



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE - DIN**

**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN  
INGEGNERIA MECCANICA – CURRICULUM MECCANICA  
DELL’AUTOMAZIONE E ROBOTICA**

**ANALISI DI SEGNALI VIBRAZIONALI PER IL MONITORAGGIO DELLE  
CONDIZIONI OPERATIVE DI UN MULINO TAMBURLANO**

**Tesi di laurea magistrale in meccanica delle vibrazioni**

**Relatore**

**Prof. Marco Troncossi**

**Presentata da**

**Davide Pancaldi**

**Correlatori**

**Alberto Peroni**

**Simone Rosa**

---

**Sessione marzo 2025**

**Anno Accademico 2023/2024**



## **Abstract**

In questa tesi si sono studiate e poi applicate diverse tecniche per analizzare i segnali vibrazionali acquisiti da un mulino a tamburo, utilizzato per la macinazione ad umido continua delle materie prime nella produzione delle piastrelle; l'obiettivo dello studio è quello di riuscire a stimare le condizioni operative della macchina, per verificare che esse siano buone o per individuare difetti se presenti.

Le varie tecniche sono implementate in un'applicazione creata su Matlab, attraverso la quale l'utente può, scorrendo tra i vari menu e le varie funzioni, elaborare i dati acquisiti dalla macchina e fare delle ipotesi sulle sue condizioni di funzionamento.



# INDICE

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Analisi delle Vibrazioni per il Monitoraggio e la Diagnostica dei Macchinari</b>	<b>2</b>
2.1	Strategie di Manutenzione	2
2.2	Monitoraggio delle Condizioni	2
2.3	Elaborazione dei Dati	3
2.4	Caratteristiche dei Segnali	4
2.5	Segnali Generati da Macchine Rotanti	8
2.6	Indicatori di Salute	12
2.6.1	Densità di Probabilità e Momenti	13
2.6.2	Indicatori per gli Ingranaggi	15
2.6.3	Altri Indicatori	17
2.6.4	Distanza di Mahalanobis	18
2.7	Analisi su Grafici dei Segnali	19
2.7.1	Forma d'Onda	19
2.7.2	Trasformata Discreta di Fourier	19
2.7.3	Curiosi Spettrale	23
2.7.4	Trasformata di Hilbert e Demodulazione	25
2.7.5	Cepstrum	27
2.7.6	Order Tracking	28
<b>3</b>	<b>Monitoraggio di un Mulino Tamburlano</b>	<b>29</b>
3.1	Presentazione della Macchina	29
3.2	Dati Acquisiti	32
3.3	Tecniche di Analisi dei Dati	33
<b>4</b>	<b>Sviluppo e Implementazione di una Procedura di Elaborazione Dati</b>	<b>39</b>
4.1	Analisi su un Singolo File di Dati	39
4.1.1	Calcolo e Analisi Indicatori	42
4.1.2	Analisi su Grafici	45
4.1.2.1	Analisi Spettrale	45
4.1.2.2	Demodulazione e Spettro dell'Inviluppo	55
4.1.2.3	Cepstrum	57

4.2	Analisi su più File di Dati	58
<b>5</b>	<b>Risultati</b>	<b>62</b>
5.1	Primo Periodo di Osservazione	62
5.2	Secondo Periodo di Osservazione	69
<b>6</b>	<b>Conclusioni e Sviluppi Futuri</b>	<b>80</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>81</b>





# 1 Introduzione

Monitorare una macchina durante il suo funzionamento porta notevoli vantaggi, perché permette di stimarne le condizioni operative, determinando se esse sono buone o difettose; dalle stime che vengono fatte è poi possibile ottimizzare le manutenzioni, per farle solo quando effettivamente è necessario e direttamente sui componenti che vengono ritenuti difettosi.

In questa tesi, dunque, vengono studiate e applicate diverse tecniche per analizzare i segnali vibrazionali generati da un mulino a tamburo per la macinazione ad umido continua; la macchina oggetto di studio è stata prodotta da SACMI nel 1998 e la si vuole analizzare per capire se dopo tanti anni le sue condizioni sono ancora buone.

Tutte le analisi sono state implementate in una applicazione creata su Matlab, con la quale l'utente può, scorrendo tra i vari menu e le varie funzioni, elaborare i dati acquisiti dalla macchina e fare delle ipotesi sulle sue condizioni di funzionamento. In particolare, potrà utilizzare gli indicatori per determinare se un difetto è presente o meno e diverse analisi su grafici per determinare quale è il difetto e dove esso si trova.

## **2 Analisi delle Vibrazioni per il Monitoraggio e la Diagnostica dei Macchinari**

### **2.1 Strategie di Manutenzione**

Qualunque sistema, inevitabilmente nel tempo, tende a usurarsi e deteriorarsi; per questo, le aziende possono prevedere strategie di manutenzione per garantire un corretto funzionamento delle loro strutture, attrezzature e macchinari.

Originariamente le macchine venivano fatte funzionare fino a rottura, il che portava ad avere tempi più lunghi tra un fermo e l'altro, ma anche a guasti potenzialmente catastrofici; si possono infatti avere danni ingenti anche sulle macchine vicine e, per il fatto che bisogna attendere che vengano fatte le riparazioni e che vengano prodotti i pezzi sostitutivi, tempi di fermo molto lunghi. Da questo derivano perdite di produzione, che possono anche essere maggiori del costo del singolo macchinario. Questa strategia di manutenzione è comunque utilizzata in ambienti in cui si usa un alto numero di piccole macchine, in cui un guasto è difficilmente catastrofico e quindi non critico per la produzione.

Una strategia di manutenzione alternativa può essere quella preventiva, in cui la manutenzione viene fatta a intervalli regolari in modo da avere una bassa probabilità di rotture tra le riparazioni. Gli intervalli vengono scelti in modo che non più dell'1-2% delle macchine arrivano a rottura, ma questo comporta, oltre al fatto che comunque una piccola percentuale dei guasti rimane, ad avere maggiori parti di ricambio e maggior lavoro di manutenzione, di quelli che servono effettivamente, e con molti componenti che vengono sostituiti, quando potrebbero lavorare per due o tre volte il tempo scelto per la loro sostituzione. In ogni caso, questo tipo di strategia può essere comunque utilizzata dove si riesce a prevedere, con una certa accuratezza, dopo quanto tempo un componente arriva a rottura o deve essere sostituito; questo però non vale per molti di essi, come ad esempio i cuscinetti, in cui il tempo di funzionamento varia di molto da componente a componente.

La terza strategia utilizzabile è detta manutenzione predittiva, in cui il guasto è previsto attraverso un costante monitoraggio delle condizioni della macchina e la manutenzione viene fatta, quindi, nel momento ottimale. Ha evidentemente notevoli vantaggi rispetto alle strategie precedentemente descritte, ma richiede l'utilizzo di tecniche di monitoraggio affidabili che permettano di determinare sia le condizioni attuali, che di fare previsioni sulla vita rimanente della macchina.

### **2.2 Monitoraggio delle condizioni**

Il monitoraggio delle condizioni di salute di una macchina mira a stimare le condizioni attuali e a predire le condizioni future della macchina mentre essa è in funzionamento, utilizzando tecniche che permettano di ottenere informazioni riguardanti il suo stato; la tecnica più utilizzata è sicuramente l'analisi delle vibrazioni in quanto reagisce immediatamente ai cambiamenti, con la possibilità di poter fare sia monitoraggio in continuo che intermittente, può identificare con precisione la zona del guasto e può dare indicazione di difetti anche molto piccoli.

L'analisi delle vibrazioni è basata sul fatto che anche in buone condizioni, le macchine generano vibrazioni. Queste possono essere collegate a eventi periodici, come ad esempio l'ingranamento dei denti degli ingranaggi, oppure possono essere collegate a eventi che non sono completamente

sincronizzati con la velocità di rotazione degli alberi; da questo deriva anche la possibilità di utilizzare diverse tecniche per la diagnostica basate sull'analisi delle frequenze e la possibilità di separare i segnali perfettamente periodici, da quelli che non lo sono.

Il monitoraggio può quindi essere di tipo:

- Continuo, anche detto online, per spegnere le macchine nel caso di cambiamenti improvvisi, soprattutto su quelle più critiche e costose per evitare rotture catastrofiche. È basato sul monitoraggio di parametri più semplici, come RMS o il valore massimo delle vibrazioni, i quali riescono a dare indicazione di un guasto solo poco tempo prima che esso avvenga.
- Intermittente, anche detto offline, che permette di fare analisi più dettagliate, quindi di avere indicazioni di un possibile guasto con largo anticipo, con costi minori, ma con l'impossibilità di identificare rotture improvvise.

Per acquisire dati vengono utilizzati dei trasduttori: sono dispositivi che ricevono in ingresso uno stimolo e restituiscono un segnale elettrico (di solito in corrente o tensione) facilmente gestibile, controllabile e computabile. L'input non è quindi direttamente misurato, ma si ottiene la modifica che esso compie sul sensore.

Il trasduttore che di solito viene utilizzato per il monitoraggio delle condizioni della macchina è l'accelerometro piezoelettrico, per via degli ampi range di frequenza e ampiezza misurabili con elevata sensibilità e accuratezza. È possibile utilizzare anche altri tipi di trasduttori, sia per monitorare con metodi diversi la macchina (magari dove le analisi con gli accelerometri non sono efficaci), che per poter unire dati di più sensori e fare studi più precisi o avanzati: un esempio è l'utilizzo del tacometro che -in unione con i segnali accelerometrici- permette di calcolare la media sincrona dei segnali acquisiti.

## 2.3 Elaborazione dei Dati

I dati grezzi ottenuti direttamente dai sensori non sono molto efficaci per comprendere lo stato della macchina, in quanto, di solito, sono segnali molto complessi e non sempre utili per determinare il livello del degrado del componente che si sta monitorando; per questo, devono essere convertiti in informazioni utili con lo scopo di:

- Diminuire la componente di rumore;
- Fornire maggiori informazioni per comprendere o visualizzare, evidenziandolo, il processo che produce determinati dati;
- Ridurre le dimensioni dei dati, utilizzando modelli computazionali.

Grazie all'elaborazione dei dati si può studiare lo stato di salute della macchina in modo più o meno approfondito:

- Si può semplicemente definire se c'è o meno un difetto nella macchina, rilevando eventuali cambiamenti sullo stato del componente monitorato, da uno stato normale a un nuovo stato anomalo. In particolare, si può definire una regione, entro la quale il comportamento è definito normale e se i dati rilevati si trovano al di fuori di questa regione, allora il sistema è considerato difettoso.
- Si possono eseguire analisi più approfondite eseguendo diagnostica, ovvero stimando il tipo, la dimensione, la posizione e la causa del guasto.

- Ulteriori analisi possono portare alla prognostica, ovvero a stimare il tempo che rimane prima che il sistema o un componente si guasti. È utilizzata dalle aziende per gestire i rischi derivanti da guasti inaspettati e di solito è basata sull'esperienza degli ingegneri che fanno le manutenzioni, anche se le decisioni umane spesso non sono sufficientemente accurate quando si tratta di sistemi complessi. Per questo ci sono state numerose ricerche per sviluppare modelli per la prognostica, i quali, in generale sono basati su valutazioni della salute e sulla stima della vita rimanente del sistema, grazie alle quali si possono poi studiare con anticipo piani di manutenzione.

L'elaborazione dei dati può essere fatta in due modi:

- Rappresentando i dati su grafici. Le caratteristiche di questo tipo di analisi sono:
  - o Eventuali difetti possono essere trovati studiando i pattern che vengono evidenziati nelle varie rappresentazioni;
  - o La creazione di un algoritmo che analizza i grafici risulta difficoltosa e quindi conviene che sia una persona esperta ad eseguire le varie analisi;
  - o Si può determinare se c'è un difetto o meno, la tipologia, le dimensioni e la posizione senza avere alcun dato relativo a misure passate, grazie al riconoscimento di determinati pattern;
- Calcolando indicatori di salute. Le caratteristiche di questa analisi sono:
  - o È semplice creare un algoritmo per capire se è presente o meno un difetto, definendo delle soglie per ogni indicatore, all'interno delle quali la macchina teoricamente è in buone condizioni e all'esterno delle quali la macchina ha un problema;
  - o È possibile creare un algoritmo per comprendere dove è presente il difetto, le sue dimensioni e la sua tipologia ma bisogna avere molti dati a disposizione, sia relativi a quando la macchina funziona in condizioni ottimali, sia relativi a quando la macchina è in funzionamento con uno o più difetti;
  - o È possibile determinare quanta vita rimane a un componente della macchina, studiando le variazioni nel tempo degli indicatori; questa analisi di solito viene fatta solo se si hanno molti dati acquisiti dalla macchina in condizioni di funzionamento difettose. Se non si avessero sufficienti dati per l'analisi, una soluzione potrebbe essere quella presentata in [5], in cui i parametri per l'analisi vengono scelti arbitrariamente invece che basandosi su misure già fatte.

Partendo dai risultati delle diverse analisi, si possono quindi prendere decisioni per fare le manutenzioni, tenendo conto sia delle informazioni riguardanti il degrado, sia della struttura del sistema, in modo da ottimizzare sia i singoli componenti o i sottosistemi, che la pianificazione dell'intero ambiente. L'interfaccia uomo-macchina è quindi fondamentale, perché fa da collegamento tra il sistema di monitoraggio e l'utente.

## 2.4 Caratteristiche dei Segnali

I segnali derivanti dai trasduttori sono espressi in funzione del tempo e, in tale dominio, di solito, non forniscono molte informazioni; spesso, per evidenziare maggiormente determinate caratteristiche del segnale, conviene passare al dominio della frequenza utilizzando la trasformata di Fourier. Essa è un operatore che permette di scrivere una funzione dipendente dal tempo come combinazione lineare di funzioni esponenziali. In base alle caratteristiche della funzione temporale, si possono avere diverse versioni della trasformata:

- Serie di Fourier: permette di esprimere un segnale temporale continuo e periodico con periodo T come una somma discreta e infinita di esponenziali:

$$x(t) = \sum_{k=1}^{\infty} A_k e^{jw_k t} \quad (2.1)$$

Partendo dal segnale temporale, è possibile calcolare i coefficienti  $A_K$  come:

$$A_K = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{-jw_k t} dt \quad (2.2)$$

In cui  $w_k$  è la k-esima armonica della frequenza fondamentale definita come  $w_k = 2\pi k/T$ ;

- Trasformata continua di Fourier: permette di esprimere un segnale temporale continuo come l'integrale di una funzione esponenziale:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j2\pi f t} df \quad (2.3)$$

La funzione  $X(f)$  (detta trasformata di Fourier) è definita come:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (2.4)$$

Sia il segnale che la trasformata sono funzioni continue.

- Trasformata campionata di Fourier: è una modifica alla trasformata continua di Fourier, derivante dal fatto che per poter computare un segnale, serve che esso sia campionato a intervalli regolari. L'espressione diventa quindi:

$$x(t_k) = \frac{1}{f_s} \int_{-f_s/2}^{f_s/2} X(f) e^{j2\pi f t_k} df \quad (2.5)$$

La trasformata è calcolabile come:

$$X(f) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x(t_k) e^{-j2\pi f t_k} \quad (2.6)$$

In cui  $t_k$  sono gli istanti di tempo in cui si ha il campionamento del segnale (da notare come si considerino infiniti campionamenti). La trasformata è una funzione continua.

- Trasformata discreta di Fourier: la trasformata discreta di Fourier è un'ulteriore modifica alla trasformata campionata, derivante dal fatto che, nelle misurazioni dei segnali, inevitabilmente i campionamenti sono limitati:

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi kn/N} \quad (2.7)$$

I coefficienti  $X(k)$  sono calcolabili come:

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi kn/N} \quad (2.8)$$

Utilizzando questa trasformata su un segnale di lunghezza N limitata, implicitamente, si considera tale segnale periodico di periodo N, dal momento che la funzione  $e^{j2\pi kn/N}$  è periodica di periodo N. Sia il segnale che la sua trasformata sono funzioni discrete e periodiche.

Nella trasformata continua di Fourier (ma vale anche per le altre trasformate)  $X(f)$  è un numero complesso per ogni  $f$ , per cui può essere scritto come:

$$X(f) = |X(f)|e^{j\arg(X(f))} \quad (2.9)$$

$X(f)$  rappresenta lo spettro del segnale: se si grafica  $|X(f)|$  al variare della frequenza  $f$  si ottiene lo spettro di ampiezza, mentre se si grafica  $\arg(X(f))$  al variare della frequenza  $f$  si ottiene lo spettro di fase. La rappresentazione nel dominio della frequenza risulta essere molto efficace nell'analisi dei segnali per la diagnostica, dal momento che, come verrà spiegato nei prossimi capitoli, ad ogni componente della macchina sono associate una determinata frequenza e le sue armoniche (ovvero i multipli di tale frequenza).

In molti segnali si può avere il fenomeno di modulazione; prendendo un segnale composto da una sola sinusoide:

$$x(t) = A\sin(w_1t + \phi) \quad (2.10)$$

Se varia l'ampiezza  $A$  nel tempo si ha modulazione in ampiezza, se varia la frequenza  $w_1$  nel tempo si ha modulazione in frequenza, mentre se varia la fase  $\phi$  nel tempo si ha modulazione in fase.

Nel caso più semplice di modulazione in ampiezza,  $A$  può essere scritto come:

$$A(t) = A_0[(1 + \gamma\sin(w_2t))] \quad (2.11)$$

In cui  $A$  è la modulante,  $\sin(w_1t + \phi)$  è la portante e  $\gamma$  è l'indice di modulazione. Svolgendo il prodotto e utilizzando le formule trigonometriche si ottiene:

$$x(t) = A_0\sin(w_1t + \phi) + \frac{\gamma A_0}{2}\cos[(w_1 - w_2)t + \phi] - \frac{\gamma A_0}{2}\cos[(w_1 + w_2)t + \phi] \quad (2.12)$$

In Figura 2.1 è quindi graficato un segnale  $x(t)$  modulato in ampiezza, nel dominio del tempo (2.1a) e nel dominio della frequenza (2.1b).

Nel caso di modulazione di frequenza si può scrivere  $w$  come:

$$w = \frac{d\alpha(t)}{dt} \quad (2.13)$$

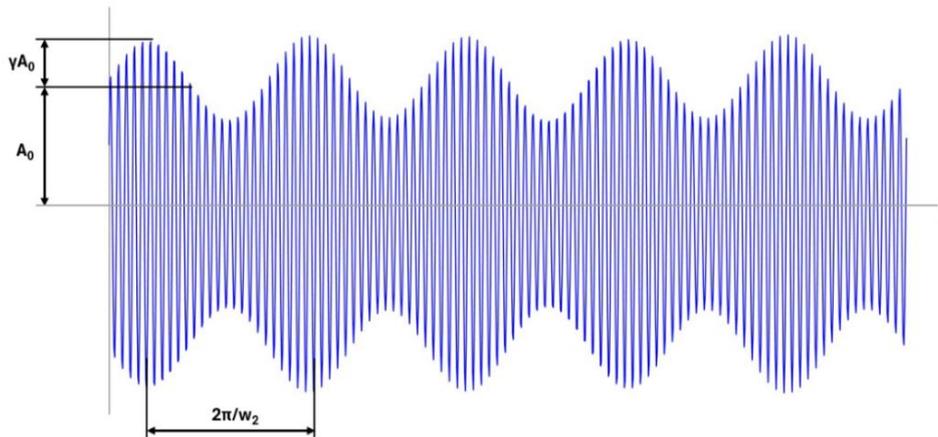
$$\alpha(t) = \int w dt = \int [w_1 + (\Delta w)f(t)] dt = w_1t + \Delta w \int f(t) dt \quad (2.14)$$

Con  $\Delta w$  massima variazione della pulsazione della portante  $w$  e  $f(t)$  la legge di variazione della pulsazione. Se ad esempio si ha  $f(t) = \cos(w_2t)$ , possiamo definire l'indice di modulazione come  $\gamma = \frac{\Delta w}{w_2}$  e scrivere:

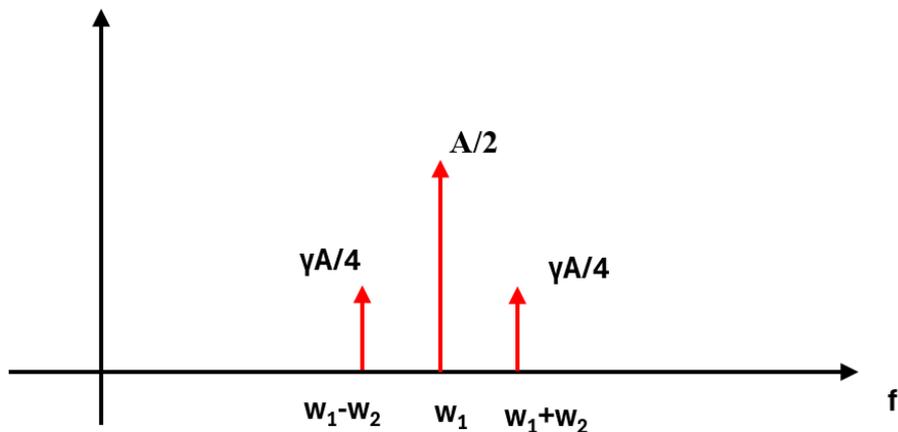
$$\alpha(t) = w_1t + \frac{\Delta w}{w_2} \int \cos(w_2t) dw_2t = w_1t + \gamma \sin w_2t \quad (2.15)$$

$$x(t) = A \sin(w_1t + \gamma \sin w_2t) \quad (2.16)$$

Da questa equazione è poi possibile dimostrare che lo spettro di un segnale sinusoidale modulato in frequenza contiene infinite componenti, disposte simmetricamente rispetto a  $w_1$ , e distanziate di  $w_2$ . Le loro ampiezze però, diminuiscono rapidamente man mano che ci si allontana da  $w_1$  e sono trascurabili se sono a una distanza maggiore di  $\Delta w$ ; nel caso in cui  $\gamma$  è molto inferiore all'unità, le uniche componenti non trascurabili sono  $w_1, w_1 - w_2$  e  $w_1 + w_2$ .



(a)



(b)

Figura 2.1: segnale modulato in ampiezza nel dominio del tempo (a) e nel dominio della frequenza (b).

Nel caso di modulazione di fase possiamo scrivere l'equazione (2.9) come:

$$x(t) = A \sin(w_1 t + \phi(t)) \quad (2.17)$$

In cui se  $\phi(t)$  varia con legge armonica si ha:

$$\phi(t) = \phi_m \cos(w_2 t) \quad (2.18)$$

$$x(t) = A \sin(w_1 t + \phi_m \cos w_2 t) \quad (2.19)$$

Come nel caso precedente, si può dimostrare che lo spettro di un segnale sinusoidale modulato in fase ha infinite componenti, disposte simmetricamente rispetto alla frequenza  $w_1$ , distanziate di  $w_2$  e che diminuiscono rapidamente man mano che ci si allontana dalla frequenza centrale.

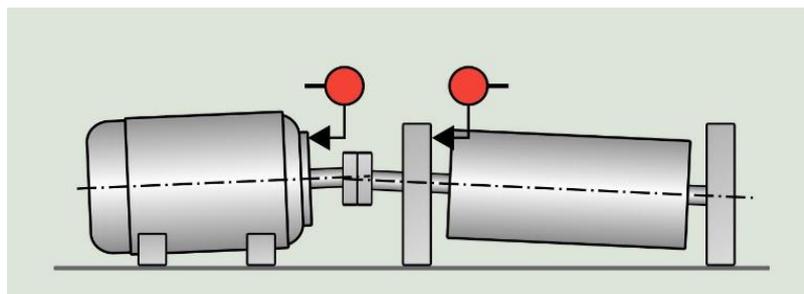
La modulazione è un fenomeno che si presenta in molti segnali derivanti da componenti difettosi, per cui la sua individuazione e analisi risulta molto utile per monitorare le condizioni della macchina.

## 2.5 Segnali Generati da Macchine Rotanti

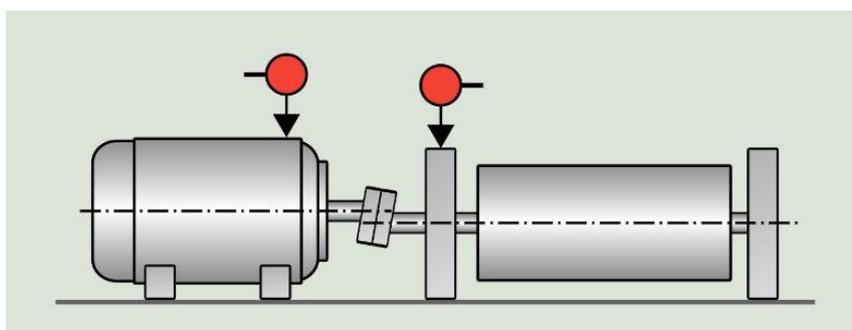
Le varie componenti della macchina, durante il funzionamento, tendono a mostrarsi nei segnali vibratorii con determinati andamenti (soprattutto se hanno un difetto), in funzione di velocità e carichi. Di fatto, risulta più semplice analizzare tali componenti in condizioni stazionarie, per cui, in questo capitolo, verranno descritti i segnali tipici di alcuni elementi presenti su molte macchine rotanti, quando velocità e carichi sono costanti -o subiscono piccole variazioni- nel tempo.

Gli alberi si individuano nei segnali vibratorii solo se hanno un difetto, alla frequenza di rotazione o alle sue prime armoniche. Tra i difetti possiamo avere:

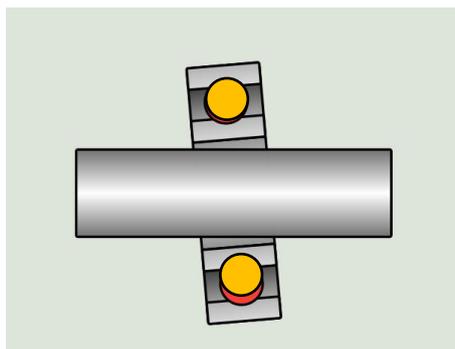
- Albero sbilanciato: si ha quando il centro di massa della sezione trasversale non è sull'asse di rotazione, per cui si viene a generare una forza che ruota alla velocità dell'albero;
- Disallineamento: si ha quando due rotori collegati in serie non sono allineati con i rispettivi supporti; è un difetto che può avere diverse cause, come, ad esempio, eccessiva confidenza nell'utilizzare accoppiamenti elastici, deformazione della macchina durante il funzionamento ecc. Può essere di diversi tipi:
  - o Disallineamento angolare: quando gli assi di rotazione dei due rotori non sono paralleli (Figura 2.2a);
  - o Disallineamento parallelo: quando gli assi di rotazione dei due rotori sono paralleli ma non sulla stessa retta (Figura 2.2b);
  - o Disallineamento dei cuscinetti: quando l'albero non è allineato con il rispettivo cuscinetto (Figura 2.2c);



(a)



(b)



(c)

Figura 2.2: disallineamento angolare (a), disallineamento parallelo (b) e disallineamento dei cuscinetti (c) da [1]. I cerchi rossi negli schemi rappresentano le migliori posizioni in cui mettere i sensori per rilevare il difetto.

- Albero incurvato (Figura 2.3): si ha quando il rotore non è più simmetrico rispetto all'asse di rotazione; è un difetto che può essere causato da deformazioni termiche o da carichi troppo elevati radiali o assiali;

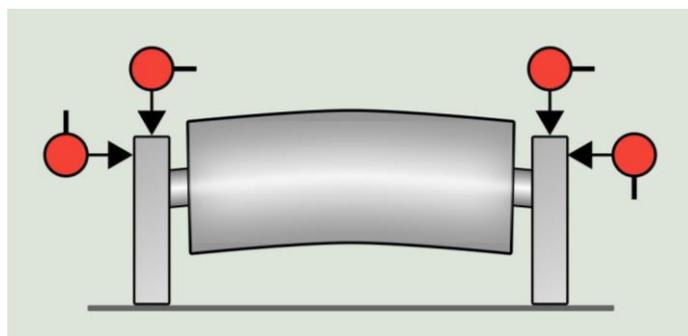


Figura 2.3: schematizzazione di un albero incurvato da [1]. I cerchi rossi nello schema rappresentano le migliori posizioni in cui mettere i sensori per rilevare il difetto.

- Albero criccato: è uno dei guasti più importanti da rilevare con il monitoraggio della macchina, anche se risulta complicato dal momento che anche grandi cricche portano a piccoli aumenti, se non nulli quando esse sono chiuse, alla frequenza di rotazione dell'albero.

Altri elementi sono gli ingranaggi, che si riconoscono nello spettro, anche se non hanno difetti, dal momento che danno dei picchi alla frequenza di ingranamento -calcolabile come velocità di rotazione di una ruota per il suo numero di denti- e alle sue armoniche. Il motivo è che durante la rotazione, il numero di coppie di denti in presa è variabile, con conseguente variazione della forza di ingranamento a parità di carico; essendo la rigidità dei denti non infinita, avremo che la loro flessione non rimane costante e si ha la variazione del rapporto di trasmissione. Le variazioni appena descritte avvengono con una frequenza pari a quella di ingranamento e sono riconoscibili con dei picchi nello spettro.

Nel monitoraggio degli ingranaggi è quindi molto importante conoscere la frequenza di ingranamento e le sue armoniche, ma serve cercare anche eventuali bande laterali, ovvero le bande distanti dalla frequenza di rotazione del pignone e dell'ingranaggio, dalla frequenza di ingranamento. Il motivo è che le bande laterali indicano quale ruota è in cattive condizioni, visto che i difetti si presentano con fenomeni di modulazione in ampiezza e/o fase visibili nello spettro, con portante la frequenza di ingranamento e modulante la frequenza di rotazione.

