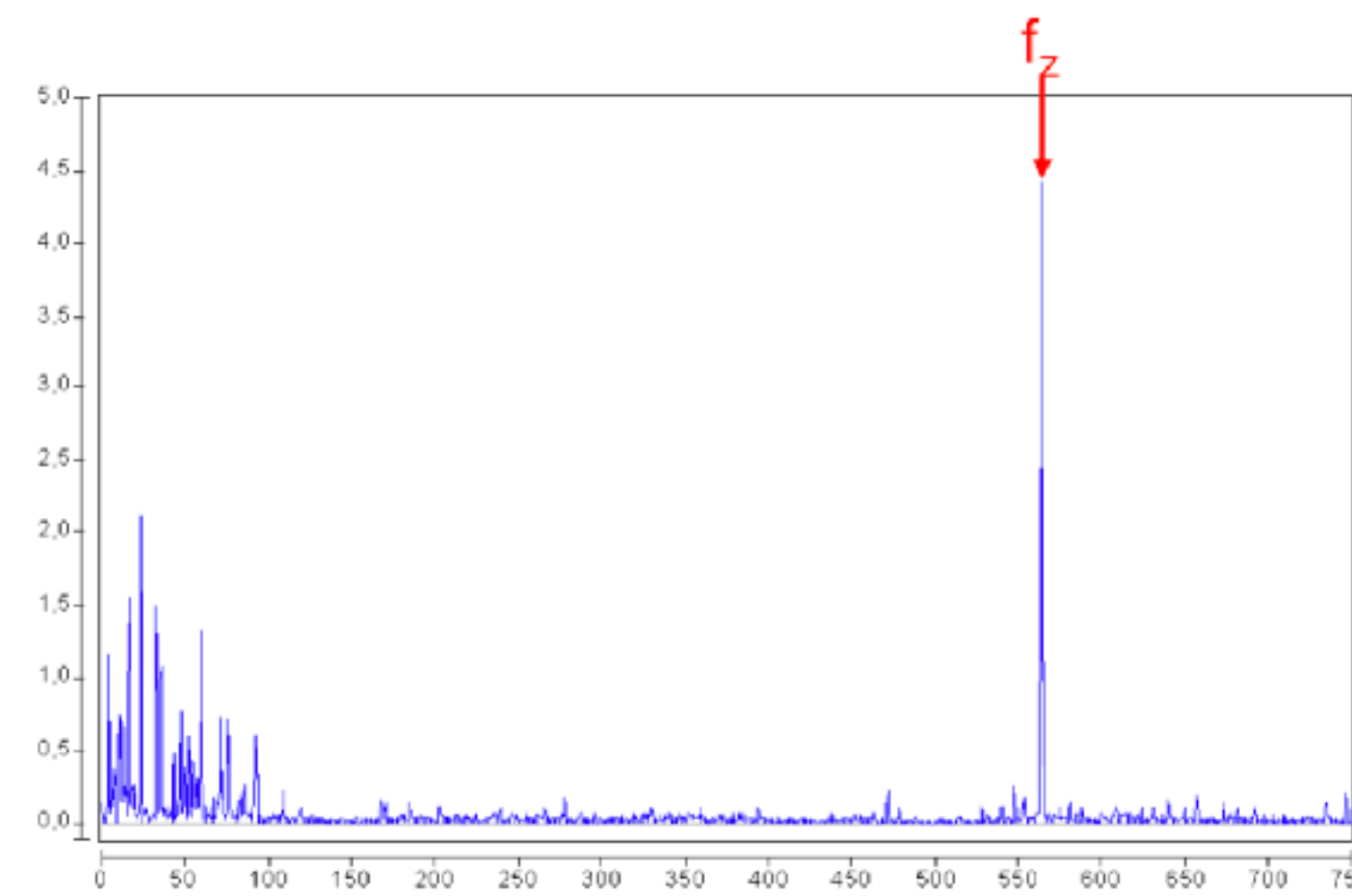
