

meccanica delle vibrazioni

laurea magistrale
ingegneria meccanica

parte 7
Manutenzione e Diagnosi

CREATING EFFICIENCY BY THE NUMBERS

Maintenance managers can save an average of **450 hours** annually by automating reports using maintenance software.

39% of maintenance professionals say it takes too long to find parts. Software eliminates this problem by making inventory numbers more visible.

An average of 18 minutes per day is spent retrieving information with legacy systems. Going digital can eliminate this time and save the typical technician over **73 hours every year**.

Risparmiare tempo

CONTROLLING COSTS BY THE NUMBERS

\$890K

can be saved by the typical manufacturing facility every year with the increased uptime maintenance software provides.

\$100K

can be saved by the maintenance department annually by going digital and eliminating the need to file, store, recreate and find paper documents.

\$70K/YR

in energy costs can be saved by manufacturing facilities by using sensors to detect leaks in air compressors.

Risparmiare denaro

IMPROVING SAFETY BY THE NUMBERS

Maintenance software makes it easier to coordinate and track maintenance safety training, which leads to a **24%** reduction in injury rate.

24%

58k

The OSHA handed out over **58,000 violations** for non-compliance in 2016. Maintenance software can help your company avoid being part of that number.

Deficient documentation accounts for **15% of all maintenance-related injuries**. Going digital provides increased access to documents so you can eliminate this issue

15%

I dati sono il tesoro di ogni azienda!

HARNESSING KNOWLEDGE BY THE NUMBERS

The average turnover of maintenance professionals in manufacturing industry is 22%. Software **cuts the cost of training a new employee by 70%** by improving the consolidation and transfer of knowledge.

70%

Maintenance teams can **save up to \$8,500/year** for each employee by making information accessible digitally.

\$8.5k

17.8%

Going digital leads to a **17.8% reduction in MRO inventory** by allowing organizations to construct accurate and accessible inventory databases

Risparmiare risorse

REDUCING DOWNTIME, BY THE NUMBERS



160

Implementing a CMMS can save manufacturing facilities more than **160 hours** of downtime per year.



70

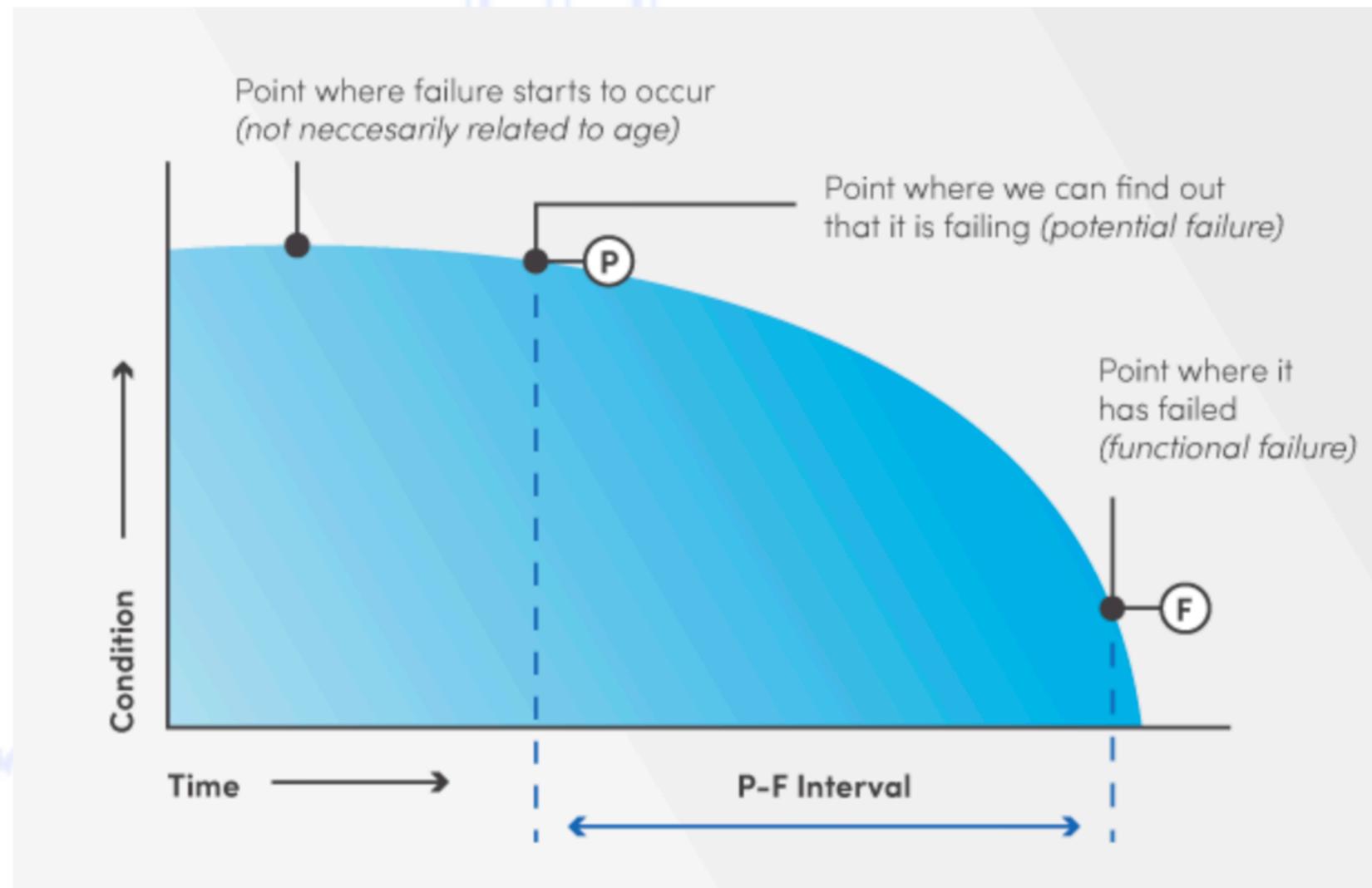
Going digital can **eliminate an average of 70** gauge reading errors every year, leading to better data, less downtime and improved asset reliability.



20.1%

Using maintenance software leads to a **20.1% reduction** in equipment downtime on average.

Fondamentale per la gestione della salute della macchine,
c'è 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, ad ogni istante di tempo, la **condizione** della della macchina e conoscerne lo **sviluppo**, permettono di prevederne la vita utile residua.

La manutenzione delle macchine deve risolvere entrambi gli aspetti!

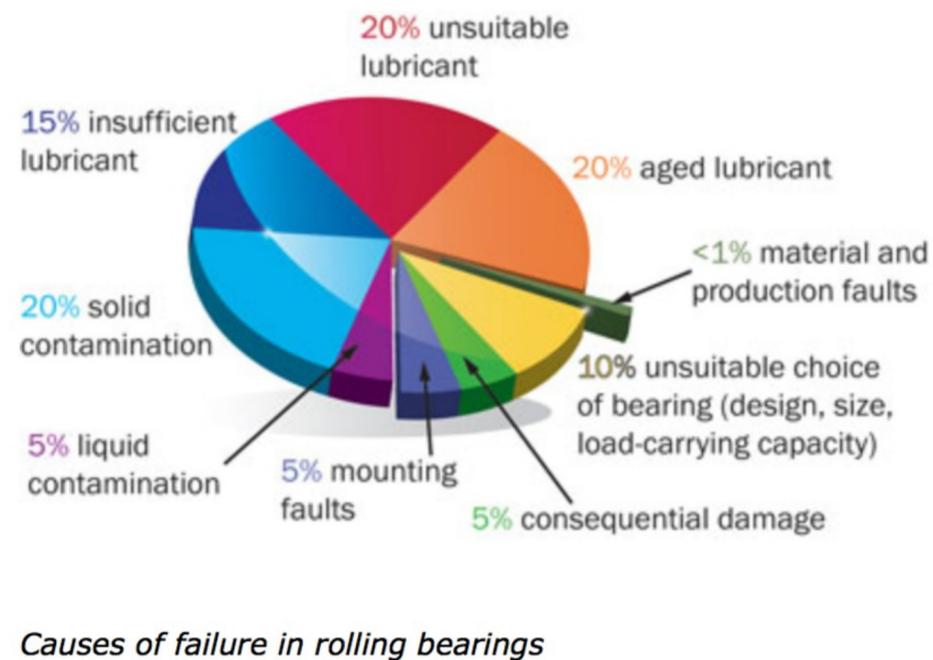
Le tecniche di manutenzione delle macchine sono fondamentali per mantenere sotto controllo i costi di gestione.

Questi possono essere variamente classificati e raggruppati (corrente elettrica, aria compressa, pezzi di ricambio, manutenzione, mancata produzione...), ma se è possibile quantificarli, è possibile cercarne di minimizzarli.

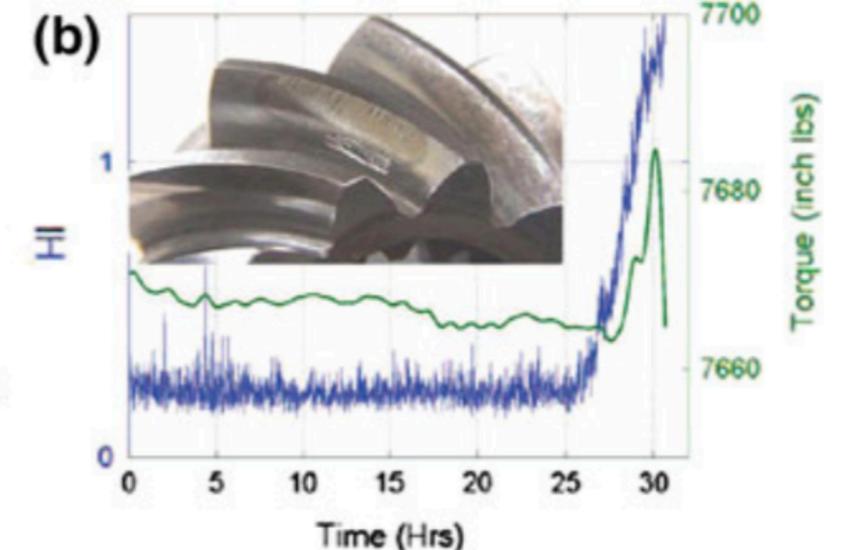
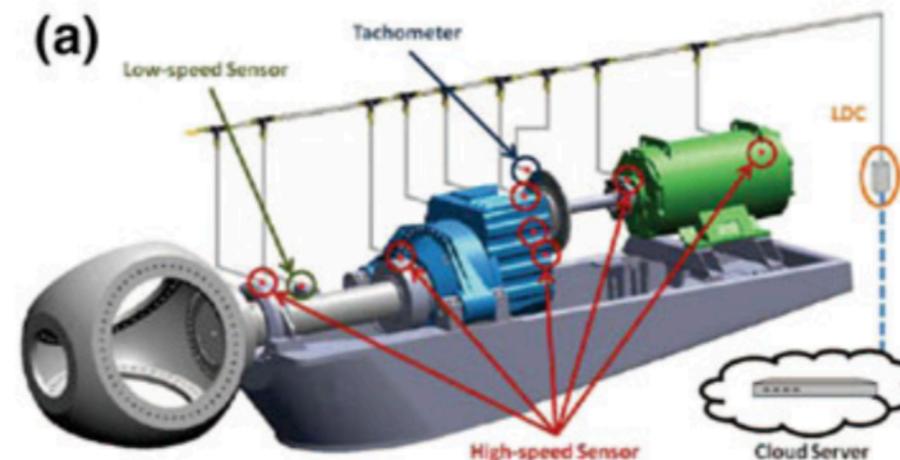
In questo ambito ci limitiamo a considerare le problematiche relative alla manutenzione macchinario, intesa come quella serie di attività ed interventi volti a mantener la macchina in grado di svolgere la funzione per la quale è stata progettata e costruita.

come cambiano i numeri 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
1991-2000 years	1.13	0.82	0.49	0.35