A seconda del difetto che si ha su un ingranaggio, si possono avere due tipi di modulazione:

- Modulazione locale (Figura 2.4a): si ha un'ampia distribuzione di bande laterali attorno alla frequenza di ingranamento e alle sue armoniche; è il caso di difetti locali sui denti, come ad esempio denti rotti o criccati;
- Modulazione lenta (Figura 2.4b): si hanno poche bande laterali attorno alla frequenza di ingranamento e alle sue prime armoniche; si ha quando il difetto è distribuito su più denti, come ad esempio nel caso di eccentricità o disallineamenti;

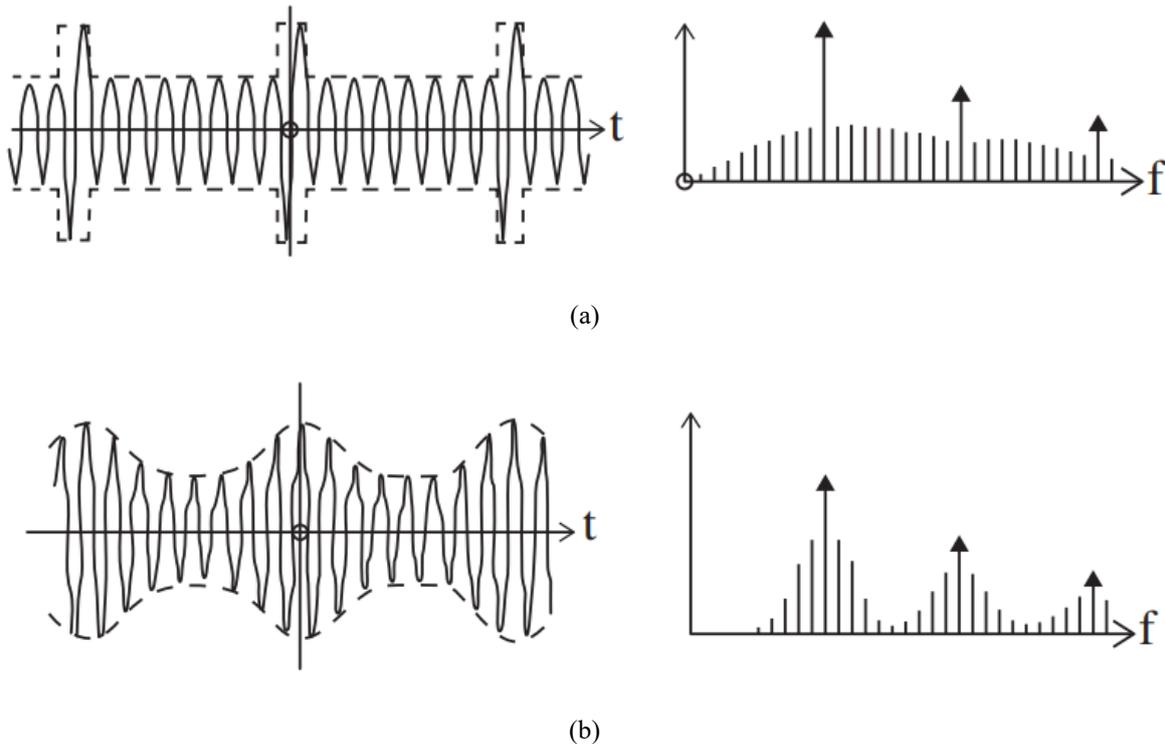


Figura 2.4: modulazione locale (a) e modulazione lenta (b) da [4] in segnali derivanti da ingranaggi con difetti.

Difetti locali possono anche generare degli impulsi che vanno ad eccitare le frequenze di risonanza del carter.

Come i componenti precedentemente descritti, anche i cuscinetti hanno le loro frequenze caratteristiche; esse si notano solo se c'è un difetto in uno dei loro elementi (Figura 2.5):

- BPFO: frequenza relativa all'anello esterno quando ha un difetto; corrisponde al numero di sfere o rulli che passano sopra un determinato punto dell'anello esterno ad ogni rotazione dell'albero; la formula per calcolarla è:

$$BPFO = \frac{nf_r}{2} \left( 1 - \frac{d}{D} \cos \phi \right) \quad (2.20)$$

- BPFI: frequenza relativa all'anello interno quando ha un difetto; corrisponde al numero di sfere o rulli che passano sopra un determinato punto dell'anello interno ad ogni rotazione dell'albero; la formula per calcolarla è:

$$BPFI = \frac{nf_r}{2} \left( 1 + \frac{d}{D} \cos \phi \right) \quad (2.21)$$

- BSF: frequenza relativa agli elementi rotolanti quando hanno un difetto: corrisponde al numero di rotazioni che compiono le sfere o i rulli su sé stessi ad ogni rotazione dell'albero; la formula per calcolarla è:

$$BSF = \frac{f_r D}{2d} \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \cos \phi \right)^2 \right] \quad (2.22)$$

- FTF: frequenza relativa alla gabbia quando ha un difetto; corrisponde al numero di rotazioni che compie la gabbia del cuscinetto ad ogni rotazione dell'albero; la formula per calcolarla è:

$$FTF = \frac{f_r}{2} \left( 1 - \frac{d}{D} \cos \phi \right) \quad (2.23)$$

Nelle formule,  $f_r$  è la velocità di rotazione dell'albero,  $\phi$  è l'angolo di contatto,  $d$  è il diametro dei corpi volventi e  $D$  è la distanza tra i centri di due corpi volventi diametralmente opposti calcolata come  $(D_1+D_2)/2$  (Figura 2.6).

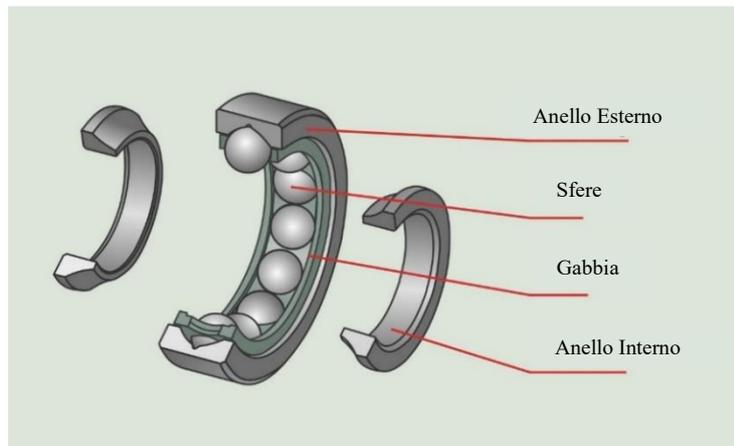


Figura 2.5: elementi principali di un cuscinetto a rotolamento da [3].

Le frequenze calcolate sono però ideali: nella realtà si ha sempre una piccola variazione casuale dovuta al fatto che l'angolo di contatto cambia con la posizione dei corpi volventi; essi cercano quindi di andare a una velocità diversa tra loro, con la gabbia che li tiene in posizione; ne deriva un loro scivolamento che porta a casuali variazioni nelle frequenze. Il fatto che ci sia questa piccola componente di casualità aiuta nel separare le componenti vibratorie dei cuscinetti da un segnale che contiene anche altre componenti meno randomiche (come ad esempio ingranaggi).

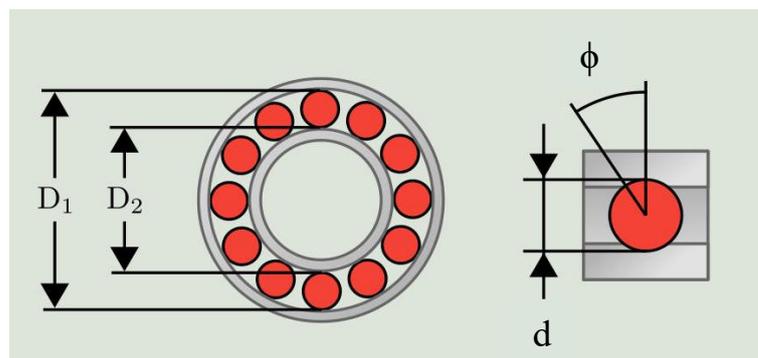


Figura 2.6: dimensioni principali per il calcolo delle frequenze caratteristiche dei cuscinetti a rotolamento da [3].

Per individuare quindi un difetto in un cuscinetto bisogna cercare le frequenze descritte nelle equazioni (2.20), (2.21), (2.22), (2.23) -tenendo conto di una piccola componente di randomicità-, con le loro armoniche (anche fino alla decima) ed eventuali bande laterali distanziate della frequenza di rotazione dell'albero.

I cuscinetti, inoltre, hanno una loro frequenza naturale, dovuta alla loro massa e rigidità, di solito molto alta per superare le condizioni di funzionamento della macchina e non avere risonanza. In ogni caso, alcuni difetti possono provocare degli urti (tra i corpi volventi e le guide) che provocano l'eccitazione di tali frequenze naturali, con risonanza e quindi alti livelli di vibrazione ad alta frequenza. In questi casi si ha anche modulazione in alta frequenza, con bande laterali presenti a una distanza pari alla frequenza caratteristica dell'elemento che ha il difetto.

Sulle macchine sono presenti anche i motori; i più utilizzati, per applicazioni industriali, sono sicuramente i motori a corrente alternata. Essi possono essere sincroni o asincroni: nel primo caso il campo magnetico nello statore ruota alla stessa velocità del rotore, mentre nel secondo caso il campo magnetico dello statore ruota leggermente più velocemente del rotore. In entrambi i casi quindi, se è presente un difetto sullo statore, si hanno picchi al doppio della frequenza di inversione della corrente  $f_{main}$ ; nel caso di motore asincrono, inoltre, se il difetto è presente sul rotore, si hanno picchi alla frequenza di rotazione dell'albero, con numerose bande laterali distanziate della frequenza di scorrimento moltiplicata per il numero di poli.

La frequenza di inversione della corrente, in entrambi i motori è anche uguale alla velocità di rotazione dell'albero di uscita moltiplicata per il numero di coppie di poli, ma nel caso di motore asincrono bisogna aggiungere la componente di scorrimento che c'è tra i due campi magnetici rotanti. In formule quindi avremo:

- Motore sincrono:
  - o Frequenza di sincronismo:  $f_{sync} = f_{main}/p$
  - o Velocità di rotazione dell'albero in uscita:  $f_r = f_{sync}$
  - o Frequenza di scorrimento:  $f_{slip} = f_{sync} - f_r = 0$
  - o Frequenza di un difetto sullo statore:  $f_{statore} = 2f_{main} = 2p * f_r$
- Motore asincrono
  - o Frequenza di sincronismo:  $f_{sync} = f_{main}/p$
  - o Velocità di rotazione dell'albero in uscita:  $f_r \neq f_{sync}$
  - o Frequenza di scorrimento:  $f_{slip} = f_{sync} - f_r$
  - o Frequenza di un difetto nello statore:  $f_{statore} = 2f_{main} = 2p(f_r + f_{slip})$
  - o Frequenza di un difetto nel rotore:  $f_{rotore} = 2p * f_{slip}$

In cui  $p$  è il numero di coppie di poli.

## 2.6 Indicatori di Salute

L'utilizzo di indicatori permette di riassumere quantità di dati anche molto grandi in singoli valori, facili da memorizzare e da gestire; si può infatti partire da un segnale composto da migliaia di punti e riassumerlo in pochi indicatori, avendo molti meno dati da salvare e interpretare. Grazie all'enorme varietà di indicatori utilizzabili è possibile, inoltre, mettere in evidenza diverse caratteristiche di un segnale, come ad esempio la sua impulsività, la sua simmetria ecc. e utilizzare tali informazioni per comprendere lo stato della macchina in modo anche molto approfondito e preciso.

Questo tipo di analisi ha dei limiti dovuti al fatto che servono tantissimi dati per poter fare analisi più avanzate, in quanto molte di esse si basano sull'analizzare l'andamento nel tempo degli

indicatori o si basano sul confrontare i dati acquisiti in condizioni ottimali, con i dati acquisiti in condizioni imperfette.

### 2.6.1 Densità di Probabilità e Momenti

Considerando una variabile  $x$ , con funzione di distribuzione di probabilità si intende la probabilità che tale variabile assuma valori uguali o inferiori ad uno specifico valore  $\alpha$ :

$$P(\alpha) = P[x \leq \alpha] \quad (2.24)$$

La derivata della funzione in un punto è chiamata densità di probabilità ed è calcolata come:

$$p(\alpha) = \frac{dP(\alpha)}{d\alpha} \quad (2.25)$$

Tra le funzioni di distribuzione di probabilità, la più importante è quella normale o di Gauss, in quanto è tra le funzioni più utilizzate per approssimare andamenti casuali di variabili. La sua formulazione è:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.26)$$

Con  $\mu$  valore medio e  $\sigma$  deviazione standard.

Partendo quindi da un segnale  $x(t)$ , campionato a intervalli regolari, con  $N$  campionamenti, possiamo definire i primi indicatori, utilizzabili per il monitoraggio della macchina, come i momenti della funzione di distribuzione di probabilità; essi sono definiti come:

$$M_n(x) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_k - \mu)^n \quad (2.27)$$

$\mu$  è il valore medio: individua il centro della distribuzione e può essere calcolato con la formula:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \quad (2.28)$$

Il momento del primo ordine risulta essere sempre nullo ( $M_1 = 0$ ); possiamo quindi calcolare il momento del secondo ordine, ovvero la varianza ( $\sigma^2$ ), che permette di descrivere quanto sono sparsi i valori rispetto alla media:

$$\sigma^2 = M_2(x) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_k - \mu)^2 \quad (2.29)$$

Dalla varianza possiamo anche intuire la formula per calcolare la deviazione standard:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_k - \mu)^2} \quad (2.30)$$

Il momento del terzo ordine è lo skewness (S), che definisce se la densità di probabilità è una funzione simmetrica o meno; di solito viene normalizzato dividendolo per la deviazione standard elevata alla terza:

$$S = \frac{M_3(x)}{\sigma^3} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_k - \mu)^3}{\sigma^3} \quad (2.31)$$

Se il valore della skewness è negativo, la curva della densità di probabilità è inclinata verso destra, se è positivo, la curva della densità di probabilità è inclinata verso sinistra, mentre se è nullo la curva della densità di probabilità è centrata (come nel caso di distribuzione normale). I tre casi sono quindi rappresentati in Figura 2.7.

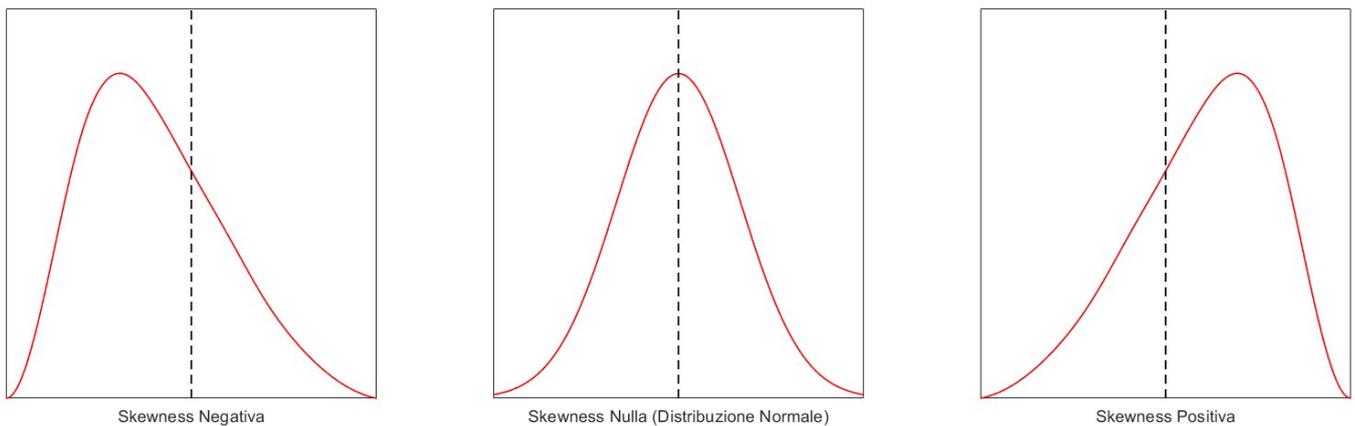


Figura 2.7: forma della curva della densità di probabilità al variare del segno dello skewness.

Per descrivere l'impulsività di un segnale si può utilizzare il momento del quarto ordine, ovvero la curtosi (K); di solito viene normalizzata dividendola per la deviazione standard elevata alla quarta:

$$K = \frac{M_4(x)}{\sigma^4} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_k - \mu)^4}{\sigma^4} \quad (2.32)$$

Come lo skewness, la curtosi descrive la forma della distribuzione (Figura 2.8):

- In una distribuzione normale il suo valore è pari a 3;
- Se il suo valore è maggiore di 3 si ha un picco più alto attorno alla media e valori più bassi altrove;
- Se il suo valore è minore di 3 si ha un picco più basso attorno alla media, e valori più alti altrove.

Dal momento che la forma della curva è descritta in funzione del fatto che la curtosi sia maggiore o minore di 3, in alcune applicazioni il valore di 3 viene sottratto nel calcolo e si definisce la curtosi utilizzando i cumulanti: essi sono degli elementi che possono essere stimati partendo dai momenti, ma i cumulanti di ordine elevato non contengono i cumulanti di ordine più basso (a differenza dei momenti). Ad esempio, i cumulanti dei primi quattro ordini possono essere calcolati come:

$$C_1 = M_1 \quad (2.33)$$

$$C_2 = M_2 - M_1^2 \quad (2.34)$$

$$C_3 = M_3 - 3M_1M_2 + 2M_1^3 \quad (2.35)$$

$$C_4 = M_4 - 4M_3M_1 - 3M_2^2 + 12M_2M_1^2 - 6M_1^4 \quad (2.36)$$

Se si è nel caso in cui il momento del primo ordine è nullo ( $M_1 = 0$ ), si ha che i cumulanti del secondo e quarto ordine diventano:

$$C_2 = M_2 = \sigma^2 \quad (2.37)$$

$$C_4 = M_4 - 3M_2^2 \quad (2.38)$$

Se poi si normalizza il cumulante del quarto ordine, come fatto per il momento, si ottiene:

$$K_c = \frac{M_4}{\sigma^4} - 3 = K - 3 \quad (2.39)$$

Quando si calcola la curtosi, bisogna quindi specificare se si è utilizzata la formulazione con i momenti o con i cumulanti.

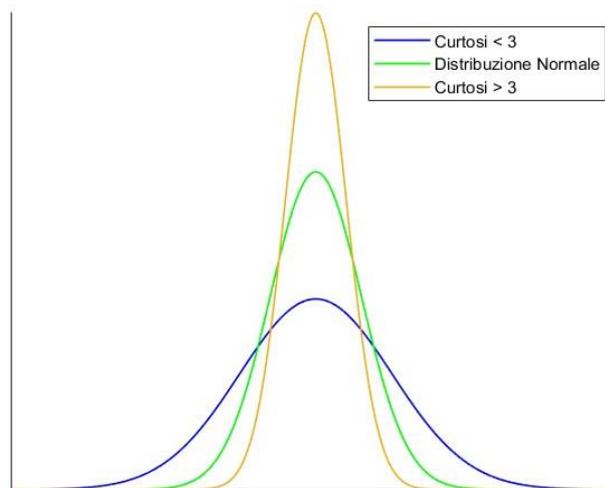


Figura 2.8: forma della curva della densità di probabilità al variare della curtosi.

## 2.6.2 Indicatori per gli Ingranaggi

Per gli ingranaggi, sono stati definiti diversi indicatori per identificare difetti; essi vengono calcolati a seguito di diversi step per mettere in evidenza determinate caratteristiche del segnale. Il procedimento descritto è tratto da [6].

Il primo step è quello di eliminare il rumore, ad esempio utilizzando la media sincrona (illustrata nel capitolo 4) per mettere in evidenza solo le componenti degli ingranaggi; dal segnale pulito si possono estrarre i primi due indicatori:

- Figura di merito zero (FM0): identifica cambiamenti nell'ingranamento; la formula per calcolarlo è:

$$FM0 = \frac{PP}{\sum_{k=1}^{N_{\text{har}}} P_i} \quad (2.40)$$

In cui  $PP$  è la differenza tra il valore massimo e il valore minimo,  $P_i$  è l'ampiezza della  $i$ -esima armonica della frequenza di ingranamento dell'ingranaggio e  $N_{\text{har}}$  è il numero di armoniche utilizzate per il calcolo;

- SER: è il rapporto tra la somma delle bande laterali e la frequenza di ingranamento degli ingranaggi; in formula:

$$SER = \frac{\sum_{k=1}^{N_{sb}} (S_i^+ + S_i^-)}{P_1} \quad (2.41)$$

In cui  $N_{sb}$  è il numero di bande laterali usato per il calcolo (di solito 3),  $S_i^+$  e  $S_i^-$  sono le ampiezze delle i-esime bande laterali attorno alla frequenza di ingranamento;

Il secondo step è quello di rimuovere le armoniche della frequenza di ingranamento dallo spettro, ottenendo il segnale residuo. Gli indicatori che si possono estrarre a questo punto sono:

- NA4: è un indicatore che è utilizzato per controllare l'avanzamento dei difetti in un ingranaggio; è ottenuto dividendo il quarto momento del segnale residuo (res) per la varianza media del segnale residuo delle ultime M rivoluzioni elevata al quadrato; in formula:

$$NA4 = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (res_i - \overline{res})^4}{\left\{ \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \left[ \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (res_{jk} - \overline{res}_j)^2 \right] \right\}^2} \quad (2.42)$$

In cui N è il numero di punti in una rotazione e  $\overline{res}$  è il valore medio del residuo.

- NB4: è calcolato in modo simile al NA4, ma al posto del segnale residuo si utilizza l'involuppo del segnale passa-banda filtrato e centrato nella frequenza di ingranamento dell'ingranaggio. L'obiettivo è di tenere solo la parte di segnale all'interno della banda selezionata, eliminando il resto, e di utilizzare l'involuppo (s) per evidenziare fluttuazioni diverse da quelle normali; in formula si ha:

$$NB4 = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (s_i - \overline{s})^4}{\left\{ \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \left[ \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (s_{jk} - \overline{s}_j)^2 \right] \right\}^2} \quad (2.43)$$

Il terzo step è quello di ottenere il segnale di differenza, rimuovendo dal segnale residuo le bande laterali della frequenza di ingranamento. Si possono quindi ottenere gli ultimi 4 indicatori:

- FM4: è utilizzato per individuare cambiamenti nell'ingranamento se un numero limitato di denti sono danneggiati. È definito come la curtosi del segnale di differenza (diff):

$$FM4 = \frac{N \sum_{i=1}^N (diff_i - \overline{diff})^4}{\left( \sum_{i=1}^N (diff_i - \overline{diff})^2 \right)^2} \quad (2.44)$$

- M6A ed M8A: sono simili all'FM4, ma sono più sensibili ai picchi nel segnale di differenza avendo potenze più alte, rispettivamente 6 e 8:

$$M6A = \frac{N^2 \sum_{i=1}^N (diff_i - \overline{diff})^6}{\left( \sum_{i=1}^N (diff_i - \overline{diff})^2 \right)^3} \quad (2.45)$$

$$M8A = \frac{N^3 \sum_{i=1}^N (diff_i - \overline{diff})^8}{\left(\sum_{i=1}^N (diff_i - \overline{diff})^2\right)^4} \quad (2.46)$$

- Energy ratio (ER): calcolato come l'RMS del segnale di differenza diviso l'ampiezza della frequenza di ingranamento con le sue armoniche e le rispettive bande laterali:

$$ER = \frac{RMS(diff)}{\sum_{i=1}^{N_{har}} \left[ P_i + \sum_{j=1}^{N_{sb}} (S_{ij}^+ + S_{ij}^-) \right]} \quad (2.47)$$

### 2.6.3 Altri Indicatori

- Valore di picco (Peak): è il valore massimo assoluto del segnale:

$$Peak = \max(|x|) \quad (2.48)$$

- Valore quadratico medio (RMS): indicatore statistico dell'ampiezza assoluta di un segnale e rappresenta la sua totale energia vibratoria; è definito come la radice quadrata della media aritmetica dei valori al quadrato. In formula diventa:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k^2} \quad (2.49)$$

Nel caso di un segnale ottenuto da un accelerometro montato su un albero rotante, la media dei valori misurati deve essere circa zero perché sennò significherebbe che la macchina starebbe traslando. Si nota quindi come in questi casi, prendendo l'equazione (2.30), la deviazione standard e l'RMS abbiano lo stesso valore e risulta quindi ridondante calcolarli entrambi;

- Entropia: misura il disordine del sistema e il suo valore aumenta all'aumentare della casualità del segnale. Ci possono essere diverse formulazioni, come ad esempio l'entropia di Shannon (SE):

$$SE = - \sum_{k=1}^N p(x_k^2) \log p(x_k^2) \quad (2.50)$$

- Percentile 75 ( $P_{75}$ ): è un parametro statistico che indica quale valore è maggiore di una determinata percentuale (75% in questo caso) di tutte le altre misure;
- Potenza media del segnale: può essere calcolata come la media dei valori misurati al quadrato; in formula:

$$P_m = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |x_k|^2 \quad (2.51)$$

- Integrale Lineare (i): dà una misura della complessiva variazione dei valori del segnale misurato, mettendo in evidenza effetti come modulazione o urti; la formula per calcolarlo è:

$$i = \sum_{k=0}^N \text{abs}(x_{k+1} - x_k) \quad (2.52)$$

Si possono, infine, definire alcuni indicatori adimensionali:

- Fattore di cresta (CF): dà un'idea di quanti sono gli impatti nel segnale misurato, rapportando il valore di picco all'RMS; in formula è calcolato come:

$$CF = \frac{|Peak|}{RMS} \quad (2.53)$$

- Fattore di impulso (IF), fattore di margine (MF) e fattore di forma (SF): le equazioni per calcolarli sono:

$$IF = \frac{x_{max}}{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |x_k|} \quad (2.54)$$

$$MF = \frac{x_{max}}{\frac{1}{N} (\sum_{k=1}^N \sqrt{|x_k|})^2} \quad (2.55)$$

$$SF = \frac{RMS}{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |x_k|} \quad (2.56)$$

## 2.6.4 Distanza di Mahalanobis

La distanza di Mahalanobis è una misura della distanza tra un punto e una distribuzione di punti in uno spazio multidimensionale. Definendo  $\boldsymbol{\mu}$  come il vettore contenente le medie delle coordinate dei punti dello spazio,  $\Sigma^{-1}$  come l'inverso della matrice di covarianza dei punti dello spazio e con  $\boldsymbol{x}$  il vettore delle coordinate di un punto, possiamo definire la distanza di Mahalanobis come:

$$r^2 = (\boldsymbol{x} - \boldsymbol{\mu})^t \Sigma^{-1} (\boldsymbol{x} - \boldsymbol{\mu}) \quad (2.57)$$

Tale misura può essere utile per individuare anomalie, potendo determinare la similarità tra dati acquisiti dalla macchina quando essa è in buone condizioni (calcolando  $\boldsymbol{\mu}$  e  $\Sigma$ ) con dati acquisiti dalla medesima macchina quando essa è in condizioni ignote (vettore  $\boldsymbol{x}$ ). Se la distanza calcolata supera le soglie impostate, allora è presente un'anomalia.

Come caratteristiche della distanza di Mahalanobis possiamo avere:

- È in grado di pesare le diverse componenti tenendo conto dei relativi spazi di variazione e della loro correlazione;
- È invariante rispetto alle trasformazioni lineari, per cui se si cambia scala o se si ruotano le componenti, la distanza rimane la stessa;
- È efficace solo quando la distribuzione dei dati è gaussiana.

## 2.7 Analisi su Grafici dei Segnali

È possibile rielaborare il segnale in diversi modi, per poi graficarlo, mettendo in evidenza alcune sue caratteristiche o alcune sue componenti; in questo modo è possibile distinguere i contributi dei singoli elementi della macchina e analizzarli separatamente.

### 2.7.1 Forma d'Onda

È la tecnica più semplice di analisi, in cui si osserva una porzione del segnale temporale per individuare la presenza di modulazioni di ampiezza -quando la frequenza della modulante non è troppo elevata-, utile ad esempio per i difetti negli ingranaggi, come spiegato nel capitolo 2.5, o transitori, utile ad esempio per i difetti nei cuscinetti, in cui ogni transitorio corrisponde al passaggio di un elemento rotolante sul difetto.

In Figura 2.9 sono rappresentati qualitativamente dei segnali con transitori, derivanti dalla presenza di un difetto su un cuscinetto sull'anello esterno (2.9a), sull'anello interno (2.9b) e sugli elementi rotolanti (2.9c). BPFO, BPFI, BSF e FTF sono le frequenze caratteristiche delle componenti del cuscinetto calcolabili con le formule (2.20), (2.21), (2.22) e (2.23) e  $f_r$  è la frequenza di rotazione dell'albero.

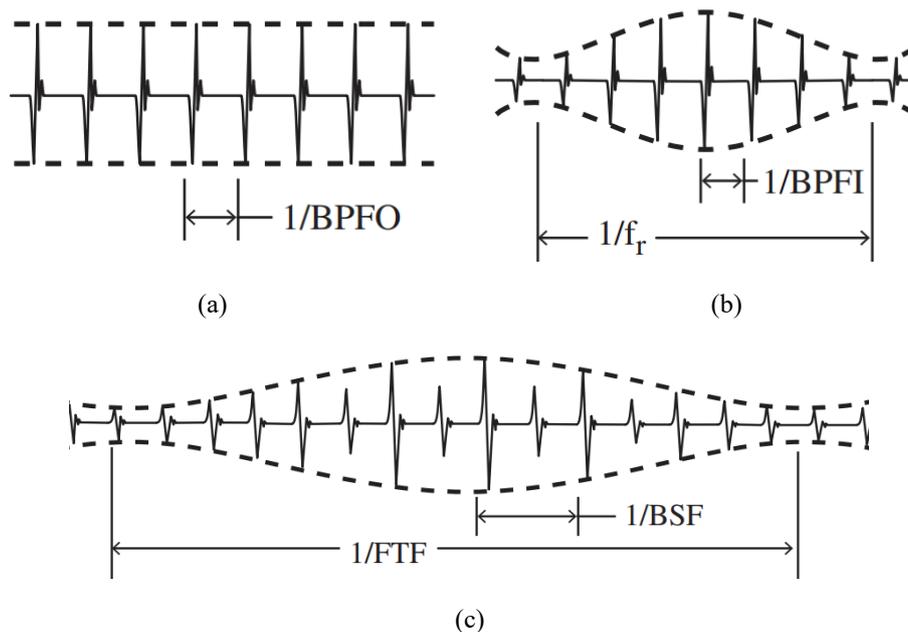


Figura 2.9: Segnali grezzi derivanti da difetti sull'anello interno (a), sull'anello esterno (b) e sugli elementi rotolanti (c) di un cuscinetto da [4].

### 2.7.2 Trasformata discreta di Fourier

La formulazione della trasformata di Fourier in tutte le sue forme è presentata nel capitolo 2.4. La versione che viene sicuramente utilizzata quando vengono analizzati i segnali è quella discreta, per il fatto che i segnali per poter essere elaborati devono essere discreti e di lunghezza finita. Dalla trasformata si possono avere lo spettro di ampiezza e lo spettro di fase, ma è il primo che fornisce le informazioni utili per lo studio della macchina; questo lo si è evidenziato anche nel capitolo 2.5,

quando, parlando delle varie frequenze caratteristiche delle componenti della macchina, si è fatto riferimento solo allo spettro in ampiezza.

La trasformata discreta, inoltre, può essere utilizzata sia su segnali di accelerazione, ma anche di velocità o di posizione. Il passaggio da una grandezza all'altra mantiene inalterati forma e periodo delle sinusoidi, ma porta a variazioni nell'ampiezza e nella fase. Integrazioni e derivazioni possono quindi essere fatte sia numericamente nel dominio del tempo, ma anche, con maggiore precisione e affidabilità, nel dominio della frequenza rispettivamente moltiplicando o dividendo punto per punto il segnale per la frequenza angolare  $\omega$  moltiplicata per  $j$ .