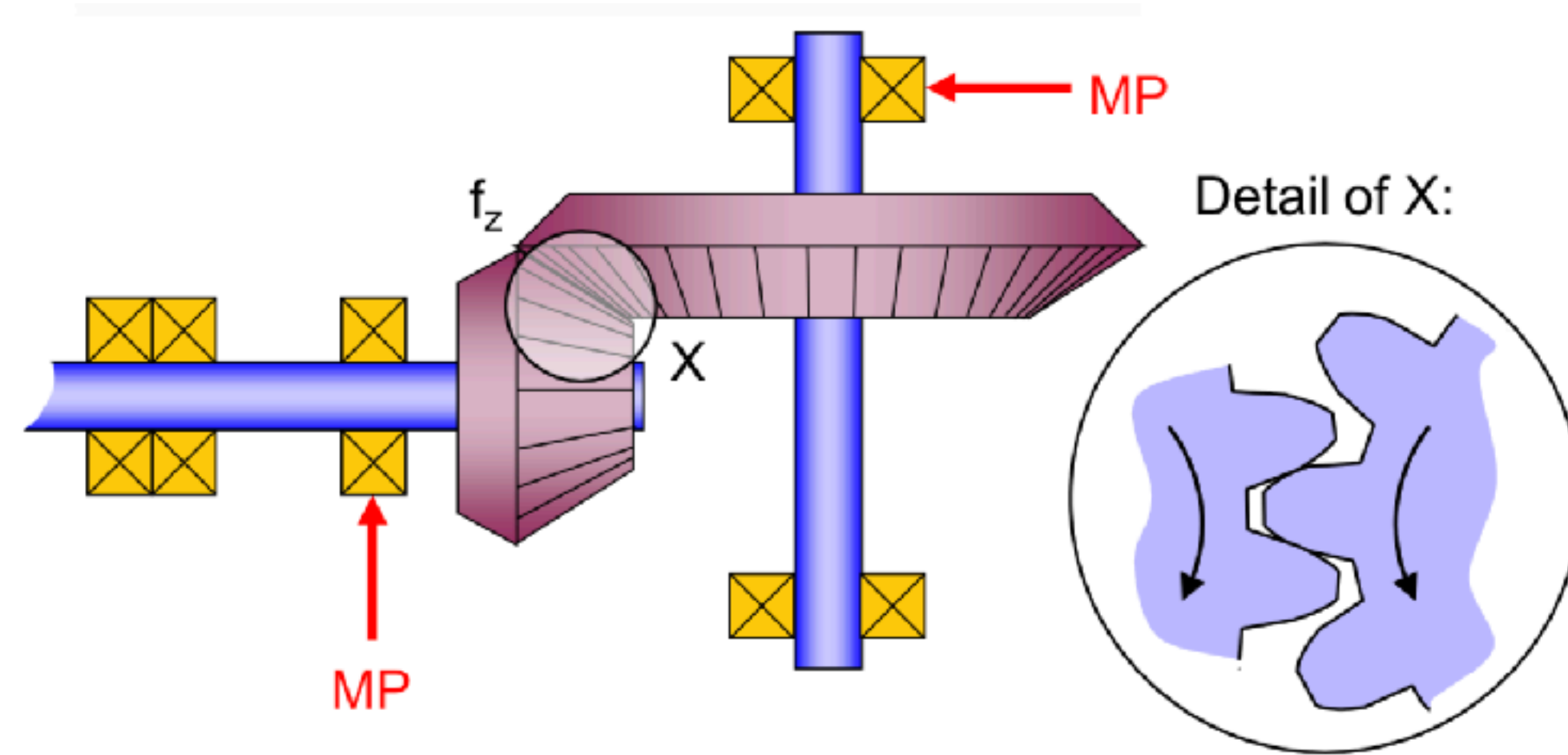
Rottura di un dente



