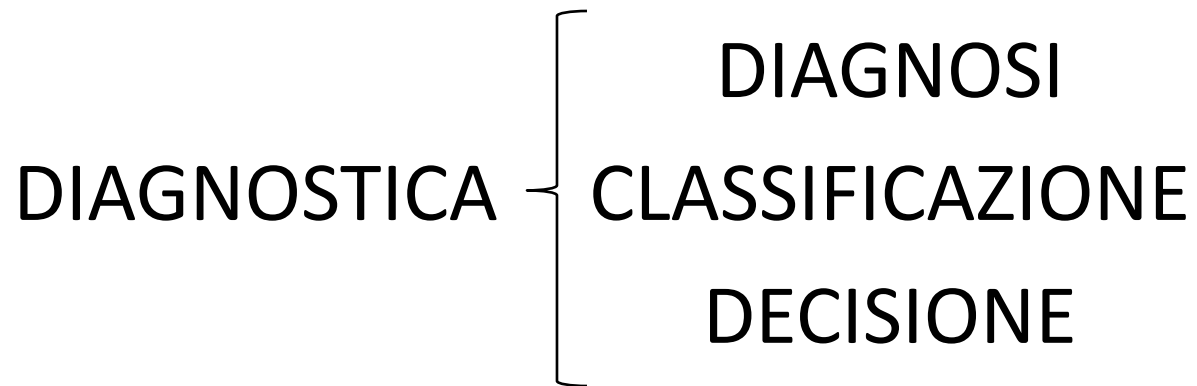


AFFIDABILITA'

MANUTENIBILITA'



EVOLUZIONE DELLA TEORIA DELL'AFFIDABILITA'

AFFIDABILITA'

Probabilità che un oggetto funzioni correttamente in determinate condizioni di impiego e per un fissato periodo di tempo. Studia con metodi probabilistici gli stati di funzionamento e di guasto di oggetti.

Anni '50

TEORIA DELL'ANELLO DEBOLE: la probabilità di funzionamento di un sistema equivale alla probabilità di funzionamento del componente più delicato (debole).

Nei sistemi complessi

TEORIA DEI SISTEMI IN SERIE: la probabilità di funzionamento di un sistema equivale al prodotto della probabilità di funzionamento dei singoli componenti.

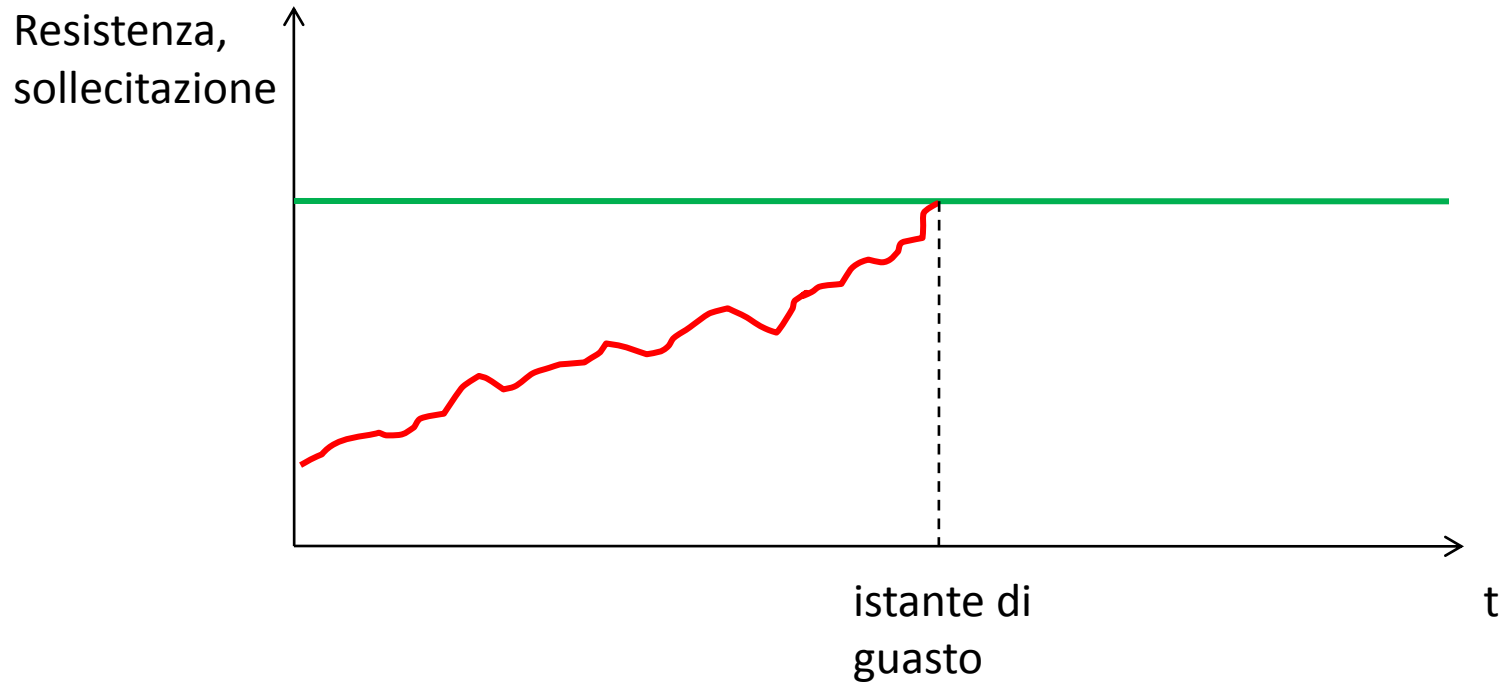
(Es. riprogettazione di numerosi componenti dei missili V1 portò a una probabilità di funzionamento del 75%).

Costi per la manutenzione: 25% del budget

Necessità di una pianificazione della MANUTENZIONE.

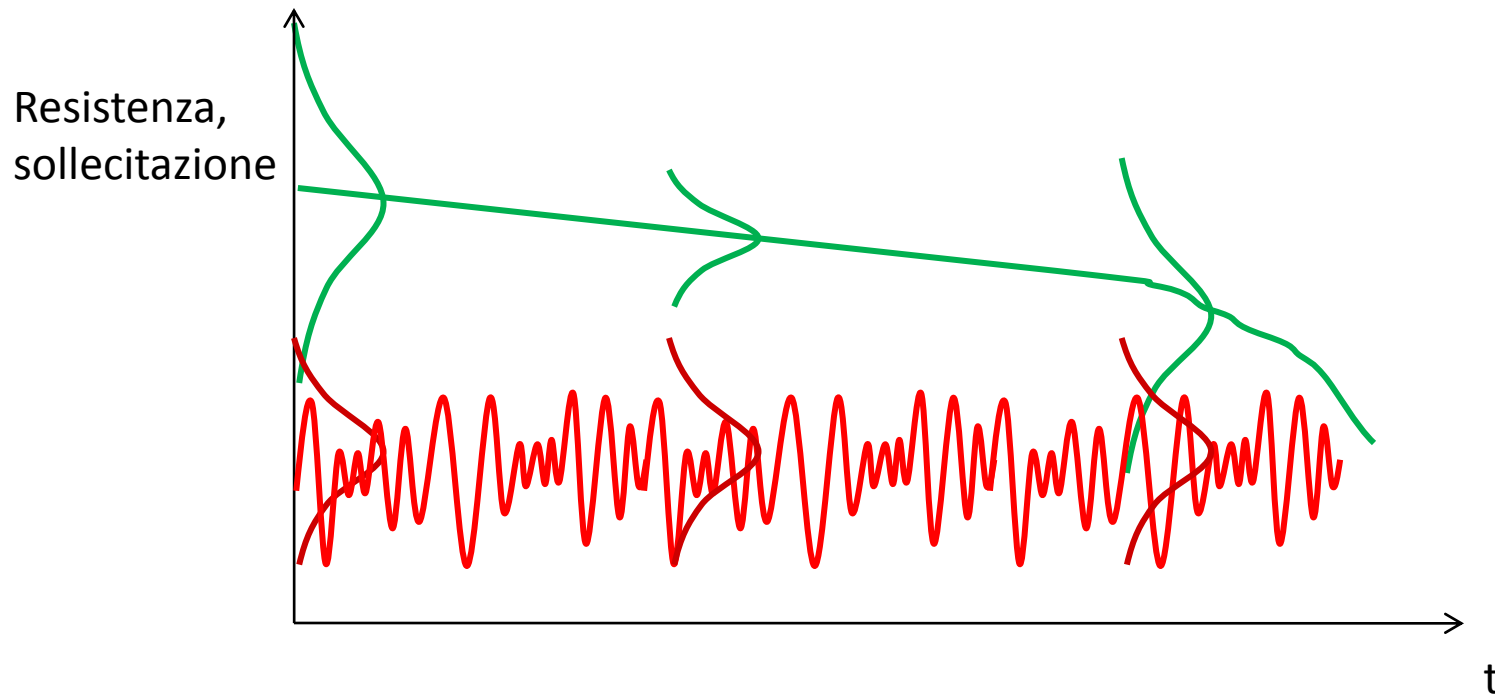
AFFIDABILITA'-ANALISI DEI GUASTI

Il GUASTO si verifica quando la sollecitazione è maggiore della resistenza del sistema.