Considerando di moltiplicare o dividere per  $j\omega$ , si può quindi intuire come la derivazione porta a una accentuazione delle componenti a più alta frequenza con un aumento di fase di  $90^\circ$ , mentre l'integrazione porta a una accentuazione delle componenti a più bassa frequenza con una diminuzione di fase di  $90^\circ$ . Per questi motivi se si fanno misure a bassa frequenza (sotto 1 Hz) conviene rilevare gli spostamenti, mentre per misure ad alta frequenza (sopra i 100 Hz) conviene rilevare le accelerazioni. In figura 2.10 sono mostrate le frequenze che vengono evidenziate dalle varie grandezze misurate, considerando che la velocità tende a mostrare tutte le componenti allo stesso modo.

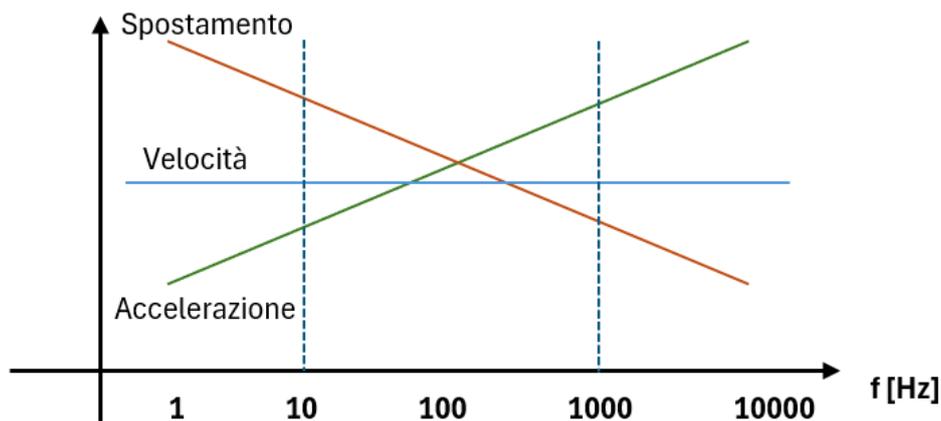


Figura 2.10: frequenze evidenziate da misure di spostamento, velocità e accelerazione.

Nell'utilizzare la trasformata di Fourier bisogna prestare attenzione a tre effetti indesiderati:

- Aliasing: si ha quando componenti in alta frequenza vengono rappresentate come se avessero una frequenza minore; avviene quando la frequenza di campionamento è minore di due volte la massima frequenza presente nel segnale misurato. Non è possibile eliminare l'aliasing una volta che lo si ha nel segnale, per cui bisogna scegliere correttamente la frequenza di campionamento e utilizzare filtri passa basso, antialiasing, per eliminare componenti alle frequenze più elevate, come i rumori, che potrebbero sporcare lo spettro in bassa frequenza;
- Leakage: non è possibile analizzare un segnale di lunghezza infinita, per cui lo si tronca moltiplicandolo per una finestra di lunghezza  $T$ ; del segnale così ottenuto si può quindi fare la trasformata, implicitamente considerando che tale segnale diventi periodico di periodo  $T$ . Per questo, se, a seguito della moltiplicazione per la finestra, il primo e l'ultimo valore sono diversi, si ha una discontinuità con la presenza di componenti armoniche indesiderate nello spettro. Il problema può essere ridotto utilizzando delle finestre che garantiscono la continuità, e che quindi garantiscano che il primo e l'ultimo valore del segnale finestrato siano uguali.

- Quando viene fatta la trasformata discreta, è improbabile che nello spettro venga rappresentata l'armonica con il valore di ampiezza più alto; si ha quindi una differenza tra il valore massimo vero e il valore massimo che viene effettivamente rappresentato nello spettro.

È possibile scegliere tra diverse finestre per acquisire un segnale; la più semplice è quella rettangolare, la quale ha valore unitario ovunque. È facile intuire quindi, che, se il segnale acquisito ha valori diversi agli estremi della finestra, si hanno sicuramente problemi di leakage.

In Figura 2.11 è rappresentato un esempio di acquisizione di un segnale con finestra rettangolare, in cui i valori agli estremi sono diversi, per cui nel segnale ricostruito c'è una discontinuità; l'acquisizione avviene correttamente solo nei casi in cui la finestra è della stessa lunghezza del periodo della sinusoide.

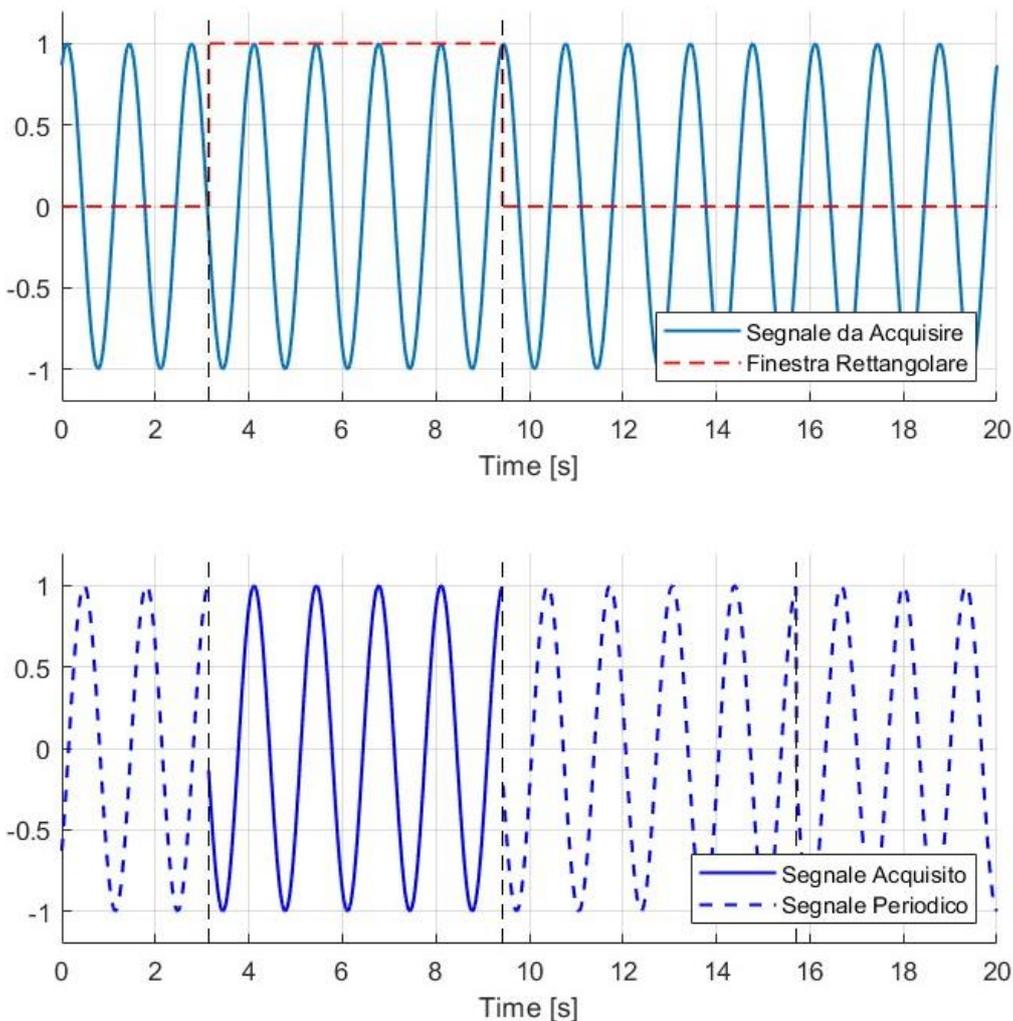


Figura 2.11: acquisizione di un segnale sinusoidale con finestra rettangolare.

Alcune delle possibili finestre alternative per ridurre il leakage possono ad esempio essere:

- La finestra di Hann, la cui formulazione è:

$$w[n] = \frac{1}{2} \left[ 1 - \cos \left( \frac{2\pi n}{N} \right) \right] = \sin^2 \left( \frac{\pi n}{N} \right) \quad (2.58)$$

- La finestra di Hamming, la cui formulazione è:

$$w[n] = 0.54 - 0.46\cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) \quad (2.59)$$

In cui  $N$  è la lunghezza della finestra in numero di campioni ed  $n$  è un numero intero compreso tra 0 e  $N-1$  compresi.

In figura 2.12 è rappresentata l'acquisizione dello stesso segnale della Figura 2.11, ma utilizzando la finestra di Hann; si nota come non si abbiano discontinuità nel segnale ricostruito, perché gli estremi della finestra vanno sempre a zero qualunque sia la porzione di segnale acquisito.

Si nota anche che il segnale acquisito sia molto diverso dal segnale di partenza, per cui lo spettro della sinusoide campionata non è composto da una sola componente; il motivo è che moltiplicare due segnali tra loro nel dominio del tempo porta alla convoluzione dei loro spettri nel dominio della frequenza, con l'energia della singola componente spettrale che si distribuisce sulle frequenze vicine (da qui il termine leakage). Come risultato si ha quindi che, nonostante si sia eliminata la discontinuità nel segnale periodico, componenti di leakage rimangono, anche se ridotte.

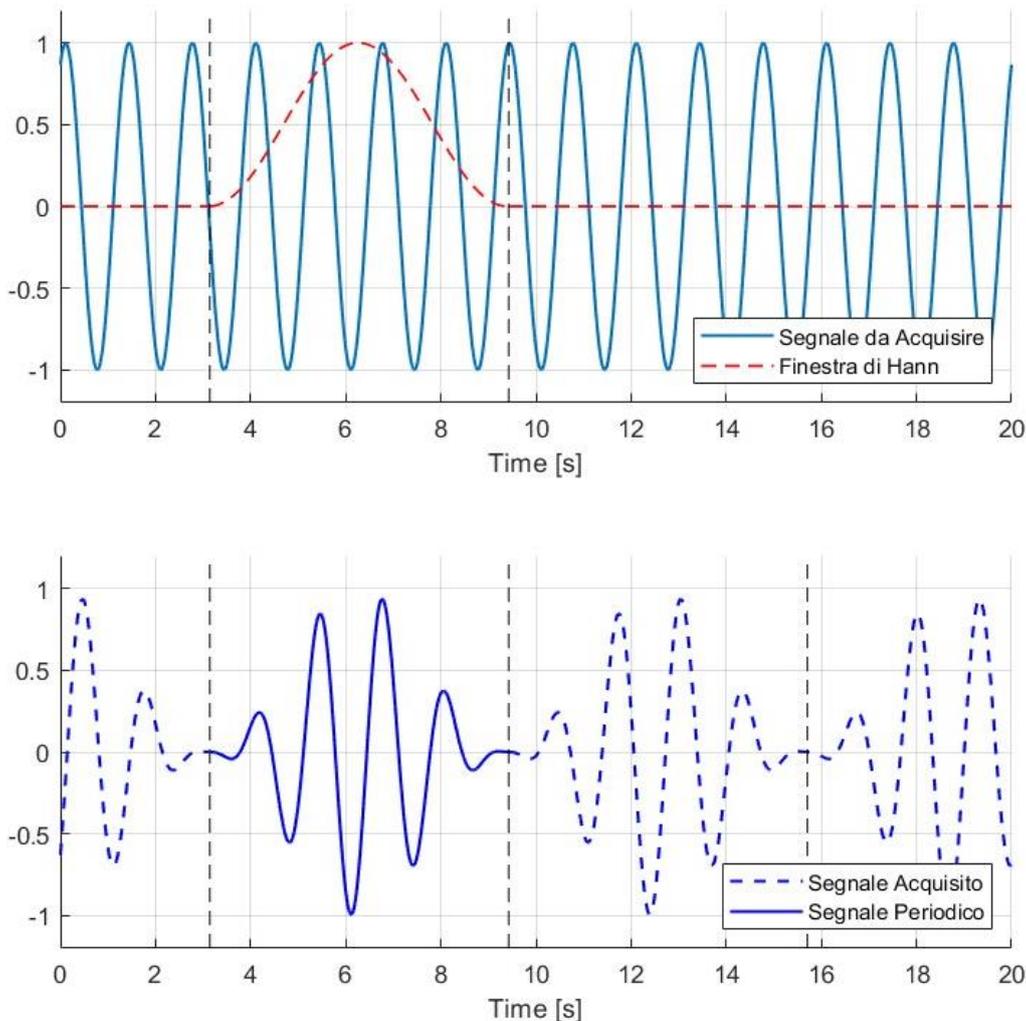


Figura 2.12: acquisizione di un segnale sinusoidale con finestra di Hann.

### 2.7.3 Curtosi Spettrale

La curtosi spettrale deriva dalla STFT (Short Time Fourier Transformation) e dà una misura dell'impulsività del segnale al variare della frequenza. La si può quindi utilizzare per capire quale banda di frequenze del segnale contiene la massima impulsività.

La STFT è una tecnica che consiste nell'applicare una funzione finestra al segnale e valutarne la trasformata di Fourier. La finestra viene fatta quindi traslare, ottenendo l'andamento dello spettro del segnale in funzione del tempo. La STFT può essere calcolata con l'equazione:

$$S(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)w(\tau - t)e^{-j2\pi f\tau}d\tau \quad (2.60)$$

In cui  $w(t)$  è la funzione della finestra che trasla lungo il segnale e  $\tau$  è la traslazione nel tempo. La risoluzione in frequenza della STFT varia con il reciproco della lunghezza della finestra, per cui non conviene utilizzare finestre troppo piccole. In figura 2.13 è rappresentato un esempio di STFT applicata a un segnale (calcolata con la funzione stft di Matlab), in cui si ha l'andamento dello spettro in funzione del tempo in un grafico tridimensionale.

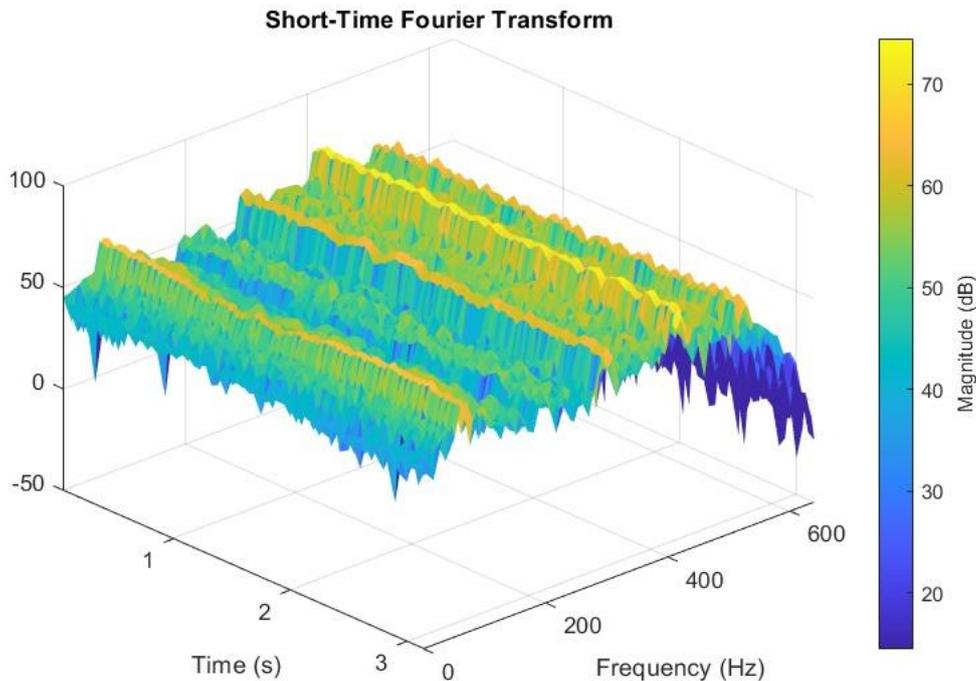


Figure 2.13: utilizzo della STFT per studiare l'andamento dello spettro nel tempo.

Dalla STFT, è poi possibile calcolare la curtosi spettrale prendendo la quarta potenza di  $S(t, f)$  per ogni  $t$  e facendone la media e normalizzandola con il quadrato del valore quadratico medio:

$$K(f) = \frac{\langle |S(t, f)|^4 \rangle_t}{\langle |S(t, f)|^2 \rangle_t^2} - 2 \quad (2.61)$$

Si è sottratto il valore di 2 per traslare il risultato a zero per un segnale Gaussiano;  $\langle \cdot \rangle_t$  è l'operatore della media temporale. In Figura 2.14 è rappresentato l'andamento della curtosi spettrale al variare della frequenza, partendo dalla STFT rappresentata in Figura 2.13.

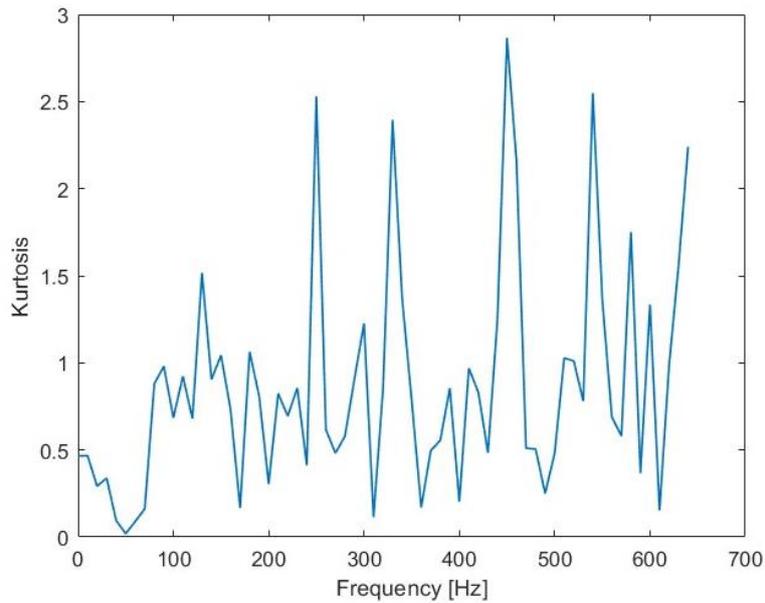


Figura 2.14: andamento della curtosi spettrale al variare della frequenza

La curtosi spettrale viene calcolata in tutto lo spettro, con valori molto alti alle frequenze dei difetti che generano segnali impulsivi e valori praticamente nulli altrove; può quindi essere utilizzata per avere un'indicazione di quale banda del segnale filtrare, per estrarre solo le componenti che hanno i massimi livelli di impulsività ed evidenziare i difetti.

In ogni caso, scegliere l'ottimale banda di passaggio per il filtro può non essere semplice, in quanto i risultati dipendono dalla combinazione di frequenza centrale e larghezza della banda. Per questo si può utilizzare il curtogramma, ovvero una rappresentazione che mostra la combinazione ottimale da utilizzare. Uno dei metodi per costruirlo può essere quello presentato da Antoni in [7]: consiste nel costruire un 'fast kurtogram', basato su una serie di filtri digitali con il range di frequenza che viene progressivamente diviso in più bande di larghezza  $1/2$ ,  $1/3$ ,  $1/4$ ,  $1/6$ ,  $1/8$ ,  $1/12$  ecc. della banda complessiva. Le risultanti combinazioni di frequenza centrale e larghezza della banda sono rappresentate in Figura 2.15.

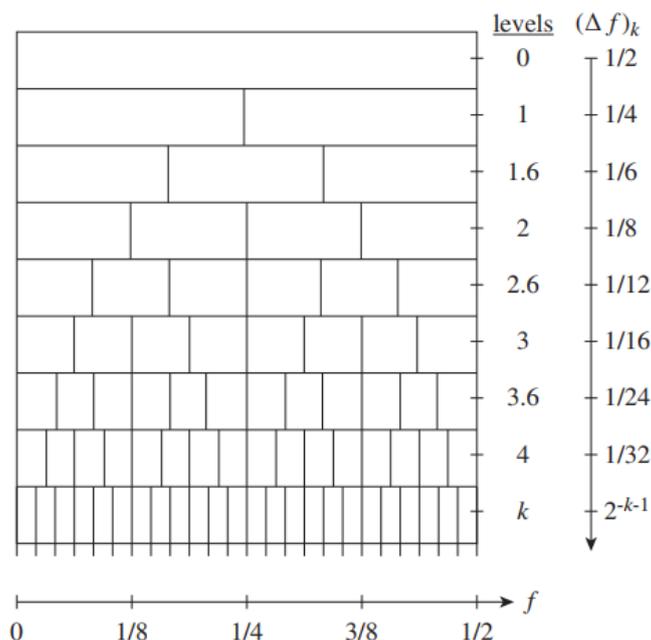


Figura 2.15: Combinazioni di frequenza centrale e larghezza di banda in un curtogramma da [7].

In ogni suddivisione viene calcolata la curtosi del segnale filtrando tutte le componenti che non fanno parte dell'intervallo scelto; La banda ottimale da scegliere per le analisi sarà quindi quella che ha il valore più alto di curtosi.

## 2.7.4 Trasformata di Hilbert e Demodulazione

Nel capitolo 2.4 si è descritto come un segnale modulato in ampiezza sia costituito da una frequenza portante e una frequenza modulante. Può essere utile per l'individuazione dei difetti (soprattutto per i difetti nei cuscinetti) demodulare il segnale, ovvero eliminare la componente in alta frequenza (la portante), per evidenziare nel segnale solo la modulante.

In pratica, la demodulazione consiste nel traslare la frequenza della portante con le sue bande laterali a zero e il passaggio può essere fatto applicando la trasformata di Fourier all'involuppo del segnale. L'involuppo può essere calcolato raddrizzando il segnale (elevandolo al quadrato) e utilizzando un filtro passa basso sul segnale raddrizzato, oppure usando la trasformata di Hilbert.

La trasformata di Hilbert di un segnale temporale  $x(t)$  è definita dall'espressione:

$$\tilde{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (2.62)$$

Se si definisce il segnale analitico come:

$$x_a(t) = x(t) + j\tilde{x}(t) \quad (2.63)$$

Si può calcolare l'involuppo come il modulo del segnale analitico:

$$env[x(t)] = |x(t) + j\tilde{x}(t)| = \sqrt{x^2(t) + \tilde{x}^2(t)} \quad (2.64)$$

Facendo quindi la trasformata dell'involuppo, nello spettro rimane l'ampiezza della portante a frequenza nulla e l'ampiezza della modulante alla frequenza della modulante. Possiamo vedere questo considerando un segnale con portante a 50 Hz e modulante a 5 Hz, rappresentato in Figura 2.16.

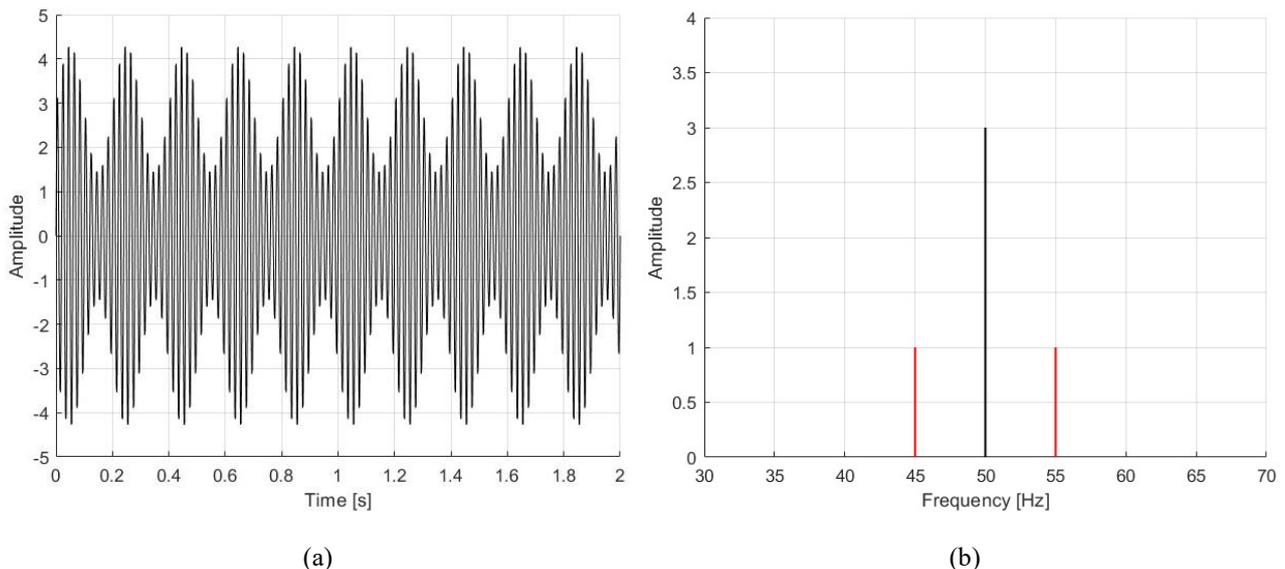


Figura 2.16: Segnale modulato in ampiezza (a) con spettro (b).

L'involuppo del segnale diventa quindi una sinusoida con frequenza quella della modulante e con valore medio uguale all'ampiezza della portante (Figura 2.17).

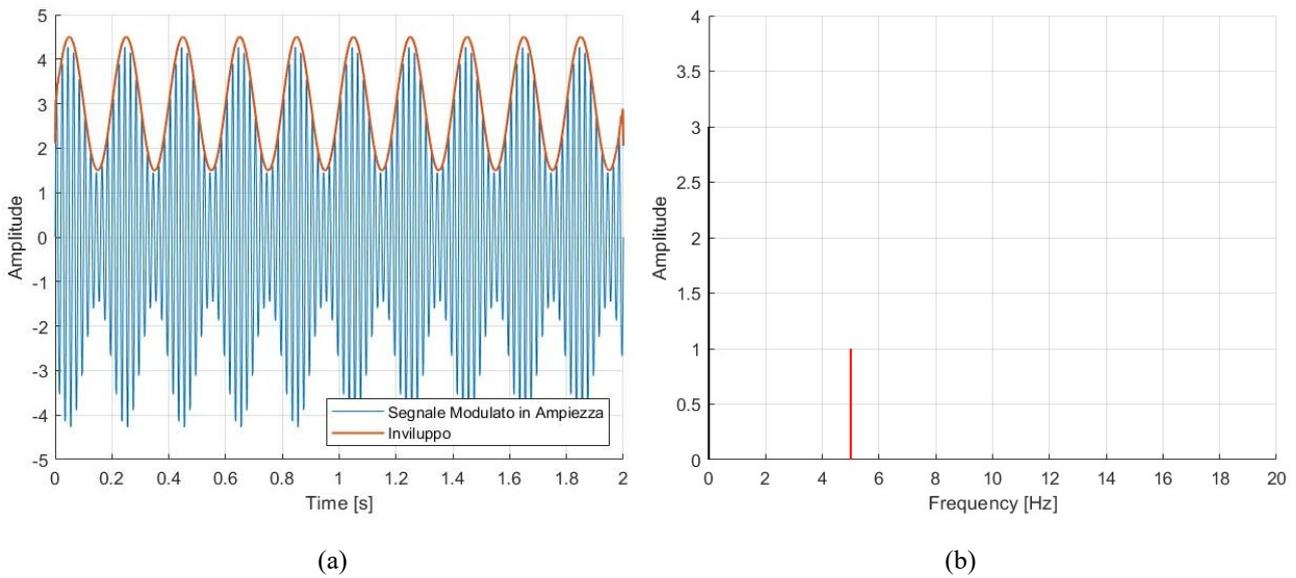


Figura 2.17: Involuppo del segnale (a) e spettro dell'involuppo (b).

Nell'esempio viene utilizzato l'involuppo su tutto il segnale per demodularlo, dal momento che sono presenti solo una portante e una modulante. Nella realtà, un segnale può essere composto da molte componenti e serve demodularlo in una banda specifica per evidenziare i difetti -se presenti- della macchina. La demodulazione viene fatta sempre allo stesso modo, traslando a zero la portante e la modulante ma il procedimento prevede più passaggi (schematizzati in Figura 2.18):

- Si fa la trasformata di Fourier del segnale temporale;
- Si sceglie la banda da demodulare, ovvero la banda in cui è presente la portante e la modulante che si vuole evidenziare;
- Si fa l'antitrasformata di Fourier della banda scelta;
- Si raddrizza il segnale temporale così ottenuto, facendone l'involuppo;
- Si fa la trasformata di Fourier e si ottiene lo spettro con la frequenza della modulante in evidenza.

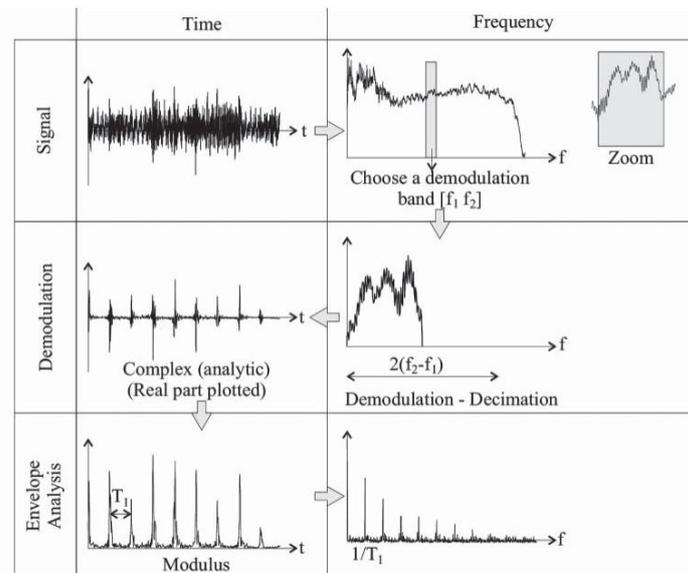


Figura 2.18: Procedimento per l'analisi con l'involuppo usando il metodo con la trasformata di Hilbert [8].

Per poter applicare questa tecnica bisogna determinare la migliore banda da utilizzare per la demodulazione; un modo per sceglierla può essere utilizzando il curtogramma.

### 2.7.5 Cepstrum

Il cepstrum può essere espresso in diversi modi; un primo modo può essere il cepstrum di potenza, definito come la trasformata inversa di Fourier del logaritmo naturale dello spettro di potenza.

Lo spettro di potenza per un segnale con potenza finita può essere trovato elevando al quadrato lo spettro di ampiezza, se quest'ultimo è discreto. Se lo spettro è continuo, elevando al quadrato si ottiene invece la densità spettrale di potenza (PSD). Se quindi un segnale ha unità di misura  $U$ , la potenza ha unità di misura  $U^2$  e la PSD ha unità di misura  $U^2/\text{Hz}$ .