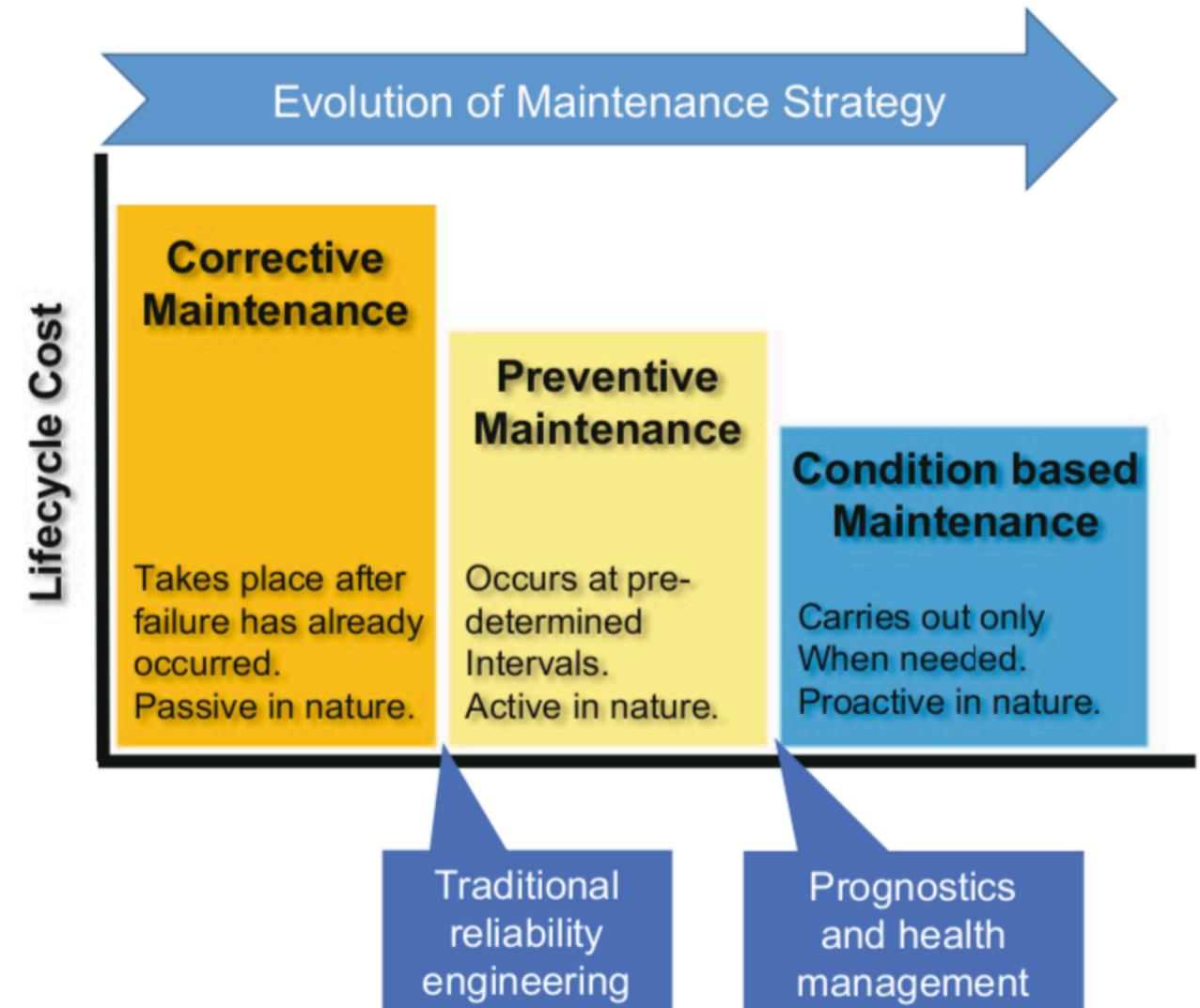
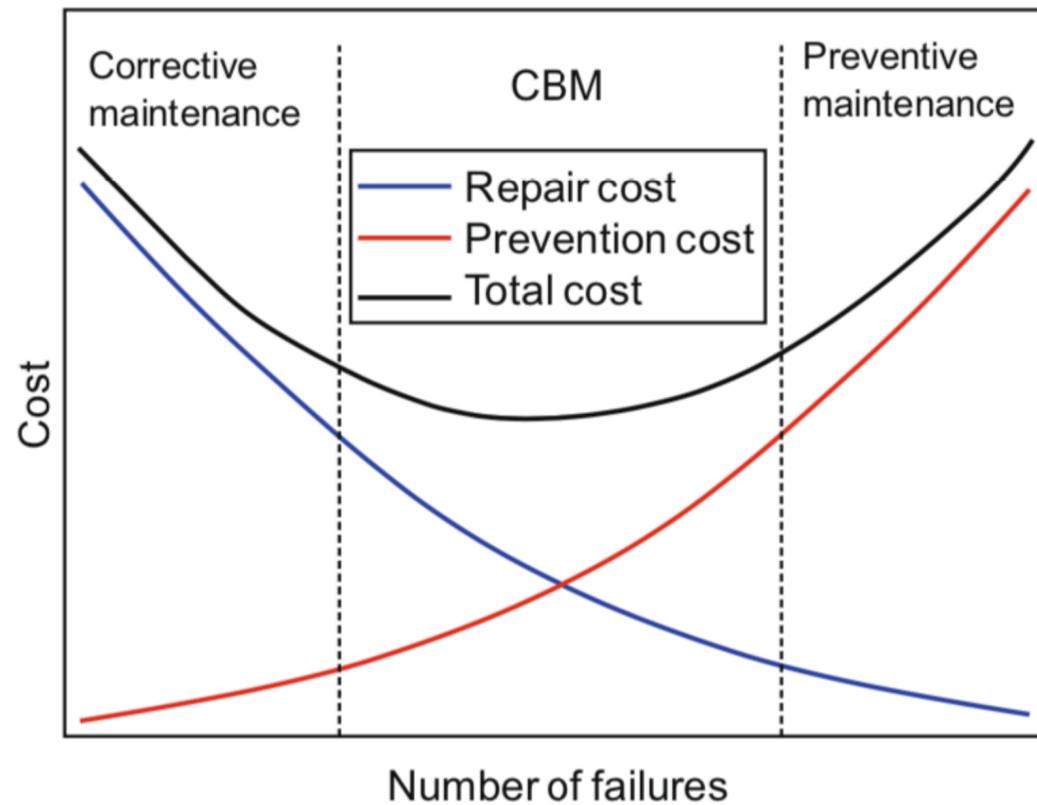


perché si rompono i cuscinetti?



Gli interventi manutentori 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

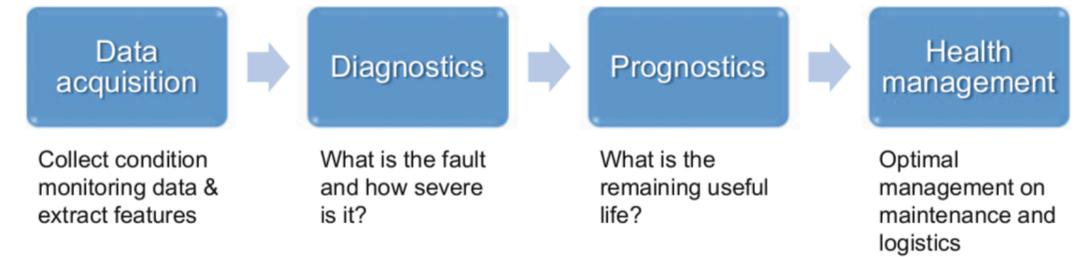
La scelta tra questi approcci, dipende dalla conoscenza della macchina,
 dal costo dei ricambi e delle attività di manutenzione,
 dalle problematiche relative alla mancata produzione,
 dalla sicurezza per l'impianto ed il personale..



Tecniche di manutenzione predittiva

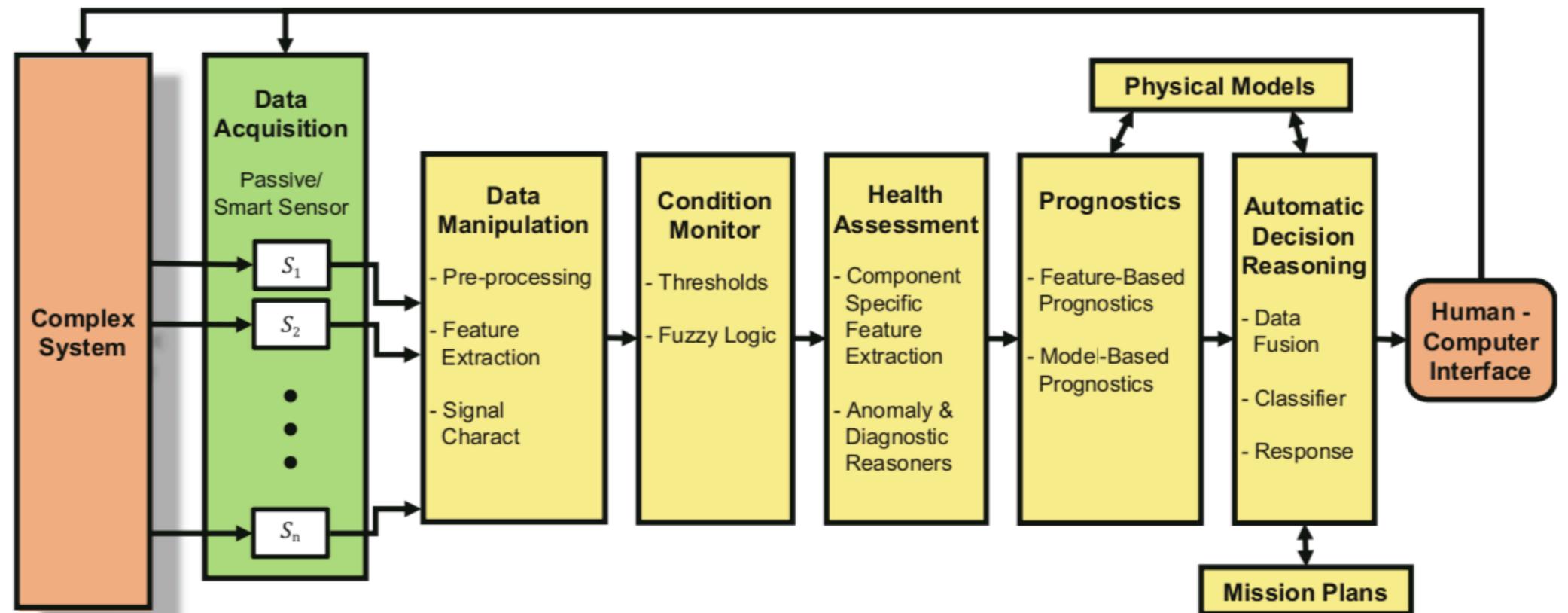
Negli anni la manutenzione si è sviluppata grandemente soprattutto grazie alle tecniche di misura ed analisi dei dati che consentono di

- **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!

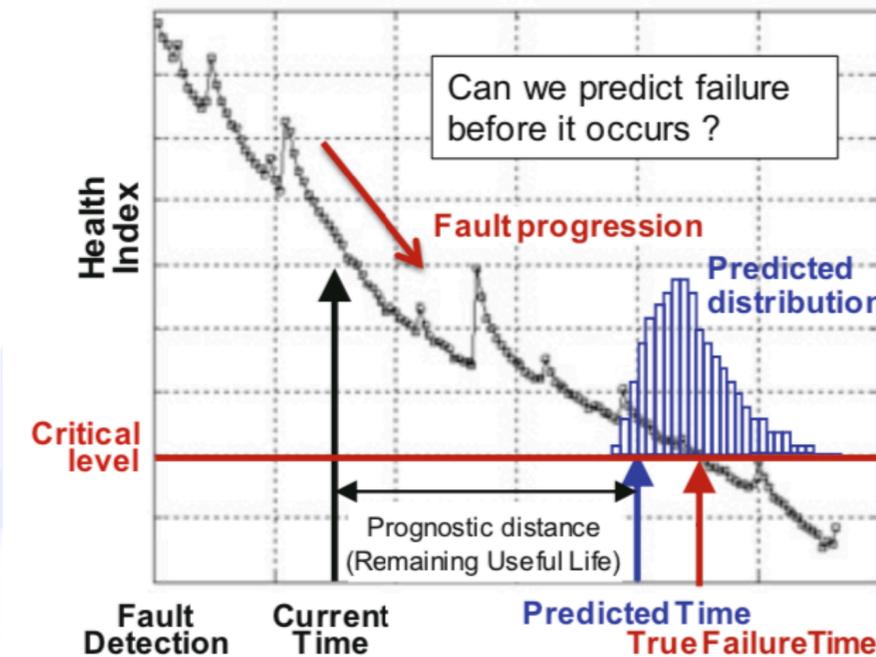
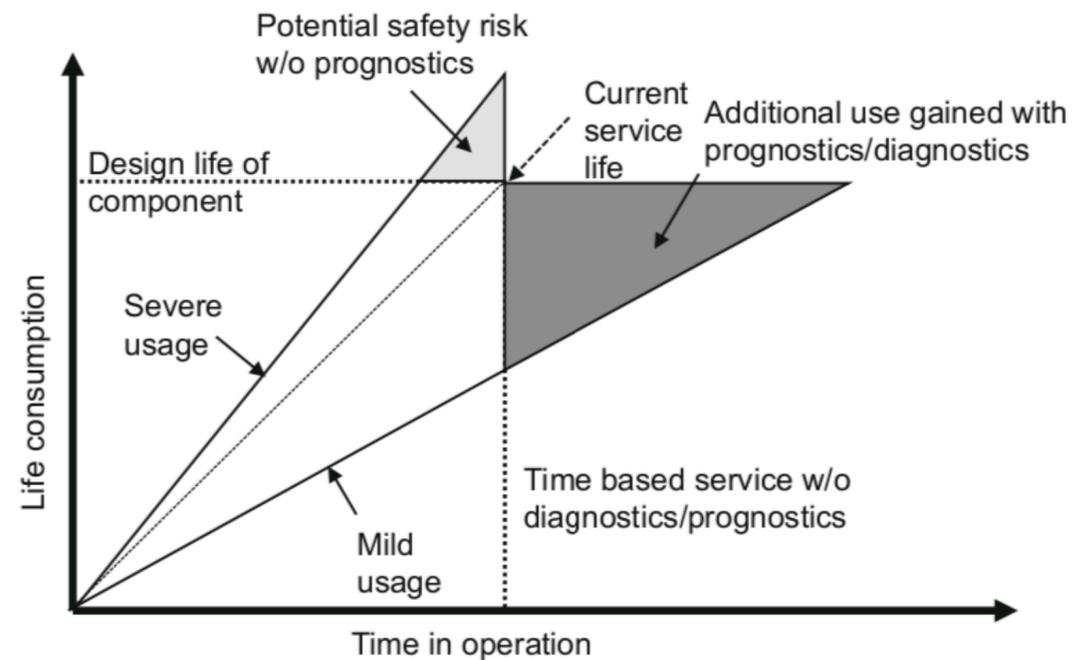
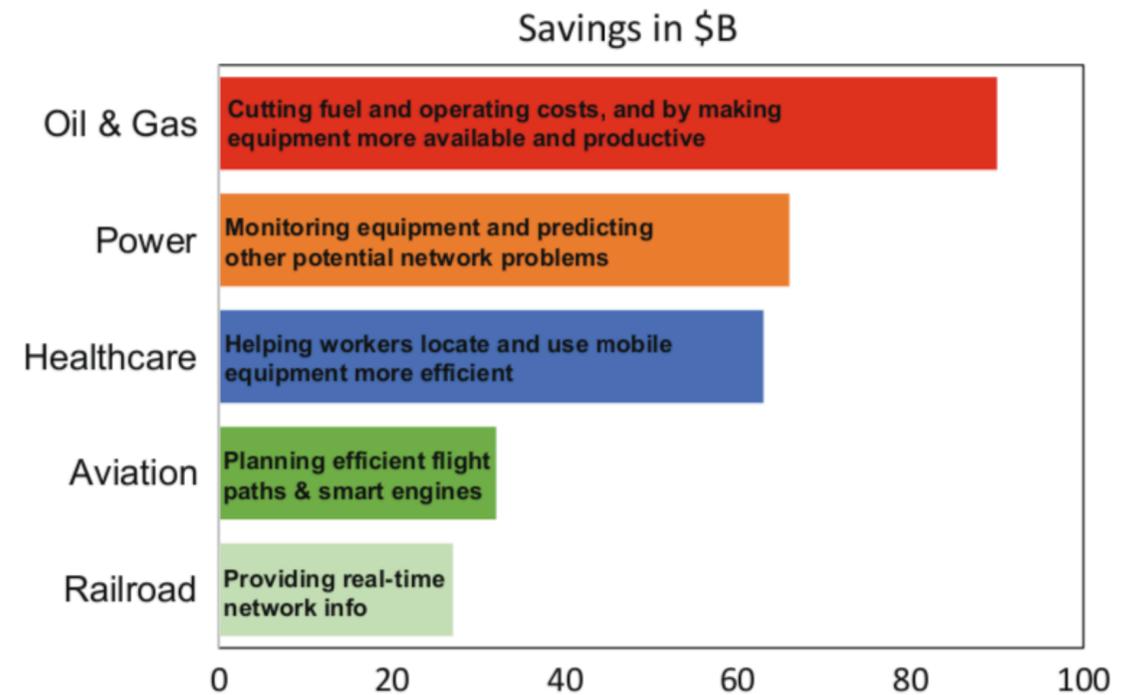