AFFIDABILITA'-ANALISI DEI GUASTI

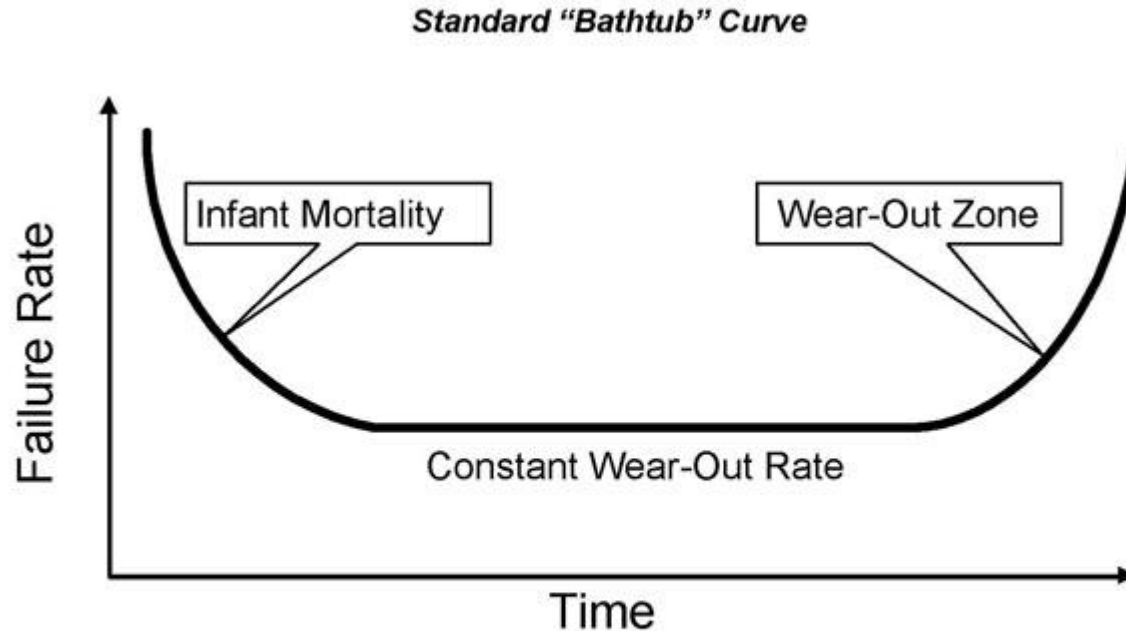
Il GUASTO si verifica quando la sollecitazione è maggiore della resistenza del sistema.



Misurando la resistenza del sistema si può prevedere l'istante di guasto (PROGNOSI: MANUTENZIONE PREDITTIVA).

Analizzando statisticamente i guasti essi si possono prevedere (manutenzione dopo un certo numero di ore di funzionamento: MANUTENZIONE PREVENTIVA).

AFFIDABILITA'-ANALISI DEI GUASTI



The traditional approach to maintenance is based on a misunderstanding of failure distributions. Only a small percentage of equipment follows this curve

PARAMETRI DI AFFIDABILITA'

MTTF: tempo medio fino al guasto
(per oggetti non riparabili).

MTBF: tempo medio tra due guasti successivi.

TASSO DI GUASTO: n. totale di guasti/tempo
cumulativo di funzionamento

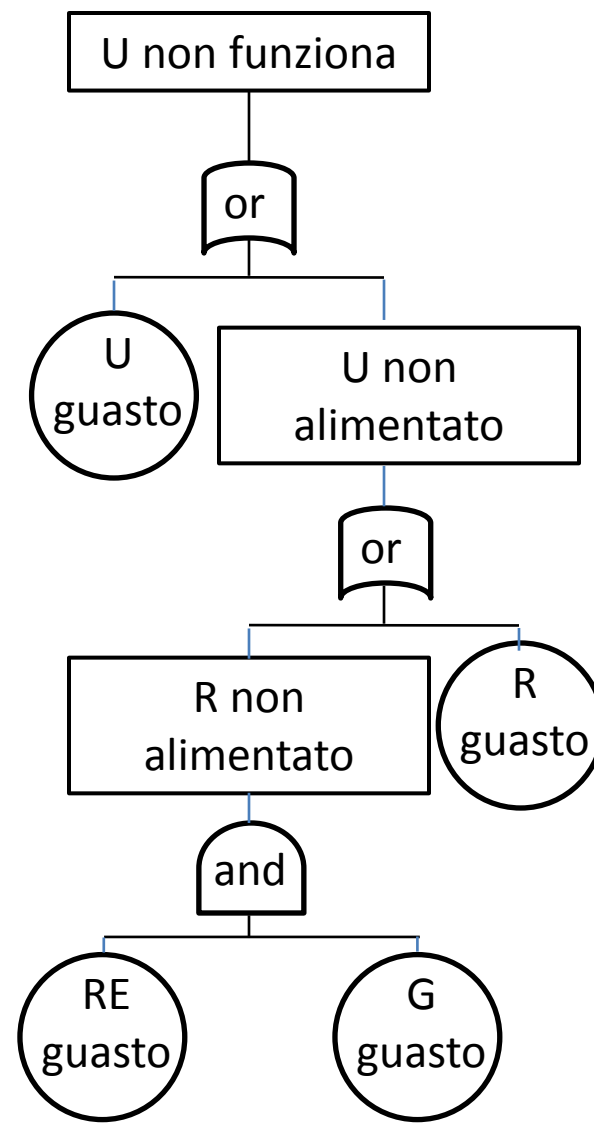
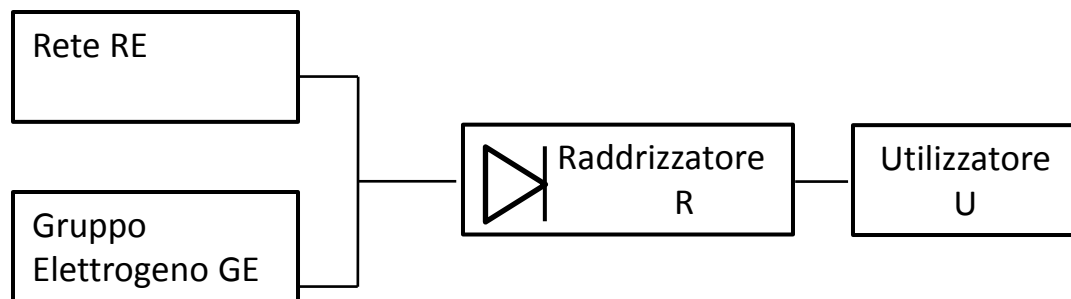
PREVISIONE DI AFFIDABILITA'

Analisi delle sequenza dei guasti e del funzionamento di un sistema in relazione dei suoi componenti.

ALBERO DEI GUASTI

Funzione di struttura o modello funzionale che lega l'affidabilità o disponibilità di un sistema alle corrispondenti caratteristiche dei suoi componenti.

Schema funzionale



MANUTENIBILITA'

Attitudine dell'oggetto ad essere mantenuto funzionante con operazioni di manutenzione preventiva o ad essere riportato in funzionamento con operazioni di manutenzione correttiva a seguito di un guasto.

Studia la progettazione, costruzione e installazione per far sì che l'oggetto funzioni con un dispendio minimo di energia e denaro in attività di manutenzione.

PARAMETRI DI MANUTENIBILITA'

MTTR: tempo medio di riparazione (manutenzione correttiva). Σ Tempi attivi

MDT (Mean down time): tempo medio di non disponibilità dell'oggetto. Σ Tempi attivi

MPT (Mean time for active preventive maintenance): tempo medio di manutenzione preventiva.
 Σ Tempi attivi + passivi

MANUTENIBILITA' – DISPONIBILITA'

Disponibilità intrinseca: probabilità che l'oggetto, utilizzato nelle condizioni prestabilite, prescindendo da ogni tipo di manutenzione programmata e operando in condizioni ideali (disponibilità mezzi, ricambi, personale, istruzioni), funzioni in modo corretto in ogni istante.

$$\Sigma \frac{\text{tempo di funzionamento}}{\text{tempi di manutenzione correttiva}}$$

Disponibilità conseguita: probabilità che l'oggetto, utilizzato nelle condizioni prestabilite e operando in condizioni ideali (disponibilità mezzi, ricambi, personale, istruzioni), funzioni in modo corretto in ogni istante.

$$\Sigma \frac{\text{tempo di funzionamento}}{\text{tempi di manutenzione correttiva} + \text{preventiva}}$$

Disponibilità operativa: probabilità che l'oggetto, utilizzato nelle condizioni prestabilite e operando in ambiente logistico reale funzioni in modo corretto in ogni istante.

$$\Sigma \frac{\text{tempo di funzionamento}}{\text{tempi di manutenzione correttiva} + \text{preventiva} + \text{tempi logistici}}$$

STRATEGIE DI MANUTENZIONE

Manutenzione al guasto:

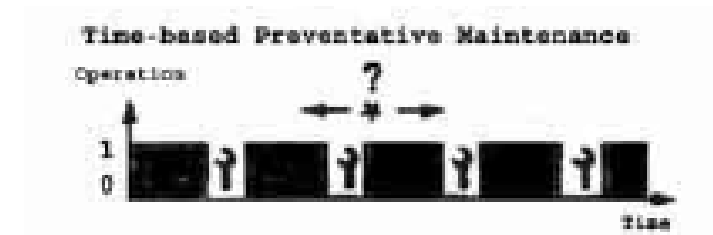
Su macchine economiche e semplici che operano in parallelo.



Danni irreparabili;
tempi lunghi di non
disponibilità;
problemi di sicurezza

Manutenzione preventiva:

Basata su osservazioni statistiche dei guasti. Viene effettuata a intervalli regolari ($< \text{MTBF}$ o 2% dei guasti).

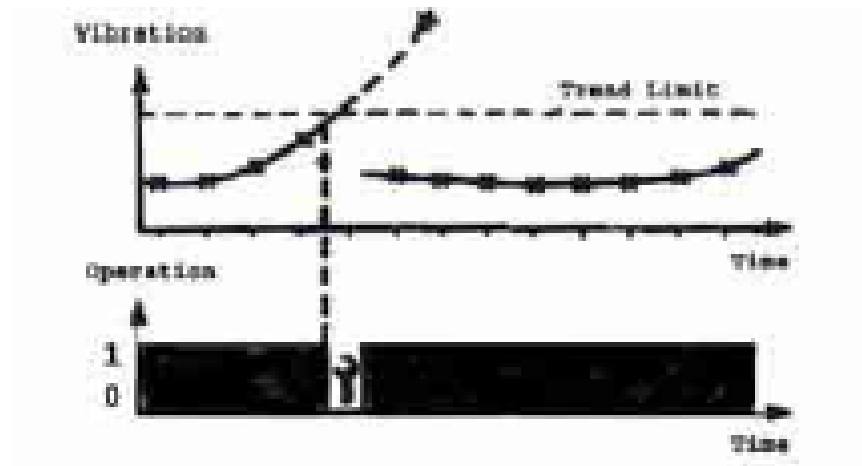


Pianificazione della
manutenzione;
Il 98% degli
esemplari è ancora
buono

STRATEGIE DI MANUTENZIONE

Manutenzione su condizione (predittiva):

Il guasto viene previsto osservando (monitorando) lo stato dell'esemplare - es. misure di vibrazione a intervalli regolari e osservazione del trend.



CRITERI DI MANUTENIBILITA'

Diagnosticabilità: attitudine di un oggetto a rivelare il suo stato o di un suo componente.