In formule il cepstrum di potenza diventa quindi:

$$C_p(\tau) = \mathfrak{F}^{-1}\{\ln[F_{xx}(f)]\} \quad (2.65)$$

In cui  $F_{xx}(f)$  è lo spettro di potenza e  $\mathfrak{F}^{-1}$  è la trasformata inversa di Fourier.

Si può quindi avere il cepstrum complesso, definito come la trasformata inversa di Fourier del logaritmo complesso dello spettro complesso:

$$C(\tau) = \mathfrak{F}^{-1}\{\ln[X(f)]\} \quad (2.66)$$

In cui:

$$X(f) = \mathfrak{F}[x(t)] = A(f)e^{j\phi(f)} \quad (2.67)$$

Per cui:

$$\ln[X(f)] = \ln(A(f)) + j\phi(f) \quad (2.68)$$

Originariamente il cepstrum complesso è stato utilizzato per rilevare l'eco nei segnali, ma successivamente ha trovato applicazione nella diagnostica, soprattutto per analizzare segnali contenenti famiglie di armoniche e bande laterali (con spaziatura uniforme), in cui è l'intera famiglia a caratterizzare un possibile difetto, piuttosto che la singola componente in frequenza.

Dal cepstrum complesso si può ottenere il cepstrum reale, eliminando la fase:

$$C_r(\tau) = \mathfrak{F}^{-1}\ln[A(f)] \quad (2.69)$$

L'ultimo tipo di cepstrum è quello differenziale, definito come la trasformata inversa della derivata del logaritmo dello spettro.

Osservando tutte le definizioni, il cepstrum può essere visto come lo spettro dello spettro; basandosi su questo si è quindi coniato il termine, invertendo la prima sillaba di 'spectrum'. In modi simili sono quindi definiti quefrequency da frequency, rahmonic da harmonic ecc.

## 2.7.6 Order Tracking

Nell'analisi delle vibrazioni di macchine rotanti, spesso si preferisce, nel dominio della frequenza, avere l'asse delle ascisse basato sulle armoniche, o ordini, della velocità di rotazione dell'albero. Per farlo è necessario sincronizzare i campionamenti con quest'ultima, utilizzando un tacometro o un encoder, che danno rispettivamente un impulso o diversi impulsi ad ogni rotazione. Il risultato è che, se si campiona un segnale costante in ampiezza, sincronizzato con la rotazione dell'albero (con velocità variabile), a intervalli di tempo costanti si ottiene una dispersione nello spettro in un range corrispondente alla variazione di velocità, mentre se si campiona lo stesso segnale un numero fisso di volte per rotazione, il risultato risulta indistinguibile da una sinusoide, con lo spettro che è composto solo da una linea.

L'order tracking può quindi essere utilizzato per eliminare oscillazioni nelle componenti discrete in frequenza dovute a fluttuazioni nella velocità o per osservare la variazione delle varie armoniche per valori di velocità più alti, quando ad esempio si passa per frequenze di risonanza.

Trova applicazione anche per ottimizzare la media sincrona: è una tecnica utilizzata per separare segnali periodici dal rumore di fondo o da altre componenti che non sono perfettamente periodiche. È molto utilizzata per estrarre segnali vibratorii da determinati ingranaggi, isolandoli dai segnali derivanti, ad esempio, da altri ingranaggi o cuscinetti. In pratica, viene eseguita facendo la media tra una serie di segmenti di segnale di uguale periodo T:

$$y_a(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y(t + nT) \quad (2.70)$$

Il periodo T può essere scelto come un multiplo del periodo di rotazione di un ingranaggio, in modo che i segnali generati da altri ingranaggi siano sfasati nei vari segmenti; facendo così la media, si evidenziano solo le componenti desiderate. Per quanto riguarda le componenti di segnale che non sono perfettamente periodiche, come ad esempio quelle generate dai cuscinetti o derivanti dal rumore, vengono sempre ridotte di molto non potendo essere perfettamente in fase nei vari segmenti. Per questi motivi conviene applicare l'order tracking prima di eseguire la media sincrona, dal momento che campionando in modo sincrono con la rotazione dell'albero, si garantisce che il segnale generato dall'ingranaggio che si vuole evidenziare, sia sempre perfettamente in fase nei vari segmenti.

Si può quindi intuire come, con l'order tracking, i campionamenti vengano fatti fondamentalmente a intervalli di rotazione regolari; si può dunque parlare di dominio angolo, in cui i valori letti sono funzione della posizione angolare dell'albero.

Da questo deriva la possibilità di utilizzare l'order tracking per confrontare segnali diversi, ottenuti dalla stessa macchina, ma quando essa funziona con velocità differenti, perché, nel dominio angolo la dipendenza dalla velocità viene eliminata. Un possibile procedimento per utilizzare l'order tracking per confrontare segnali è descritto più approfonditamente nel capitolo 3.3.

## 3 Monitoraggio di un Mulino Tamburlano

Per scegliere le tecniche da utilizzare per analizzare i segnali per la diagnostica e in che modo implementarle, bisogna prendere in considerazione diversi fattori, come la geometria della macchina, le velocità di rotazione, se esse sono costanti o variabili, se si hanno dati ottenuti con misure passate, se si conoscono in dettaglio le condizioni della macchina ecc.

In questo capitolo si descrive quindi l'ambiente in cui si sono implementate le tecniche e in che modo esse sono state scelte.

### 3.1 Presentazione della Macchina

La macchina analizzata è un mulino a tamburo per la macinazione ad umido continua delle materie prime utilizzate per la produzione di piastrelle. La sua funzione è quella di ridurre le dimensioni del materiale, in modo da avere la granulometria delle particelle compresa in un range definito, per conferire le proprietà desiderate, quali ad esempio resistenza e assorbimento d'acqua, alla piastrella in fase di cottura.

In Figura 3.1 è rappresentato uno schema generale della macchina: essa, di fatto, è un cilindro rotante, di diametro interno di 3.5 metri, diviso in più camere, ricoperte internamente con un rivestimento in gomma antiusura, con rilievi progettati per massimizzare l'efficienza di macinazione.

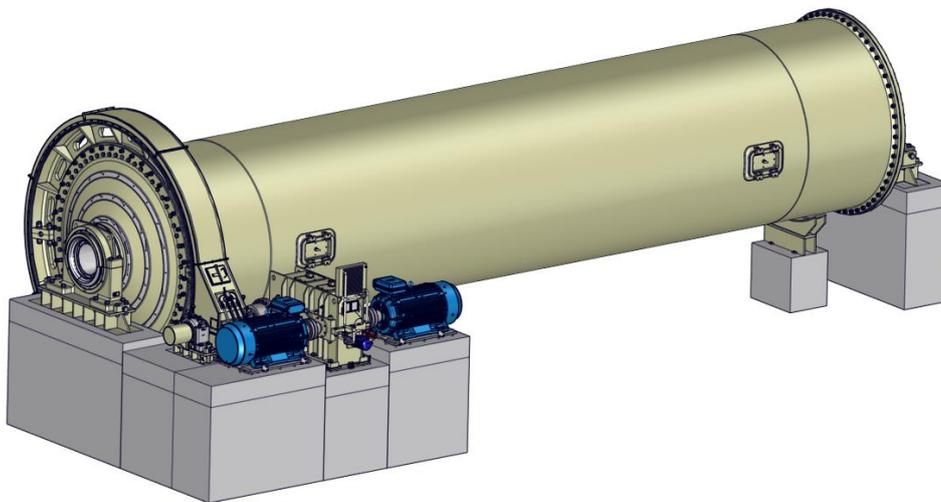


Figura 3.1: Schema mulino.

Il materiale che viene lavorato dal mulino è chiamato barbotina: comprende le materie prime da lavorare, l'acqua e additivi chimici deflocculanti; unito ai corpi macinanti, ovvero a dei ciottoli di silice o sfere in allumina sinterizzata ad alta densità, di dimensione molto superiore a quella delle particelle da macinare, costituisce la carica del mulino.

Quando il cilindro viene messo in rotazione, tutta la carica viene messa in movimento in una tipica configurazione a cascata: i corpi macinanti e il materiale vengono continuamente sollevati e fatti urtare l'uno contro l'altro, provocando la rottura delle particelle più fini e la conseguente riduzione granulometrica dell'impasto ceramico. In Figura 3.2 è rappresentata un'immagine di una simulazione DEM del movimento del materiale all'interno del mulino, presa da [9], in cui si nota

come le particelle che si trovano più in basso tendono a spostarsi verso l'alto, finché, raggiunta una certa altezza, non cadono a cascata verso l'interno.

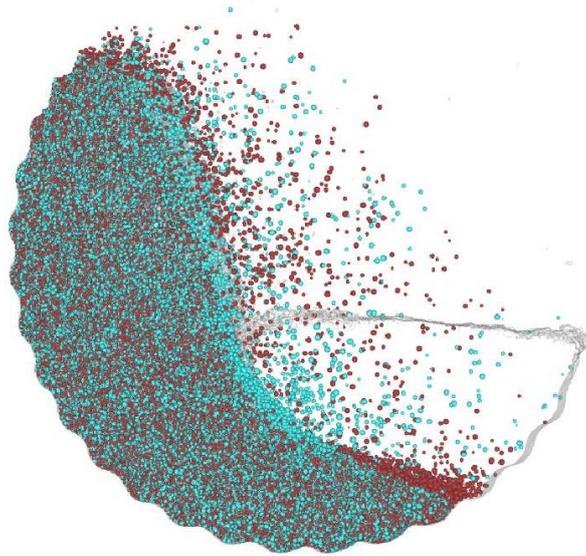


Figura 3.2: simulazione DEM del comportamento del materiale all'interno del mulino da [9].

Sulla macchina, le analisi si sono concentrate sul gruppo motorizzazione, rappresentato in Figura 3.3 e costituito da:

- Due motori a corrente alternata asincroni (1) di potenza massima 515 kW l'uno, collegati all'albero veloce del riduttore (3) con due giunti elastici multi-cross (2);
- Un pignone (5), collegato all'albero lento del riduttore con un giunto a denti (4);
- Una corona (6), solidale con il cilindro e accoppiata con il pignone; pignone e corona ruotano dentro un carter e sono lubrificati a grasso.

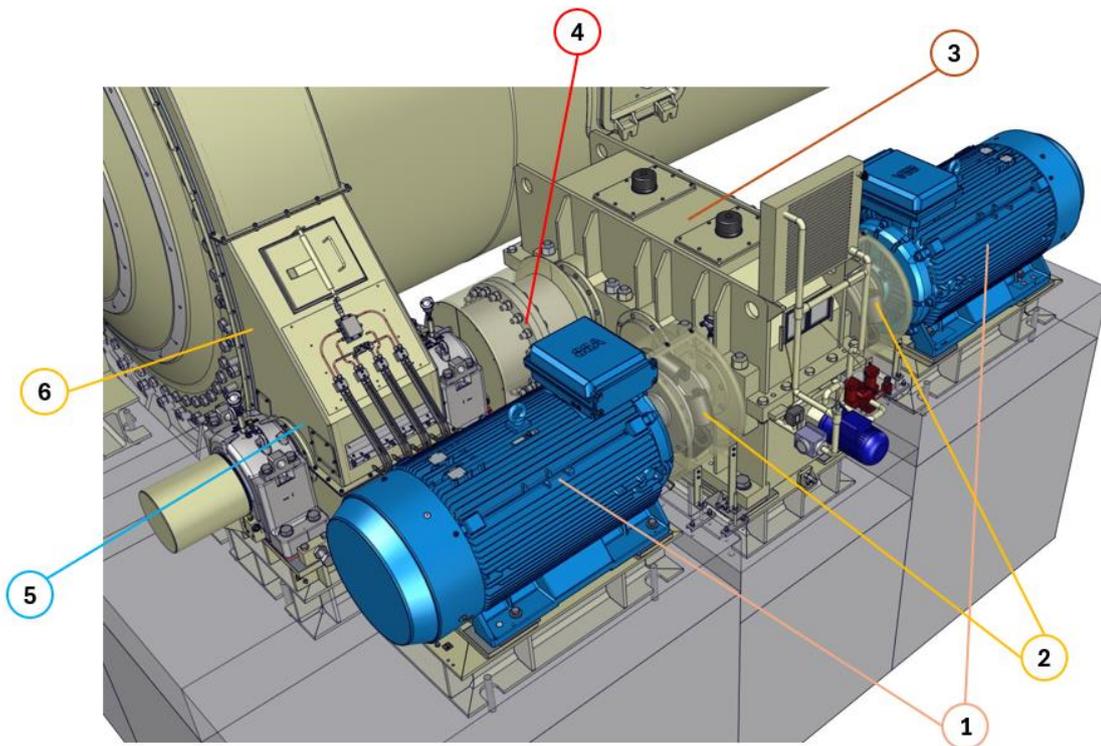


Figura 3.3: Gruppo motorizzazione del mulino, con motori (1), giunti elastici (2), riduttore (3), giunto a denti (4), pignone (5) e corona (6).

L'acquisizione dei dati è stata fatta con sei accelerometri; ognuno ha un suo codice:

- BV1: trasduttore montato sul motore di destra, in corrispondenza del cuscinetto DE (Drive End);
- BV1B: trasduttore montato sul motore di sinistra, in corrispondenza del cuscinetto DE;
- BV176A: trasduttore montato sulla flangia dell'albero veloce;
- BV176B: trasduttore montato sulla flangia dell'albero lento;
- BV179A: trasduttore montato sul cuscinetto di sinistra, del pignone;
- BV179B: trasduttore montato sul cuscinetto di destra, del pignone.

A disposizione si hanno altre misure, come quelle di temperatura sui cuscinetti, ma in questo studio non sono state utilizzate.

Il riduttore ha due stadi di riduzione, con un rapporto di riduzione totale di 1/13.9; aggiungendo l'accoppiamento pignone corona, il rapporto di riduzione totale di tutta la catena è di 1/103.9.

Con un rapporto di riduzione così alto, si ha che il cilindro ruota molto lentamente, con frequenze caratteristiche dei cuscinetti principali del mulino molto basse (dell'ordine di qualche Hz); per questo motivo, su tali cuscinetti, si è deciso di mantenere un modello di manutenzione preventiva affiancata a controlli periodici eseguiti da tecnici specializzati.

I cuscinetti in tutta la trasmissione in generale sono tutti a doppia corona di rulli a botte, anche se di diverse tipologie.

Come descritto nel capitolo 2.5, ogni componente della macchina ha una propria frequenza caratteristica; possiamo quindi riassumerle in Tabella 3.1, considerando la velocità tipica dei motori e utilizzando le formule del capitolo 2.5 (le frequenze dei giunti sono calcolate come velocità dell'albero per il numero di elementi caratteristici del giunto stesso).

<b>Frequenze Ingranaggi</b>	
Coppia Veloce	<b>420.00 Hz</b>
Coppia Intermedia	<b>96.55 Hz</b>
Coppia Lenta	<b>33.14 Hz</b>
<b>Frequenze Giunti</b>	
Giunto Elastico	<b>200.00 Hz</b>
Giunto a Denti	<b>125.37 Hz</b>
<b>Frequenza Difetto nel Rotore del Motore</b>	<b>120.00 Hz</b>

(a)

<b>Frequenze Cuscinetti Motore</b>	<b>Motore 2019</b>		<b>Motore 2024</b>	
	<b>DE</b>	<b>NDE</b>	<b>DE</b>	<b>NDE</b>
BPFI	<b>97.38 Hz</b>	<b>167.16 Hz</b>	<b>97.38 Hz</b>	<b>98.08 Hz</b>
BPFO	<b>62.62 Hz</b>	<b>112.84 Hz</b>	<b>62.62 Hz</b>	<b>61.92 Hz</b>
BSF	<b>87.72 Hz</b>	<b>99.24 Hz</b>	<b>87.72 Hz</b>	<b>83.97 Hz</b>
FTF	<b>7.83 Hz</b>	<b>8.06 Hz</b>	<b>7.83 Hz</b>	<b>7.74 Hz</b>

(b)

<b>Frequenze Cuscinetti Riduttore</b>			
Albero	<b>Veloce</b>	<b>Intermedio</b>	<b>Lento</b>
BPFI	<b>176.47 Hz</b>	<b>52.03 Hz</b>	<b>22.16 Hz</b>
BPFO	<b>123.53 Hz</b>	<b>39.69 Hz</b>	<b>18.19 Hz</b>
BSF	<b>107.062 Hz</b>	<b>34.32 Hz</b>	<b>14.28 Hz</b>
FTF	<b>8.236 Hz</b>	<b>2.09 Hz</b>	<b>0.65 Hz</b>

(c)

<b>Frequenze Cuscinetti Pignone Mulino</b>		
Posizione	<b>Pignone</b>	<b>Mulino</b>
BPFI	<b>20.65 Hz</b>	<b>4.10 Hz</b>
BPFO	<b>16.81 Hz</b>	<b>3.61 Hz</b>
BSF	<b>13.74 Hz</b>	<b>3.03 Hz</b>
FTF	<b>0.65 Hz</b>	<b>0.090 Hz</b>

(d)

Tabella 3.1: Frequenze caratteristiche di motori, ingranaggi e giunti (a), cuscinetti di motore (b), riduttore (c), pignone e mulino (d).

## 3.2 Dati Acquisiti

La macchina analizzata è stata prodotta dall'azienda SACMI nel 1998; su di essa è presente un quadro per l'analisi delle vibrazioni, sviluppato da SACMI con a bordo automazione B&R, che permette di:

- Conoscere la potenza assorbita dai motori, la loro velocità di rotazione e la loro coppia;
- Calcolare, partendo dai dati acquisiti dagli accelerometri, in tempo reale diversi indicatori, come RMS, fattore di cresta, skewness, curtosi ecc. e fornire segnalazioni se i valori calcolati superano le soglie impostate;
- Mostrare su grafici i dati acquisiti dagli accelerometri, sotto forma di segnale grezzo, spettro in accelerazione o velocità ecc.

La macchina è controllata in velocità, per cui, a regime, i dati che si ottengono possono considerarsi a velocità costante; coppia e potenza sono invece variabili. Grazie però al quadro con inverter, di cui è dotata la macchina, è possibile anche controllare il processo in potenza: questo permette di mantenere costante l'assorbimento dei motori, variando la loro velocità in base alle condizioni di lavoro.

Tutti i dati che vengono acquisiti e mostrati sul quadro della macchina possono essere esportati su un foglio di calcolo, per poter essere ulteriormente elaborati; in generale, vengono salvati come:

RAW\_BV1\_2019-07-01-08\_25\_38.csv

In cui la prima parola indica il tipo di segnale acquisito (in questo caso RAW indica il segnale grezzo), seguita dal codice del sensore (in questo caso l'accelerometro con sigla BV1), dalla data (in questo caso 1° luglio 2019) e dall'ora (in questo caso le 8 e 25 e 38 secondi).

Per l'acquisizione dei segnali ci sono alcuni parametri che si possono impostare, come la frequenza minima e la frequenza massima entro cui campionare, la sensibilità dello strumento e altro. Il

sistema di acquisizione, in automatico, determina la frequenza di campionamento moltiplicando la frequenza massima scelta per 2.56. I dati a disposizione per l'analisi sono quindi quelli derivanti dal quadro della macchina e lo storico delle manutenzioni; in particolare si hanno misure:

- Nel 2019, da luglio a dicembre, comprendenti segnali grezzi, spettri di ampiezza in velocità e spettri di inviluppo in velocità;
- Da ottobre 2024 a febbraio 2025, comprendenti solo segnali grezzi.

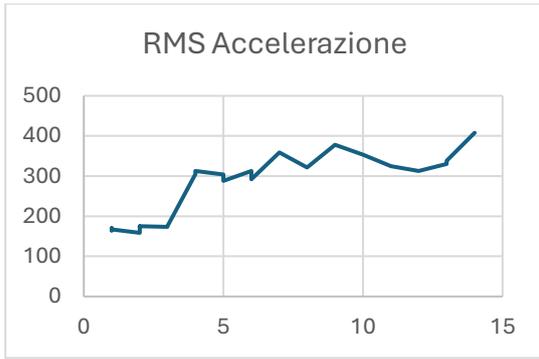
Tra i due periodi i motori sono stati cambiati (da qui la differenza nelle frequenze mostrata nella tabella 3.1b) e il riduttore è stato sostituito, revisionato, a settembre 2024; oltre a questo, non si ha nessuna informazione circa le effettive condizioni della macchina.

### 3.3 Tecniche di Analisi dei Dati

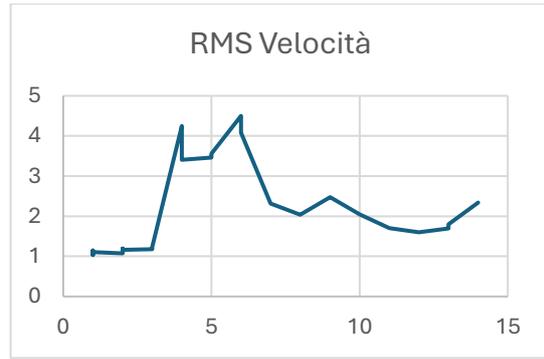
Nei capitoli precedenti si sono descritte diverse tecniche di analisi, ma la loro implementazione e utilizzo varia da applicazione ad applicazione; partendo quindi dagli indicatori, in un'applicazione di questo tipo, essi possono essere utilizzati solo per determinare se è presente un difetto o meno. Il motivo è che per poter fare analisi più approfondite, come determinare quale sia e dove si trovi il difetto, oppure stimare quanto tempo rimane prima di un guasto, servono molti più dati che descrivano la macchina, quando essa è in funzione in condizioni difettose; i dati devono essere ottenuti coprendo tutte le possibili condizioni di guasto, possibilmente combinando anche i guasti tra loro. Per questo studio, dati così completi non è possibile ottenerli, dal momento che, data l'importanza della macchina nell'impianto di produzione, si è sempre cercato di anticipare le possibili cause di guasto e intervenire tempestivamente con manutenzioni programmate.

Gli indicatori in questo studio sono quindi calcolati partendo dal segnale grezzo e controllati con delle soglie: se i valori rientrano nei limiti imposti, la macchina si considera in buone condizioni, mentre se i valori escono dalle soglie si considera la macchina in condizioni difettose. Le soglie sono determinate partendo calcolando gli indicatori in una ventina di segnali grezzi, acquisiti quando la macchina è considerata in buone condizioni (si è ipotizzato di avere tali condizioni nei primi tre giorni di luglio del 2019, come verrà descritto in modo più approfondito anche nel Capitolo 7); per ogni indicatore viene poi calcolato il valore medio e la deviazione standard delle venti misure, definendo i valori di soglia, inferiore e superiore, come il valore medio  $\pm$  tre volte la deviazione standard. Il motivo è che, considerando i dati con una distribuzione gaussiana, si ha il 99.73% di probabilità che il valore di un indicatore calcolato con la macchina in buone condizioni, si trovi all'interno dell'intervallo scelto. La larghezza dell'intervallo è arbitraria, nel senso che, se si scegliesse come intervallo il valore medio  $\pm$  due volte la deviazione standard la percentuale scenderebbe al 95%, o se si scegliesse come intervallo il valore medio  $\pm$  la deviazione standard, la percentuale scenderebbe al 67%.

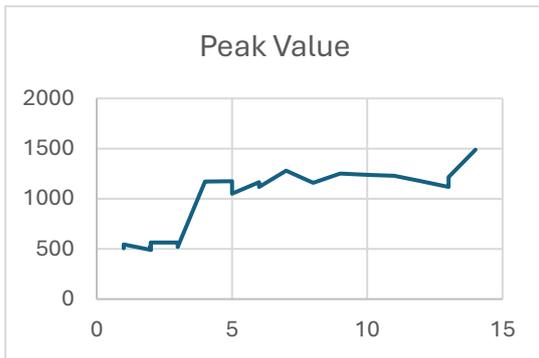
Considerazioni vanno fatte anche su quanti e quali indicatori utilizzare; infatti, nei capitoli precedenti se ne sono descritti venti, ma molti hanno le stesse variazioni nel tempo o non sono molto efficaci per distinguere le condizioni buone da quelle difettose. In figura 3.4 sono quindi rappresentati gli andamenti dei venti indicatori analizzati, utilizzando i dati acquisiti nel 2019; sull'asse orizzontale si ha il giorno analizzato, in cui potranno esserci anche più misure, con i primi tre giorni con la macchina in buone condizioni, e con i restanti con la macchina in condizioni difettose.



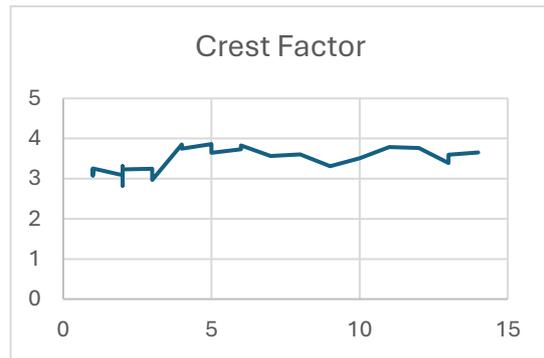
(a)



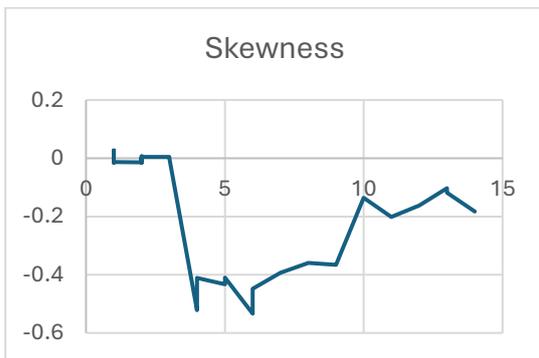
(b)



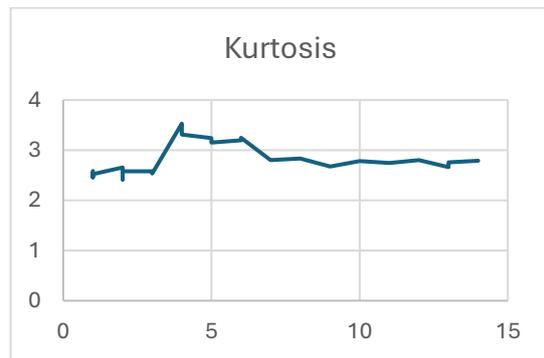
(c)



(d)



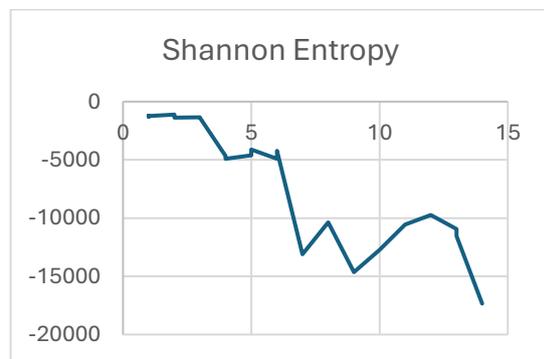
(e)



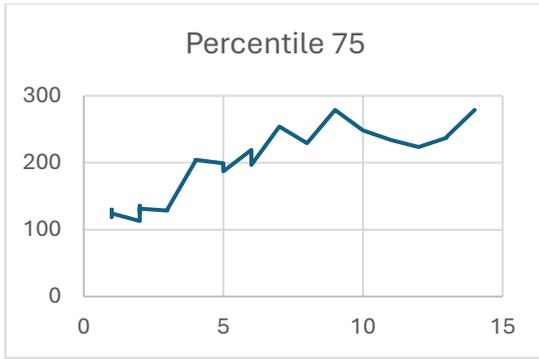
(f)



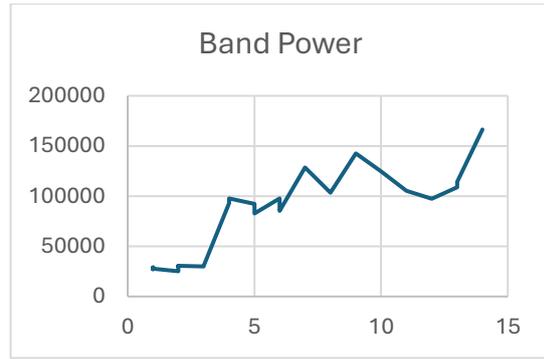
(g)



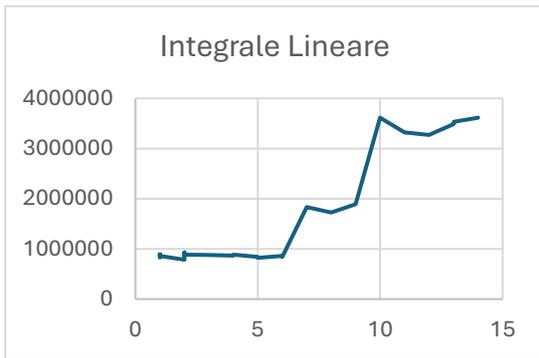
(h)



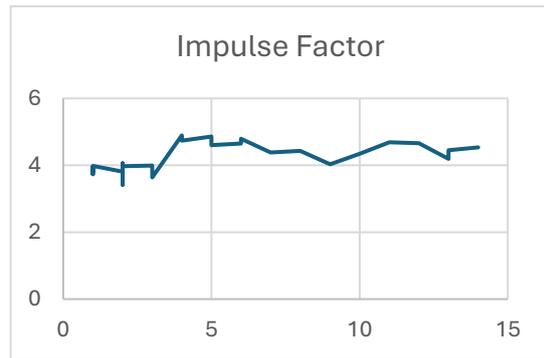
(i)



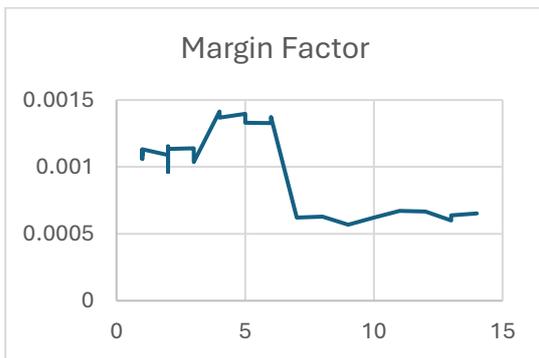
(j)



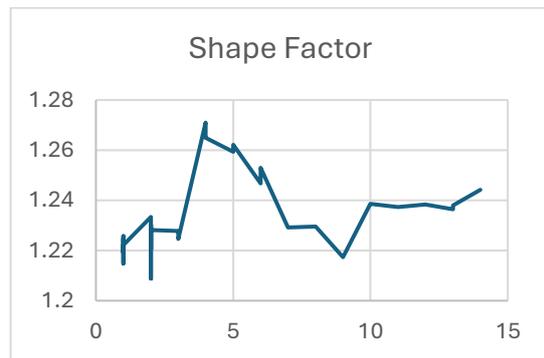
(k)