ITHACA - Information Technology for **Health Assessment** and Customized Analysis

Tecniche di manutenzione predittiva

I benefici derivanti da attività di misura e monitoraggio sono molteplici ad esempio:

- 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
- ...



Entriamo maggiormente nelle "filosofie" di manutenzione

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*

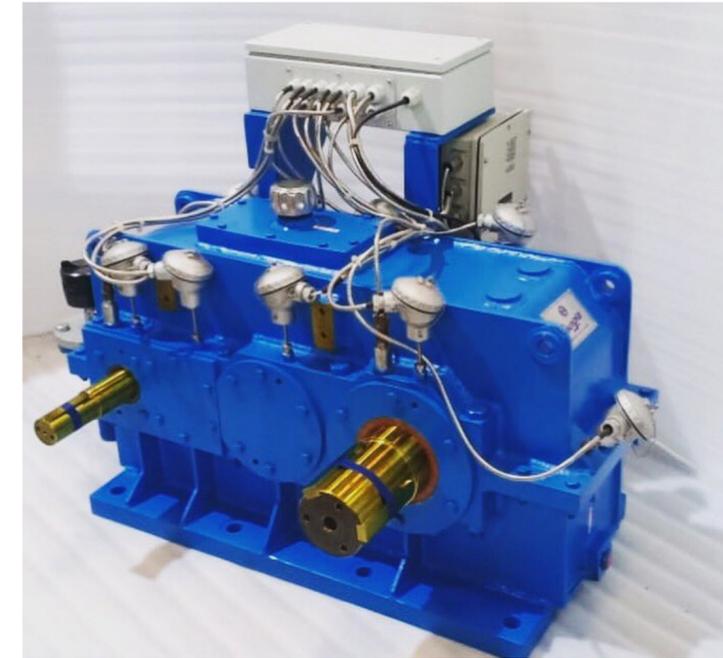
Svantaggi:

- 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:

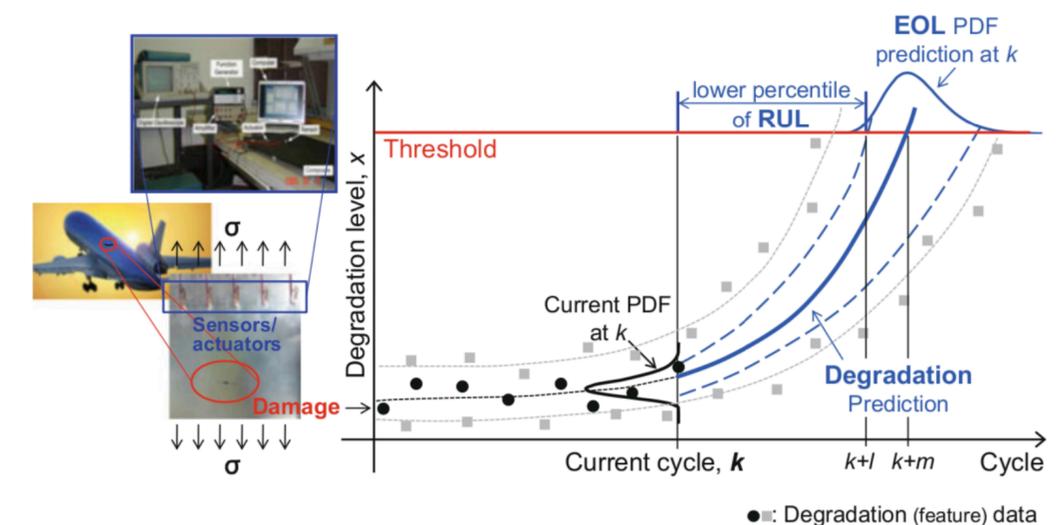
- richiede sistema di monitoraggio (investimento, tempo, risorse)
- richiede expertise specifico
- richiede la costruzione di modelli descrittivi

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"



Tecniche di manutenzione predittiva

uptime

complessità

run to failure

preventive maintenance

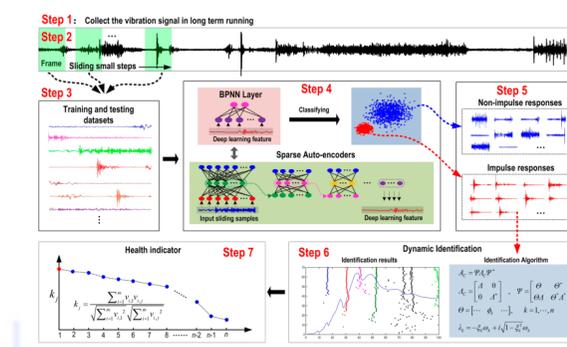
predictive maintenance

proactive maintenance

cmms

cmms*
monitoraggio

cmms*
monitoraggio
modelli



costo ricambi

costo magazzino

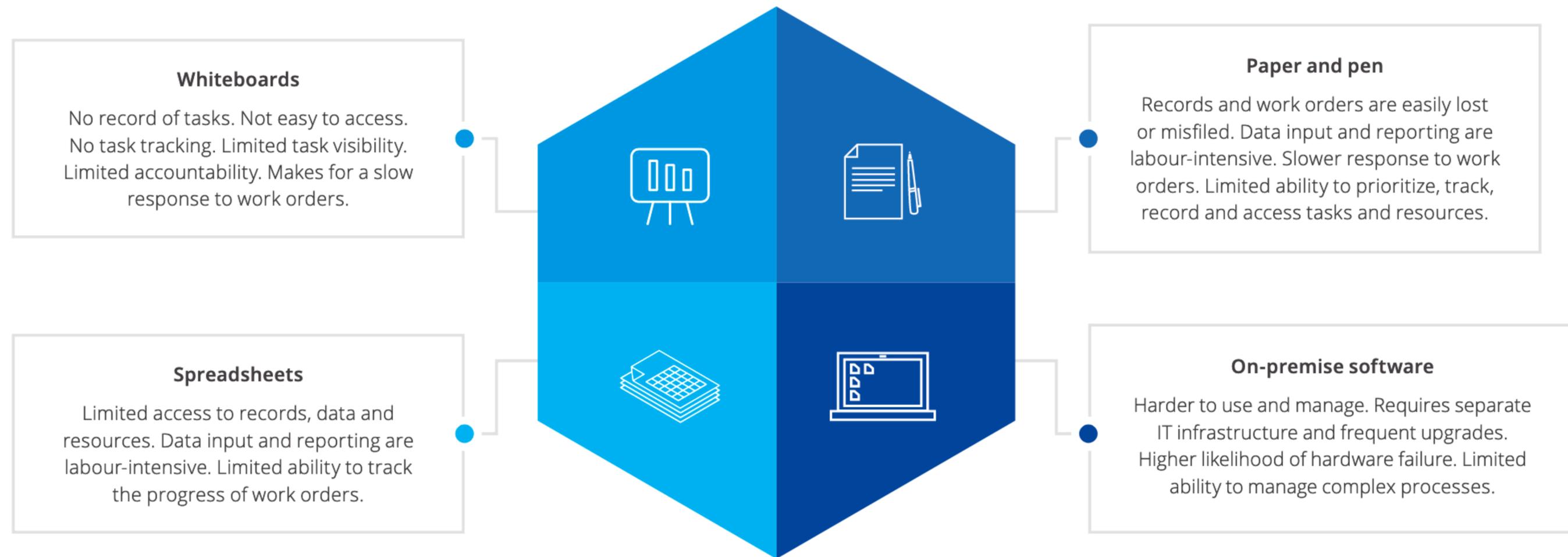
perdite produzione

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

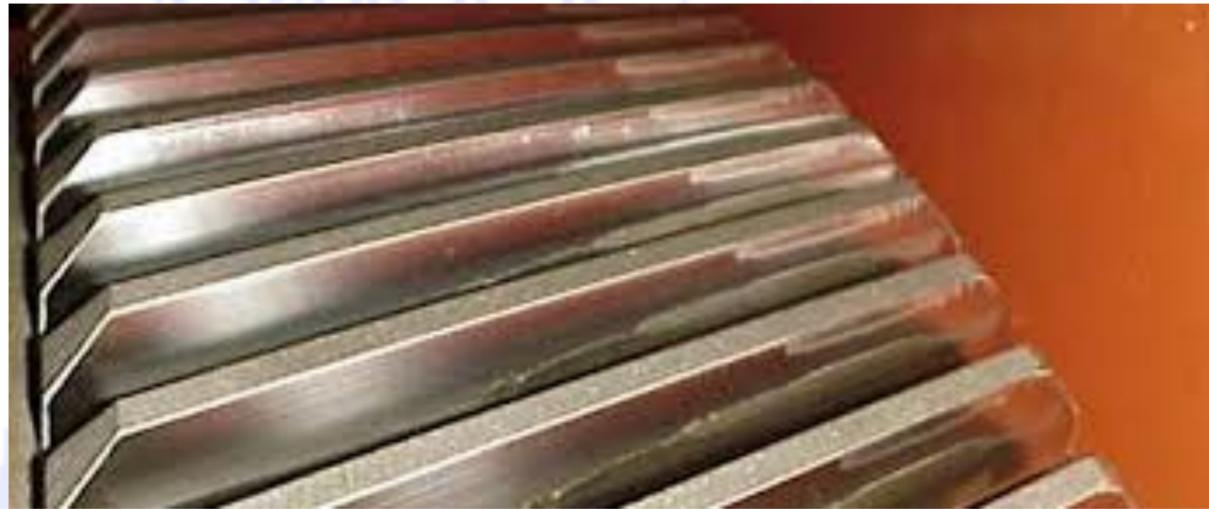
Non è un processo imemdiato!

*computerized maintenance management system

..queste tecniche di manutenzione devono essere affiancate dalla trasformazione digitale aziendale!
L'occasione presentata dai programmi dell'Industria 4.0 o in generale dell'IIoT non devono essere persa!