Accessibilità

Modularità

Intercambiabilità

Standardizzazione

DIAGNOSTICA

Dispositivi diagnostici per la manutenzione preventiva

sistemi che permettono di conoscere lo stato dell'oggetto prima che si verifichi il guasto.

Manutenzione su condizione basata sull'osservazione dei sintomi o stato di salute dell'oggetto.

Osservazione cartella clinica o firma -> PROGNOSI.

Dispositivi diagnostici per la manutenzione correttiva

sistemi che consentono di individuare gli elementi dell'oggetto che presentano guasti di salute dell'oggetto.

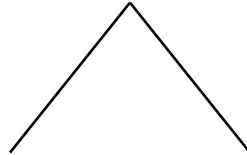
Osservazione cartella clinica o firma prima e dopo il guasto -> ANAMNESI.

OBIETTIVI DELLA DIAGNOSTICA INDUSTRIALE

Osservazione dei sintomi che permette di emettere una diagnosi

Monitoraggio

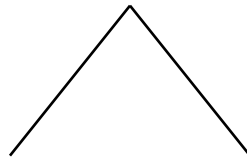
Osservazione dello stesso esemplare.



ALLARME MANUTENZIONE SU
CONDIZIONE

Controllo di qualità

Osservazione di esemplari diversi.



PASSA-NON PASSA CLASSIFICAZIONE

3 STADI DELLA DIAGNOSTICA INDUSTRIALE

DIAGNOSI

CLASSIFICAZIONE

DECISIONE

DIAGNOSI

ANALISI DEI LUBRIFICANTI

ANALISI DELLE PERFORMANCES

TERMOGRAFIA

ANALISI DI VIBRAZIONI

DIAGNOSI

ANALISI DEI LUBRIFICANTI

Analisi dei ricambi filtri e olio

Analisi delle particelle (di usura, contaminanti chimici,...) ritenute nei filtri.

Analisi spettrografica dell'olio.

La composizione delle particelle ritenute nei filtri e depositate nell'olio è la firma del sistema che è lubrificato da esso.

DIAGNOSI

ANALISI DELLE PERFORMANCES o efficienza

Es. compressori volumetrici

Pressione alla mandata: spia per blocco del filtro, usura delle fasce elastiche o bassa tenuta delle valvole.

Rendimento volumetrico: spia per perdita nelle valvole.

DIAGNOSI

TERMOGRAFIA

Es. pompe

Temperatura: segnala cavitazione.

Es. componenti elettronici

Es. motori o riduttori

Temperatura: spia di cattiva o mancata lubrificazione o perdita di efficienza del sistema di raffreddamento

DIAGNOSI

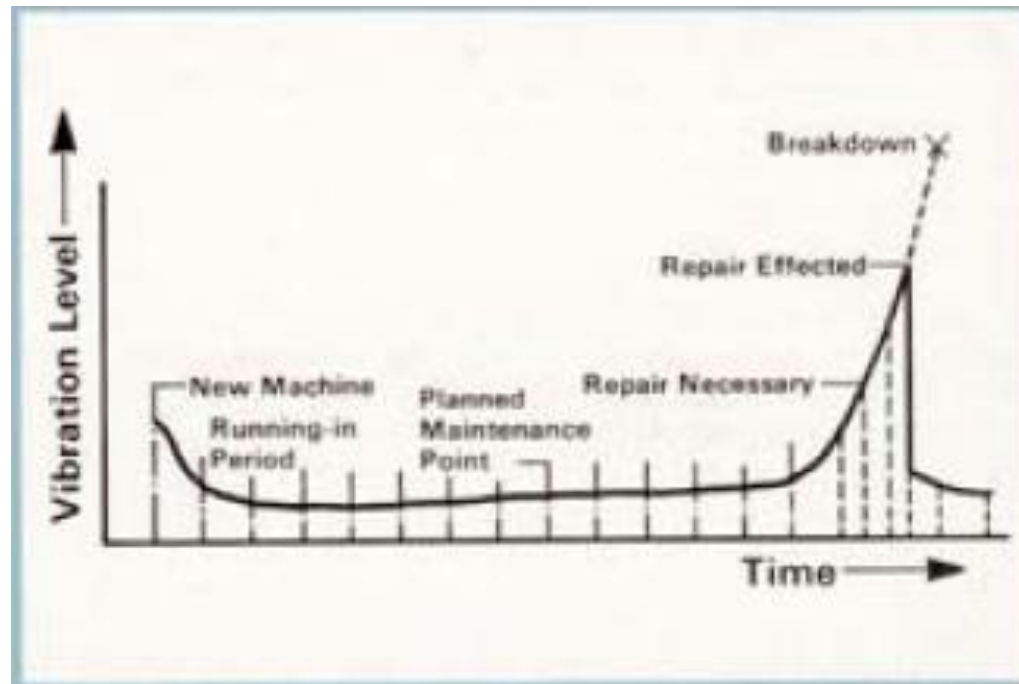
ANALISI DI VIBRAZIONI

Osservazione della firma della macchina: grafico dell'ampiezza di vibrazione in funzione della frequenza.

Ha un andamento tipico che cambia in condizioni di difettosità.

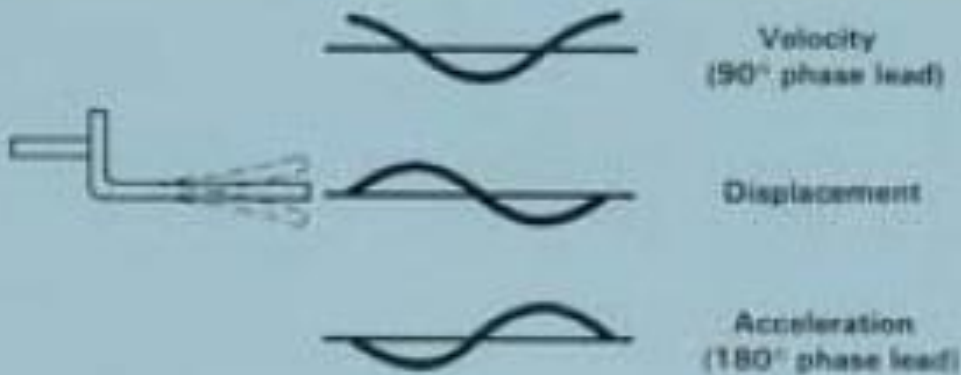
Ogni macchina deve avere una propria scheda in cui si riportano i monitoraggi periodici della firma (cartella clinica). Esaminando il comportamento (firma) e come cambia nel tempo si può emettere una prognosi (per prevedere il guasto) o una anamnesi (per individuare il guasto avvenuto).

ES. RIDUTTORE



DIAGNOSI-VIBRAZIONI

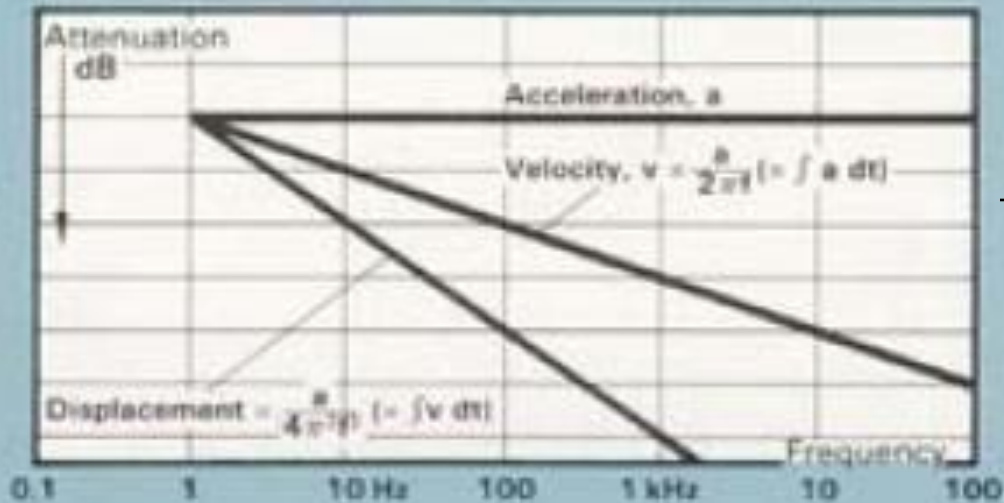
SPOSTAMENTO VELOCITA' ACCELERAZIONE



Vibrometri laser

Proximity, LDVT, sensori ottici

accelerometri



Trasformazione
dell'accelerazione in velocità
e spostamento.

Se si trascura la fase (tipico di
misure medie nel tempo):