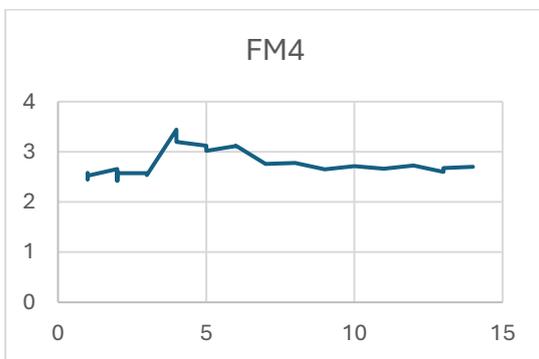
(l)



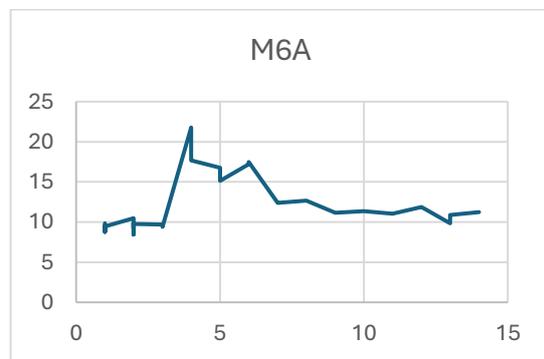
(m)



(n)



(o)



(p)

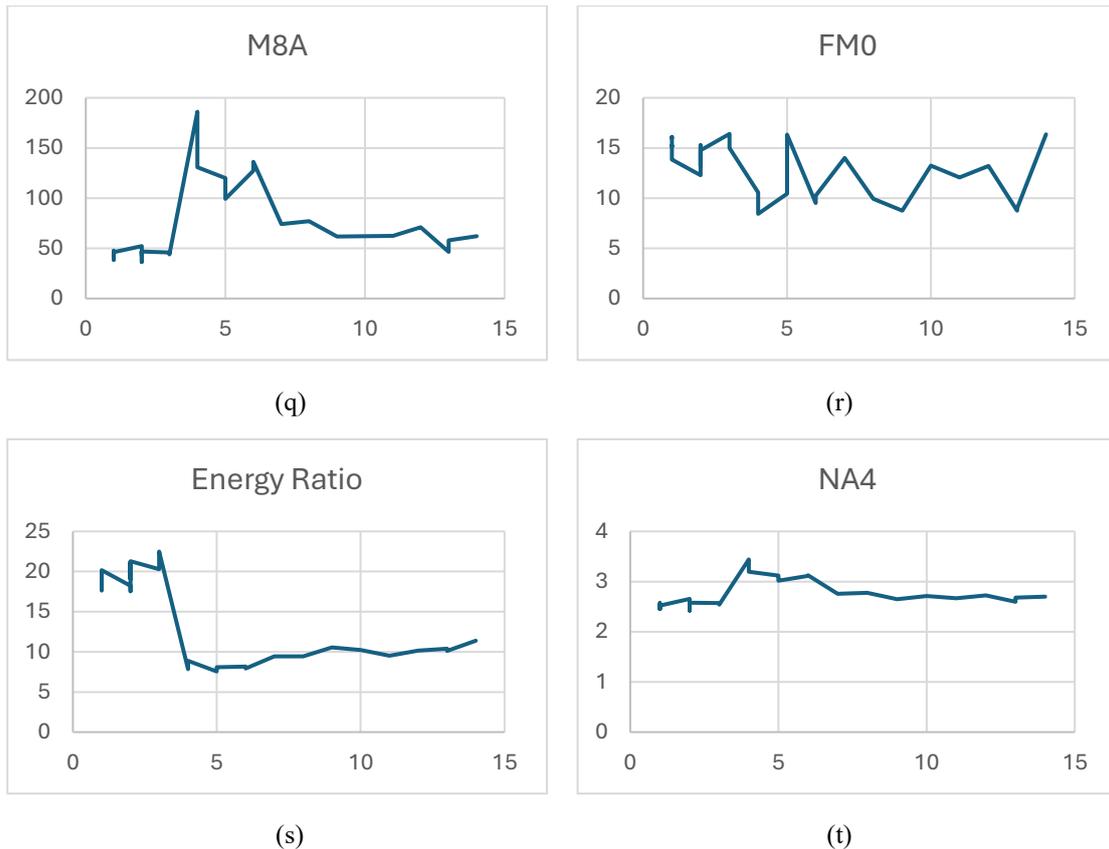


Figura 3.4: andamenti nel tempo di RMS in accelerazione (a), RMS in velocità (b), valore di picco (c), fattore di cresta (d), skewness (e), curtosi (f), varianza (g), entropia di Shannon (h), percentile 75 (i), potenza media (j), integrale lineare (k), fattore di impulso (l), fattore di margine (m), fattore di forma (n), FM4 (o), M6A (p), M8A (q), FM0 (r), energy ratio (s) e NA4 (t).

Si può quindi notare come RMS in accelerazione, valore di picco, varianza, percentile 75 e band power abbiano lo stesso andamento, per cui tra questi si può scegliere ad esempio l'RMS in accelerazione, essendo il più semplice da calcolare. Gli indicatori degli ingranaggi sono complicati da calcolare, per cui si è scelto di prendere solo l'energy ratio, essendo il più efficace nel distinguere le condizioni difettose da quelle corrette. Integrale lineare e fattore di margine sembrano efficaci come indicatori, ma osservandone il comportamento in altri sensori non sembrano consistenti. Degli indicatori rimasti si è deciso di scegliere il fattore di cresta, la skewness e la curtosi per la semplicità di calcolo e l'entropia di Shannon essendo efficace nel distinguere le condizioni difettose. Gli altri indicatori rimasti sono quindi stati scartati.

Ai 6 indicatori scelti si è poi aggiunta la distanza di Mahalanobis, calcolata partendo da RMS, fattore di cresta, skewness, curtosi ed energy ratio; l'entropia di Shannon è stata esclusa dal calcolo per via della sua troppa sensibilità al difetto (in sensori lontani da dove è presente il difetto si hanno valori fuori dalle soglie, quando invece gli altri indicatori sono dentro ai limiti).

La prima parte di analisi consiste quindi di calcolare 6 indicatori con la relativa distanza di Mahalanobis e stimare la presenza o meno del difetto, controllando che i valori ottenuti rientrino nei limiti prestabiliti.

Il passo successivo è quello di riuscire a stimare il tipo di difetto e la posizione, ovvero farne la diagnosi. Come spiegato precedentemente, non è possibile farlo utilizzando gli indicatori, per cui si sono utilizzate analisi sui grafici, ottenute tutte partendo dal segnale grezzo:

- Spettro di ampiezza in accelerazione e velocità: forniscono fundamentalmente le stesse informazioni, anche se il primo evidenzia maggiormente le componenti in alta frequenza;
- Demodulazione: analisi per evidenziare eventuale modulazione nel segnale; il procedimento è descritto nel capitolo 2.7.4 ed è possibile utilizzare il curtogramma per scegliere la banda ottimale;
- Cepstrum: analisi per studiare le armoniche con le relative bande laterali; si è vista essere un'analisi più sensibile ai difetti rispetto a quelle precedentemente descritte;

Le analisi descritte possono essere fatte tutte analizzando un singolo segnale grezzo; si sono quindi aggiunte anche delle funzioni per confrontare diversi segnali tra loro. Alla base c'è l'utilizzo dell'order tracking, per poter avere un paragone tra segnali ottenuti con la macchina funzionante a diverse velocità; il confronto è poi fatto graficando sullo stesso grafico gli spettri di ampiezza o lo spettro di potenza di tutti i segnali scelti.

L'utilizzo dell'order tracking segue i seguenti passaggi:

- Determinare la velocità esatta della macchina in ogni segnale scelto per il confronto; la stima viene fatta cercando nello spettro in accelerazione il picco corrispondente alla frequenza caratteristica della coppia veloce (Tabella 3.1a);
- Determinare in quale segnale la macchina va a velocità minore;
- Considerando che durante ogni misurazione la macchina ha funzionato a velocità costante, determinare qual è stata la rotazione nell'intervallo misurato;
- Nei segnali in cui la macchina ha compiuto una rotazione maggiore rispetto al segnale in cui la macchina è andata alla velocità minore, eliminare tutti i campionamenti delle rotazioni aggiuntive;
- Interpolare i segnali partendo da quello che è rimasto intatto, in modo da avere in tutti lo stesso numero di campionamenti e agli stessi angoli di rotazione;
- Fare la trasformata di Fourier o calcolare lo spettro di potenza, rappresentando i segnali su uno stesso grafico per il confronto.

Si possono osservare i passaggi in Figura 3.5, prendendo come esempio due sinusoidi (Figura 3.5a e 3.5b) di ampiezze diverse (1 e 1.5) e di frequenza diverse (1 e 1.25 Hz). Le stesse sinusoidi sono rappresentate nel dominio angolo (Figura 3.5c e 3.5d), supponendo che un periodo della sinusoide corrisponda a una rotazione completa ( $360^\circ$ ). La prima sinusoide non subisce modifiche, mentre la seconda viene troncata e interpolata per recuperare i punti (Figura 3.5e e 3.5f). Sono quindi rappresentati i due spettri delle sinusoidi con e senza l'order tracking (Figura 3.5g e 3.5h).

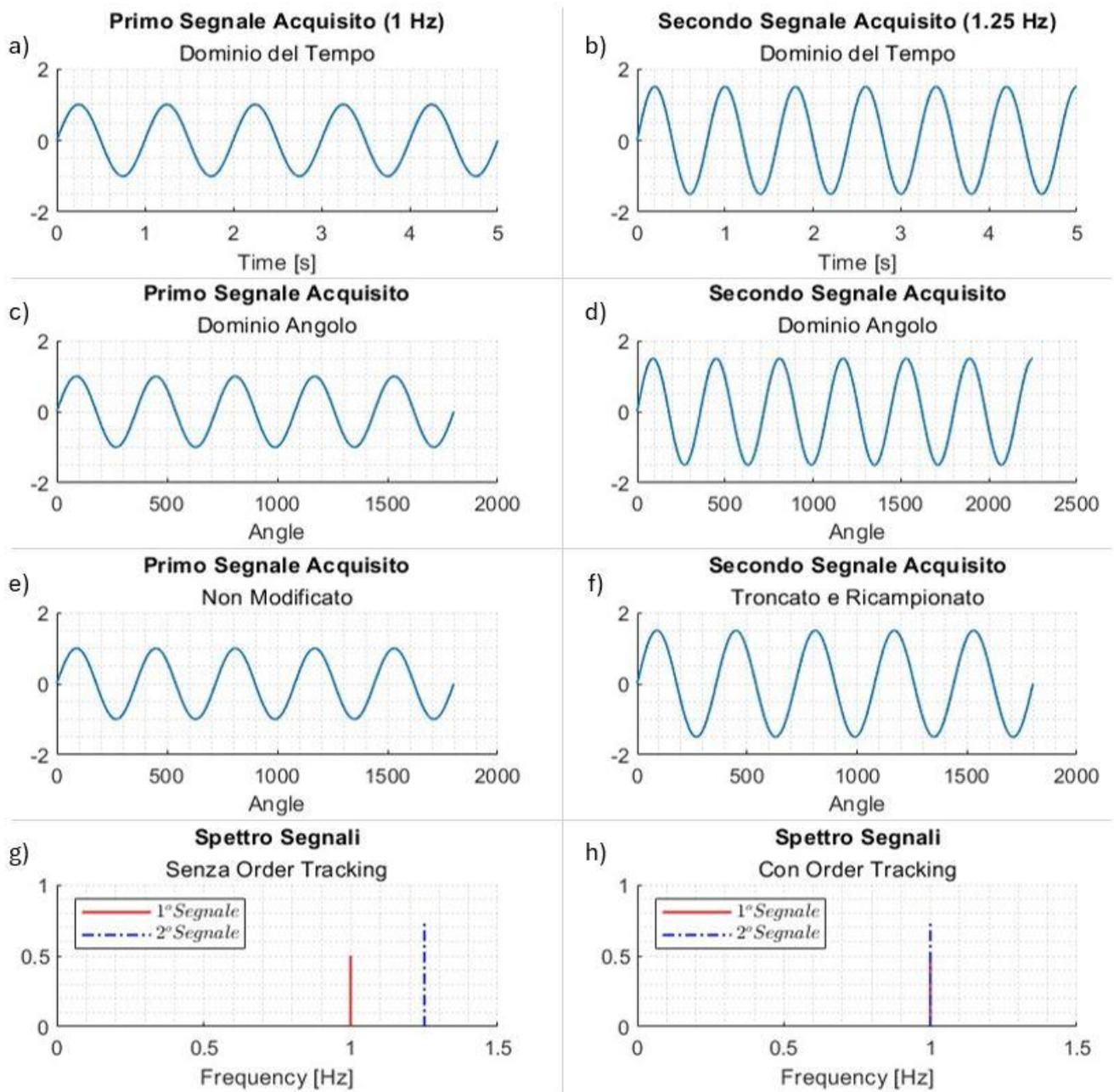


Figura 3.5: utilizzo dell'order tracking per confrontare due segnali sinusoidali con frequenza diversa.

## 4 Sviluppo e Implementazione di una Procedura di Elaborazione Dati

Per analizzare i segnali acquisiti si è scritto un programma su Matlab, in cui si sono implementate tutte le analisi descritte nel capitolo 3.3; esistono già applicazioni, sempre su Matlab, per analizzare i segnali, ma sono limitate nelle funzioni e non sono molto immediate nell'utilizzo per una specifica applicazione. Per questo, si è creato un programma che permette di scegliere i file Excel contenenti i segnali grezzi e di, attraverso diversi menu in sequenza, analizzarli in diversi modi.

Il menu iniziale (creato con la funzione menu di Matlab) ha come titolo 'Diagnostica' e presenta quattro opzioni tra cui scegliere: analizzare un singolo file di dati, analizzare più file di dati, chiudere tutte le finestre aperte o uscire dal programma.

### 4.1 Analisi su un Singolo File di Dati

La prima serie di analisi può essere fatta su un singolo file di dati; scelto il comando, si apre una schermata per scegliere il file da analizzare (generata con la funzione uigetfile di Matlab e con titolo 'Lettura file .csv'), come quella rappresentata in Figura 4.1 (i segnali sono stati salvati in cartelle con titolo la data in cui sono stati acquisiti scritta come anno, mese e giorno). Il programma può analizzare solo segnali grezzi, per cui si è inserito un controllo che fa ripetere la selezione finché non si sceglie un file che inizia con la parola 'RAW'; se il file selezionato non è corretto, nella Command Window viene mostrato un messaggio (con la funzione disp di Matlab) con scritto 'Ripetere la scelta: Il file scelto non è un RAW'. Se anziché selezionare un file e premere su 'Apri' si preme su 'Annulla', si ritorna al menu iniziale.

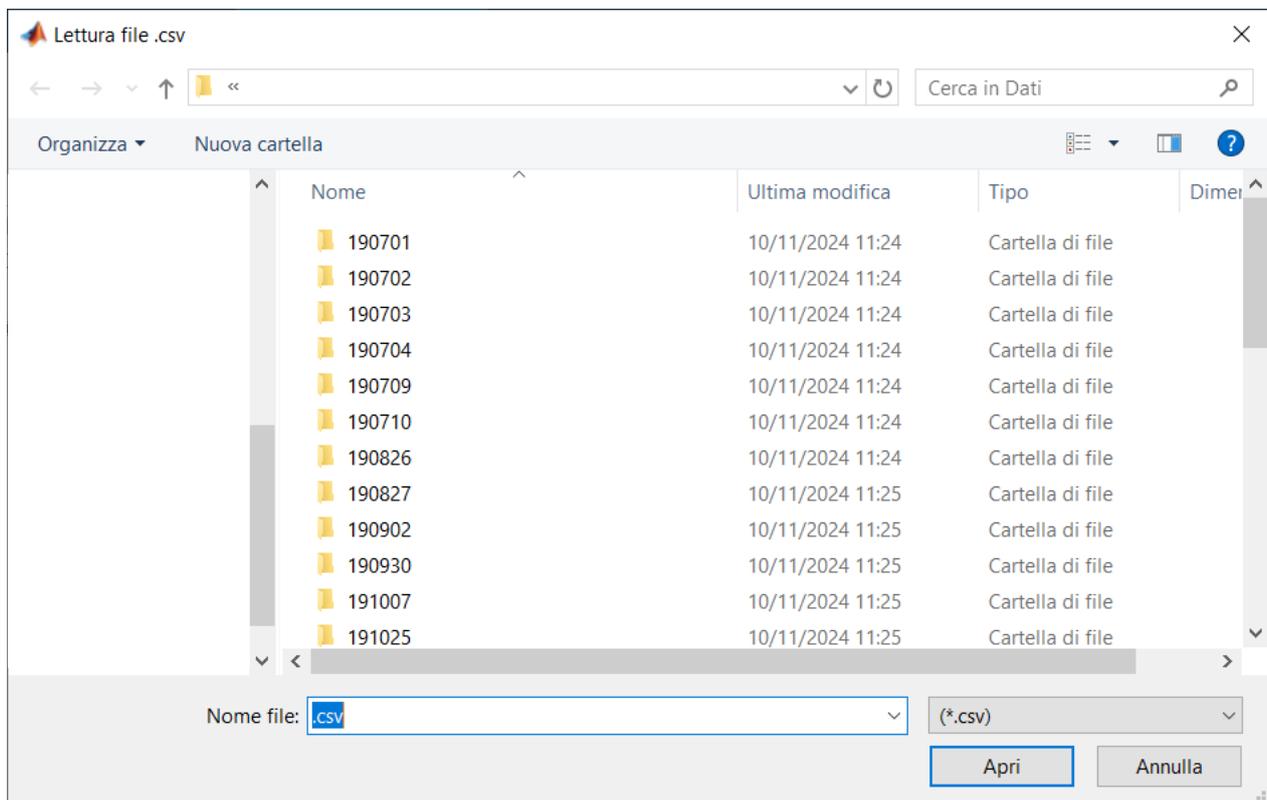


Figura 4.1: schermata di selezione del segnale da analizzare.

Se la selezione è corretta, si apre una schermata, rappresentata in Figura 4.2, che permette di inserire la velocità dei motori in rpm e la potenza assorbita in kW (funzione `inputdlg` di Matlab).

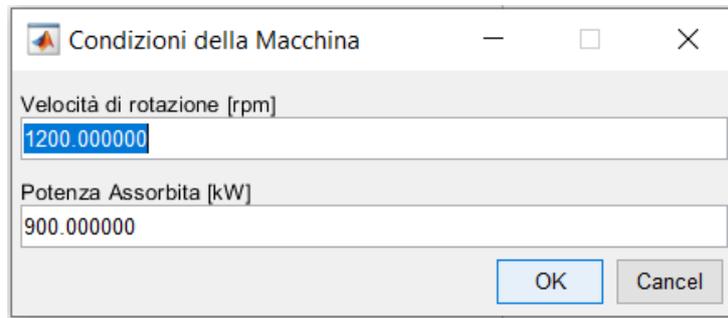


Figura 4.2: schermata per l'inserimento della velocità dei motori e la potenza assorbita.

Anche in questo caso è presente un controllo, per cui l'inserimento dei dati viene ripetuto finché i due valori inseriti non sono numeri reali compresi tra 0 e 10000; se l'inserimento dei dati non è corretto viene mostrato un messaggio nella Command Window con scritto 'Ripetere la scelta: Valore errati'. Se si sceglie l'opzione Cancel, invece di inserire i valori, si ritorna al menu iniziale.

Se l'inserimento dei dati di velocità e di potenza è corretto, il file Excel viene letto (con la funzione `readmatrix` di Matlab) e i valori vengono salvati; in quasi tutti i file, tra le caselle, sono presenti informazioni non necessarie, come la data o il tempo di acquisizione, che vengono quindi eliminate, mantenendo solo i valori del segnale grezzo acquisito dal trasduttore; in alcuni file, inoltre, essendo stati salvati male, la linea del tempo non è presente, per cui viene creata considerando una frequenza di campionamento di 1280 Hz.

In seguito, partendo dal segnale acquisito, vengono eseguite diverse operazioni:

- Viene calcolato l'asse delle frequenze, con N valori, da 0 ad un valore massimo definito come:

$$f_{max} = \frac{N - 1}{N\Delta t} \quad (4.1)$$

In cui N è il numero di campionamenti e  $\Delta t$  è il tempo di campionamento.

- Il segnale grezzo acquisito viene moltiplicato per la finestra di Hann, in modo da ridurre il leakage;
- I valori del segnale finestrato vengono moltiplicati per 9.80665, dal momento che sono espressi in mg e divisi per il numero di campionamenti, dal momento che la trasformata discreta di Fourier in Matlab non compie questo passaggio;
- Si calcola lo spettro di ampiezza sia in accelerazione (con la funzione `fft` di Matlab), che in velocità (dividendo punto per punto lo spettro in accelerazione per  $j\omega$ ), partendo dal segnale grezzo, modificato nel passaggio precedente, e mettendo a zero tutti i valori con frequenza minore di 0.5 Hz (frequenze così basse non vengono lette bene dall'accelerometro);
- Viene calcolato il segnale in velocità facendo la trasformata inversa di Fourier (con la funzione `ifft` di Matlab) dello spettro complesso in velocità;
- Viene calcolato il cepstrum reale (con la funzione `rceps` di Matlab);
- Viene determinata in modo preciso la velocità dei motori; non serve quindi inserire la velocità esatta nel menu mostrato in Figura 4.1, perché poi viene corretta seguendo i seguenti passaggi:
  - o Partendo dalla velocità inserita nel menu di Figura 4.2, viene calcolata la frequenza caratteristica della coppia veloce;

- In un range di 10 Hz attorno alla frequenza calcolata, viene trovato il valore massimo nello spettro di ampiezza in accelerazione; la frequenza in cui si ha il massimo è la frequenza reale della coppia veloce;
- Dalla frequenza trovata, si risale alla velocità reale della macchina;

La frequenza della coppia veloce è intorno ai 420 Hz, ma si potrebbero avere dei segnali che hanno frequenza di campionamento troppo bassa per avere quella frequenza nello spettro; per questo, è presente un controllo che permette di determinare la velocità dei motori cercando la terza armonica della coppia lenta, con frequenza intorno ai 100 Hz, se la frequenza di campionamento è troppo bassa.

- Vengono calcolate tutte le frequenze caratteristiche delle componenti della macchina, leggendo da un file Excel i loro valori, calcolati con i motori funzionanti a una velocità di 1 Hz, e moltiplicandoli per la velocità reale calcolata nel passaggio precedente;
- Vengono calcolati i 20 indicatori descritti nel capitolo 3: RMS in accelerazione e in velocità (con la funzione rms di Matlab), il valore di picco, il fattore di cresta, lo skewness (con la funzione skewness di Matlab), la curtosi (con la funzione kurtosis di Matlab), la varianza (con la funzione var di Matlab), l'entropia di Shannon, i fattori di impulso, di margine e di forma, il percentile 75 (con la funzione prctile di Matlab), l'integrale lineare, la potenza media del segnale (con la funzione bandpower di Matlab) e i sei indicatori degli ingranaggi (con la funzione gearConditionMetrics di Matlab).

Si apre quindi il menu successivo, con titolo il nome del file Excel scelto da analizzare, con diverse opzioni tra cui scegliere: stampare i dati, fare analisi sugli indicatori, fare analisi su grafici, chiudere tutte le finestre aperte o tornare al menu iniziale. Tutti i grafici che sono rappresentati nei prossimi capitoli derivano dall'analisi dello stesso file (denominato 'RAW\_BV1\_2019-07-03-00\_28\_53.csv').

Se si sceglie l'opzione di stampa dei dati, si apre una schermata (generata con la funzione msgbox) in cui vengono mostrate diverse informazioni relative al segnale acquisito, comprendenti:

- Il titolo del file Excel scelto;
- La banda di passaggio: varia tra 0.5 e la frequenza di campionamento divisa per 2.56; la banda di passaggio è la stessa che viene impostata nel quadro di acquisizione dati (vedi capitolo 3.2);
- Le frequenze di rotazione degli alberi: essendoci tre stadi di riduzione, si hanno le velocità dell'albero veloce, dell'albero intermedio, dell'albero lento e del mulino;
- Le frequenze caratteristiche di tutti i componenti della trasmissione, con ingranaggi, cuscinetti, giunti e motori; per i cuscinetti, vengono rappresentate le frequenze solo di alcuni di essi in base a quale sensore si è utilizzato per acquisire il segnale scelto: se il segnale deriva da uno dei due sensori dei motori (BV1 o BV1B), vengono mostrate le frequenze dei due cuscinetti dei motori (i motori sono uguali), se il segnale deriva da uno dei due sensori del riduttore (BV176A o BV176B), vengono mostrate le frequenze dei tre cuscinetti del riduttore (su ogni albero i due cuscinetti sono uguali) e se il segnale deriva da uno dei due sensori montati sui cuscinetti dell'albero del pignone (BV179A o BV179B), vengono mostrate le frequenze dei cuscinetti montati sull'albero del pignone e dei cuscinetti del mulino;

Un esempio di stampa dei dati è rappresentato in Figura 4.3.

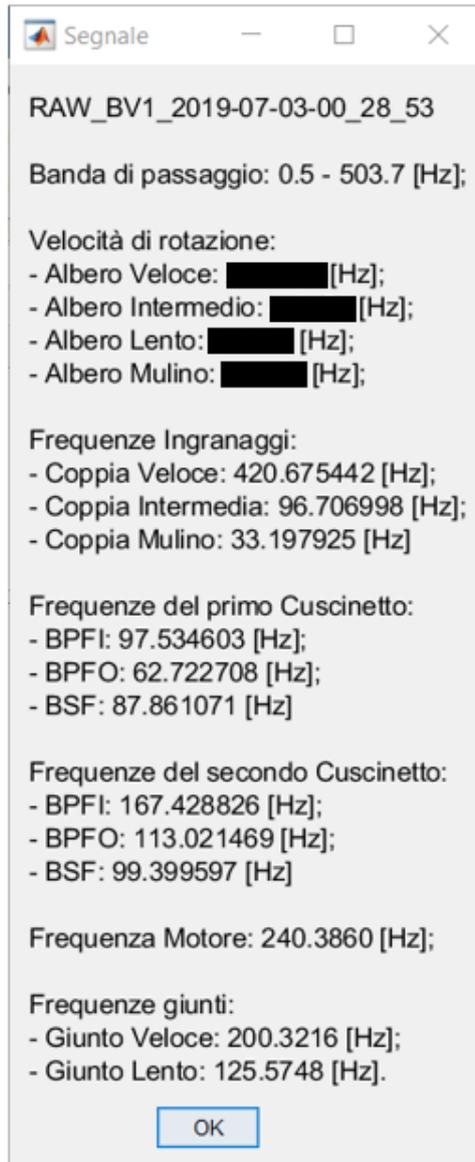


Figura 4.3: stampa dei dati di un segnale ottenuto dal sensore montato sul motore (BV1).

#### 4.1.1 Calcolo e Analisi Indicatori

Scegliendo di analizzare gli indicatori, si apre un nuovo menu, con titolo il nome del file Excel scelto da analizzare e con cinque possibilità di scelta: salvare gli indicatori in un file Excel, mostrare tutti e 20 gli indicatori calcolati dal programma, mostrare solo i sei indicatori scelti nel capitolo 3.3 con la distanza di Mahalanobis, chiudere tutte le finestre aperte o tornare al menu di analisi di un singolo file di dati.

È stato creato un file Excel, in cui ad ogni sensore è assegnato un foglio, ad ogni misura è assegnata una riga, mentre le colonne hanno in ordine il numero della riga, il titolo del file Excel analizzato e i valori di tutti e 20 gli indicatori. Se si sceglie quindi l'opzione di salvataggio degli indicatori nell'Excel, il programma cerca il foglio del sensore del segnale scelto e controlla che il titolo del file analizzato sia diverso da tutti i titoli dei file già salvati: in caso affermativo, viene riempita una

nuova riga (con la funzione writematrix di Matlab), col suo numero, con il titolo del file e con i 20 indicatori, mentre in caso negativo viene mostrato un messaggio con scritto 'Misura già salvata'.

In Figura 4.4 è rappresentato il foglio del sensore BV1 del file Excel, con alcune misure salvate: l'ultima riga è la nuova misura, mentre le righe precedenti sono state modificate, mettendole in ordine alfabetico con il titolo del file (quindi in ordine di data) e modificando i numeri della prima colonna mettendo il numero del giorno; queste modifiche sono state fatte dentro il file Excel, non utilizzando funzioni di Matlab, per facilitare alcune analisi e dimostrano la facilità di gestione e memorizzazione degli indicatori.