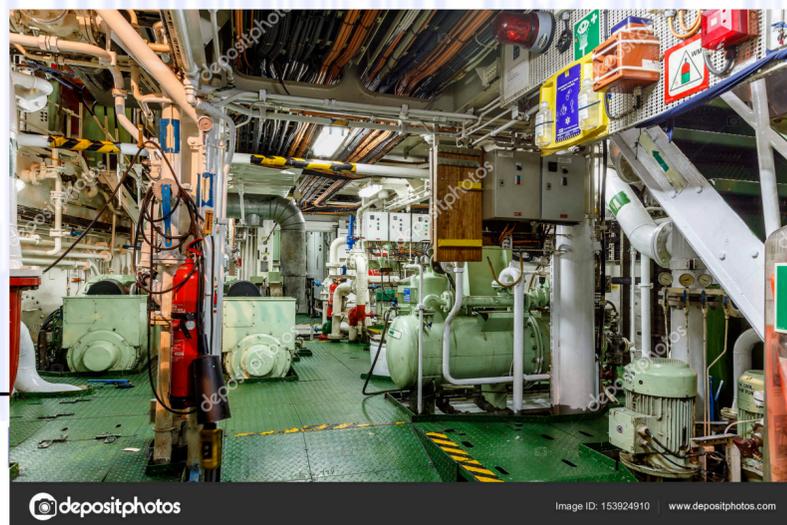
...la piattaforma **ITHACA** è un prodotto Industria4.0!



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

“miglior maniera possibile” perché (soprattutto su macchine nuove) esiste un margine di incertezza ed un minimo di customizzazione della catena di misura
es. sulla prossimità tra sensore e danno incipiente, 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)



Concentriamo l'attenzione sul monitoraggio

Prevede le seguenti fasi

- 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

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

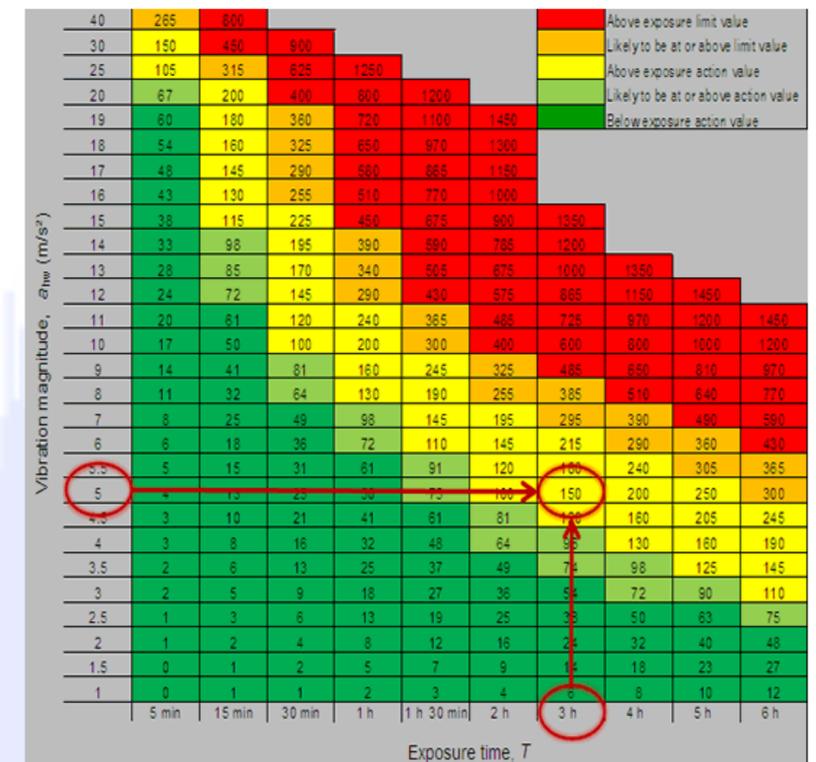
Figure 1 Vibration Severity ISO 10816-3 : 2009

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

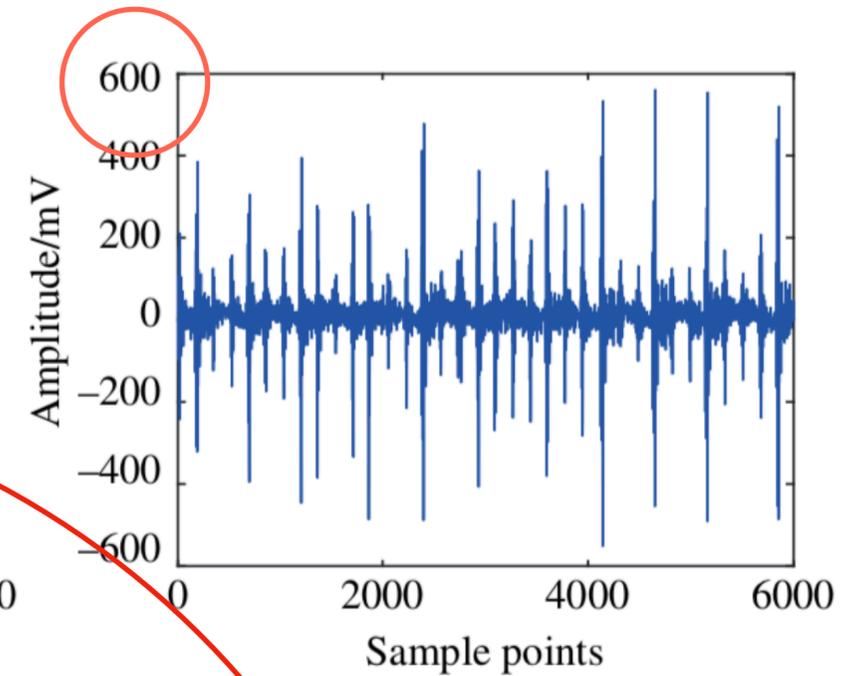
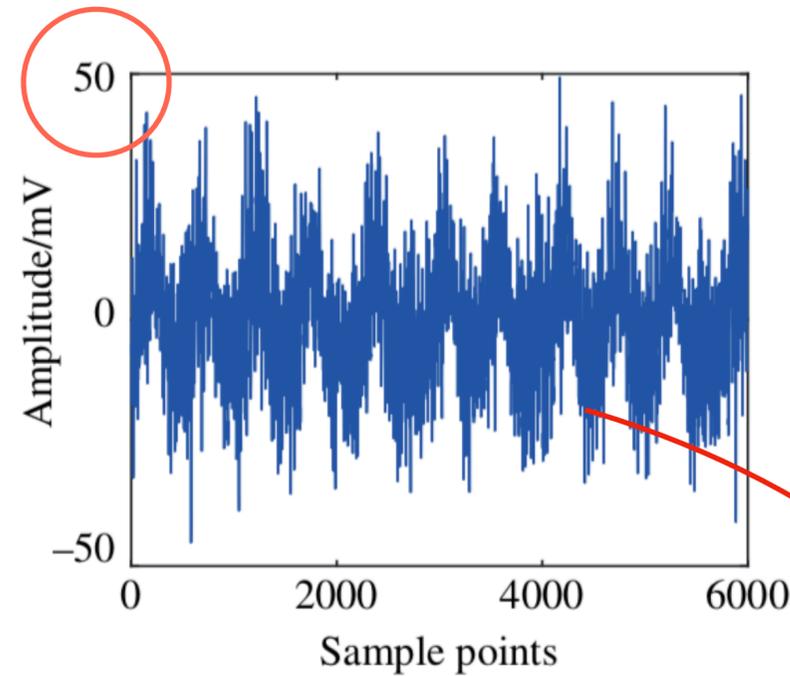
Group 1 Huge Machine Output, 300kW~50MW
Group 2 Middle Machine Output, 15kW~300kW

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

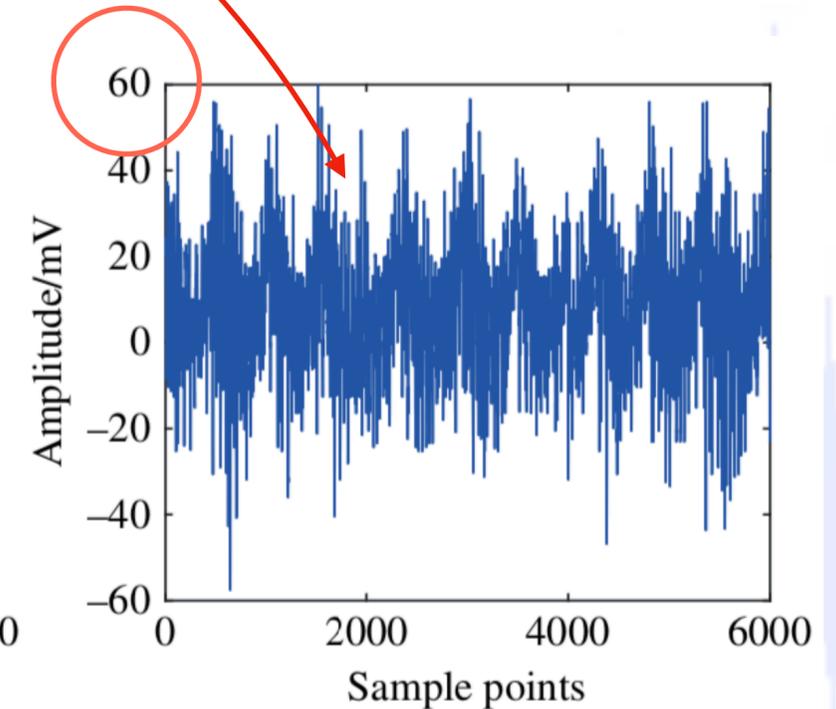
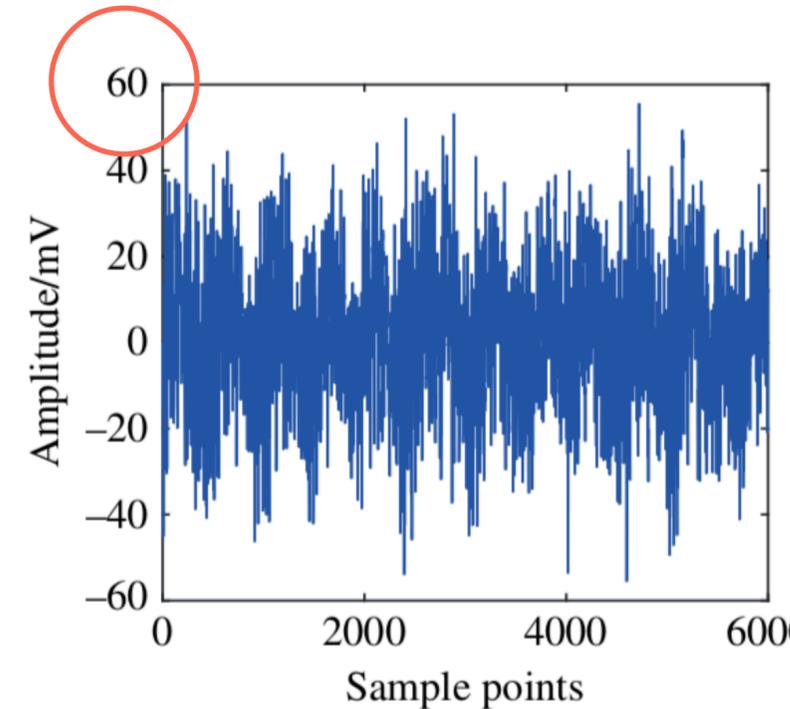


L'analisi dati più elementare è quella visiva
ma la capacità quantitative e diagnostiche
risultano molto limitate

Misura Vibrazioni
Cuscinetto Nuovo
Vs
Cuscinetto danno Guida interna



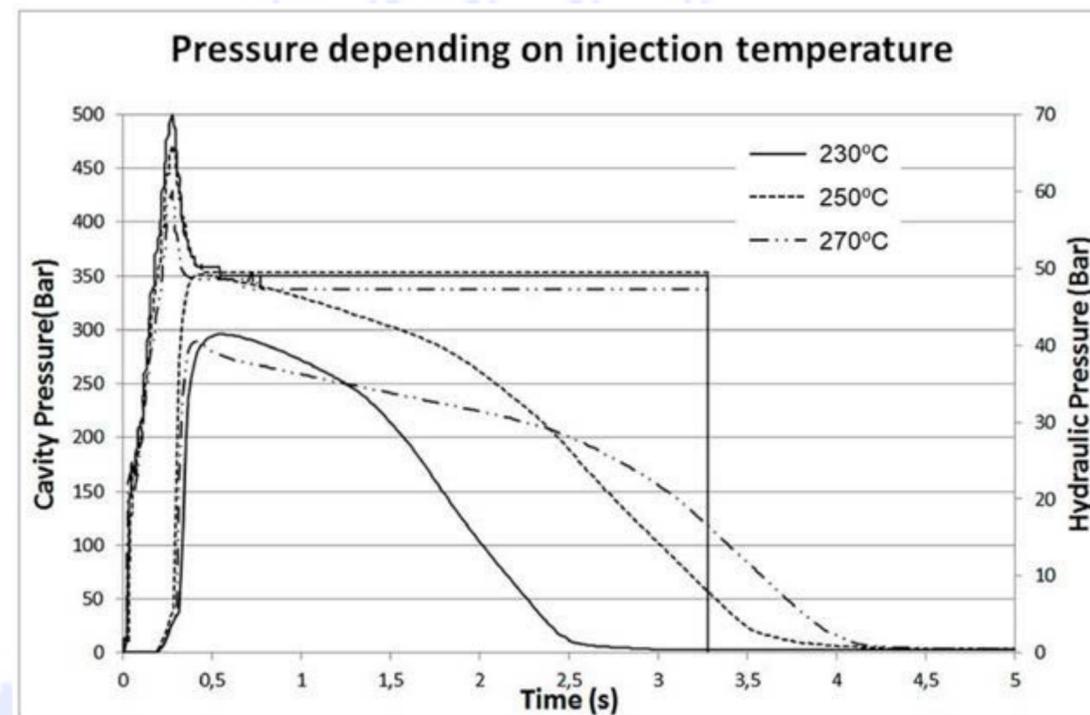
Misura Vibrazioni
Cuscinetto danno Guida esterna
vs
Cuscinetto usurato