$$v = \frac{a}{2\pi f} \quad e \quad s = \frac{a}{4\pi^2 f^2}$$

$$\log(v) = \log\left(\frac{a}{2\pi f}\right) = \log(a) - \log(2\pi f)$$

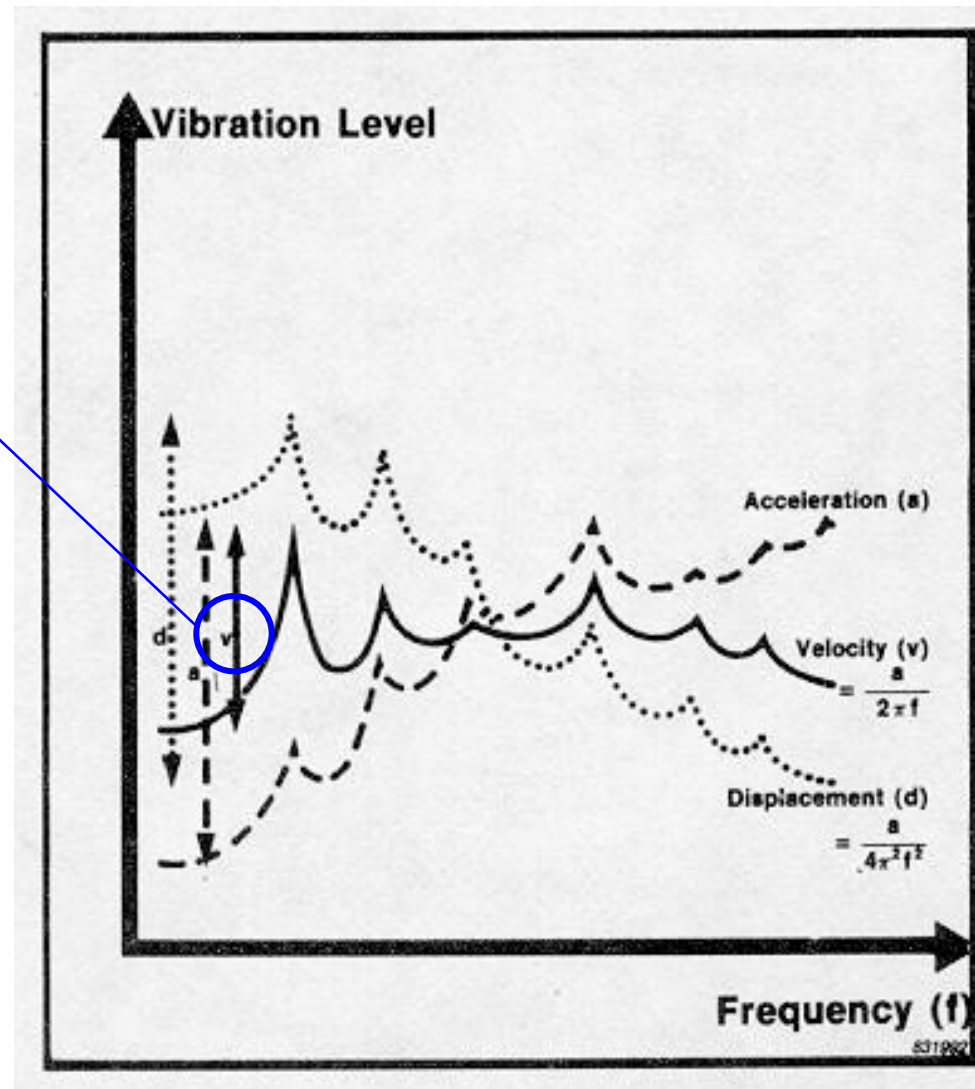
$$\log(s) = \log(s) - 2\log(2\pi f)$$

DIAGNOSI-VIBRAZIONI

SPOSTAMENTO VELOCITA' ACCELERAZIONE

Il range dinamico in velocità è il più piatto pertanto si utilizza tutta la scala di ampiezza in tutto il range di frequenza.

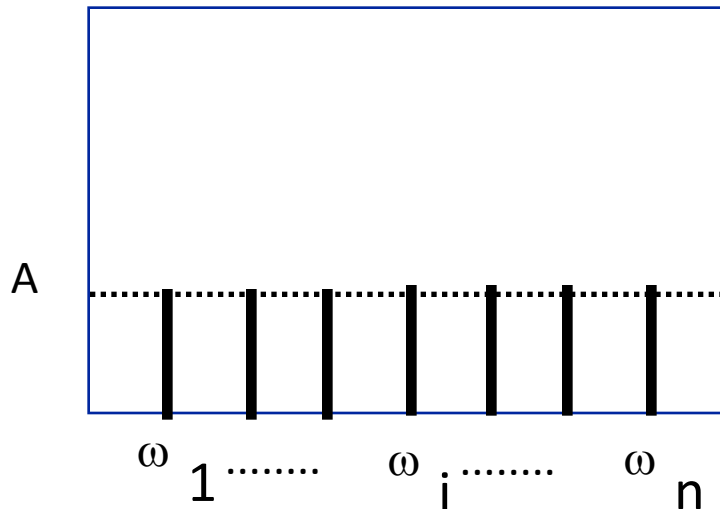
Nell'analisi in frequenza si sceglie tipicamente la velocità perché è un parametro energetico (cinetico): vibrazioni a frequenze diverse sono equivalenti se hanno la stessa energia di vibrazione.



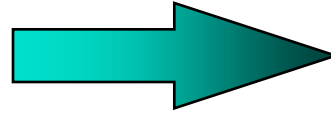
DIAGNOSI-VIBRAZIONI

DERIVAZIONE

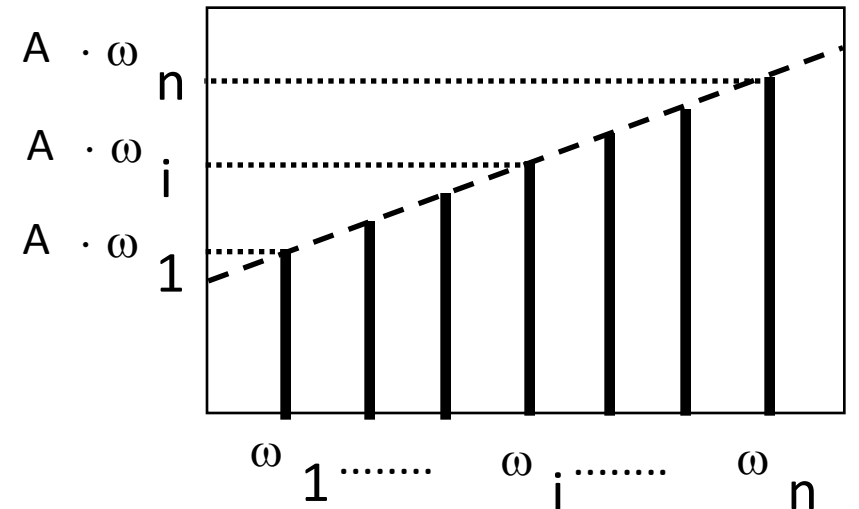
SPOSTAMENTO



$$x_i = A_i \sin(\omega_i t)$$



VELOCITA'



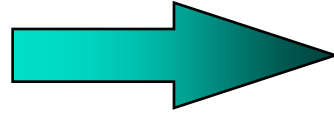
$$\dot{x}_i = A_i \omega_i \cos(\omega_i t)$$

L'operazione di derivazione comporta
l'aggiunta di 90 ° alle fasi

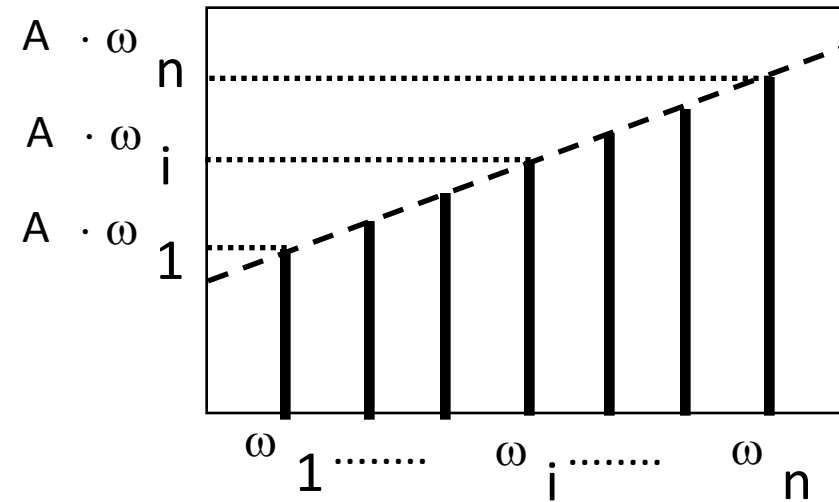
DIAGNOSI-VIBRAZIONI

DERIVAZIONE

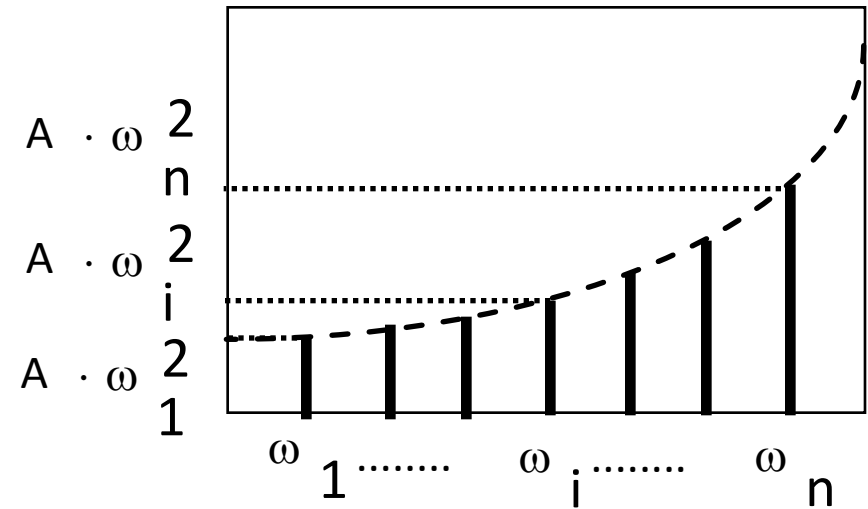
VELOCITA'



ACCELERAZIONE



$$\dot{x}_i = A_i \cdot \omega_i \cdot \cos(\omega_i t)$$



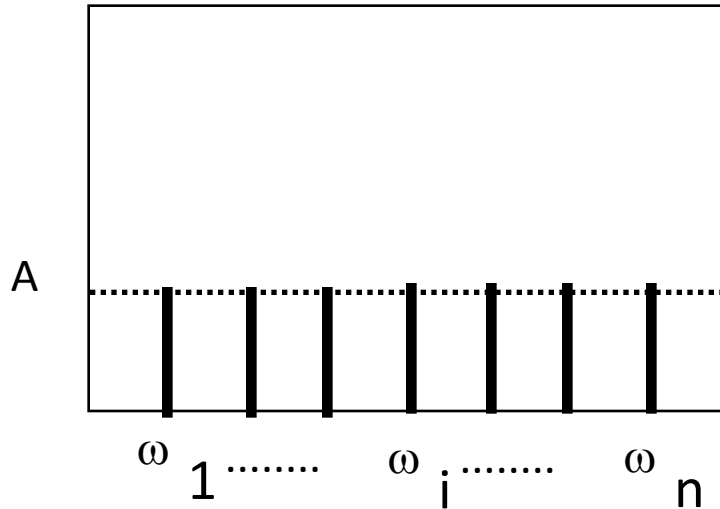
$$\ddot{x}_i = -A_i \cdot \omega_i^2 \cdot \sin(\omega_i t)$$