ID	TITOLO	RMS Acc	RMS Vel	Peak Value	CRESI	FACTOF	SKEWNESS	KURTOSIS	VARIANZA	SHANNONENTROPY	PERCENTILE 75	BandPower	Integrate Linear	IMPULSE FACTOF	MARGIN FACTOF	SHAPE FACTOF	F04	M6A	M8A	F00	Energy_Rate	NA4
1	RAW_BV1_2019-07-01-05_11_12	133.252	1.0688919	394.1035	2.826573668	-0.001742029	2.4653281	17.74942	-756.6763763	100.1587	17756.029	776787.1642	3.505083191	0.000936404	1.218352623	2.467803	3.780913	38.86382	3.232889	13.068398	2.467803	
1	RAW_BV1_2019-07-01-05_11_12	129.931	1.0074535	377.0332	2.23955443	-0.040852029	2.305063	1633.39	-705.0604386	37.22562	1633.66	686070.943	3.57030021	0.00103449	1.21875007	2.498836	3.177853	42.54526	3.522422	12.04003	2.498836	
1	RAW_BV1_2019-07-01-06_18_11	124.5303	1.210545	373.3370	2.398434211	-0.040802322	2.673096	1544.66	-655.6760954	32.23279	15507.35	649007.3405	3.102039316	0.001057761	1.234917512	2.668537	3.048980	51.22447	3.0526	12.03040	2.668537	
1	RAW_BV1_2019-07-01-07_21_10	122.8595	1.1678368	373.3370	3.00767215	0.002166655	2.555236	19394.85	-634.553853	90.034485	15094.46	650292.3321	3.783352445	0.001076071	1.224091978	2.544756	3.508835	44.87943	10.41988	13.25134	2.544756	
1	RAW_BV1_2019-07-01-07_21_15	123.6207	1.1946681	401.8536	3.23236259	-0.17839834	2.791729	16944.55	-425.3651844	86.402289	16940.29	639427.6409	4.08957733	0.001077591	1.243800073	2.759332	3.155624	62.34457	11.25624	13.05568	2.759332	
1	RAW_BV1_2019-07-01-08_24_5	118.4476	0.8781988	368.7439	3.070706648	0.038837185	2.94175	14268.2	-597.4532128	86.860655	14267.73	620537.6302	3.720431887	0.001079194	1.229488241	2.64407	3.052491	53.6277	10.03021	12.43888	2.64407	
1	RAW_BV1_2019-07-01-20_48_3	114.9199	0.9978554	378.5858	3.294344467	-0.188537128	2.638906	13193.67	-549.0030202	85.28137	13206.59	601794.5094	4.05683876	0.001059446	1.234555544	2.639734	3.052001	54.2807	3.30026	11.475227	2.639734	
1	RAW_BV1_2019-07-01-20_49_0	116.9487	0.9672523	356.1096	3.066025252	-0.1581762943	2.539508	13.4801	-541.3639594	87.21605	13430.06	619225.5195	3.783804559	0.001074015	1.227595849	2.583723	3.182724	47.5395	8.371503	11.624587	2.583723	
1	RAW_BV1_2019-07-01-23_10_2	126.5941	1.0053722	381.1035	3.012578088	-0.133832937	2.536455	18006.49	-476.3965231	93.75	18003.29	679409.1442	3.866297693	0.001060711	1.23693016	2.501294	3.253179	43.4615	8.46587	12.23345	2.501294	
1	RAW_BV1_2019-07-01-23_11_14	124.0575	1.188877	401.1933	3.233379242	-0.068490127	2.570939	15.33395	-648.5001077	88.142395	15330.26	681735.347	3.866626869	0.001030479	1.226545793	2.56255	3.175388	48.02001	9.50561	12.361725	2.56255	
2	RAW_BV1_2019-07-02-10_33_2	124.7227	1.0178396	371.5392	2.979266206	-0.02322483	2.570116	16.55915	-605.2344899	91.19415	16555.74	672326.8505	3.6411418	0.001037123	1.222151071	2.519427	3.181626	41.02445	10.1823	12.375337	2.519427	
2	RAW_BV1_2019-07-02-11_36_4	130.634	1.0438642	395.462	2.84948236	-0.00038823	2.38524	18276.45	-625.4451657	104.7075	18274.07	781958.1633	3.433187345	0.000867447	1.20825328	2.349482	3.801035	32.02486	8.64685	13.30475	2.349482	
2	RAW_BV1_2019-07-02-11_53_4	113.7494	0.8789018	365.5701	3.213847045	0.023853729	2.524828	12941.47	-536.2385231	80.83262	12938.11	603656.2983	3.924839467	0.001052303	1.221272764	2.518435	3.312653	44.11553	8.062679	10.377842	2.518435	
2	RAW_BV1_2019-07-02-11_53_5	119.8646	0.9374235	373.1942	3.113982288	0.006588225	2.484473	14371.01	-600.197589	86.863945	14367.51	649330.1417	3.786323099	0.001079893	1.220010689	2.474247	3.859589	39.81173	8.481846	11.683324	2.474247	
2	RAW_BV1_2019-07-02-14_16_1	120.5353	1.0486931	367.0807	3.044985859	0.071003867	2.548264	14534.64	-606.7212322	69.248205	14532.1	648388.4176	3.729431556	0.001862074	1.225194229	2.55298	3.572551	45.23108	9.588053	12.367153	2.55298	
2	RAW_BV1_2019-07-02-16_03_3	118.3265	0.8678197	384.6233	3.2505682	-0.05818013	2.632775	14003.88	-585.204916	84.41862	14001.16	624242.0132	4.002128236	0.001055653	1.231026819	2.536825	3.637853	56.06808	8.68624	12.04619	2.536825	
2	RAW_BV1_2019-07-02-17_32_5	112.755	1.0156661	351.4862	3.117255707	-0.024803328	2.640978	12714.77	-526.5305657	81.825255	12713.7	597414.6255	3.836037497	0.001093309	1.230581831	2.623117	3.026092	50.58886	7.792366	11.541802	2.623117	
2	RAW_BV1_2019-07-02-18_36_3	106.3616	0.9017517	366.694	3.441751351	-0.04680026	2.675195	1131.35	-463.507396	71.68127	1132.92	557597.7147	4.258001619	0.001020306	1.235962286	2.658076	3.016053	57.50306	9.321147	10.62559	2.658076	
2	RAW_BV1_2019-07-02-20_10_1	106.415	0.8730422	394.95	3.335523607	-0.04714348	2.671311	11313.48	-463.8202689	73.61325	11324.16	549843.1594	4.18202266	0.001075204	1.232339121	2.649165	3.014601	52.10381	7.80843	10.656279	2.649165	
2	RAW_BV1_2019-07-02-21_43_2	106.6322	1.045375	342.3616	3.210043337	-0.058012395	2.645337	11372.5	-466.2301221	71.80023	11374.31	552064.3345	3.966568576	0.00108042	1.235673595	2.63818	3.022053	49.49392	7.352393	10.352473	2.63818	
2	RAW_BV1_2019-07-02-23_04_4	100.5694	0.8224193	345.5048	3.162383847	-0.17620761	2.678035	11.78739	-484.3004123	77.67323	11781.1	588766.194	3.323203096	0.0010918	1.232080805	2.674433	3.051089	7.45803	8.884931	11.67433	2.674433	
3	RAW_BV1_2019-03-00_29_5	107.4518	0.9201622	381.7889	3.864880463	0.048984986	2.638891	15473.77	-473.5963177	77.789305	15475.89	594441.6523	4.507401963	0.00103025	1.228192725	2.633044	3.81933	51.67633	10.61846	12.63404	2.633044	
3	RAW_BV1_2019-07-03-00_29_4	108.6821	0.921955	369.0948	3.395781537	-0.02392124	2.613431	1818.64	-485.4712534	80.323895	1813.38	573794.7038	4.17488341	0.001020397	1.228221674	2.610314	3.04855	51.3389	7.88836	10.515029	2.610314	
3	RAW_BV1_2019-07-03-01_53_2	112.1762	0.9557395	346.6492	3.090220721	-0.037318588	2.563912	12586.07	-519.7786267	81.68803	12583.5	588398.4553	3.788952316	0.001802712	1.226110678	2.563064	3.877002	46.2152	7.984847	10.197276	2.563064	
3	RAW_BV1_2019-07-03-03_15_2	112.874	0.9444136	387.6495	3.485936636	-0.044386036	2.652786	12.58353	-520.4754013	81.12335	12581.53	589194.06	4.252968662	0.001053364	1.238007606	2.63845	3.044611	52.38462	9.83388	10.712349	2.63845	
4	RAW_BV1_2019-07-04-07_31_1	123.5151	1.0180643	394.2566	3.186209072	-0.04423712	2.547195	15.2176	-640.13146	80.873175	15215.55	662597.7657	3.916712179	0.00106891	1.225442273	2.538386	3.042473	44.20614	9.436688	11.567719	2.538386	
4	RAW_BV1_2019-07-04-08_56_2	118.4252	1.0313124	361.1298	3.04943275	-0.04279738	2.552337	14.02701	-586.1009512	86.59603	14024.54	631861.7093	3.722520644	0.001054335	1.220748662	2.54732	3.559066	45.47776	8.704951	11.022251	2.54732	
5	RAW_BV1_2019-07-09-06_31_5	113.6267	0.9024238	378.1321	3.327809783	-0.021843332	2.620806	12.31296	-535.4300386	80.809725	12311.03	630072.143	4.003356114	0.001053384	1.225894726	2.616443	3.012223	50.26855	10.47285	12.016336	2.616443	
5	RAW_BV1_2019-07-09-12_23_0	106.6121	0.9170854	343.7042	3.364515566	0.002700557	2.675225	11.79415	-485.070611	82.16095	11796.58	573551.5036	3.832323911	0.001083332	1.230181214	2.678358	3.037531	58.09491	8.817414	10.648805	2.678358	
6	RAW_BV1_2019-07-10-10_12_4	110.8821	0.8710072	330.0781	2.978938204	0.01024682	2.567666	12.28378	-506.674488	82.33937	12294.94	592301.3429	3.648068738	0.001039179	1.225484386	2.581979	3.048763	45.42542	9.13321	11.000451	2.581979	
6	RAW_BV1_2019-07-10-05_11_5	108.8253	0.9483688	351.5332	3.250710777	-0.045028936	2.539591	11.71281	-461.2786256	83.89803	111169	572490.6348	4.04720954	0.001056411	1.225888914	2.538952	3.993536	48.93884	8.19391	10.78893	2.538952	
7	RAW_BV1_2019-11-06-18_13_36	113.8459	0.4884943	374.0362	3.816783681	-0.023805204	2.626368	10.77638	-878.3282439	78.071595	10783.37	830149.321	4.430373765	0.000632707	1.230184896	2.632745	3.533889	56.7671	7.281761	8.704518	2.632745	
8	RAW_BV1_2019-11-10-09_53_51	116.2044	0.4323674	400.3143	3.423701649	0.001270581	2.628581	13.62388	-1139.397946	89.86664	13671.32	1257820.421	4.206223553	0.000598052	1.228861885	2.630902	3.053385	55.61219	6.542982	10.17848	2.630902	
9	RAW_BV1_2019-11-25-10_31_8	118.3207	0.437388	387.0842	3.002578736	0.002878336	2.632544	13.95353	-1170.003526	86.72333	13993.78	1250702.797	4.17784391	0.000585139	1.221707179	2.60732	3.02946	52.03072	6.68805	10.451957	2.60732	
35	RAW_BV1_2019-07-04-08_56_2	117.9195	1.0080342	343.4143	2.822244425	0.002222225	2.562054	13900.98	-575.7101728	67.57019	13891.6	620000.6036	3.572216566	0.00101959	1.222434766</							

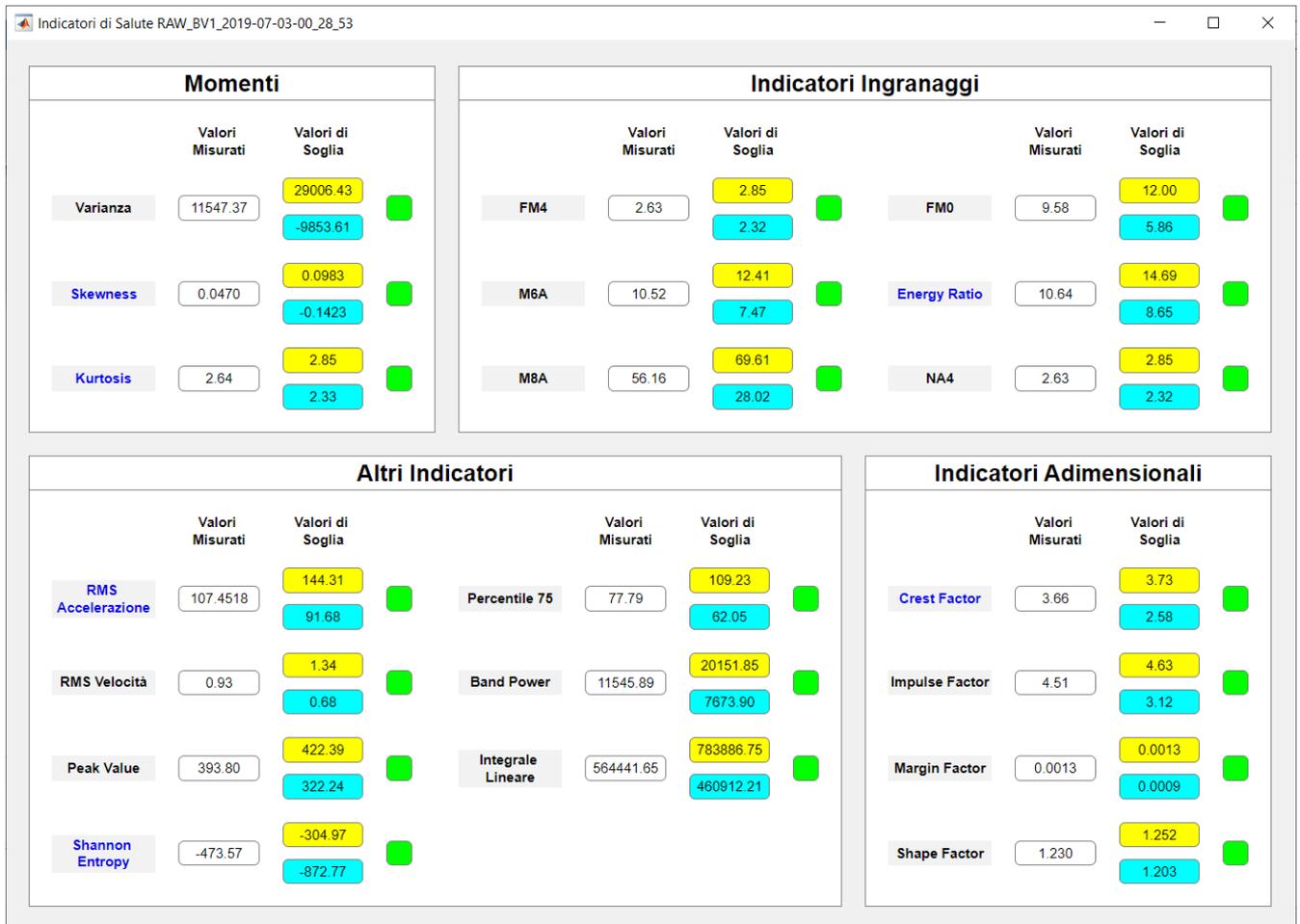


Figura 4.5: schermata con tutti e 20 gli indicatori analizzati.

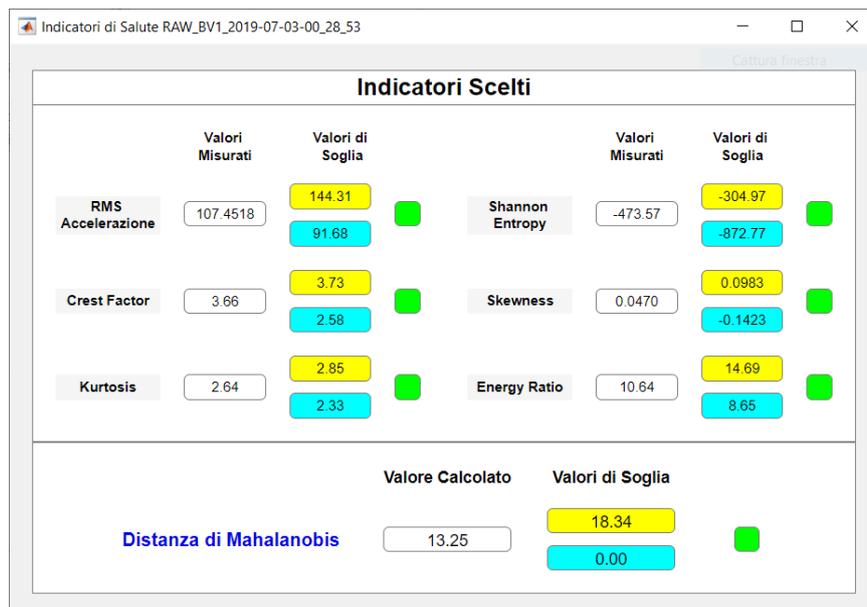


Figura 4.6: schermata con i 6 indicatori scelti e la distanza di Mahalanobis.

## 4.1.2 Analisi su Grafici

Scegliendo di analizzare il segnale grezzo su grafici si apre un menu, con titolo il nome del file Excel scelto, con sette opzioni: rappresentare il segnale grezzo, rappresentare il suo spettro in accelerazione, rappresentare il suo spettro in velocità, applicare la demodulazione al segnale, rappresentare il cepstrum reale del segnale, chiudere tutte le finestre aperte o tornare al menu di analisi di un singolo file di dati.

Ogni volta che si apre la schermata di un grafico, gli altri grafici aperti vengono chiusi; altre schermate, come quelle degli indicatori o quelle di stampa dei dati rimangono invece aperte.

Se si sceglie quindi la prima opzione si apre una schermata con il segnale grezzo, come quella rappresentata in Figura 4.7.

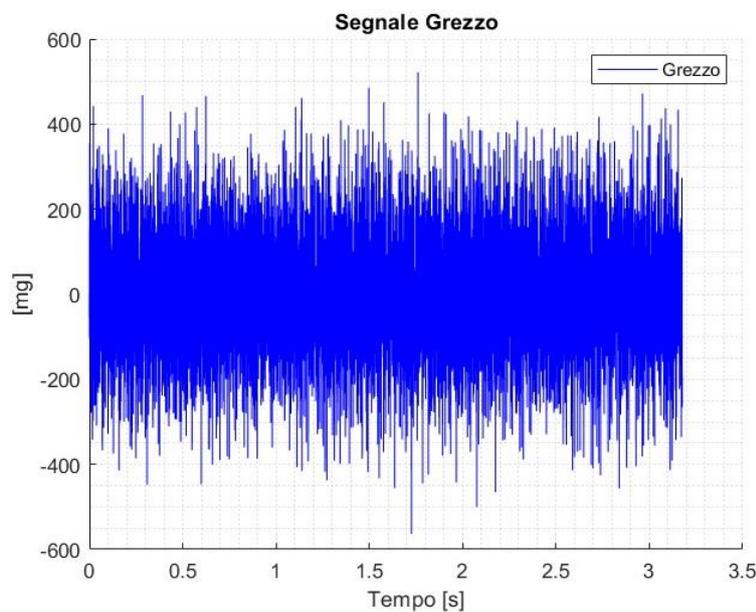


Figura 4.7: esempio di schermata con il segnale grezzo acquisito.

Dal segnale grezzo si possono ottenere alcune informazioni, ma sono limitate; per evidenziare determinate caratteristiche del segnale conviene utilizzare altre rappresentazioni, utilizzando le altre funzioni del programma.

### 4.1.2.1 Analisi Spettrale

È possibile scegliere tra due opzioni per analizzare lo spettro di ampiezza del segnale, ovvero lo spettro in velocità, che evidenzia tutte le componenti allo stesso modo o lo spettro in accelerazione che evidenzia maggiormente le componenti in alta frequenza.

Nel caso di spettro in accelerazione si apre una schermata come quella rappresentata in Figura 4.8.

Sul grafico si possono graficare delle bande scegliendo tra sei funzioni (cliccando sul bottone 'Bande'); tre funzioni permettono di graficare le armoniche e le subarmoniche delle frequenze caratteristiche delle componenti della macchina, due funzioni graficano delle bande partendo da una frequenza scelta dall'utente e una funzione calcola la distanza tra due frequenze scelte dall'utente. I due menu a tendina che si aprono cliccando sul bottone 'Bande' sono rappresentati in Figura 4.9.

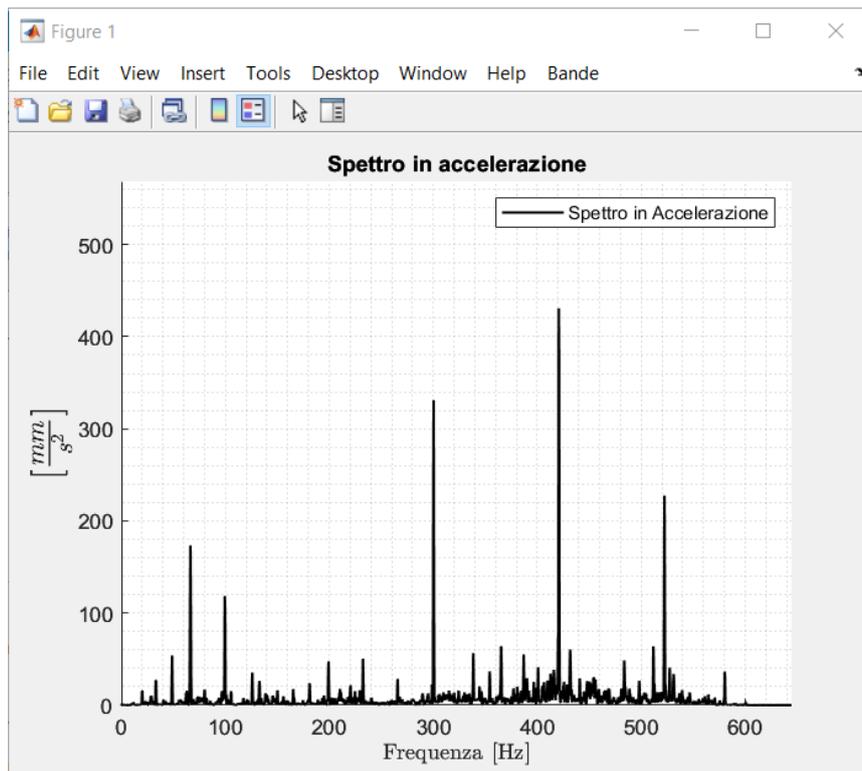


Figura 4.8: esempio di schermata con rappresentato uno spettro in accelerazione.



(a)

(b)

Figura 4.9: menu a tendina per graficare le bande delle componenti della macchina (a) o per scegliere altre opzioni che utilizzano delle frequenze scelte dall'utente.

Se sul grafico sono disegnate delle bande utilizzando una delle sei funzioni, sul relativo bottone compare un checkmark (come, ad esempio, per il bottone degli ingranaggi nella Figura 4.9); le bande disegnate con una delle sei funzioni possono essere anche cancellate cliccando di nuovo sullo stesso bottone che si è utilizzato per graficarle (anche il checkmark viene cancellato).

Con le prime tre funzioni si possono quindi disegnare le bande:

- Degli ingranaggi: se si sceglie questa opzione si apre una schermata come quella rappresentata in Figura 4.10. Si hanno tre ingranaggi nella trasmissione, per cui si ha una riga per ingranaggio per scegliere il numero di armoniche da disegnare e una riga per ingranaggio per scegliere il numero di subarmoniche da disegnare, per un totale di 6 righe; il numero massimo di bande disegnabili è 20, mentre se si preme il bottone 'Cancel' non viene disegnata nessuna banda. Sono inoltre presenti dei controlli sui valori inseriti dall'utente, per cui se si inseriscono valori non interi o non compresi tra 0 e 20 (e si preme sul bottone 'OK'), la schermata ricompare scrivendo nella Command Window 'Ripetere la scelta: Valori non corretti'; se si mettono tutti 0 la schermata continua a ricomparire perché deve esserci almeno un valore non nullo.

**Bande Ingranaggi**

Numero di armoniche nella coppia veloce [1, 20]

Numero di armoniche nella coppia intermedia [1, 20]

Numero di armoniche nella coppia mulino [1, 20]

Numero di subarmoniche nella coppia veloce [1, 20]

Numero di subarmoniche nella coppia intermedia [1, 20]

Numero di subarmoniche nella coppia mulino [1, 20]

Figura 4.10: schermata per scegliere il numero di bande degli ingranaggi da graficare.

Utilizzando quindi i dati inseriti in Figura 4.10 si ha come risultato quello rappresentato in Figura 4.11.

Sopra ogni banda è presente una scritta che la descrive: le prime armoniche (che coincidono con le prime subarmoniche) hanno la freccia, le armoniche successive hanno un numero (che parte da 2 a salire) seguito dalla parola 'Arm' e le subarmoniche successive hanno un numero (che parte da 2 a salire) seguito dalla parola 'Sub'; la legenda inoltre si aggiorna, con le armoniche e le subarmoniche dello stesso ingranaggio che sono rappresentate con lo stesso colore e rientrano nella stessa famiglia di curve. L'obiettivo della schermata è quindi quello di essere la più chiara e immediata possibile, riuscendo a identificare velocemente ciascuna banda a quale ingranaggio appartiene e di quale armonica si tratta.

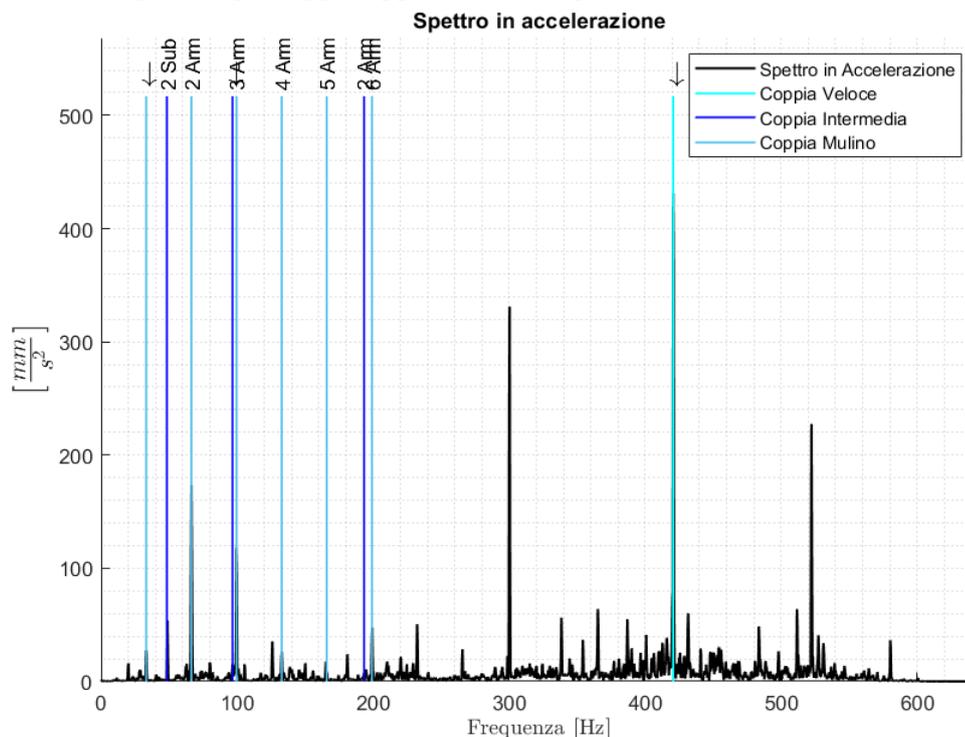


Figura 4.11: rappresentazione delle bande degli ingranaggi, utilizzando i valori inseriti in Figura 4.10.

- Dei cuscinetti: se si sceglie questa opzione si apre una schermata come quella rappresentata in Figura 4.12.

Figura 4.12: : schermata per scegliere il numero di bande dei cuscinetti da graficare.

In base al sensore con cui si è acquisito il segnale, è possibile graficare le frequenze di solo alcuni dei cuscinetti: se i sensori sono quelli dei motori (BV1 o BV1B) è possibile graficare solo le frequenze dei due cuscinetti dei motori, se i sensori sono quelli del riduttore (BV176A o BV176B) è possibile graficare solo le frequenze dei tre cuscinetti del riduttore, mentre, se i sensori sono quelli dell'albero del pignone (BV179A o BV179B), è possibile graficare solo le frequenze dei cuscinetti del pignone e dei cuscinetti del mulino.

La prima riga della schermata permette quindi di scegliere il cuscinetto (tra 1 e 2 per i sensori BV1, BV1B, BV179A e BV179B e da 1 a 3 per i sensori BV176A e BV176B), mentre le altre 6 permettono di scegliere le armoniche e subarmoniche delle frequenze caratteristiche dell'anello interno, dell'anello esterno e dei corpi rotolanti del cuscinetto; se il sensore non è BV176A o BV176B e si sceglie il terzo cuscinetto la schermata si chiude e non viene graficata nessuna banda.

Il numero massimo di bande disegnabili è 20 per ogni componente, mentre se si preme il bottone 'Cancel' non viene disegnata nessuna banda. Sono inoltre presenti dei controlli sui valori inseriti dall'utente, per cui se si inseriscono valori non interi o non compresi tra 1 e 3, per la prima riga, e non compresi tra 0 e 20, per le altre sei righe (e si preme sul bottone 'OK'), la schermata ricompare scrivendo nella Command Window 'Ripetere la scelta: Valori non corretti'; se si mettono tutti 0 (senza contare la prima riga) la schermata ricompare perché deve esserci almeno un valore non nullo.

Utilizzando quindi i dati inseriti nella schermata di Figura 4.12, si ha come risultato il grafico rappresentato in Figura 4.13.

Le bande disegnate seguono lo stesso principio delle bande che vengono disegnate con la funzione degli ingranaggi: sopra ogni banda è presente una scritta che la descrive, con le prime armoniche (che coincidono con le prime subarmoniche) aventi una freccia, con le armoniche successive aventi un numero (che parte da 2 a salire) seguito dalla parola 'Arm' e con le subarmoniche successive aventi un numero (che parte da 2 a salire) seguito dalla

parola ‘Sub’; la legenda inoltre si aggiorna, con le armoniche e le subarmoniche, della stessa componente del cuscinetto, che vengono rappresentate dello stesso colore e rientrano nella stessa famiglia di curve. Si può quindi notare come si possano graficare le armoniche e le subarmoniche di solo un cuscinetto alla volta.

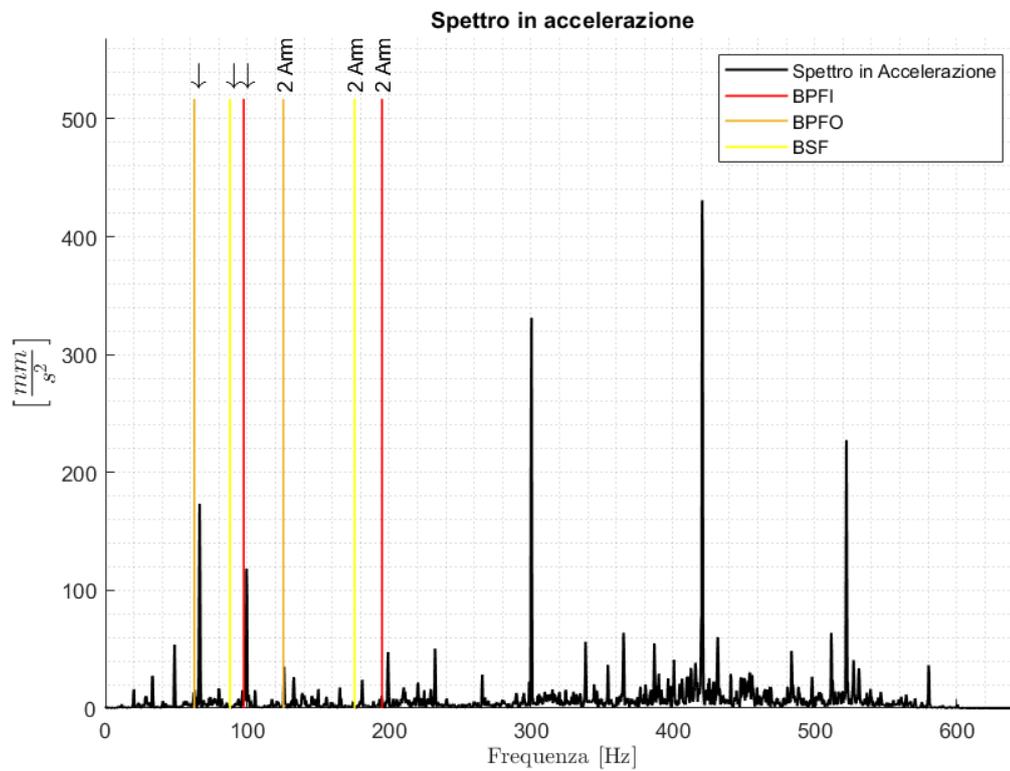


Figura 4.13: rappresentazione delle bande dei cuscinetti, utilizzando i valori inseriti in Figura 4.12.