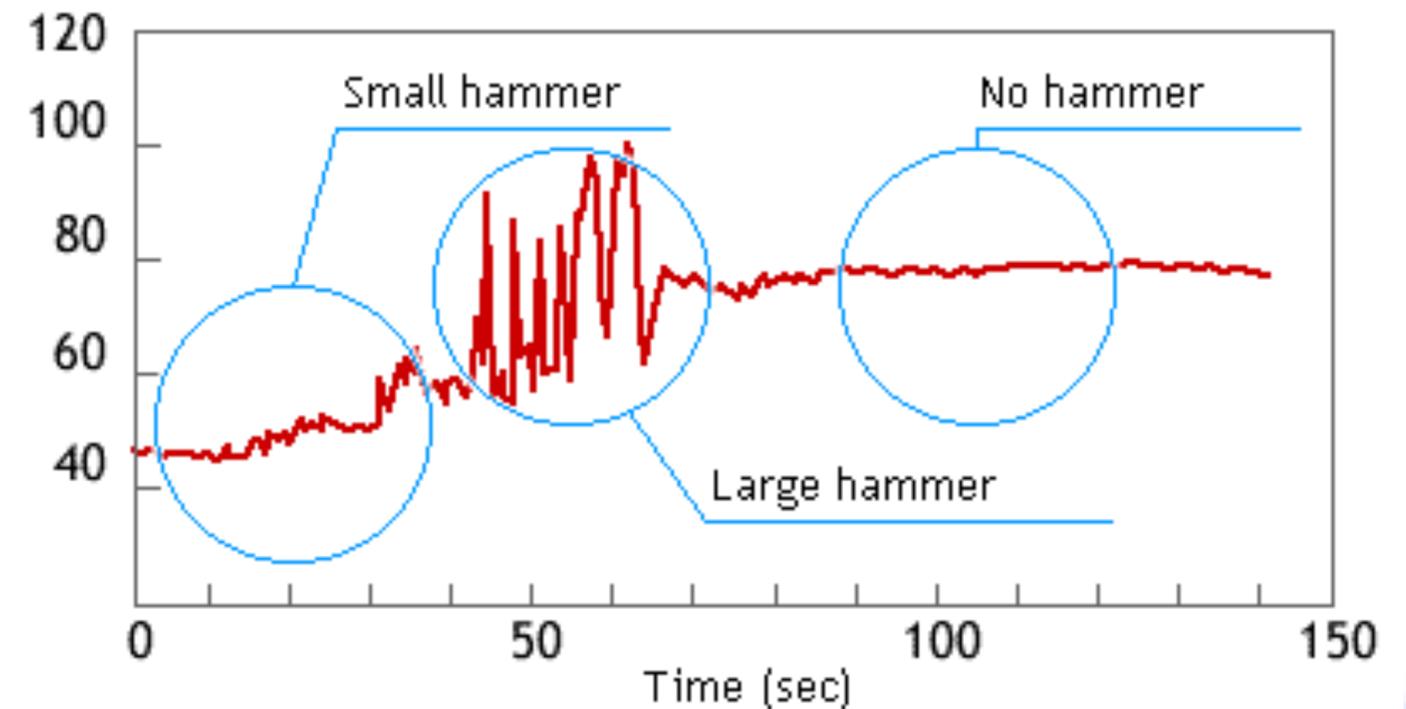
Servono sicuramente tecniche di analisi più raffinate, ma soprattutto in grado di fornire una valenza quantitativa al dato.

Le più semplici, sono le tecniche di analisi dei dati nel dominio del tempo, di estrazione statistica! che valutano gli indicatori su acquisizioni di tempo definite e costanti.

L'intervallo di analisi è fondamentale ed è legato al processo che si vuole monitorare e lo deve contenere interamente



es. Pressofusione alluminio
cosa ci interessa veramente?



es. Colpo d'ariete
cosa ci interessa veramente?



Gli indicatori più comuni 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

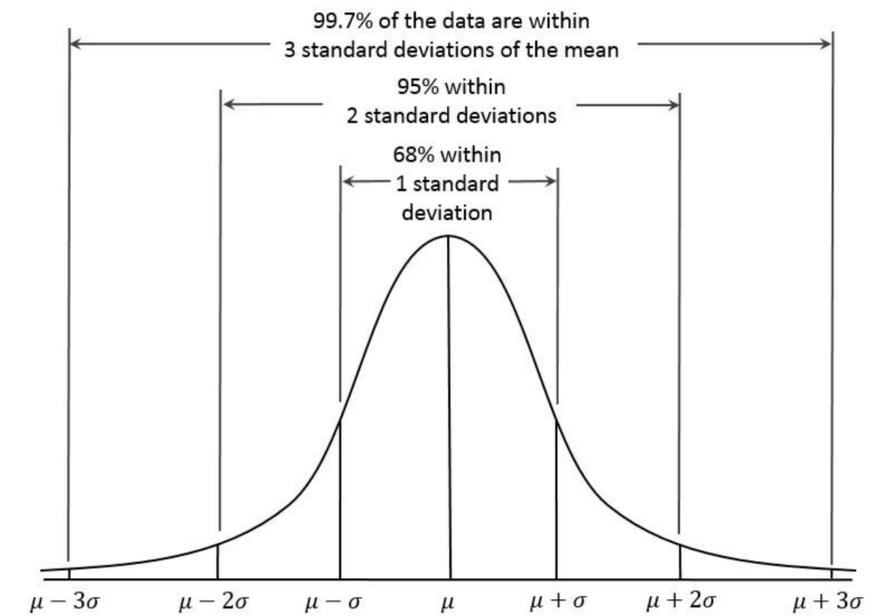
$$x_C = \frac{x_M}{x_{RMS}}$$

Sono parametri globali!
Da questi avere capacità diagnostiche
(interpretare cosa si sta danneggiando)
resta difficile!

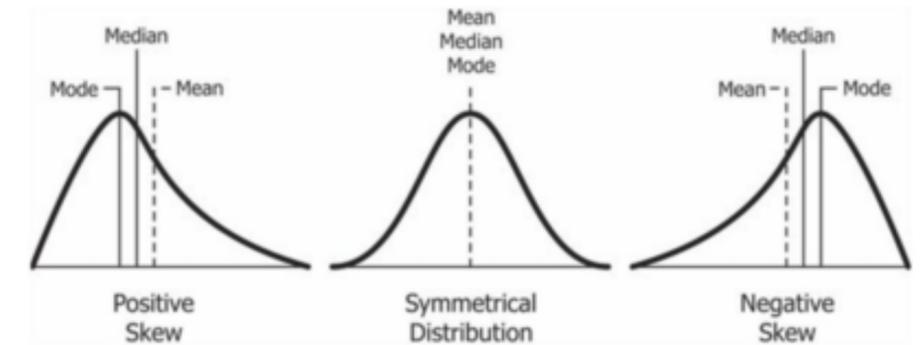
Come correlare puntualmente queste informazioni con la rottura di una ruota dentata?

- Valore di Picco
- Valore Medio
- Valore RMS
- Valore Picco Picco
- Valore di Cresta

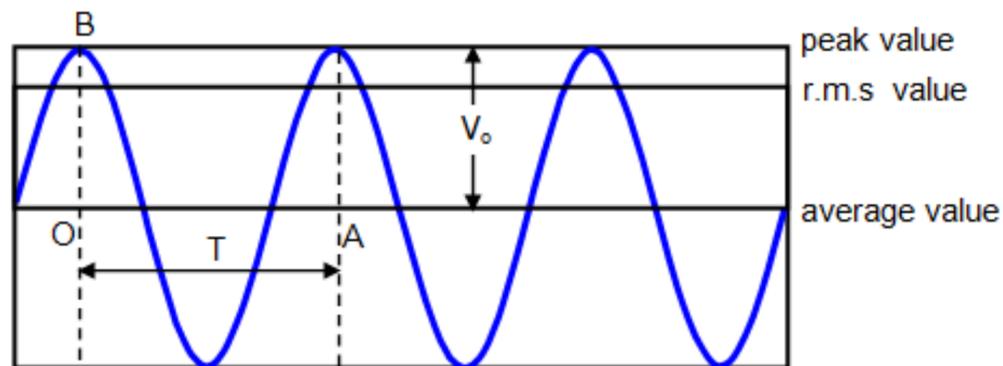
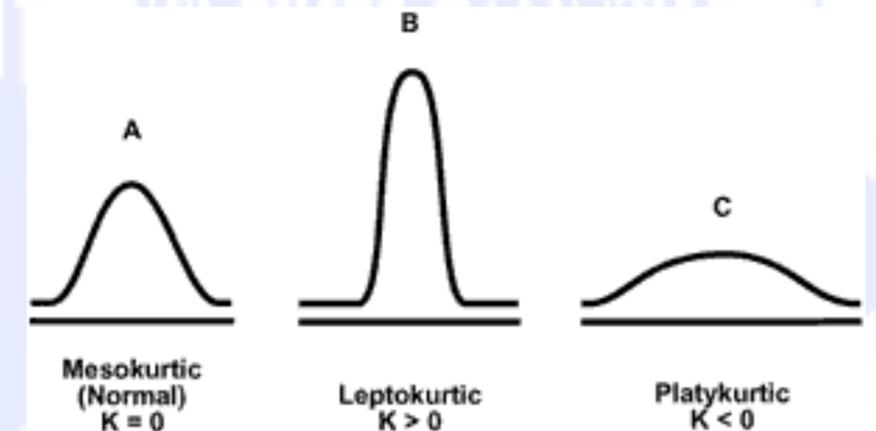
Valore della Varianza
o Deviazione Standard



Valore della Skewness (MSO3)



Valore della Kurtosis (MSO4)



Per compensare questa difficoltà ogni settore ha cercato di definire un indicatore in grado di evidenziare qualche particolarità della distribuzione del dato che potrebbe tornare utile 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

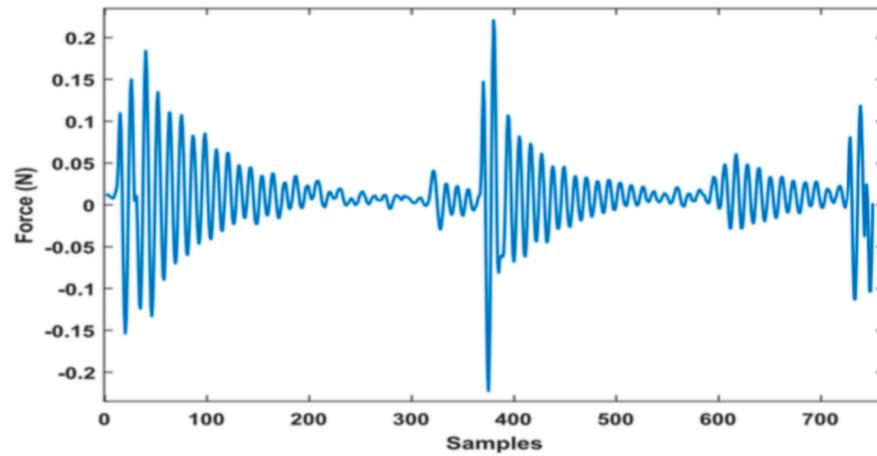
*Momenti statici di ordine superiore
(5, 6, 7, 8, 9)*

Entropia

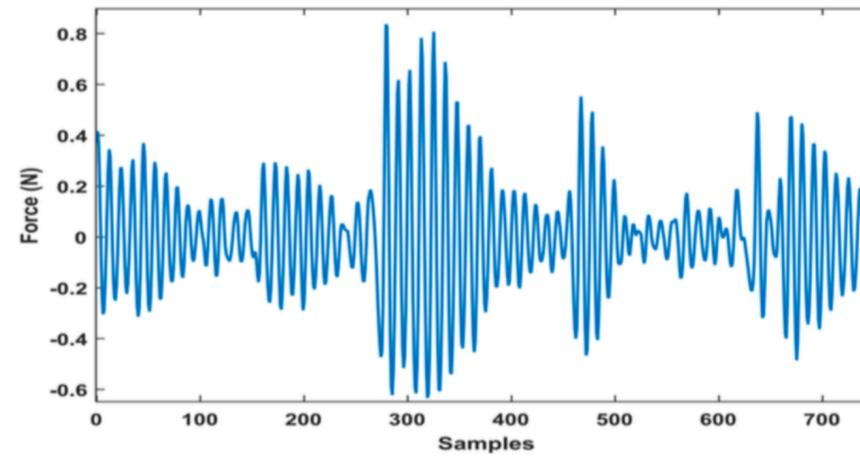
..la cui usabilità ed interpretazione sono abbastanza discutibili
l'applicabilità rimane ristretta a casi molto particolari!

Come usarli questi indicatori per interpretare segnali di questo tipo...