L'operazione di derivazione comporta
l'aggiunta di 90 ° alle fasi

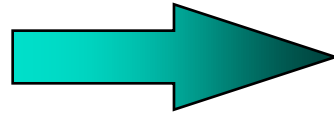
DIAGNOSI-VIBRAZIONI

DERIVAZIONE

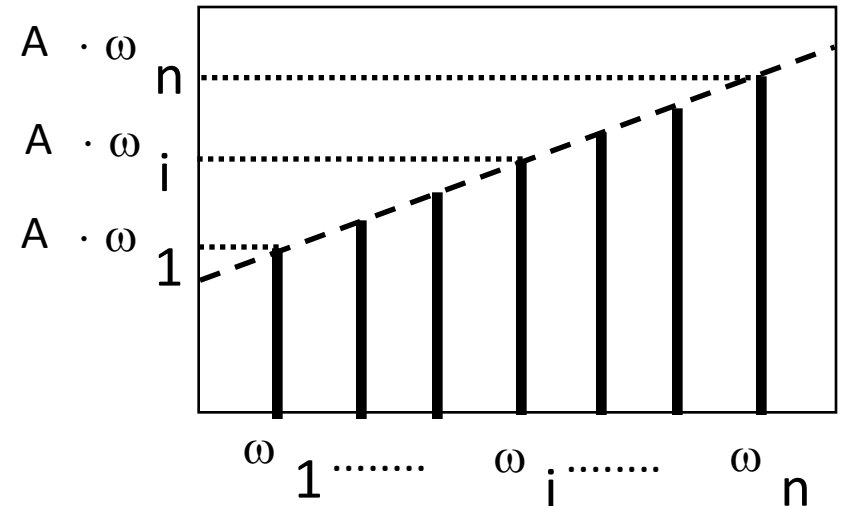
VELOCITA'



$$\dot{x}_i = A_i \cdot \sin(\omega_i t)$$



ACCELERAZIONE



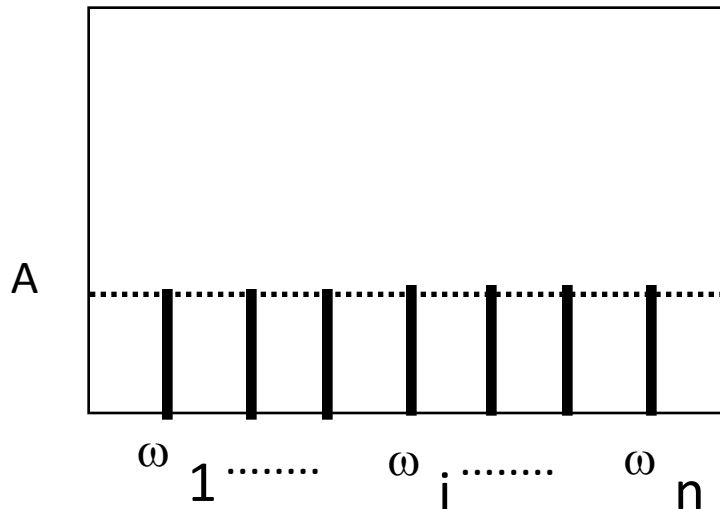
$$\ddot{x}_i = A_i \cdot \omega_i \cdot \cos(\omega_i t)$$

L'operazione di derivazione comporta
l'aggiunta di 90 ° alle fasi

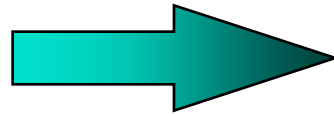
DIAGNOSI-VIBRAZIONI

INTEGRAZIONE

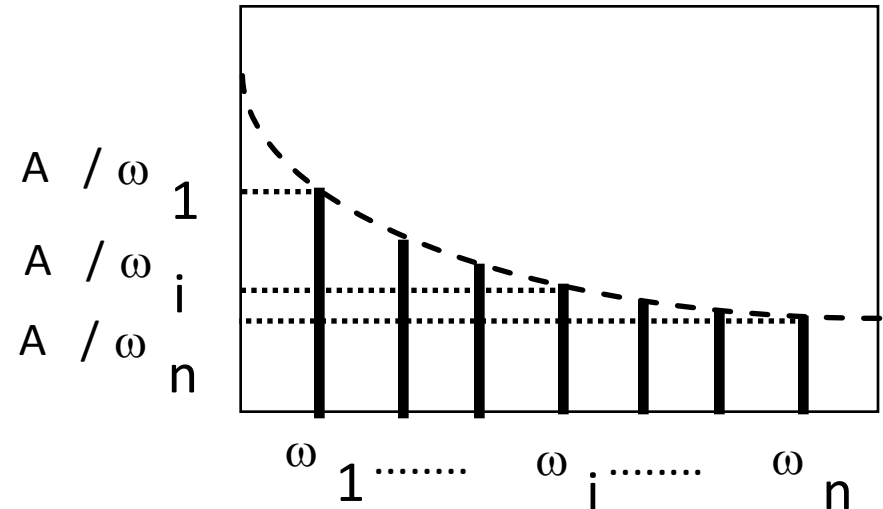
VELOCITA'



$$\dot{x}_i = A_i \cdot \sin(\omega_i t)$$



SPOSTAMENTO



$$x_i = - \frac{A_i}{\omega_i} \cdot \cos(\omega_i t)$$

L'operazione di integrazione comporta la sottrazione di 90 ° alle fasi

DIAGNOSI-VIBRAZIONI

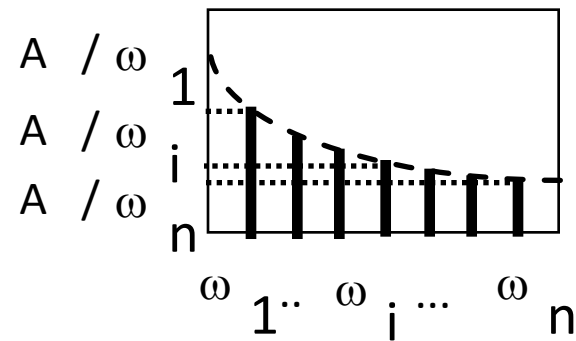
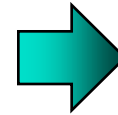
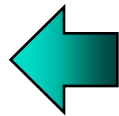
INTEGRAZIONE

DERIVAZIONE

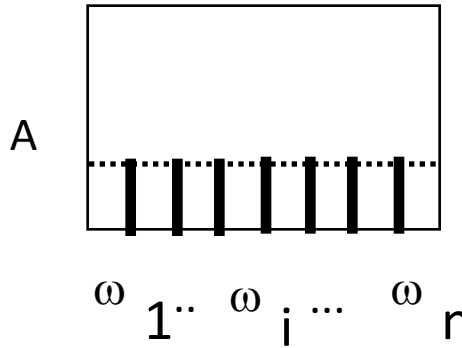
SPOSTAMENTO

VELOCITA'

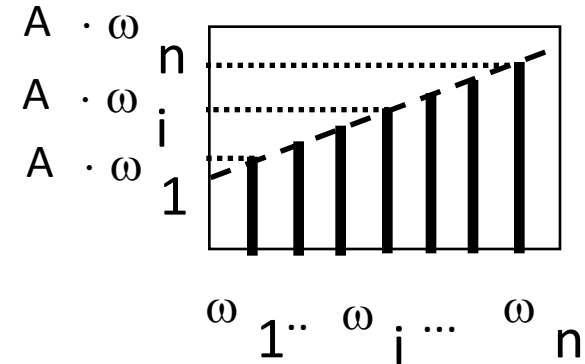
ACCELERAZIONE



$$x_i = - \frac{A_i}{\omega_i} \cdot \cos(\omega_i t)$$



$$\dot{x}_i = A_i \cdot \sin(\omega_i t)$$



$$\ddot{x}_i = A_i \cdot \omega_i \cdot \cos(\omega_i t)$$

L'operazione di integrazione comporta la sottrazione di 90 ° alle fasi

L'operazione di derivazione comporta l'aggiunta di 90 ° alle fasi

DIAGNOSI-VIBRAZIONI

FATTORI CHE INFLUENZANO LA SCELTA

➤ **banda passante**

➤ **effetto di carico**

➤ **sensibilita'**

DIAGNOSI-VIBRAZIONI

CAMPI DI UTILIZZO DEI VARI TRASDUTTORI

RAPPORTO TRA MASSIMO E MINIMO
VALORE MISURABILE

100000000

10000

10

1

10

10000

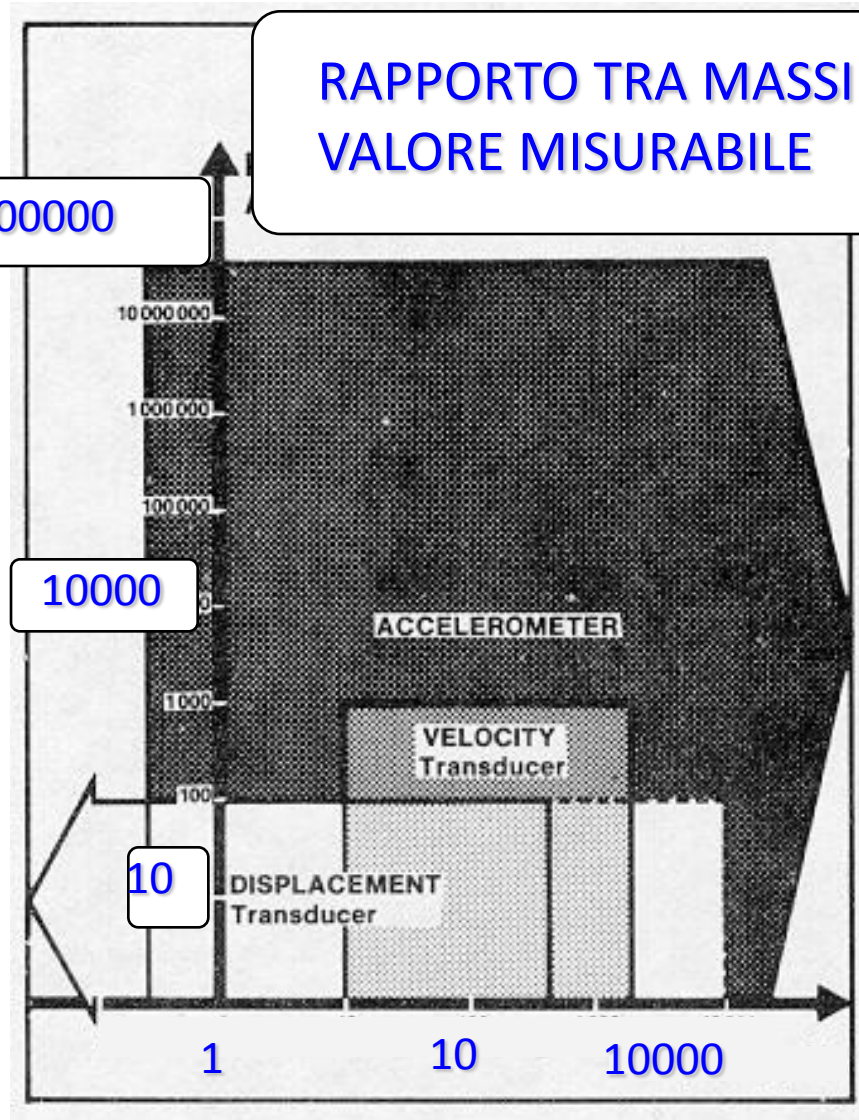
ACCELEROMETER

VELOCITY
Transducer

DISPLACEMENT
Transducer

FREQUENZA
[Hz]

Per le vibrazioni nel
campo di frequenze tra
10 e 1000 Hz, la velocità
di vibrazione è il
parametro di gran lunga
più utilizzato



DIAGNOSI-VIBRAZIONI

Normative e criteri di valutazione per le vibrazioni dei macchinari ISO 2372, 3945, 10816 VDI 2056

Per vibrazioni di tipo puramente armonico, sia il valore di picco che il valore medio quadratico sono indicativi del livello di vibrazione.