**Eccentricità
o
Albero piegato**



**Ingranamento
Errato**



Forma dente errata

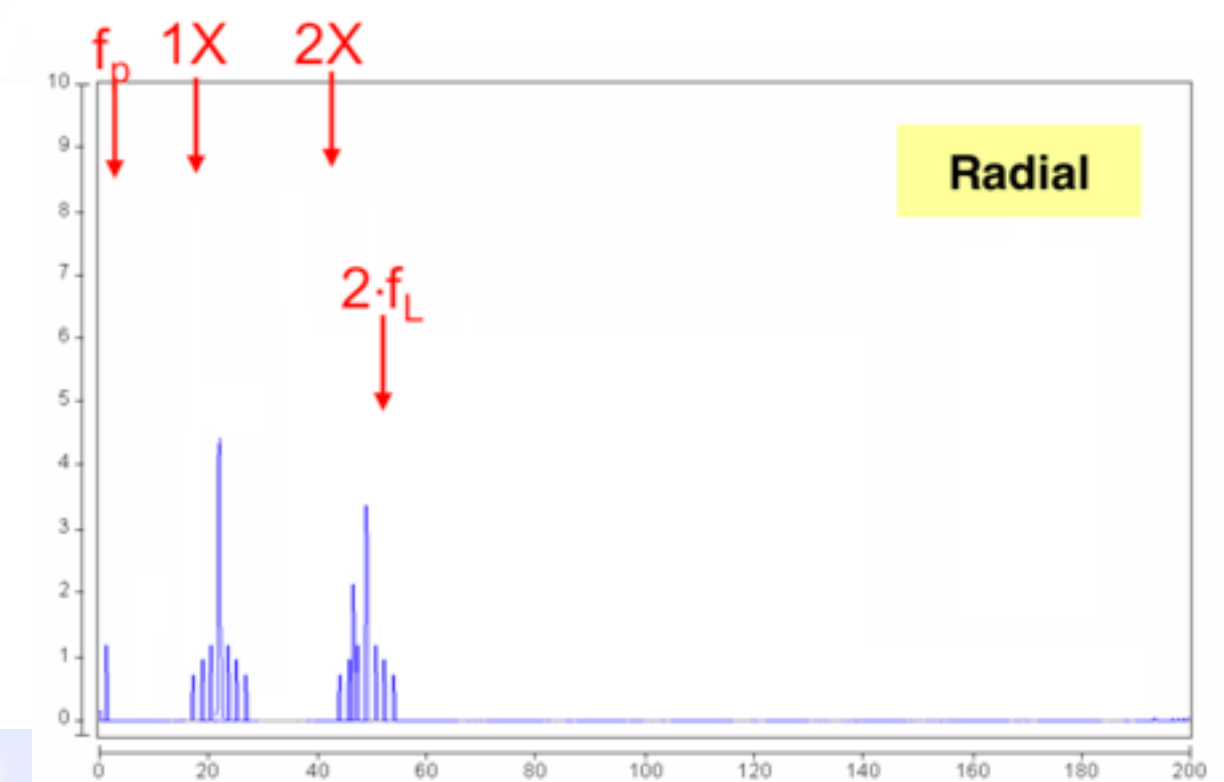