Cuscinetto
Danno Assiale



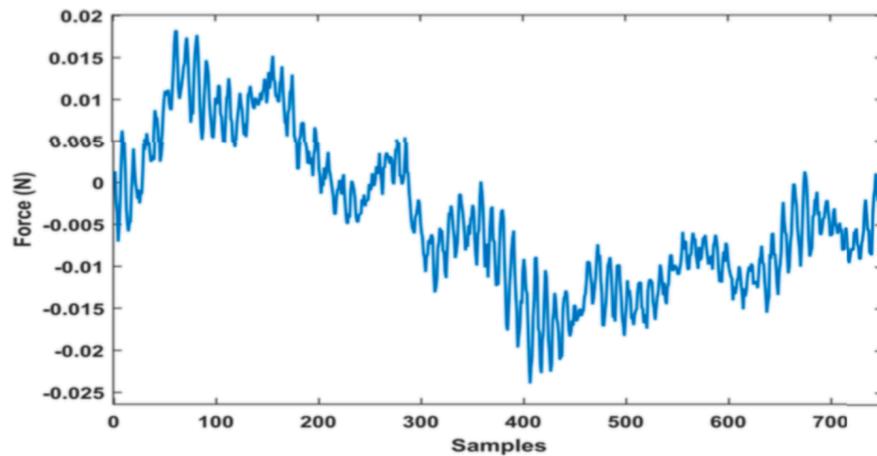
(a)



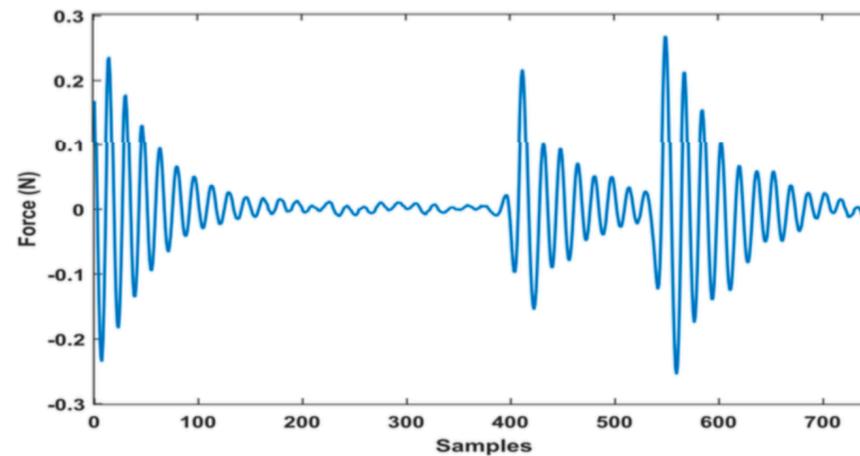
(b)

Cuscinetto
Contaminanti lubirificazione

Cuscinetto
Nuovo



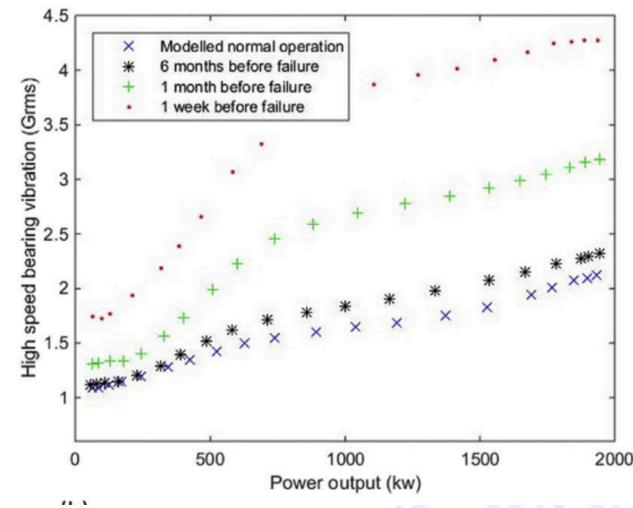
(c)



(d)

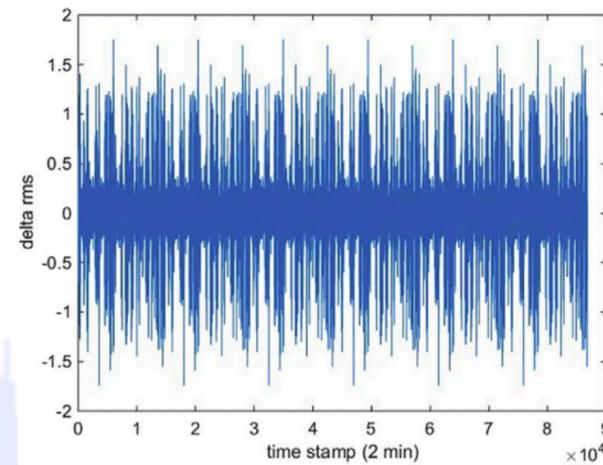
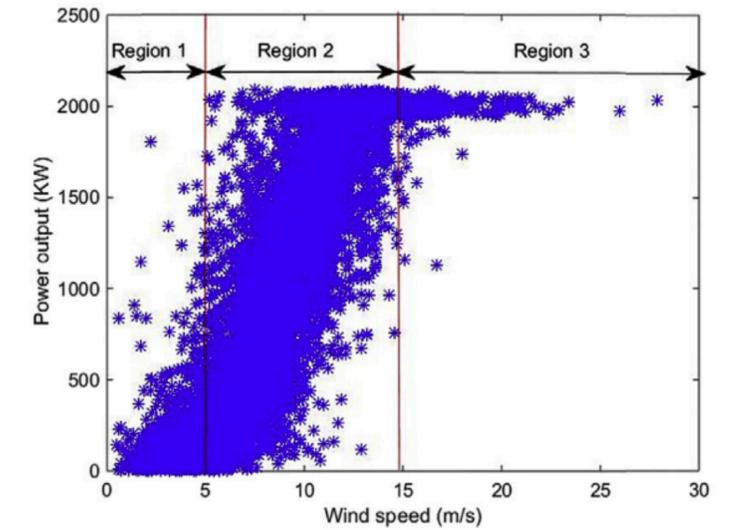
Cuscinetto
Danno Radiale

Quello che si può fare sicuramente è tracciare nel tempo e rispetto dal altre grandezze, l'andamento di questi indicatori ricercandone la variazione (statisticamente) significativa

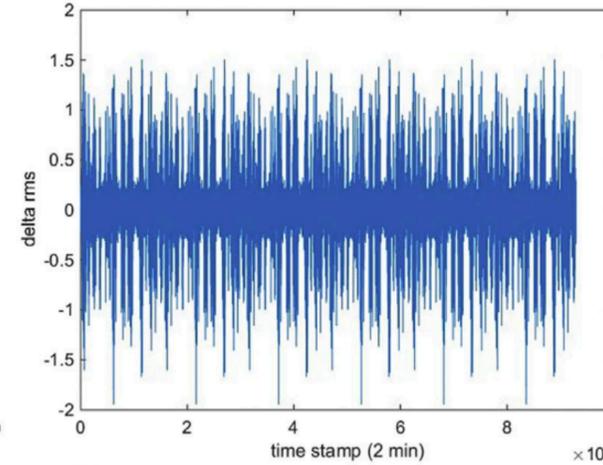


L'esperienza specifica e una certa numerosità di failures permette di intervenire appropriatamente

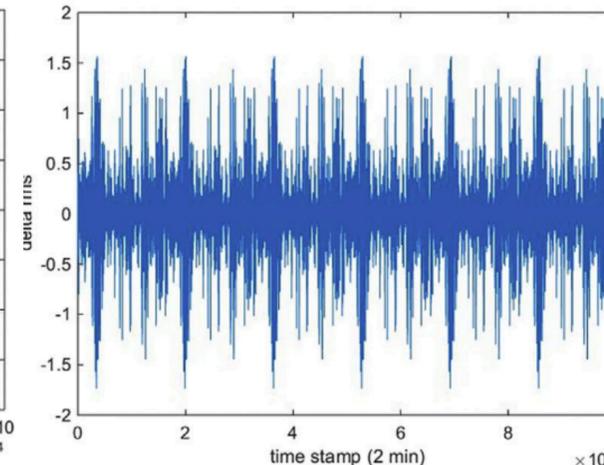
(Quanti più dati si confrontano quanto maggiori sono le possibilità di identificare variazioni di comportamento)



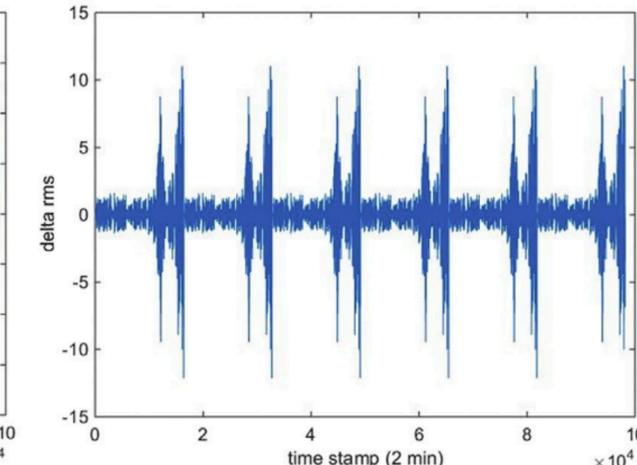
Funzionamento Normale



6 mesi prima della rottura



1 mese prima della rottura



1 settimana prima della rottura

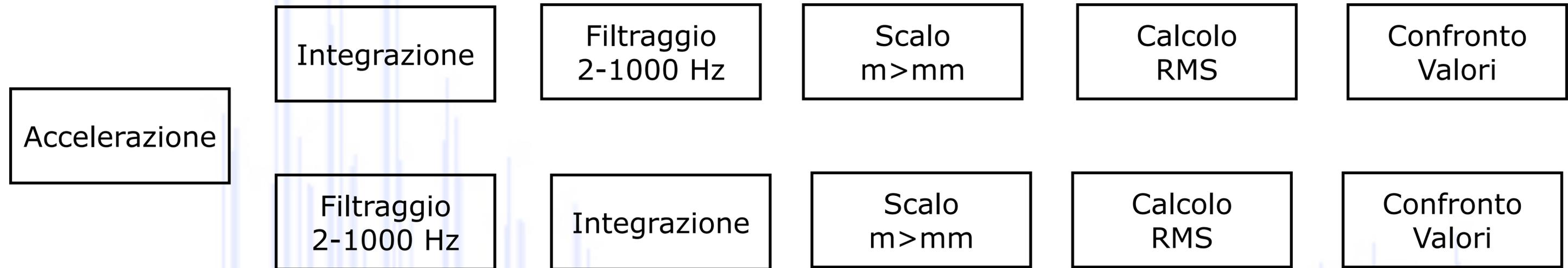
Il caso più classico di monitoraggio con RMS è la norma ISO 10816 (o nella versione aggiornata ISO 20816 a seconda della sezione di interesse)

Fornisce i livelli di velocità RMS limite, per le diverse tipologie di macchine, potenze installate, e tipologia di fondazioni.
 E' il modo più giusto di partire con il monitoraggio se non si hanno informazioni pregresse sulla macchina.

VIBRATION SEVERITY PER ISO 10816-1						
Machine	Class I		Class II	Class III	Class IV	
	in/s	mm/s	Small Machines	Medium Machines	Large Rigid Foundation	Large Soft Foundation
Vibration Velocity Vrms	0.01	0.28				
	0.02	0.45				
	0.03	0.71	GOOD			
	0.04	1.12				
	0.07	1.80				
	0.11	2.80	SATISFACTORY			
	0.18	4.50				
	0.28	7.10	UNSATISFACTORY			
	0.44	11.20				
	0.70	18.00				
	1.10	28.00	UNACCEPTABLE			
	1.77	45.90				

- Part1 **Guidelines** > ISO:20816:2016
- Part2 **Land Based Steam turnbines >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**

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 quanto acquisisco?
come filtro? (nel tempo o in frequenza), con che filtro?
come integro? (nel tempo o in frequenza), a quanto filtro passa alto?
...

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

Esistono molte norme che danno delle indicazioni analoghe..

BS (British Standard)

VDI (Verein Deutsche Ingenieure)

API (American Petroleum Industry)

GOST (Gosudarstvennyy Standart)

UNI (Ente Nazionale Italiano di Unificazione)

ANSI American National Standards Institute

ASA Acoustic Society of America

AGMA America Gear Manufacturer Association

In ogni caso bisogna fare molta attenzione a come interpretare le indicazioni delle norme, capendo quale è lo spirito per il quale la norma è stata scritta

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 assicurare il funzionamento in impianto durante le normali operazioni ..
non a che vedere con la protezione della macchina durante la vita utile!