Per vibrazioni di tipo più complesso i due indici darebbero indicazioni discordanti (per velocità di rotazione da 600 a 12000 rpm-10÷200 Hz-solo il valore medio quadratico della velocità di vibrazione risulta indicativo del livello di vibrazione).

Per tale motivo la InternationalStandard Organisation (ISO) ha introdotto come parametro di misura del livello di vibrazione il 'vibration severity'.

Tale parametro è definito come il più alto valore quadratico medio della velocità di vibrazione nel range di frequenza da 10 a 1000 Hz, misurato sul macchinario in punti prefissati.

Tali misure sono generalmente triassiali in corrispondenza dei supporti o del basamento.

DIAGNOSI-VIBRAZIONI

Vibration severity

Una volta effettuata la registrazione della velocità istantanea di vibrazione (naturalmente campionando il segnale) il suo valore quadratico medio può essere ricavato tramite la seguente formula:

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt}$$

Per vibrazioni di tipo armonico alla frequenza ω_i , la velocità di vibrazione è esprimibile come:

$$v_i = V_i \cos(\omega_i t)$$

Se le vibrazioni misurate contengono le frequenze ω_i (con $i=1, 2, \dots, n$), se sono state misurate l'ampiezza delle vibrazioni (s_i), la velocità (v_i) o l'accelerazione (a_i) ad ogni frequenza, il livello di vibrazione (**Vibration severity**) è esprimibile come:

$$\begin{aligned} v_{rms} &= \sqrt{\frac{1}{2} \left[\left(\frac{A_1}{\omega_1} \right)^2 + \left(\frac{A_2}{\omega_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{A_n}{\omega_n} \right)^2 \right]} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(S_1 \omega_1)^2 + (S_2 \omega_2)^2 + \dots + (S_n \omega_n)^2 \right]} \\ &= \sqrt{\frac{1}{2} \left[(V_1)^2 + (V_2)^2 + \dots + (V_n)^2 \right]} \end{aligned}$$

DIAGNOSI-VIBRAZIONI

Standards e criteri di valutazione per le vibrazioni dei macchinari

- Macchine alternative con componenti sia alternativi che rotativi (motori diesel e alcuni tipi di compressori e pompe): le vibrazioni sono misurate sulla struttura principale e quelle più interessanti sono in genere localizzate alle basse frequenze;
- Macchine rotative con rotori rigidi (alcuni tipi di motori elettrici, pompe lente e a singolo stadio): le vibrazioni sono misurate sulla struttura principale in prossimità dei supporti e queste sono indicative delle forze generate dal moto del rotore (specialmente a causa dello sbilanciamento);
- Macchine rotative con rotori flessibili (generatori elettrici con turbine a vapore, pompe e compressori multi-stadio): in questi casi tali macchine, nella fase di accelerazione per il raggiungimento della velocità operativa, attraversano più velocità critiche e il rotore vibra con modi diversi. Le vibrazioni misurate sulla struttura principale non sono più indicative delle vibrazioni del rotore (le vibrazioni misurate sui supporti possono essere piccole mentre il rotore può vibrare con grosse ampiezze, tali da comprometterne la funzionalità). In tali casi è necessario misurare direttamente le vibrazioni dell'albero;
- Macchine rotative con rotori quasi-flessibili (turbine a vapore a bassa pressione, compressori assiali): in tali macchine vi sono rotori speciali in cui le vibrazioni misurate in prossimità dei supporti sono indicative delle vibrazioni dell'albero.

In relazione al tipo di vibrazioni a cui sono soggetti, i macchinari possono essere suddivisi in 4 categorie:

DIAGNOSI-VIBRAZIONI

Macchine rotanti con rotori rigidi

Lo standard ISO 2372 si riferisce a macchine rotanti con velocità tra i 10 e 200 rps caratterizzati da rotori sia rigidi che flessibili a condizione che le misure di vibrazioni in prossimità dei supporti siano indicative delle vibrazioni del rotore.

I componenti di tale tipo sono inoltre suddivisi in 4 classi:

- **Classe I-Singoli componenti collegati integralmente al macchinario completo nelle normali condizioni operative (motori elettrici fino a 15 kW);**
- **Classe II-Macchine di media taglia (motori elettrici da 15 a 75 kW e motori fino a 300 kW su basamenti speciali)**
- **Classe III-Motori di grandi dimensioni montati su basamenti pesanti e rigidi;**
- **Classe IV-Motori di grandi dimensioni montati su basamenti relativamente elastici (flessibili) o strutture di tipo leggero.**

Il livello di vibrazione è suddiviso in 4 intervalli classificati con le lettere: A (buono), B (ammissibile), C (tollerabile), D (inaccettabile) in ordine crescente di importanza.

Il range di livello di vibrazioni deve essere scelto dall'utente sulla base di considerazioni che riguardano:

- il tipo e la taglia del macchinario;
- il tipo di servizio che deve assicurare;
- il tipo di basamento
- gli effetti che le vibrazioni possono provocare sul personale, sugli strumenti e sui macchinari vicini.

DIAGNOSI-VIBRAZIONI

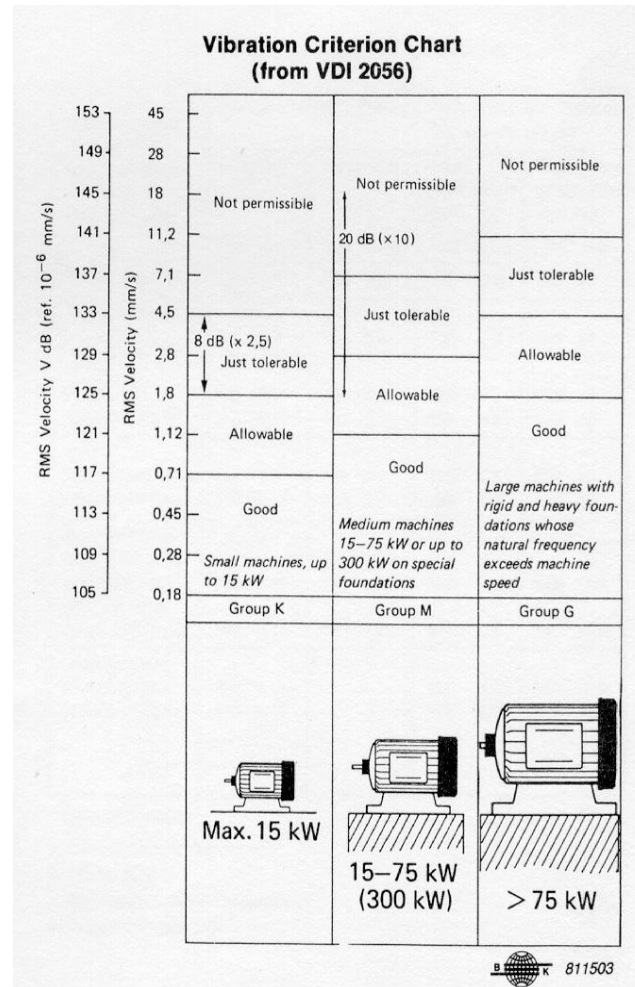
Macchine rotanti con rotori rigidi- criteri per la classificazione del livello di vibrazione ISO 10816

R.m.s. vibration velocity mm/sec	up to 15 kW Class I	15 to 75 kW Class II	> 75 kW (rigid) Class III	> 75 kW (soft) Class IV
0,28	A	A	A	A
0,45				
0,71				
1,12	B	B	B	B
1,8				
2,8	C	C	C	C
4,5				
7,1	D	D	D	D
11,2				
18				
28				
45				

Table 3 • Typical Evaluation Criteria Zone Vibration Magnitude

DIAGNOSI-VIBRAZIONI

Macchine rotanti con rotori rigidi- criteri per la classificazione del livello di vibrazione VDI 2056