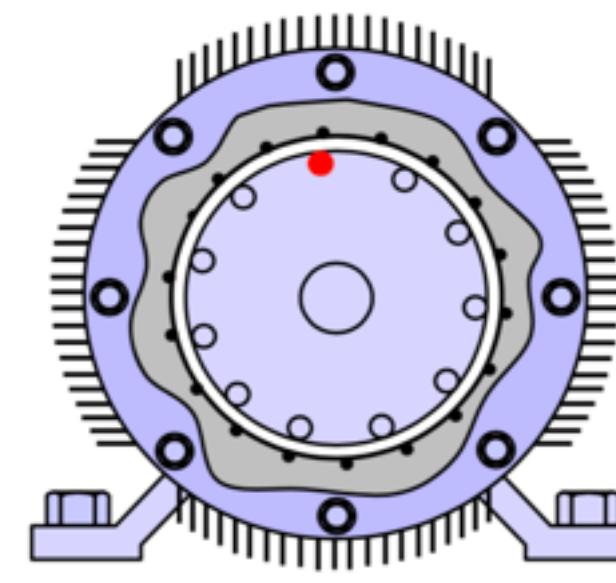
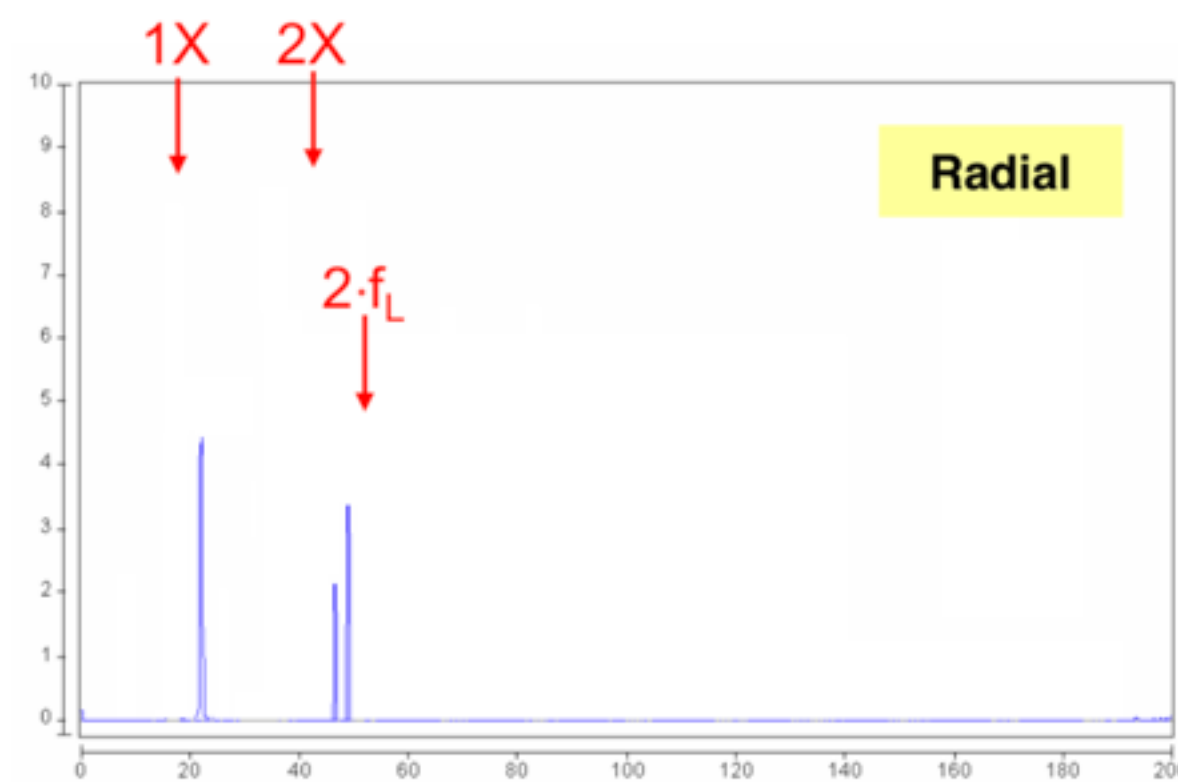
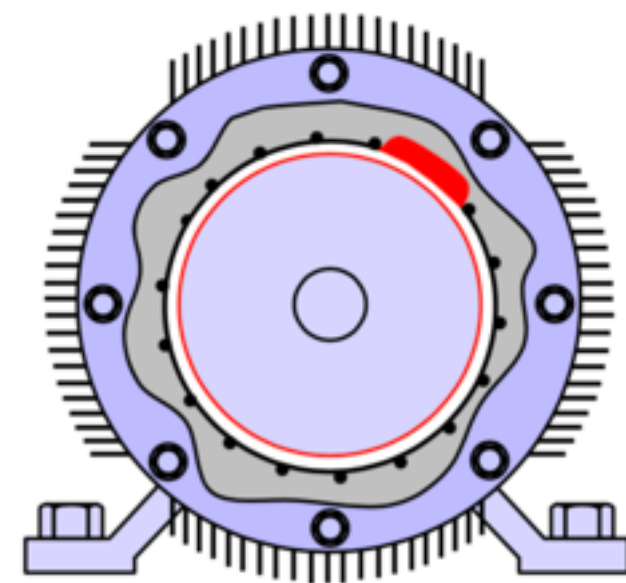
Attenzione ai rotismi epicicloidali!