- Dei motori e dei giunti: se si sceglie questa opzione si apre una schermata come quella rappresentata in Figura 4.14.

Componente	Numero
Numero di armoniche Asse veloce	3
Numero di armoniche Motore	1
Numero di armoniche Giunto albero veloce	1
Numero di armoniche Giunto albero lento	2
Numero di subarmoniche Motore	2
Numero di subarmoniche Giunto albero veloce	0
Numero di subarmoniche Giunto albero lento	0

Figura 4.14: : schermata per scegliere il numero di bande dei motori e dei giunti da graficare.

Con questa funzione è possibile graficare le armoniche della velocità di rotazione dell'albero veloce (prima riga) e le armoniche e le subarmoniche della frequenza caratteristica del motore e dei giunti (le altre sei righe); il numero massimo di bande disegnabili per ogni riga è 20, mentre se si preme il bottone 'Cancel' non viene disegnata nessuna banda.

Sono inoltre presenti dei controlli sui valori inseriti dall'utente, per cui se si inseriscono valori non interi o non compresi tra 0 e 20 (e si preme sul bottone 'OK'), la schermata ricompare scrivendo nella Command Window 'Ripetere la scelta: Valori non corretti'; se si mettono tutti 0 la schermata continua a ricomparire perché deve esserci almeno un valore non nullo.

Utilizzando quindi i dati inseriti in Figura 4.14, si ha come risultato il grafico rappresentato in Figura 4.15.

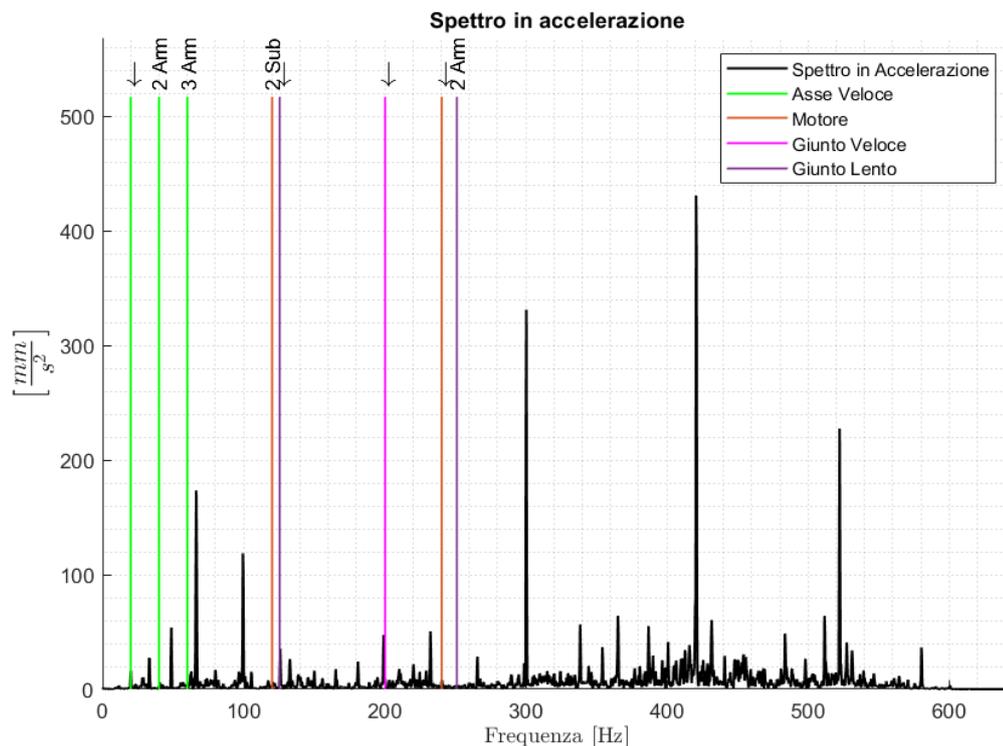


Figura 4.15: rappresentazione delle bande dei motori e dei giunti, utilizzando i valori inseriti in Figura 4.14. Le bande disegnate seguono lo stesso principio delle bande che vengono disegnate con le due funzioni precedenti: sopra ogni banda è presente una scritta che la descrive, con le prime armoniche (che coincidono con le prime subarmoniche) aventi una freccia, con le armoniche successive aventi un numero (che parte da 2 a salire) seguito dalla parola 'Arm' e con le subarmoniche successive aventi un numero (che parte da 2 a salire) seguito dalla parola 'Sub'; la legenda inoltre si aggiorna, con le armoniche e le subarmoniche della stessa componente della macchina che sono rappresentate dello stesso colore e rientrano nella stessa famiglia di curve.

Le tre funzioni appena descritte sono indipendenti: è possibile graficare o cancellare le bande, con una delle funzioni, indipendentemente dal fatto che sul grafico ci siano disegnate altre bande di altri componenti della macchina (la legenda si aggiorna sempre di conseguenza). In Figura 4.16 si ha un esempio di rappresentazione sullo spettro di diverse bande di diverse componenti della macchina (due armoniche asse veloce, un'armonica della coppia veloce, tre armoniche della coppia del mulino, due armoniche della frequenza dell'anello interno del cuscinetto, tre armoniche della frequenza dei corpi rotolanti del cuscinetto e due armoniche del motore).

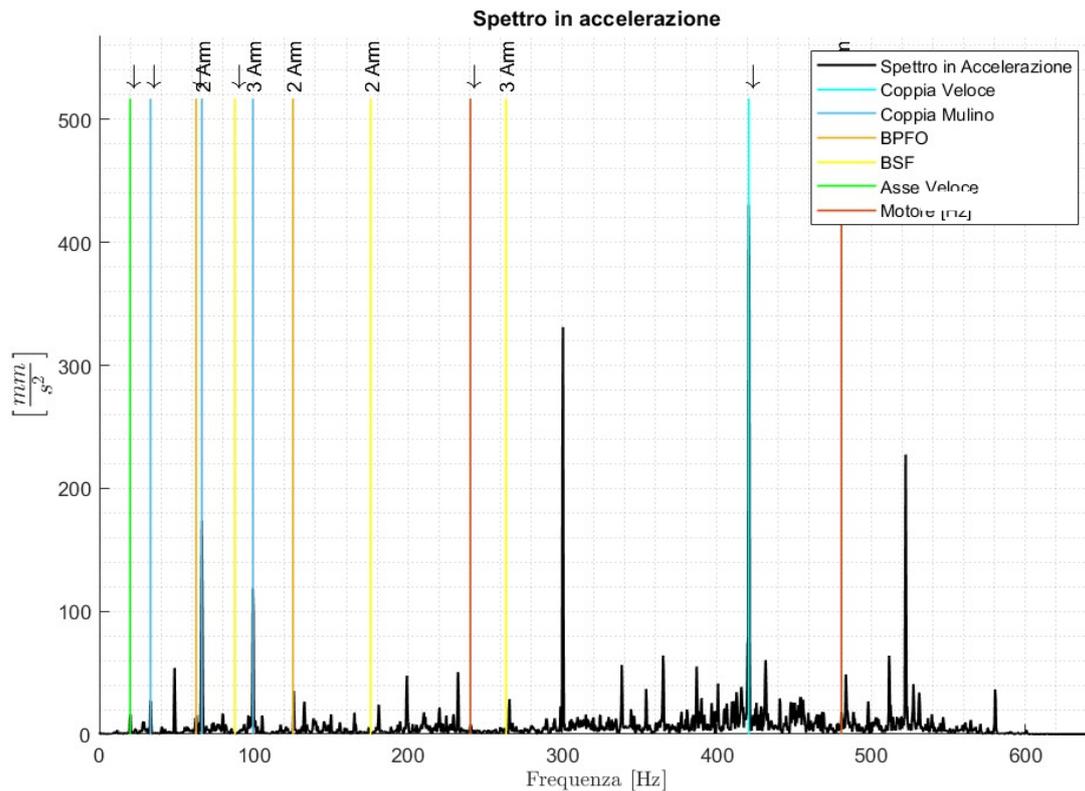


Figura 4.16: esempio di rappresentazione sullo spettro di diverse bande appartenenti a componenti diverse della macchina.

Le bande disegnate con le tre funzioni sopra descritte dipendono dalla geometria della macchina, ma è anche possibile disegnare delle bande sul grafico partendo da una frequenza scelta dell'utente:

- Bande laterali: vengono disegnate delle bande a distanza costante tra loro attorno a una frequenza scelta dall'utente.

Scegliendo questa opzione nella Command Window compare la scritta 'Seleziona Frequenza Centrale e Premi INVIO'; a quel punto l'utente può scegliere un punto sul grafico e premere INVIO; se si preme INVIO senza selezionare alcun punto, nella Command Window compare la scritta 'Frequenza Centrale non Selezionata' e non viene disegnata nessuna banda, mentre, se si sceglie il punto correttamente, il programma legge le sue coordinate (con la funzione `getCursorInfo` di Matlab) e compare una schermata, come quella rappresentata in Figura 4.17. Essa permette di scegliere il numero di bande laterali da disegnare a una distanza pari alla frequenza di rotazione dell'asse veloce (prima riga), alla frequenza di rotazione dell'asse intermedio (seconda riga) o alla frequenza di rotazione dell'asse lento (terza riga).

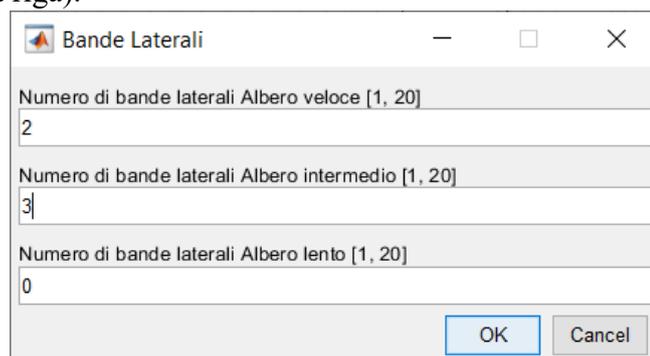


Figura 4.17: schermata per scegliere il numero di bande laterali disegnare.

Il numero massimo di bande disegnabili per ogni riga è 20, mentre se si preme il bottone ‘Cancel’ non viene disegnata nessuna banda. Sono inoltre presenti dei controlli sui valori inseriti dall’utente, per cui se si inseriscono valori non interi o non compresi tra 0 e 20 (e si preme sul bottone ‘OK’), la schermata ricompare scrivendo nella Command Window ‘Ripetere la scelta: Valori non corretti’; se si mettono tutti 0 la schermata continua a ricomparire perché deve esserci almeno un valore non nullo.

Utilizzando quindi i dati inseriti in Figura 4.17, si ha come risultato il grafico rappresentato in Figura 4.18.

Una volta che vengono disegnate le bande, anche la legenda si aggiorna, con la banda in corrispondenza della frequenza scelta dall’utente colorata in rosso e le bande laterali, appartenenti allo stesso gruppo, rappresentate dello stesso colore e appartenenti alla stessa famiglia di curve.

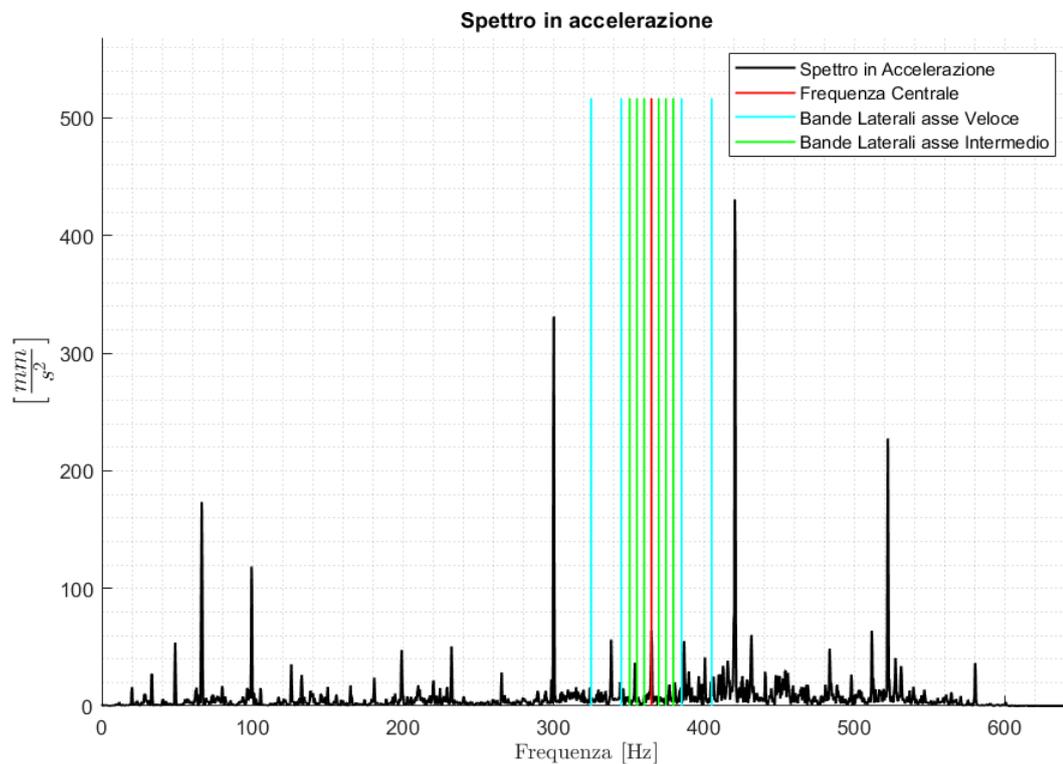


Figura 4.18: rappresentazione delle bande laterali, utilizzando i valori inseriti in Figura 4.17.

- Armoniche e subarmoniche: vengono disegnate le armoniche e le subarmoniche della frequenza scelta dall’utente.

Scegliendo questa opzione nella Command Window compare la scritta ‘Seleziona Frequenza Centrale e Premi INVIO’; a quel punto l’utente può scegliere un punto sul grafico e premere INVIO; se si preme INVIO senza selezionare alcun punto, nella Command Window compare la scritta ‘Frequenza non Selezionata’ e non viene disegnata nessuna banda, mentre, se si sceglie il punto correttamente, il programma legge le sue coordinate e compare una schermata, come quella rappresentata in Figura 4.19. Essa permette di scegliere il numero di armoniche (prima riga) e il numero di subarmoniche (seconda riga) della frequenza scelta.

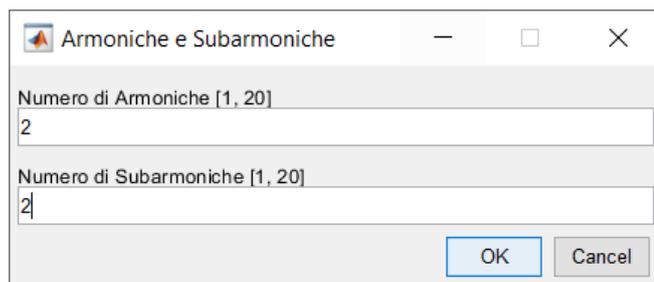


Figura 4.19: schermata per scegliere il numero di armoniche e subarmoniche da disegnare. Il numero massimo di bande disegnabili per ogni riga è 20, mentre se si preme il bottone ‘Cancel’ non viene disegnata nessuna banda. Sono inoltre presenti dei controlli sui valori inseriti dall’utente, per cui se si inseriscono valori non interi o non compresi tra 0 e 20 (e si preme sul bottone ‘OK’), la schermata ricompare scrivendo nella Command Window ‘Ripetere la scelta: Valori non corretti’; se si mettono tutti 0 la schermata continua a ricomparire perché deve esserci almeno un valore non nullo. Utilizzando quindi i dati inseriti in Figura 4.19, si ha come risultato il grafico rappresentato in Figura 4.20.

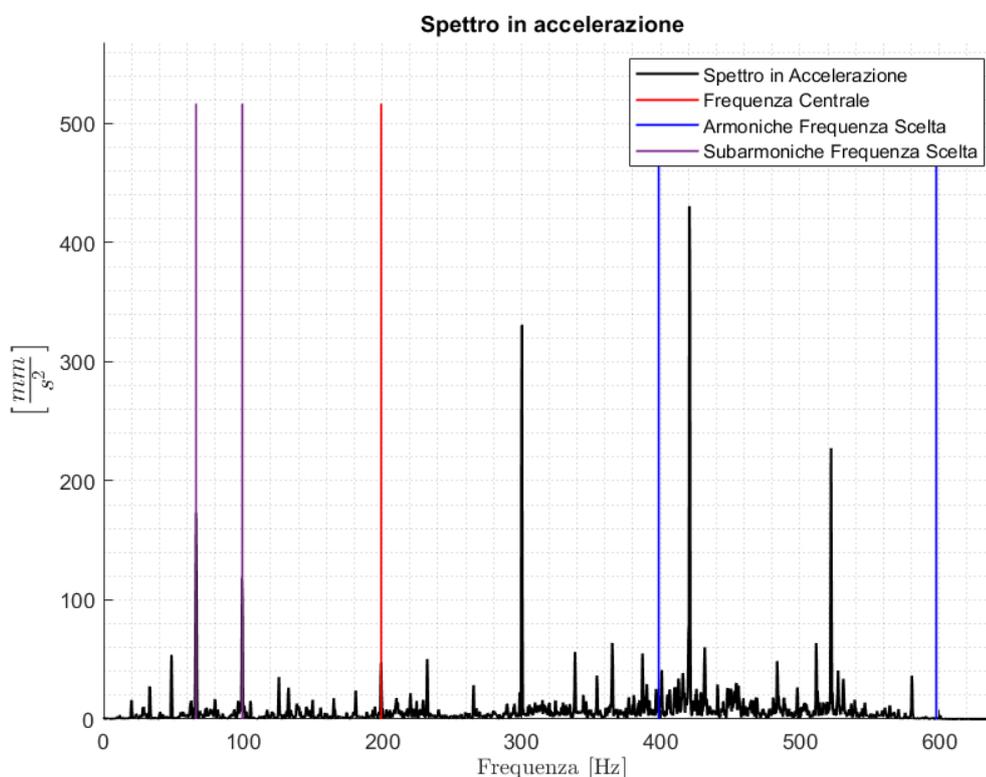


Figura 4.20: rappresentazione delle armoniche e delle subarmoniche, utilizzando i valori inseriti in Figura 4.19. Una volta che vengono disegnate le bande anche la legenda si aggiorna, con la banda in corrispondenza della frequenza scelta dall’utente rappresentata in rosso e con le armoniche (subarmoniche) disegnate dello stesso colore e appartenenti alla stessa famiglia di curve. In questo caso, nel conteggio delle armoniche (e delle subarmoniche) non è considerata la frequenza scelta dall’utente, per cui, se, ad esempio, si scegliesse di rappresentare due armoniche (subarmoniche), verrebbero disegnate la seconda e la terza (nelle funzioni precedenti venivano disegnate la prima e la seconda).

Se si disegnano delle bande laterali o delle armoniche e subarmoniche con le ultime due funzioni descritte, qualunque altra banda presente sul grafico viene cancellata (con i relativi checkmark nei bottoni del menu), così come se si disegnano delle bande con le prime tre funzioni descritte (quelle

relative alle frequenze dei componenti della macchina), se sono presenti delle bande laterali o delle armoniche/subarmoniche, queste ultime vengono cancellate (con i relativi checkmark nei bottoni del menu).

Nella schermata dello spettro in accelerazione è presente un'ulteriore funzione che permette di mostrare la distanza tra due punti scelti dall'utente. Scegliendo questa opzione nella Command Window compare la scritta 'Seleziona un Punto e Premi INVIO' a seguito della quale l'utente può quindi scegliere il primo punto; compare quindi una seconda scritta 'Seleziona un altro Punto e Premi INVIO', a seguito della quale l'utente può scegliere il secondo punto. Quando viene selezionato un punto, sul grafico compare un punto rosso in corrispondenza della frequenza scelta (Figura 4.21).

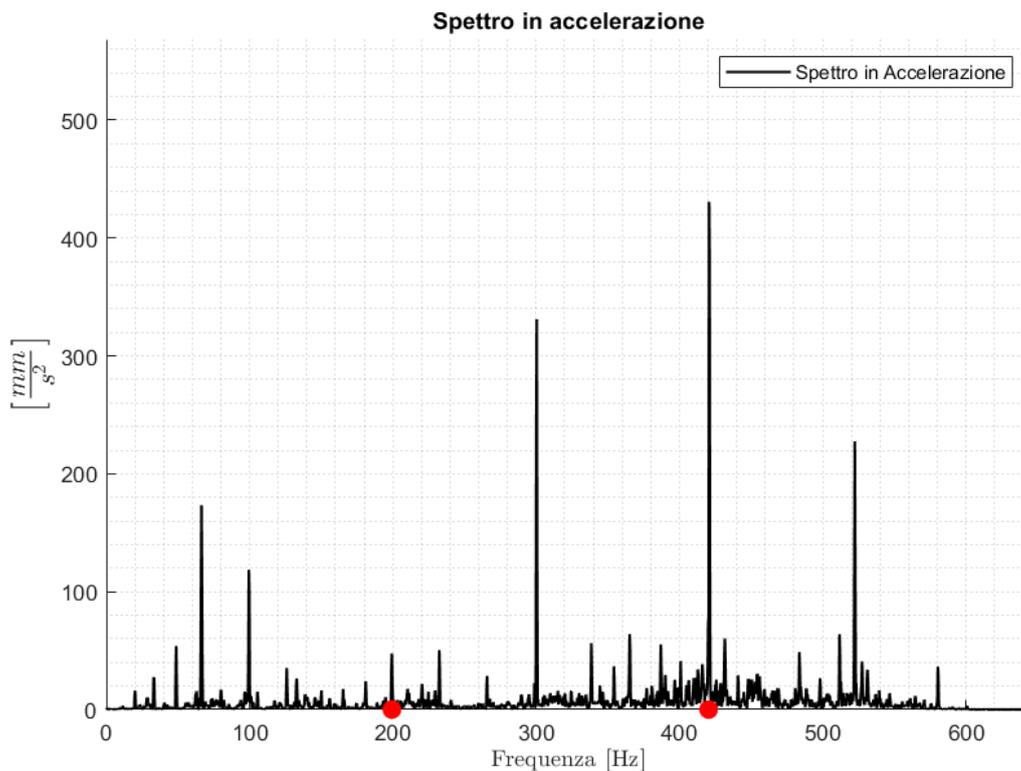


Figura 4.21: spettro in accelerazione con punti rossi in corrispondenza delle frequenze scelte dall'utente.

Una volta scelti i punti, nella Command Window viene scritto 'La distanza tra i punti scelti è: ', seguito dalla differenza tra le frequenze dei due punti scelti e da '[Hz]'. Se si preme INVIO senza selezionare il primo punto, nella Command Window viene scritto 'Primo Punto non Selezionato' e la funzione si chiude, mentre se si preme INVIO senza selezionare il secondo punto, nella Command Window viene scritto 'Secondo Punto non Selezionato', viene cancellato l'indicatore del primo punto dal grafico e la funzione si chiude.

Se si utilizza questa funzione, qualunque altra banda disegnata rimane, mentre, se sono ancora disegnati i suoi indicatori (i punti rossi sul grafico) e si sceglie una delle funzioni precedentemente descritte, tali indicatori vengono cancellati (come il checkmark dal bottone del menu).

Oltre allo spettro di ampiezza in accelerazione è possibile graficare lo spettro di ampiezza in velocità (Figura 4.22). La rappresentazione è del tutto simile allo spettro in accelerazione, per cui le funzioni implementate sono le stesse e con la stessa rappresentazione: è possibile graficare le frequenze caratteristiche delle componenti della macchina, bande laterali e armoniche e

subarmoniche partendo da una frequenza scelta dall'utente e calcolare la distanza tra due punti scelti dall'utente.

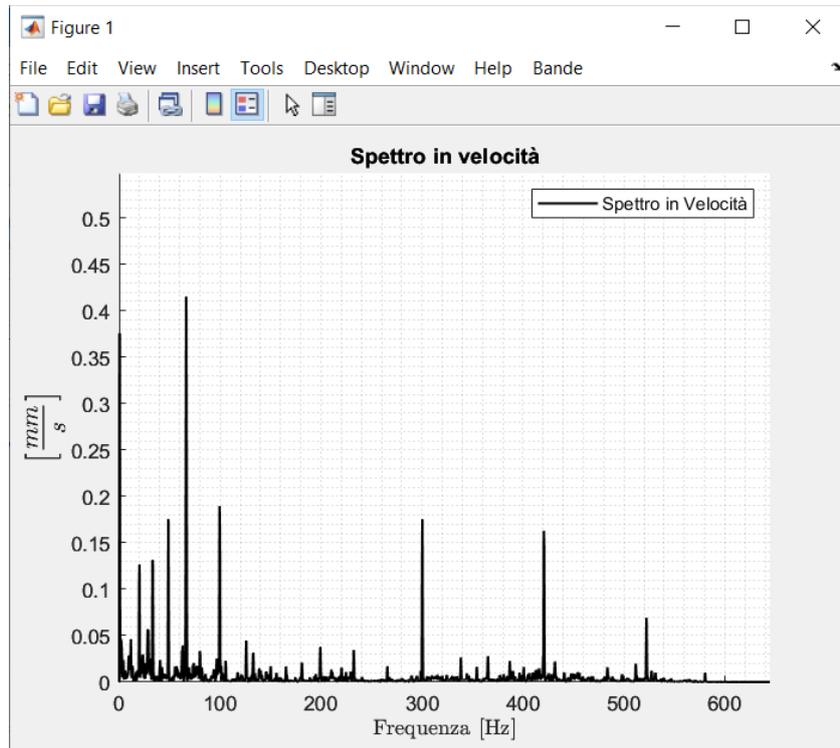


Figura 4.22: spettro in velocità.

#### 4.1.2.2 Demodulazione e Spettro dell'Involuppo

Il procedimento implementato per la demodulazione è del tutto simile a quello rappresentato in Figura 2.18; il primo passaggio consiste quindi nel determinare su quale banda applicare l'analisi. Per farlo, si hanno due opzioni: l'utilizzo del kurtogramma oppure inserendo i valori estremi della banda a mano.

Se si sceglie quindi di demodulare il segnale, si apre una schermata, con la funzione `questdlg` di Matlab, in cui viene chiesto 'Vuoi graficare il Kurtogramma?' con opzioni di scelta 'Sì' e 'No'. Se viene scelta la prima, si apre una schermata con il kurtogramma (generata con la funzione `kurtogram` di Matlab) come quella rappresentata in Figura 4.23 e nella Command Window viene scritto 'Seleziona un Punto e Premi INVIO'. L'utente può quindi scegliere un punto sul grafico ed esso diventa uno dei due estremi della banda da demodulare; se si preme INVIO senza aver selezionato alcun punto, nella Command Window viene scritto 'Primo Punto non Selezionato' e l'analisi viene annullata; se il primo punto è invece selezionato correttamente, viene scritto 'Seleziona un altro Punto e Premi INVIO'. L'utente può quindi scegliere il secondo punto sul grafico, che diventa il secondo estremo della banda da demodulare; se si preme INVIO senza aver selezionato alcun punto, nella Command Window viene scritto 'Secondo Punto non Selezionato' e l'analisi viene annullata.

Sulla scelta dei due punti è presente un controllo, per cui se la distanza tra i due punti scelti è inferiore ai 10 Hz, nella Command Window viene scritto 'Ripete la scelta: Valori non corretti', seguito da 'Seleziona un altro Punto e Premi INVIO'; l'utente deve quindi ripetere la selezione del secondo punto, finché non viene rispettata la condizione di banda più larga di 10 Hz; il motivo di

questa scelta è per avere un minimo di risoluzione nel grafico che si ottiene a seguito della demodulazione.

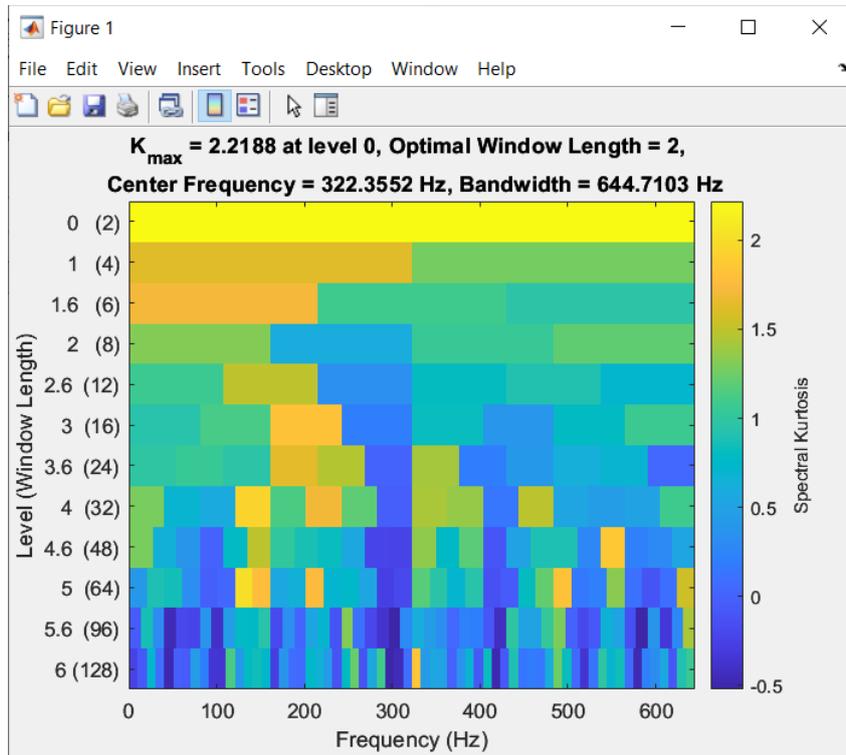


Figura 4.23: kurtogramma.

Se le selezioni sono state fatte correttamente, il programma prosegue con l'analisi.

Se invece nella schermata di richiesta di rappresentazione del kurtogramma si sceglie l'opzione 'No', si apre una schermata come quella rappresentata in Figura 4.24, in cui i due valori estremi sono inseriti a mano dall'utente.

Per i valori inseriti ci sono due controlli: la loro differenza deve essere superiore ai 10 Hz e i due valori devono essere reali e compresi nella banda di passaggio, la quale è compresa tra 0.5 Hz e la frequenza di campionamento divisa per 2.56. Se una delle due condizioni non viene rispettata, viene scritto nella Command Window 'Ripetere la scelta: Valori non corretti'. Se si preme 'Cancel' non viene fatta nessuna analisi e si torna al menu di scelta dei grafici.