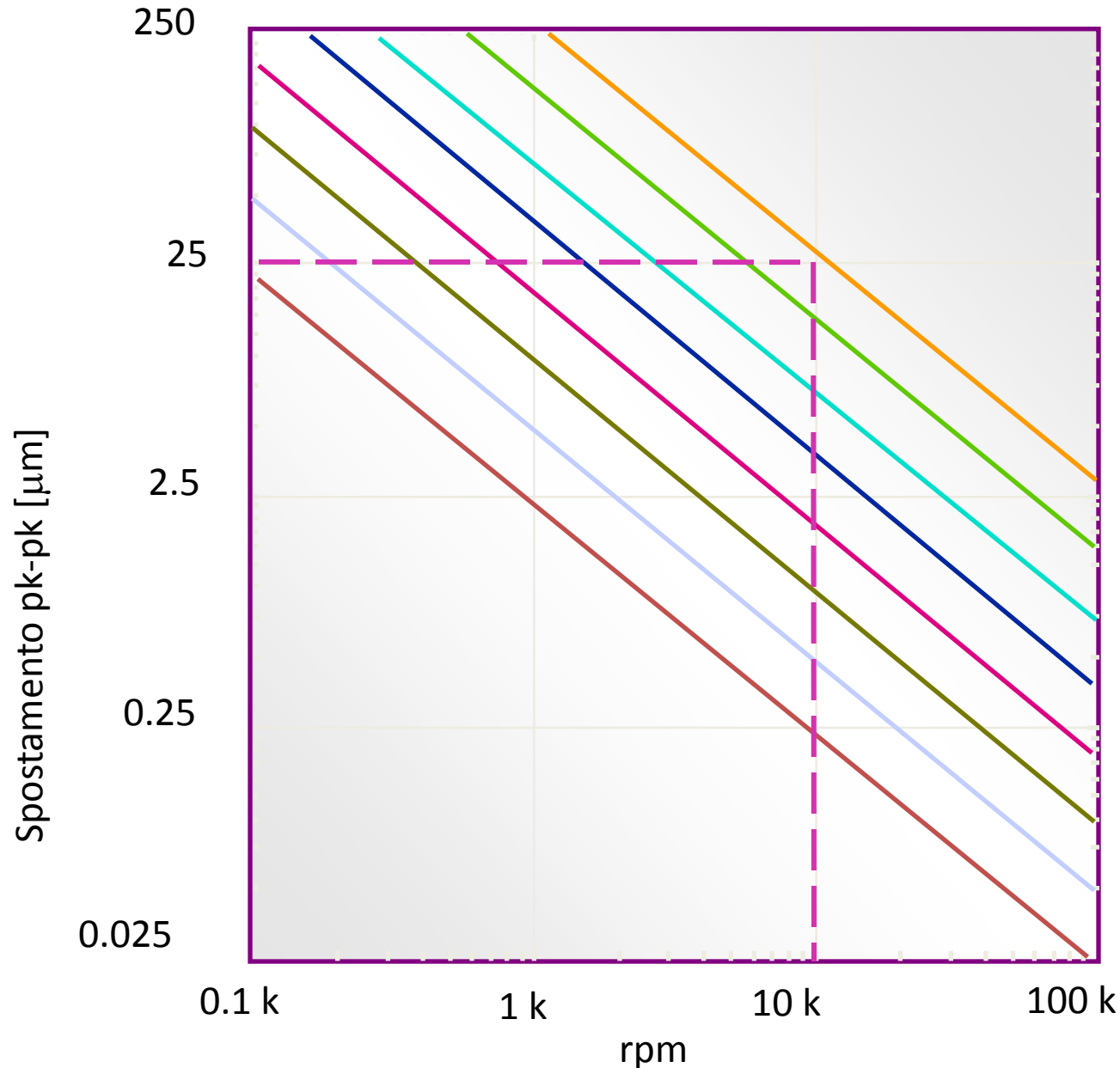


DIAGNOSI-VIBRAZIONI

Macchine rotanti con rotori rigidi- criteri per la classificazione del livello di vibrazione in base al tipo di supporto della macchina

rms velocity vibration severity		Support classification	
mm/sec	in./sec	Rigid supports	Flexible supports
0.46	0.018	Good	Good
0.71	0.028		
1.12	0.044		
1.8	0.071	Satisfactory	Satisfactory
2.8	0.11		
4.6	0.18	Unsatisfactory	Unsatisfactory
7.1	0.28		
11.2	0.44	Unacceptable	Unacceptable
18.0	0.71		
28.0	1.10		
46.0	1.80		
71.0	2.80		

DIAGNOSI-VIBRAZIONI



General Machinery Criterion Chart

Velocità pk

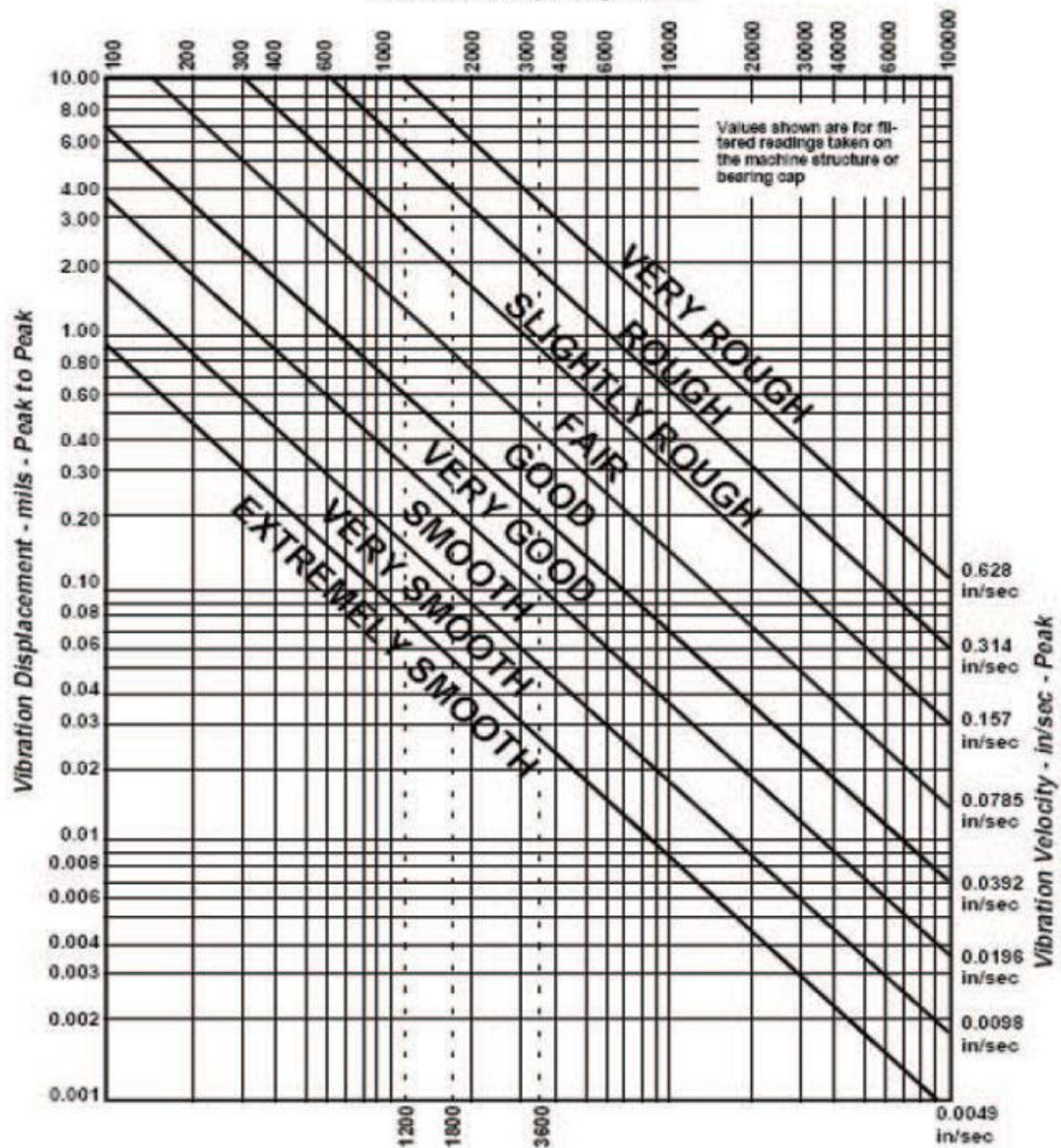
15.0	mm/s
7.5	mm/s
3.8	mm/s
2.0	mm/s
1.0	mm/s
0.5	mm/s
0.25	mm/s
0.125	mm/s

$$S_{pp} = 25 \mu m$$

$$f = 10000(\text{rpm})/60 \text{ s}$$

$$V_p = 2\pi f S_{pp}/2 = 15.0 \text{ mm/s}$$

Vibration Frequency - CPM



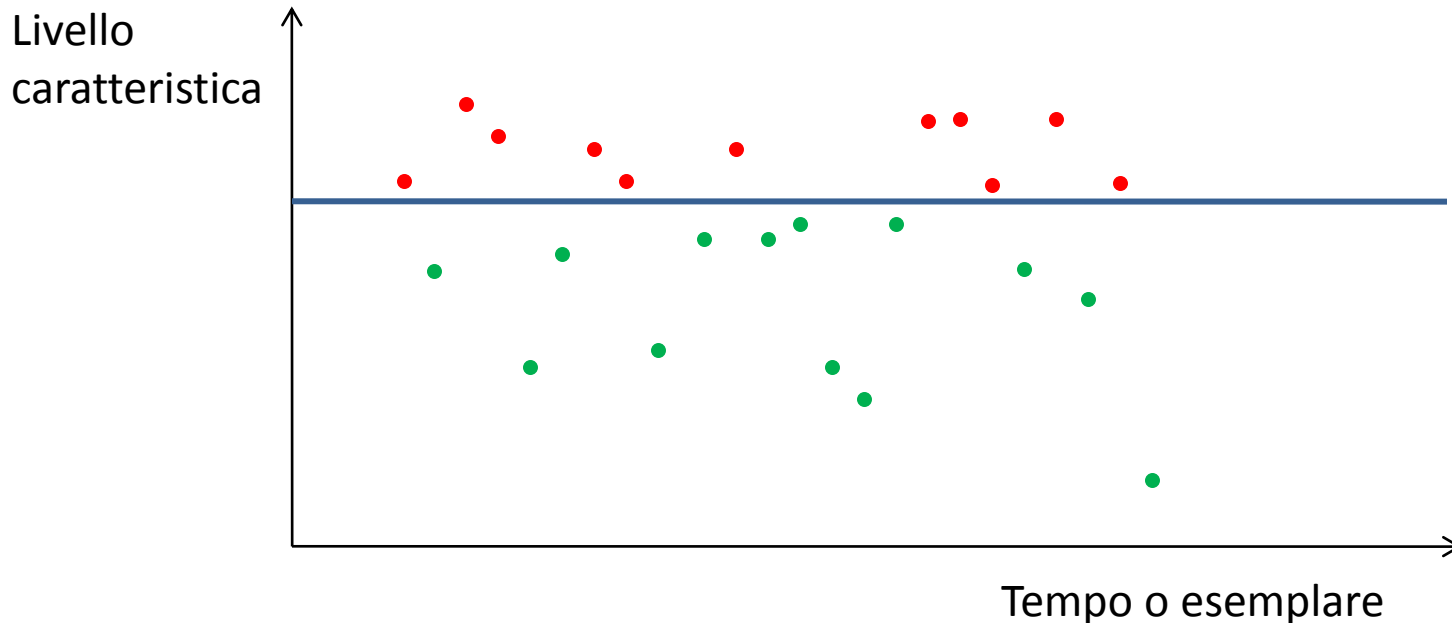
DIAGNOSI-CLASSIFICAZIONE

ESTRAZIONE DELLE CARATTERISTICHE

Una sola caratteristica + soglia (monodimensionale)