Molto più informativa è l'analisi in frequenza dei segnali acquisiti
(fatta la trasformata di Fourier)

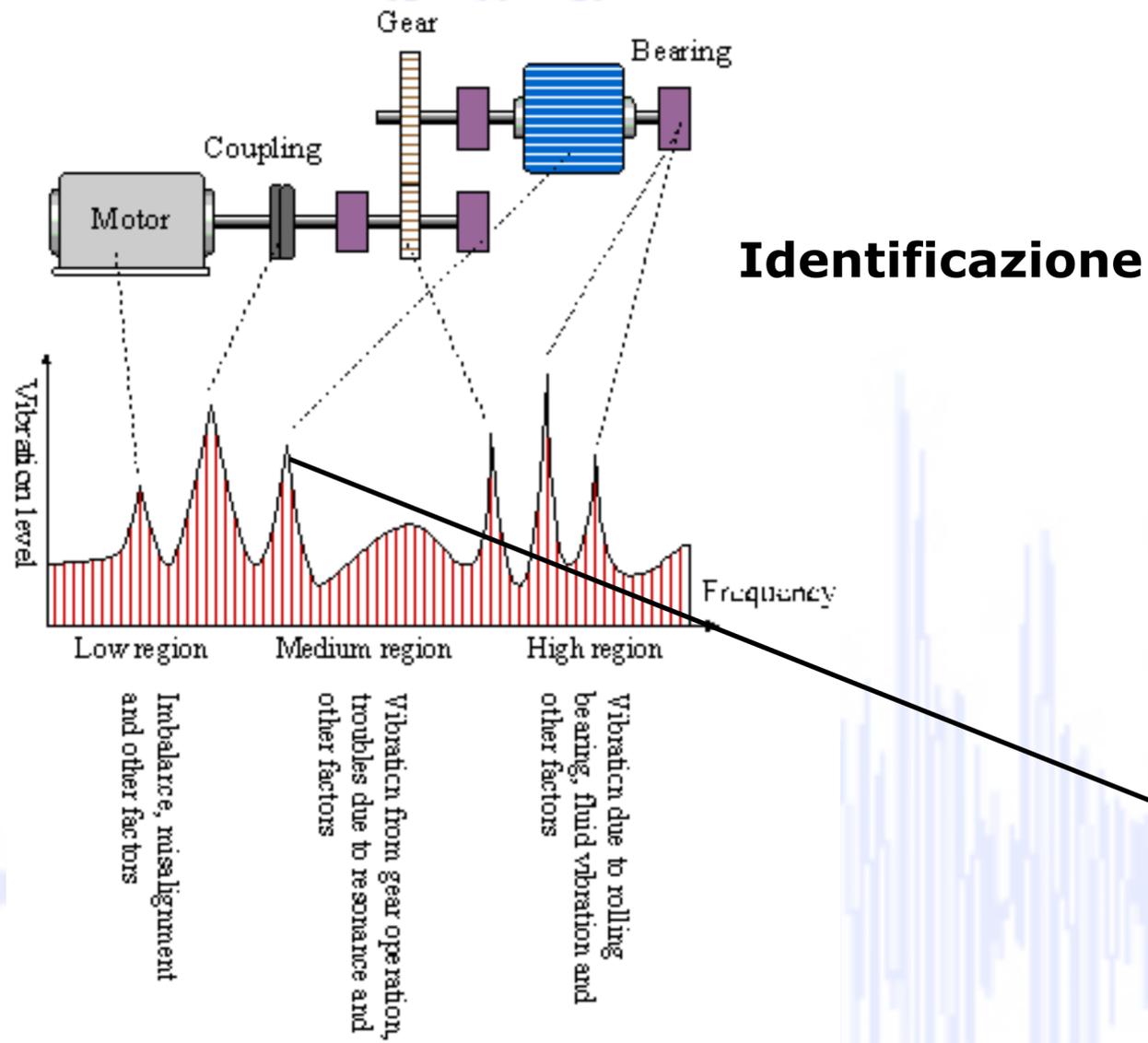
Di solito dal segnale del tempo $x(t) \rightarrow [U]$
si calcola il valore RMS $\rightarrow [U^2]$
si calcola la trasformata in frequenza $X(f) \rightarrow [U]$
e da questa lo spettro del segnale $S_{xx}(f) = X(f) * X(f) \rightarrow [U^2]$

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

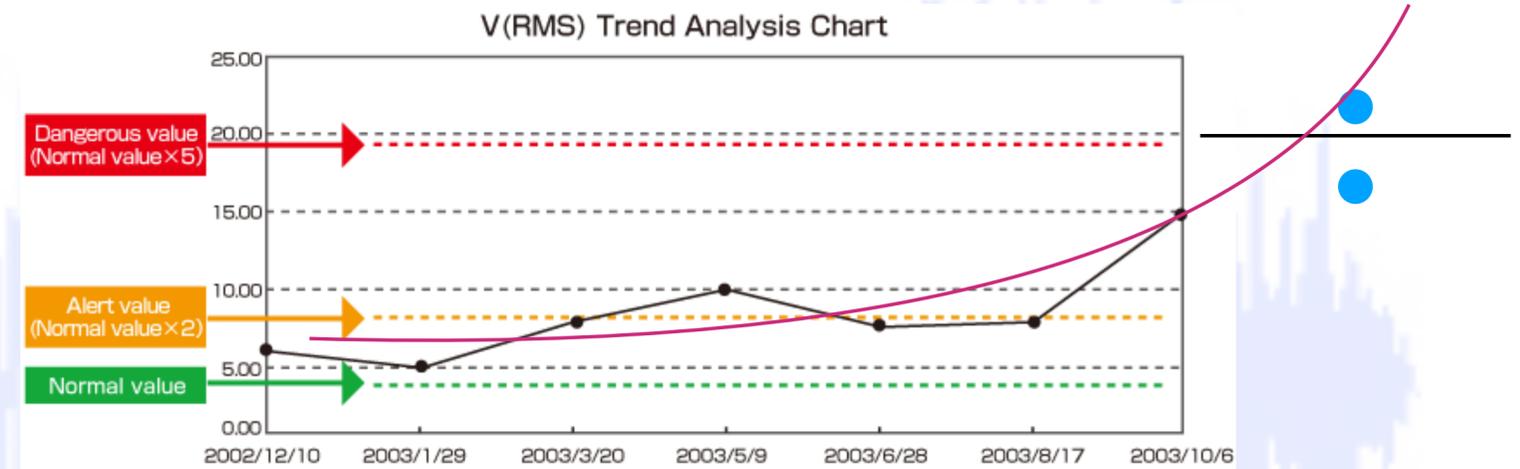
o di Energy Spectral Density (ESD) $\rightarrow [U^2s/Hz]$
(per segnali in regime transitorio) per tener conto della risoluzione e della durata del segnale

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

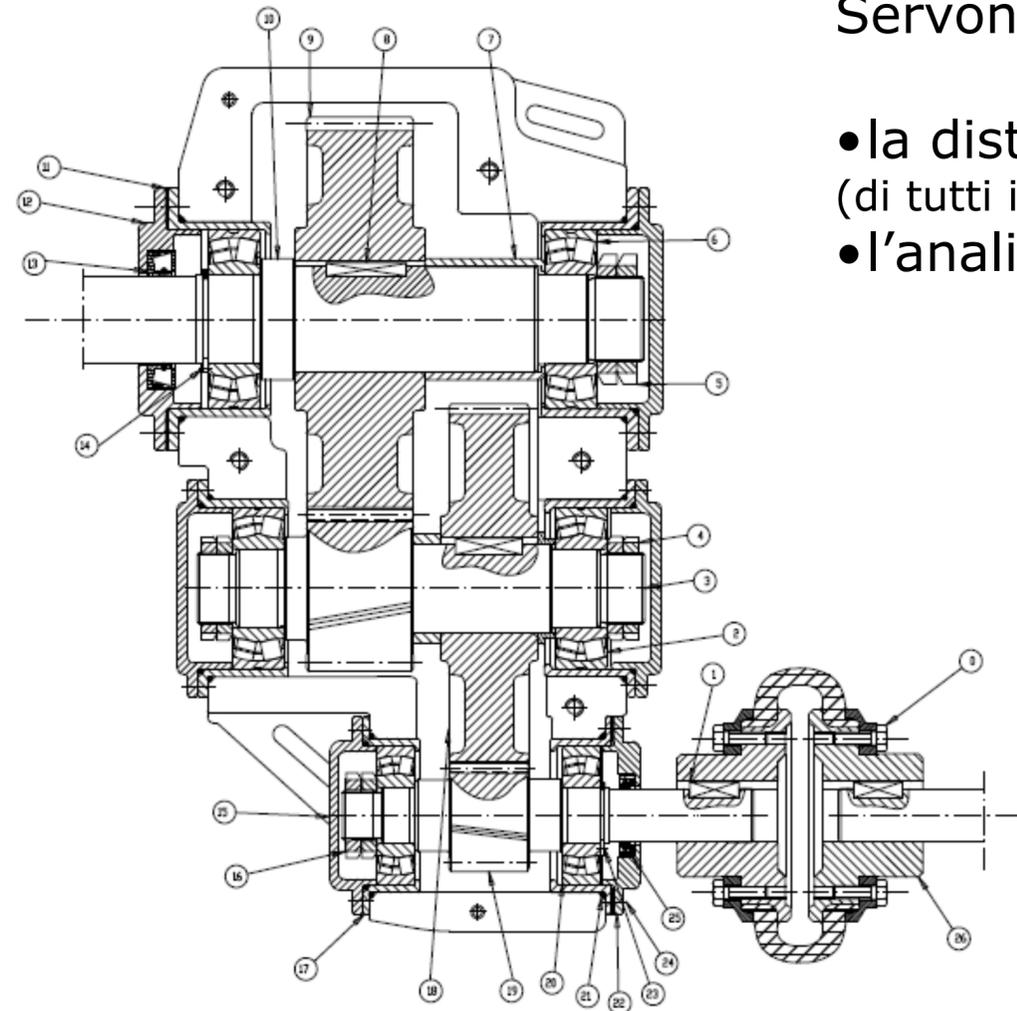
..perchè in queste funzioni si evidenziano in maniera univoca le risposte dei vari elementi del sistema diagnosticando dove si localizzano i danni nella macchina, in più, dal monitoraggio nel tempo di tali valori caratteristici segue l'andamento del deterioramento!



Monitoraggio

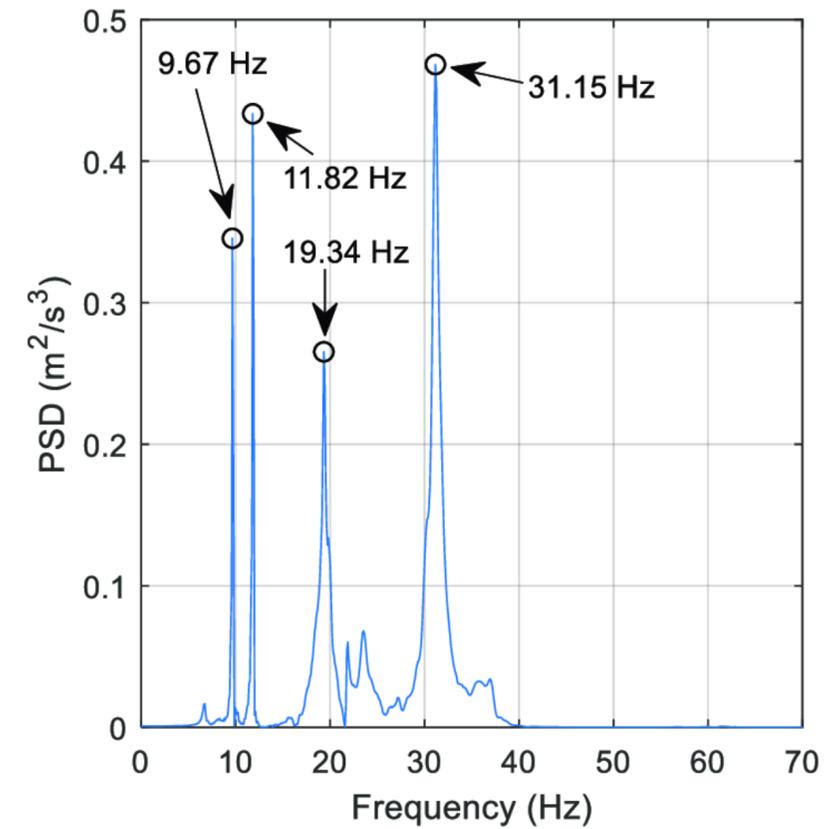


Il passo fondamentale è ovviamente collegare in maniera univoca la cinematica del sistema analizzato con gli spettri dei dati acquisiti.