Le velocità di rotazione che determinano le frequenze di danno devono essere opportunamente corrette con la velocità del porta-treno!

Problemi elettrici.. i motori elettrici combinano in loro le frequenze di danno potenziale dipendenti dalle eccitazioni meccaniche e da quelle elettriche

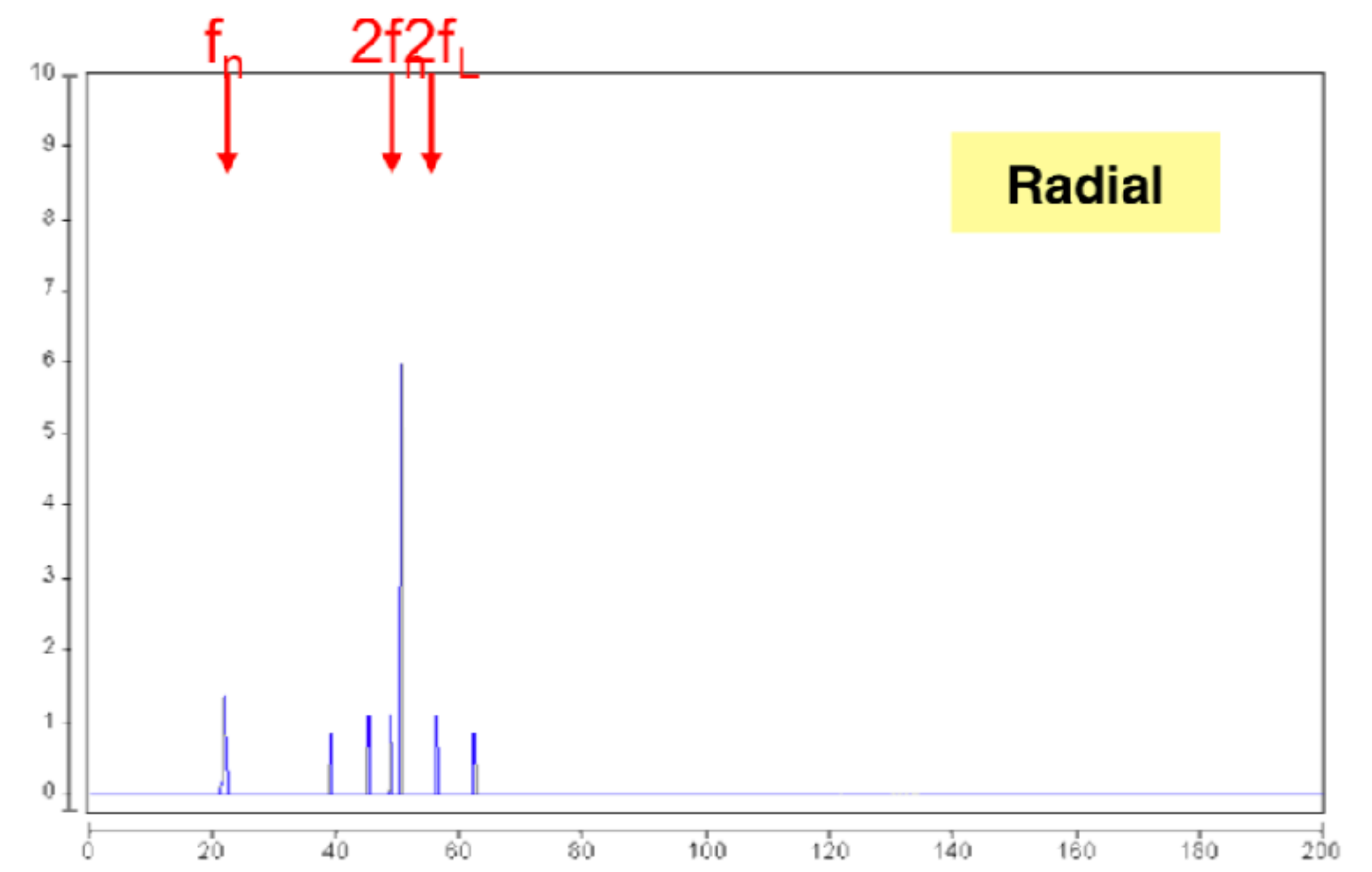
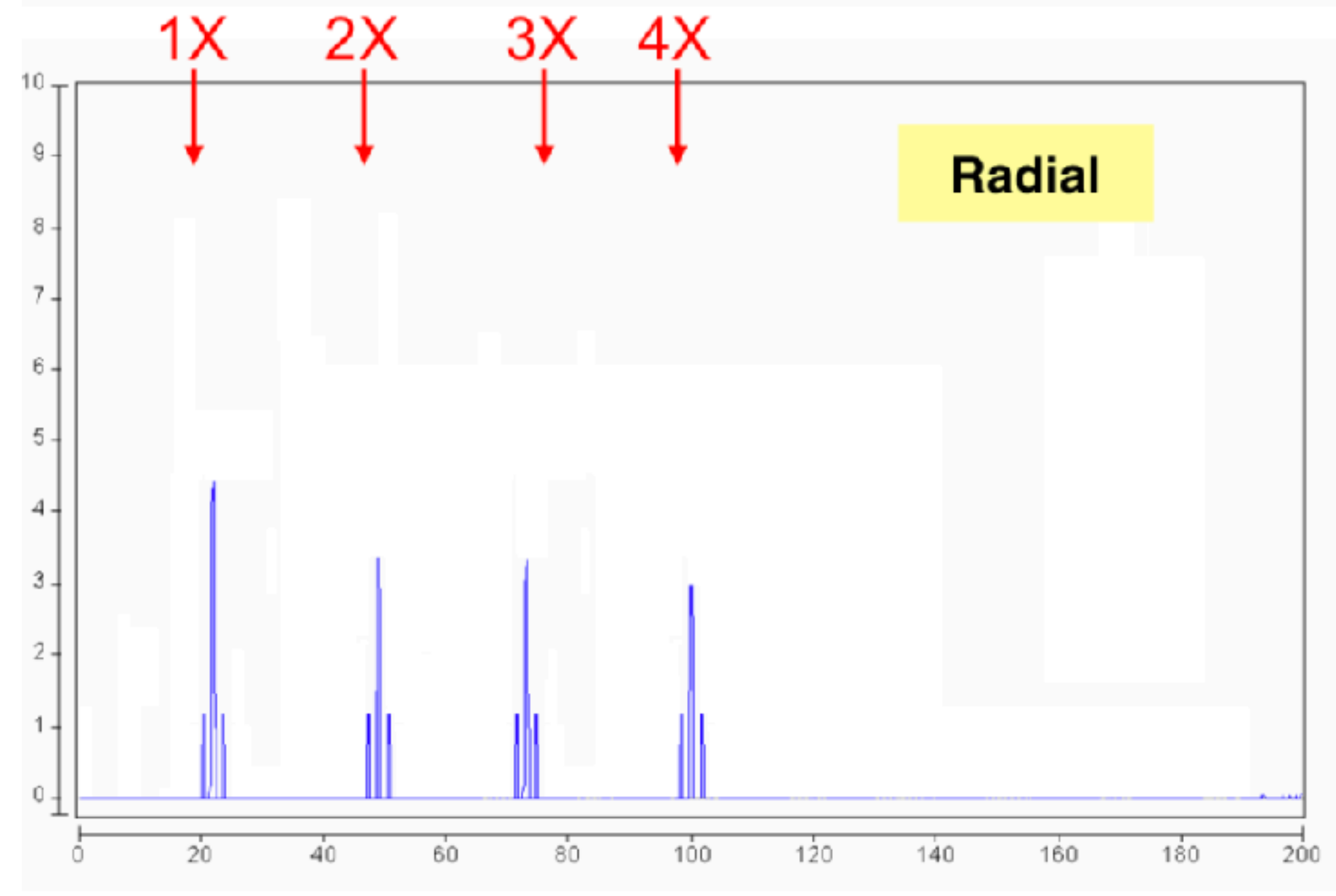
- eccentricità statore
- eccentricità rotore
- barre allentate
- barre troncate
- cuscinetti
- ..