Livello Caratteristica > soglia -> bad

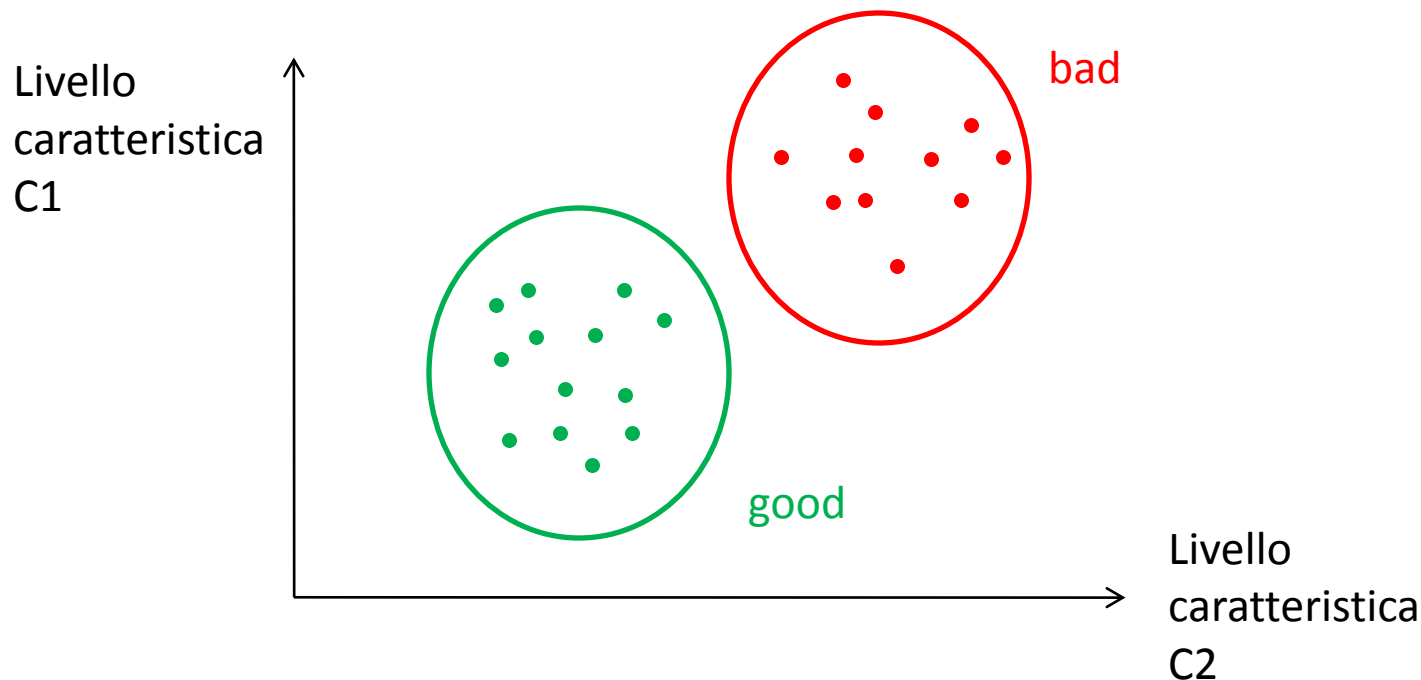
Livello Caratteristica < soglia -> good



DIAGNOSI-CLASSIFICAZIONE

ESTRAZIONE DELLE CARATTERISTICHE

Due caratteristiche + soglia (bidimensionale)
SPAZIO DELLE CARATTERISTICHE



DIAGNOSI-DECISIONE

DETERMINAZIONE DELLA SOGLIA

Procedura della massima probabilità (teoria di Bayes)

Stato

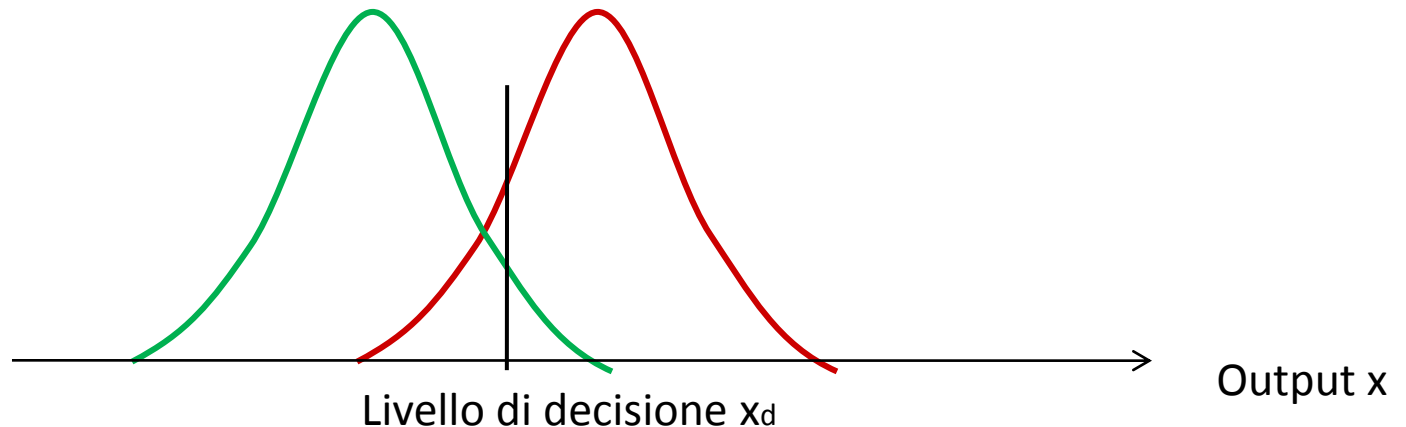
Output

Macchina
buona

è distribuzione $p(x|s)$

Macchina
difettata

è distribuzione $p(x|d)$

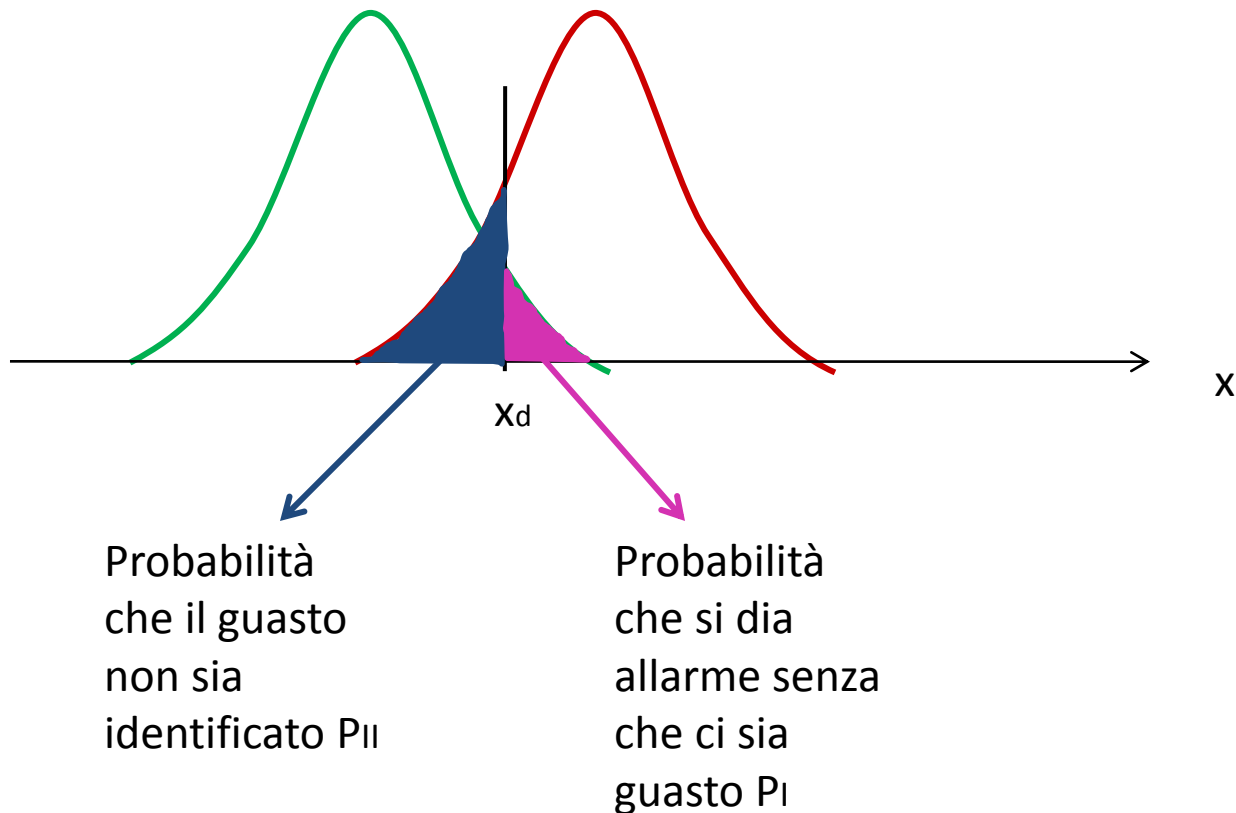


DIAGNOSI-DECISIONE

DETERMINAZIONE DELLA SOGLIA

Procedura della massima probabilità (teoria di Bayes)

Se l'output x supera il livello di decisione (soglia) x_d si dà allarme



DIAGNOSI-DECISIONE

DETERMINAZIONE DELLA SOGLIA

Procedura della massima probabilità (teoria di Bayes)

Se l'errore di tipo I costa K_I e l'errore di tipo II costa K_{II} per avere lo stesso costo nello scartare un pezzo buono o nell'immettere sul mercato un pezzo guasto occorre che:

$$P_I K_I = P_{II} K_{II}$$

Si sceglie x_d in modo che il rapporto delle probabilità sia inversamente proporzionale al rapporto dei costi:

$$P_I / P_{II} = K_I / K_{II}$$

DIAGNOSI-DECISIONE

DETERMINAZIONE DELLA SOGLIA

Procedura della massima probabilità (teoria di Bayes)

Se il costo nello scartare un pezzo buono (K_I) > del costo nell'immettere sul mercato un pezzo guasto (K_{II}) occorre che:

$$K_I > K_{II}$$

$$P_I < P_{II}$$