Servono

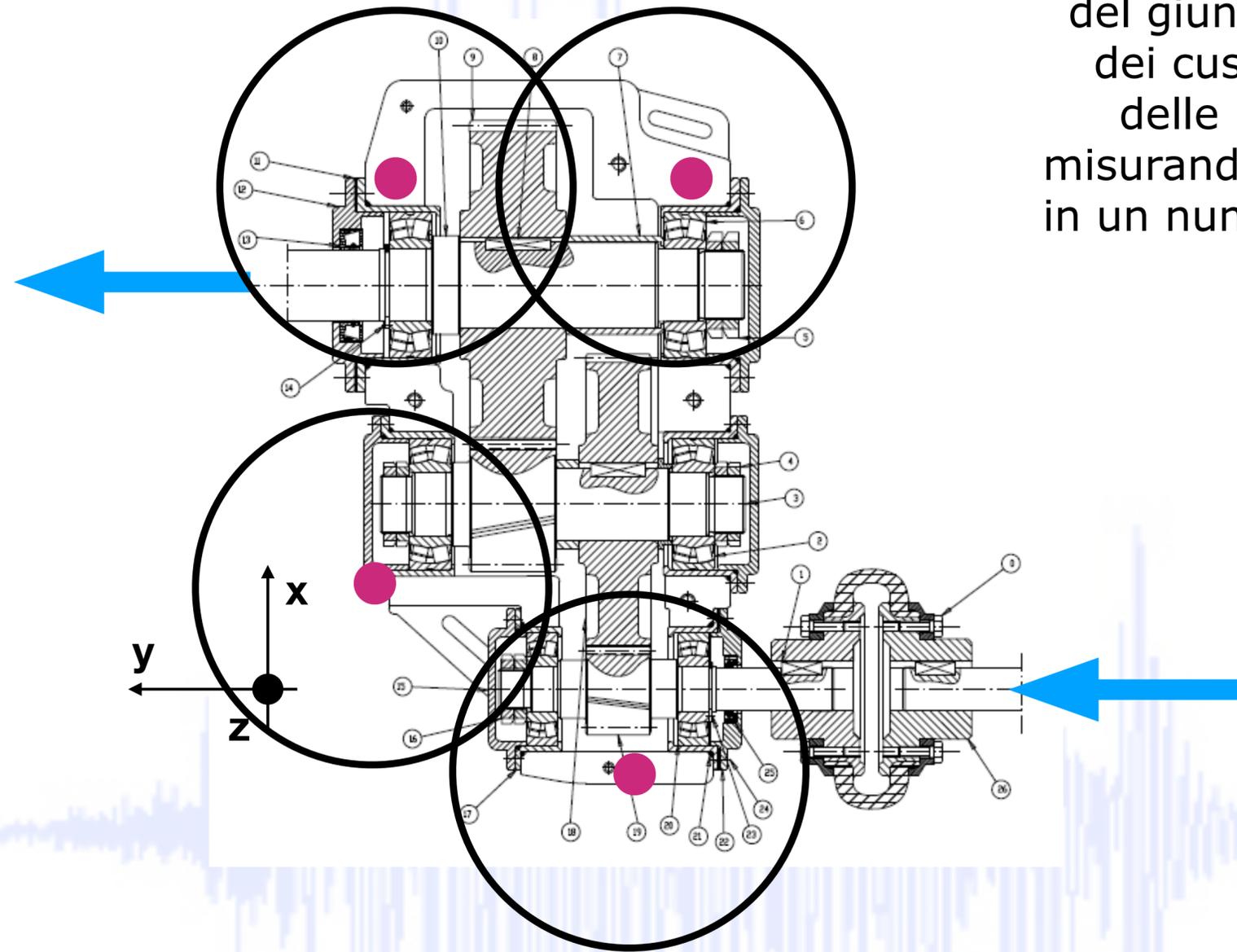
- la distinta dei pezzi (di tutti i pezzi in movimento)
- l'analisi della catena cinematica



- la posizione dei sensori
- la risoluzione in frequenza adeguata

Ad esempio: Vogliamo monitorare il riduttore di figura,

> Seguendo il flusso di potenza, potremmo essere interessati a tracciare 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!



Che tipo di giunto è?
 Quali cuscinetti abbiamo?
 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?

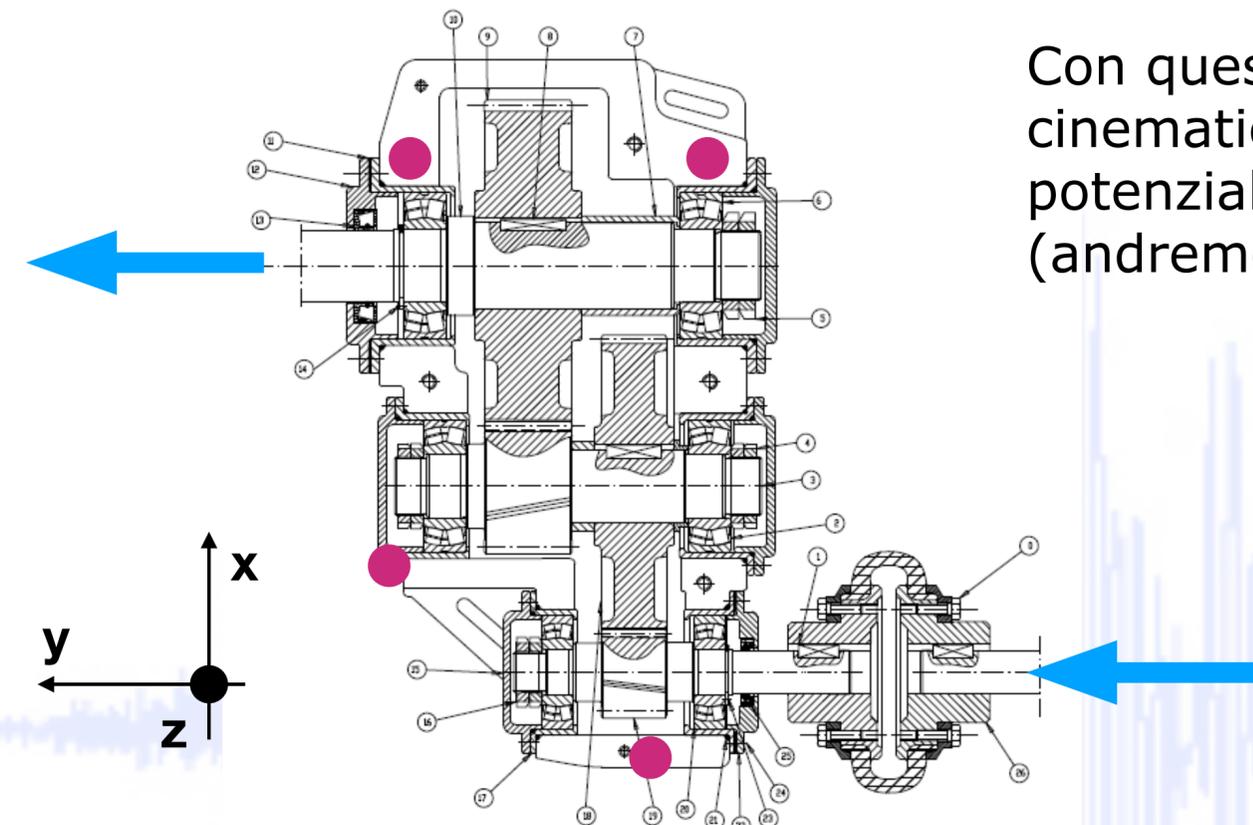
(buona norma definire una terna di riferimento unica per tutto l'impianto.. o per lo meno per la macchina)

- > 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?

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



Quanti decimali?

- 1. velocità di rotazione albero 1
- 300 rpm > 5Hz
- 458 rpm > 7.6333333Hz
- 618 rpm > 10.3Hz
- velocità di rotazione albero 2
- 300 rpm * z1/z2 > 1,23188Hz
- 458 rpm * z1/z2 > 1,88059 Hz
- 618 rpm * z1/z2 > 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!

Cosa bisognerà fare?

- 1. velocità di rotazione
- 300 rpm > 5Hz
- 458 rpm > 7.63333333Hz
- 618 rpm > 10.3Hz

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

24092CA /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 calcolo 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.

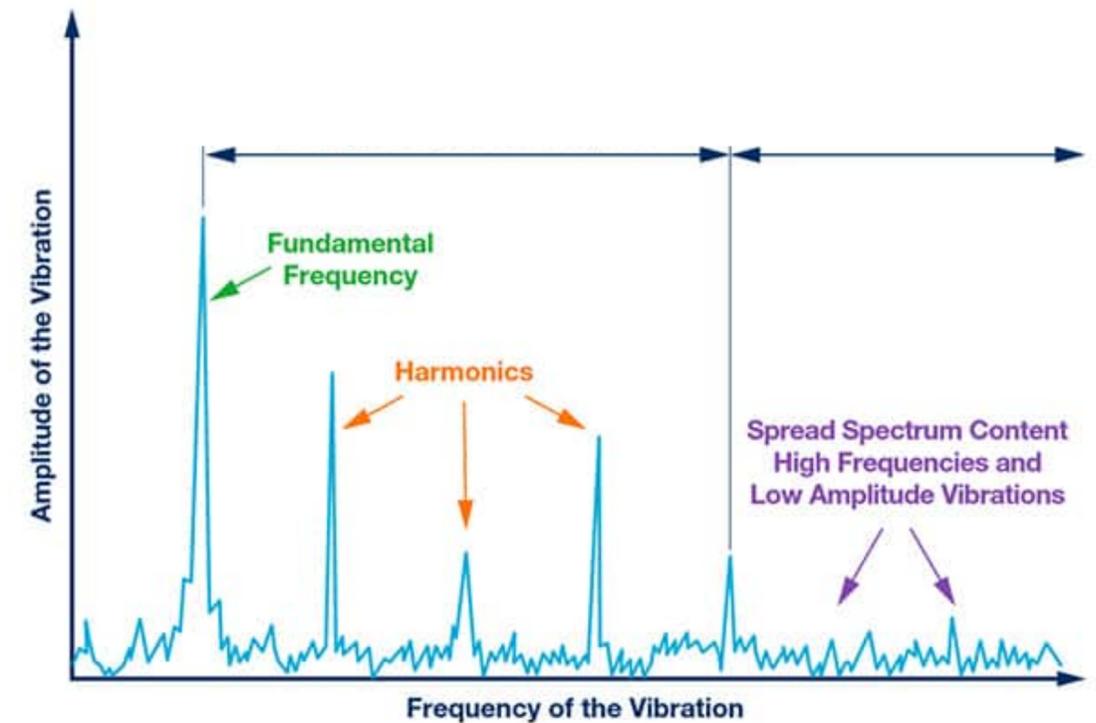
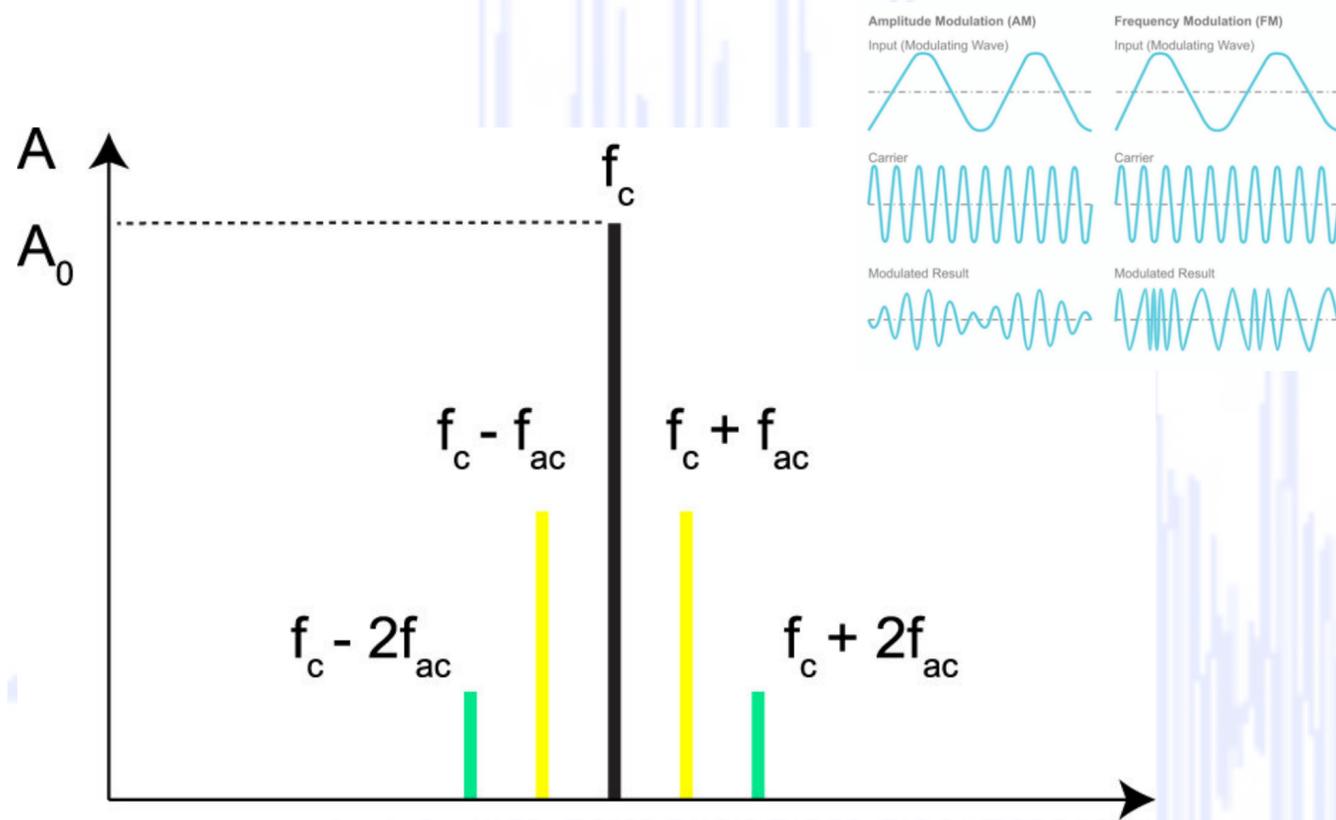
Bisogna proprio tracciare TUTTE
le frequenze di danno potenziale?

Cosa si fa quando 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!