- frequenza di alimentazione f_l
- frequenza di barra (barre) $f_{bar} = f_n * n_{bar}$
- frequenza sincrona $f_{sync} = 2f_l / p$
- frequenze di scorrimento $f_{slip} = f_{sync} - f_n$
- frequenza passaggio poli $f_p = f_{slip} * p$
- frequenza di eccitazione del drive
- tiro magnetico
- cortocircuiti
- ...



Barre rotore rotte o allentate

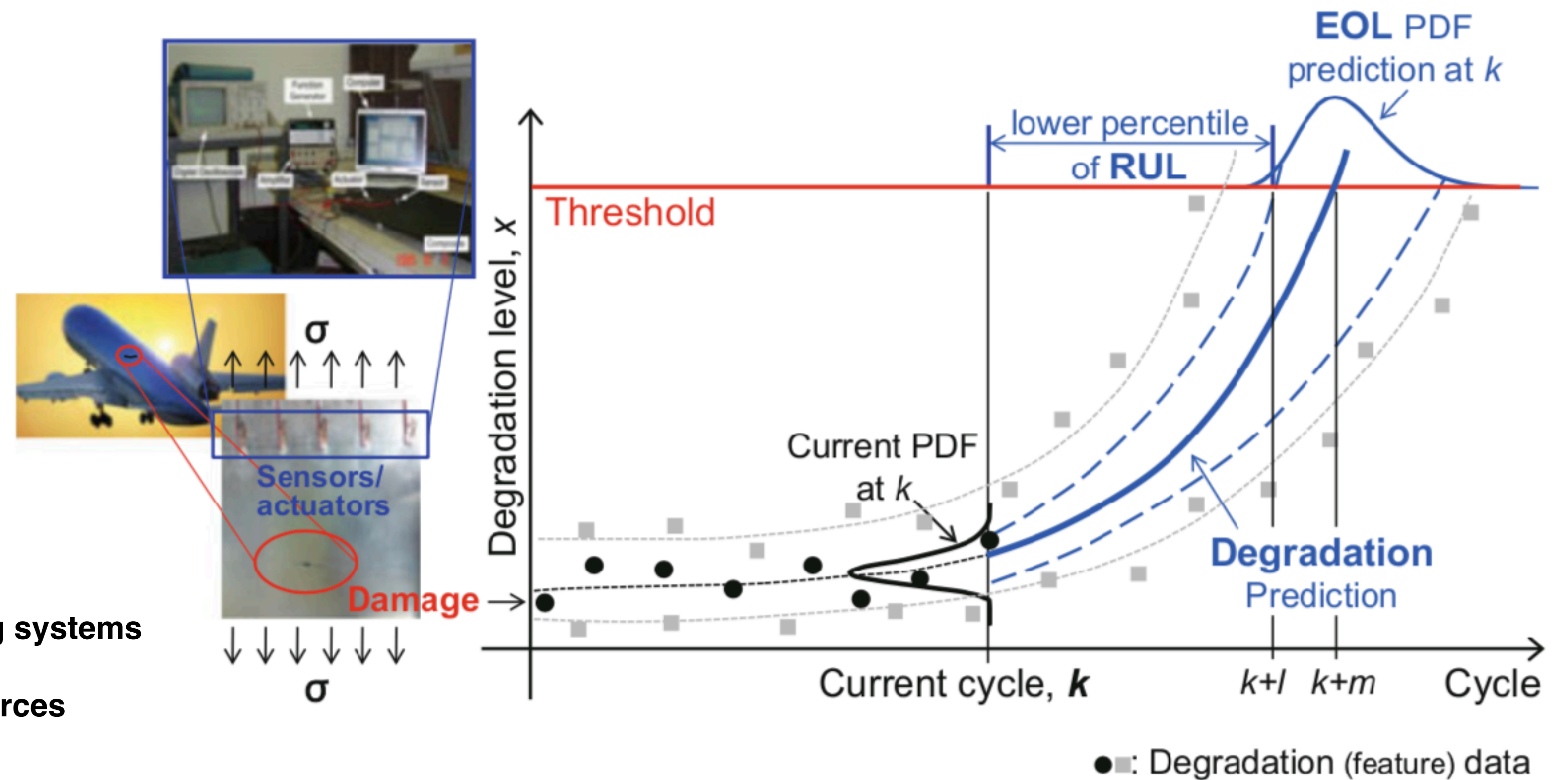
Connessioni Elettriche allentate



..questo è quanto per un quadro generale sulla **diagnosi** del macchinario basata sull'analisi delle vibrazioni

Quanto manca per dover mantenere/cambiare il pezzo?

Si apre tutto un altro mondo..la **prognosi** del macchinario, ma è un altro corso!



*Prognostic and health management of engineering systems

Nam-Ho Kim, Dawn An, Joo.ho Choi

*Data driven modelling using matlab in water resources

and environmental engineering

Shahab Araghinejad