Figura 4.24: schermata per inserire gli estremi della banda da demodulare.

Se la scelta degli estremi della banda è fatta correttamente, viene quindi mostrato il risultato della demodulazione in una nuova schermata. In Figura 4.25 è mostrato il risultato della demodulazione, prendendo una banda compresa tra 160 e 240 Hz; al momento non si sono aggiunte ulteriori funzioni per analizzare il grafico.

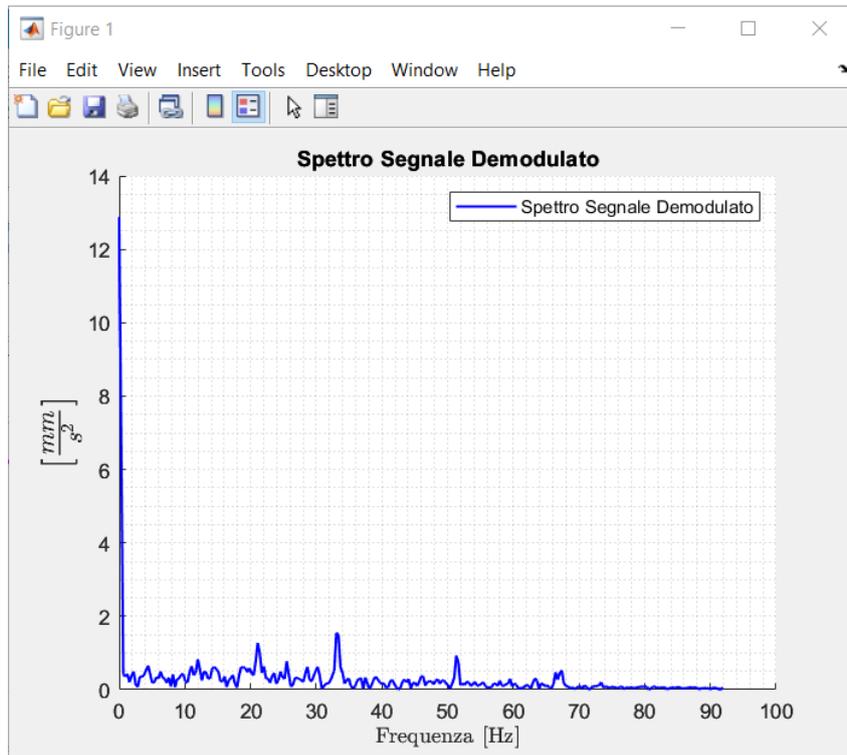


Figura 4.25: risultato della demodulazione.

### 4.1.2.3 Cepstrum

L'ultima analisi che è possibile fare, partendo da un singolo file di dati, è il cepstrum reale. Scegliendo questa opzione viene creata una schermata come quella rappresentata in Figura 4.26; anche in questo caso non si sono implementate funzioni aggiuntive per analizzare il grafico.

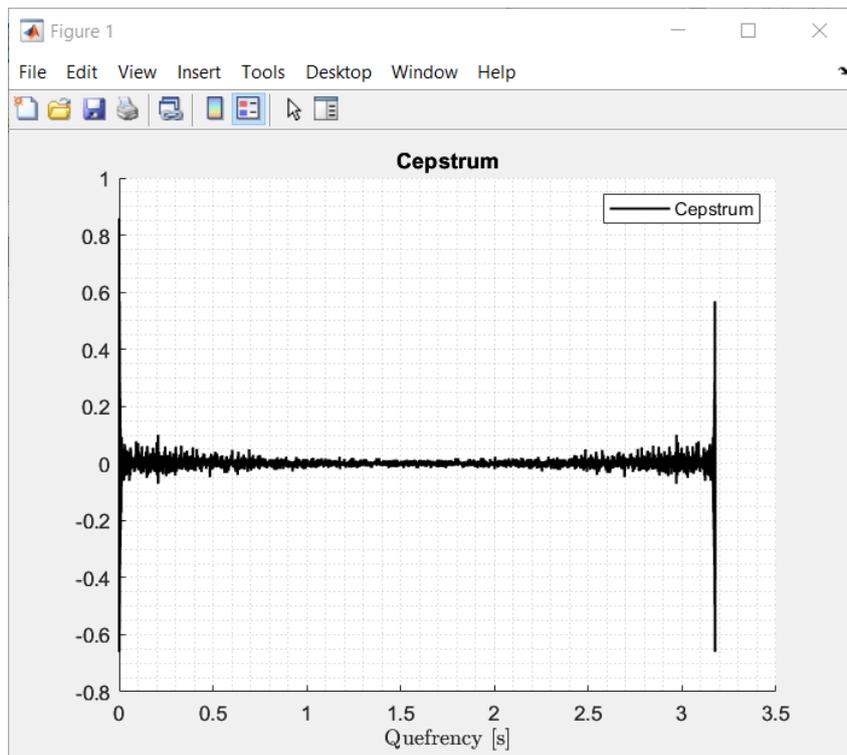


Figura 4.26: cepstrum reale.

## 4.2 Analisi su più File di Dati

Analizzando un singolo file alla volta, in alcuni casi, può risultare difficoltoso capire se, a distanza di giorni, settimane o mesi, le condizioni della macchina sono cambiate; può quindi risultare utile poter confrontare diversi segnali tra loro, ottenuti in diversi periodi, per capire se le condizioni della macchina sono passate da buone a difettose o se un difetto già presente sta peggiorando nel tempo.

Scegliendo quindi di analizzare più file, si apre una schermata come quella rappresentata in Figura 4.27, in cui viene chiesto il numero di segnali da confrontare.

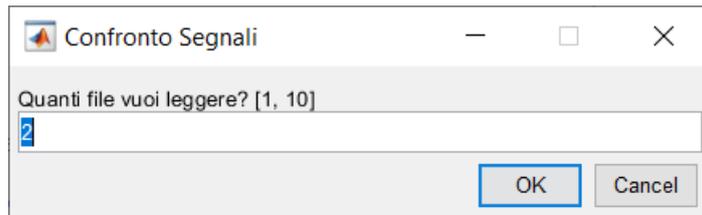


Figura 4.27: schermata per scegliere quanti segnali confrontare tra loro.

Il numero massimo di segnali che si possono scegliere è 10, mentre se si preme il bottone ‘Cancel’ si ritorna al menu iniziale. Sono inoltre presenti dei controlli sui valori inseriti dall’utente, per cui se si inseriscono valori non interi o non compresi tra 1 e 10 (e si preme sul bottone ‘OK’), la schermata ricompare scrivendo nella Command Window ‘Ripetere la scelta: Valori non corretti’.

Se il valore inserito è corretto, compaiono in sequenza delle schermate, come quella rappresentata in Figura 4.28, in numero uguale al valore inserito nella schermata di Figura 4.27; le schermate hanno come titolo ‘Lettura file .csv’ seguito dal numero del file che si sta selezionando, da ‘di’ e dal numero totale di file che devono essere selezionati.

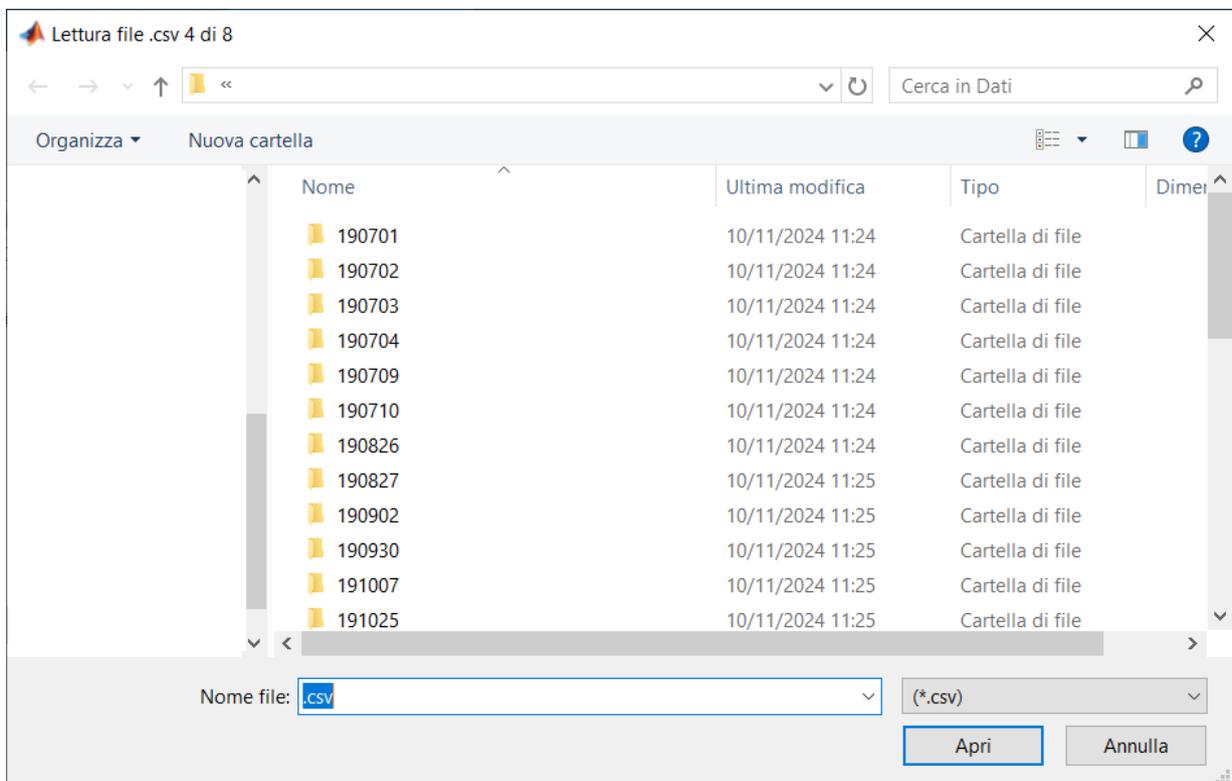


Figura 4.28: schermata di selezione di uno dei file da analizzare.

Se si preme sul bottone ‘Annulla’ (in una qualunque delle schermate che appaiono) si ritorna al menu iniziale. Se si sceglie invece un file e si preme su ‘Apri’, il programma controlla che i dati siano relativi a un segnale grezzo; per farlo controlla che la prima parola del titolo del file sia ‘RAW’: in caso negativo ricompare la schermata di scelta del file e nella Command Window viene scritto ‘Ripetere la scelta: Il file scelto non è un RAW’; in caso positivo il programma legge il file, dal titolo trova con quale sensore si è acquisito il segnale, calcola la frequenza di campionamento e corregge i dati letti: in alcuni file sono scritti dei dati superflui, che vengono cancellati, come data o tempo di acquisizione o in altri non è presente la linea del tempo, che viene quindi ricostruita, considerando una frequenza di campionamento di 1280 Hz.

Ogni volta che viene selezionato un file vengono fatti diversi controlli:

- I file scelti devono essere diversi: il programma controlla che tutti i file abbiano un titolo diverso; se si sceglie un file con lo stesso titolo di uno precedentemente scelto, la scelta deve essere rifatta e nella Command Window viene scritto 'Ripetere la scelta: File già scelto';
- I file devono contenere dati ottenuti tutti dallo stesso sensore: il programma controlla che i sensori letti nei titoli siano gli stessi; se si sceglie un file con dati acquisiti con un sensore diverso da quello del primo file scelto, la scelta deve essere rifatta e nella Command Window viene scritto 'Ripetere la scelta: File di un sensore diverso dai precedenti';
- I file devono contenere dati acquisiti con la stessa frequenza di campionamento: il programma controlla le frequenze di campionamento di tutti i file; se si sceglie un file con frequenza di campionamento diversa dal primo file scelto, la scelta deve essere rifatta e nella Command Window viene scritto 'Ripetere la scelta: Frequenza di campionamento diversa dalle precedenti';
- I file devono avere lo stesso numero di campionamenti; se si sceglie un file con un numero di campionamenti diversi dal primo file scelto, la scelta deve essere rifatta e nella Command Window viene scritto 'Ripetere la scelta: File di lunghezze diverse'.

Ogni volta che la selezione del file avviene correttamente, superando tutti i controlli, compare una schermata come quella rappresentata in Figura 4.2, in cui si chiede la velocità dei motori in rpm e la potenza assorbita in kW. Il programma controlla i valori inseriti dall’utente, se essi sono reali e compresi tra 0 e 10000: in caso affermativo l’utente può proseguire con la selezione del file successivo, in caso negativo la schermata ricompare e nella Command Window viene scritto 'Ripetere la scelta: Valori errati'. Nella stessa schermata, se invece di inserire i dati e premere su ‘OK’, si preme su ‘Cancel’, si ritorna al menu iniziale e tutte le selezioni fatte precedentemente non vengono considerate.

Il valore di potenza inserito è utilizzato per portare virtualmente tutti i segnali alla stessa potenza, moltiplicando per 900 kW il segnale grezzo e dividendolo per la potenza inserita dall’utente; è un modo molto semplice per provare di avere un confronto più corretto tra segnali ottenuti con potenze diverse della macchina.

Se tutti i file sono stati selezionati correttamente, per ognuno viene determinata in modo preciso la velocità dei motori; non serve quindi inserire la velocità esatta nel menu raffigurato in Figura 4.2, perché poi viene corretta seguendo i seguenti passaggi:

- Partendo dalla velocità inserita nel menu di Figura 4.2, viene calcolata la frequenza caratteristica della coppia veloce;

- In un range di 10 Hz attorno alla frequenza calcolata, viene trovato il valore massimo nello spettro di ampiezza in accelerazione; la frequenza in cui si ha il massimo è la frequenza reale della coppia veloce;
- Dalla frequenza trovata, si risale alla velocità reale della macchina;

La frequenza della coppia veloce è intorno ai 420 Hz, ma si potrebbero avere dei segnali che hanno frequenza di campionamento troppo bassa per avere quella frequenza nello spettro; per questo è presente un controllo che permette di determinare la velocità dei motori cercando la terza armonica della coppia lenta, con frequenza intorno ai 100 Hz, se la frequenza di campionamento è troppo bassa.

Trovate le velocità dei motori, vengono calcolate le frequenze caratteristiche dei componenti della macchina leggendo da un file Excel i loro valori, calcolati considerando i motori funzionanti a una velocità di 1 Hz, e moltiplicandoli per la velocità più bassa calcolata tra tutti i segnali.

Con i segnali selezionati e le velocità dei motori è ora possibile applicare il procedimento descritto alla fine del Capitolo 3.3, per poter eliminare la dipendenza dalla velocità nei vari segnali e poter confrontare i loro spettri in accelerazione e il loro spettro di potenza.

Finita quindi la selezione dei vari file si apre un menu con quattro opzioni: graficare lo spettro di ampiezza in accelerazione di tutti i segnali, graficare lo spettro di potenza di tutti i segnali, chiudere tutte le finestre aperte o tornare al menu iniziale.

Scegliendo la prima opzione si apre una schermata come quella rappresentata in Figura 4.29; in questo caso si sono graficati solo 3 segnali, ma è possibile arrivare fino a 10.

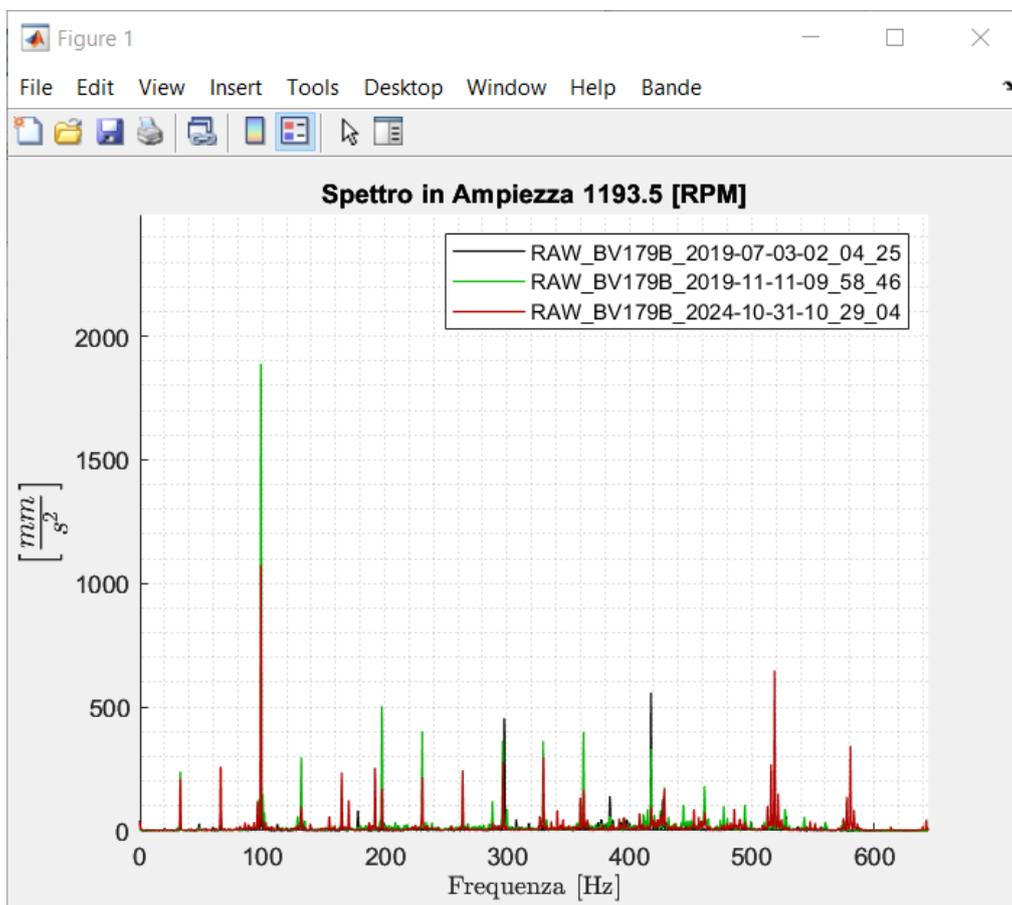


Figura 4.29: schermata per visualizzare gli spettri in accelerazione di tre segnali.

Il titolo del grafico è quindi ‘Spettro in Ampiezza’, seguito dal valore della velocità più bassa dei motori determinata tra quelle dei segnali analizzati in rpm e nella legenda ad ogni curva è assegnato il titolo del file analizzato.

È possibile utilizzare le stesse funzioni descritte nel capitolo degli spettri: disegnare le frequenze caratteristiche e le loro armoniche e subarmoniche delle componenti della macchina, disegnare le armoniche e subarmoniche o le bande laterali di una frequenza scelta dall’utente o mostrare la distanza tra due punti del grafico.

Se si sceglie invece la seconda opzione del menu si apre una schermata come quella rappresentata in Figura 4.30; i segnali analizzati sono sempre gli stessi, ma si confrontano i loro spettri di potenza calcolati con la funzione pwelch di Matlab.

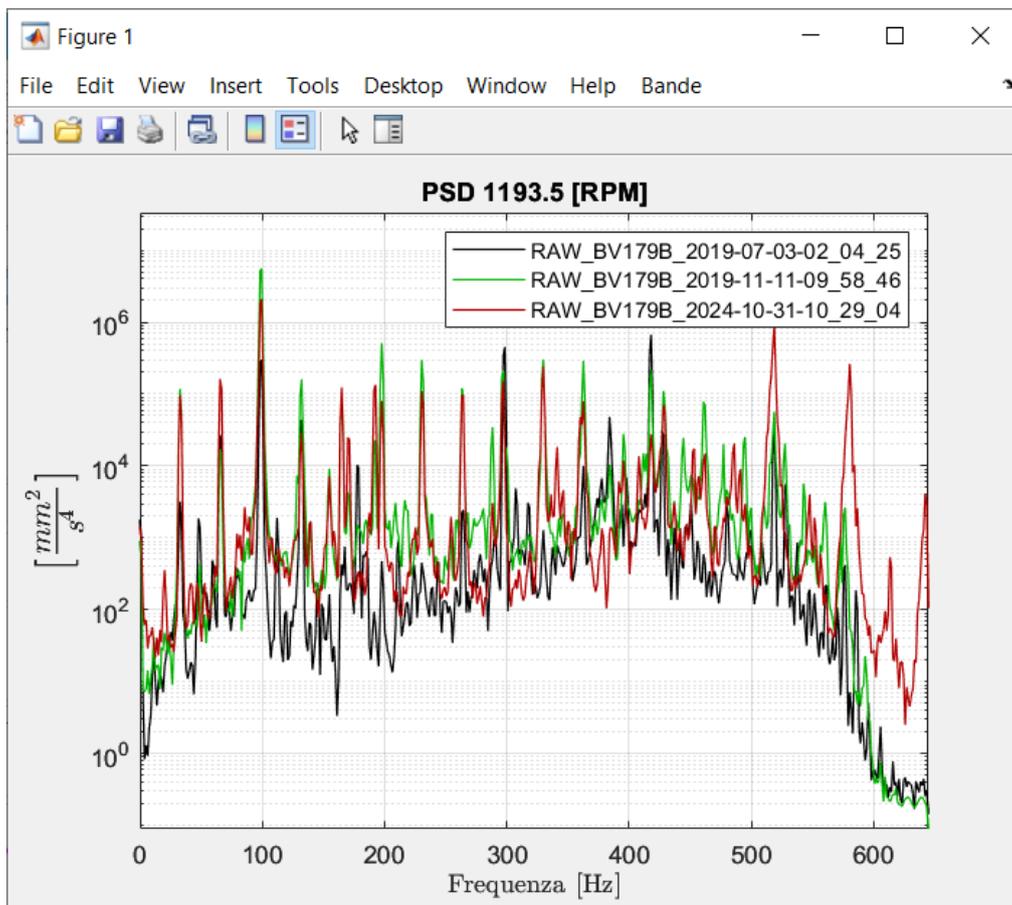


Figura 4.30: schermata per visualizzare gli spettri di potenza di tre segnali.

Il titolo del grafico è quindi ‘PSD’ seguito dalla velocità più bassa dei motori calcolata tra quelle dei segnali analizzati in rpm e nella legenda ad ogni curva è assegnato il titolo del file analizzato.

Anche in questa schermata è possibile utilizzare le stesse funzioni descritte nel capitolo degli spettri: disegnare le frequenze caratteristiche e le loro armoniche e subarmoniche delle componenti della macchina, disegnare le armoniche e subarmoniche o le bande laterali di una frequenza scelta dall’utente o mostrare la distanza tra due punti del grafico.

Nel grafico in cui si confrontano gli spettri, l’asse verticale è in scala lineare per avere una rappresentazione simile a quella dei singoli spettri descritta nel capitolo 4.1.2.1, mentre nel grafico in cui si confrontano gli spettri di potenza l’asse verticale è in scala semilogaritmica per rendere più evidenti le differenze tra i vari segnali.

# 5 Risultati

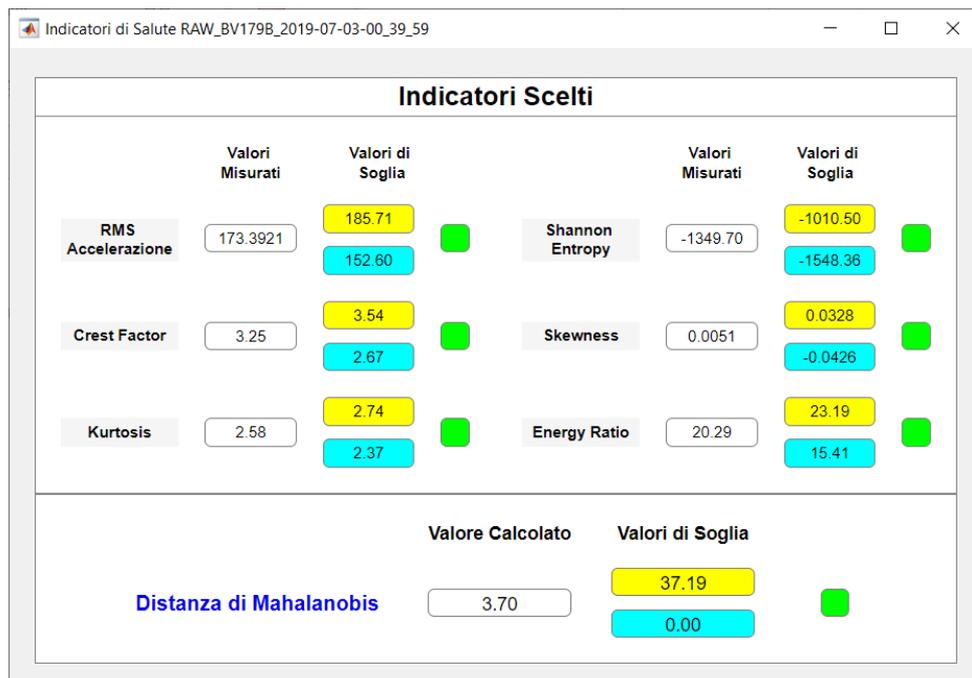
I primi dati dalla macchina si sono acquisiti nel 2019, da luglio a dicembre (primo periodo di osservazione), e poi da ottobre del 2024 fino a febbraio 2025 (secondo periodo di osservazione); analizzati i vari segnali acquisiti, con il programma creato su Matlab, si sono ipotizzate tre condizioni di funzionamento diverse (restano ipotesi dal momento che non ci sono stati dei controlli a confermarle):

- Dall' 1 al 3 luglio del 2019 si è ipotizzato che la macchina fosse in buone condizioni, in quanto nelle varie analisi non è emerso nessun difetto evidente; i dati ottenuti in questo periodo sono il punto di riferimento per il confronto con i segnali acquisiti nei periodi successivi;
- Dal 4 luglio fino alla fine del 2019 si è ipotizzato un difetto di disallineamento tra il pignone e la corona;
- Da ottobre del 2024 a febbraio del 2025 si è ipotizzato un difetto sul cuscinetto dell'albero intermedio del riduttore.

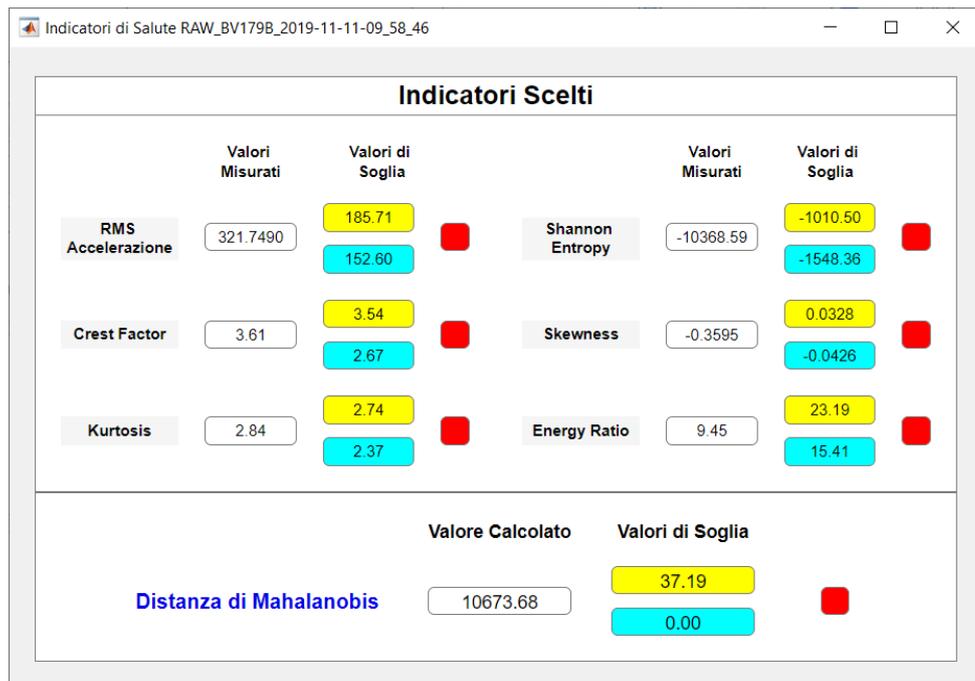
Le analisi che hanno portato a ipotizzare i due difetti sono quindi descritte in questo capitolo, per mostrare in che modo è possibile utilizzare il programma per stimare le condizioni della macchina.

## 5.1 Primo Periodo di Osservazione

Tra i segnali acquisiti nei primi tre giorni di luglio e i segnali acquisiti nel resto del 2019 si hanno delle differenze, soprattutto nei dati acquisiti con i sensori montati sull'albero del pignone (BV179A e BV179B). La differenza la si nota già negli indicatori: in Figura 5.1a sono raffigurati gli indicatori di un segnale acquisito il 3 luglio e si nota come essi siano tutti all'interno delle soglie, mentre in Figura 5.1b sono raffigurati gli indicatori di un segnale acquisito l'11 novembre e si nota come essi siano tutti fuori dalle soglie.



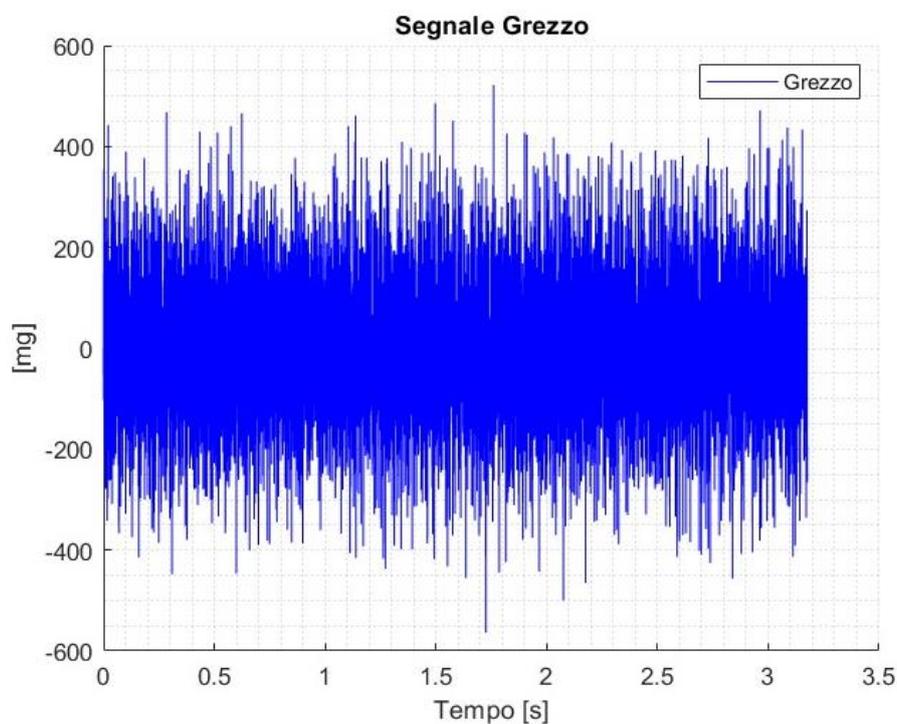
a)



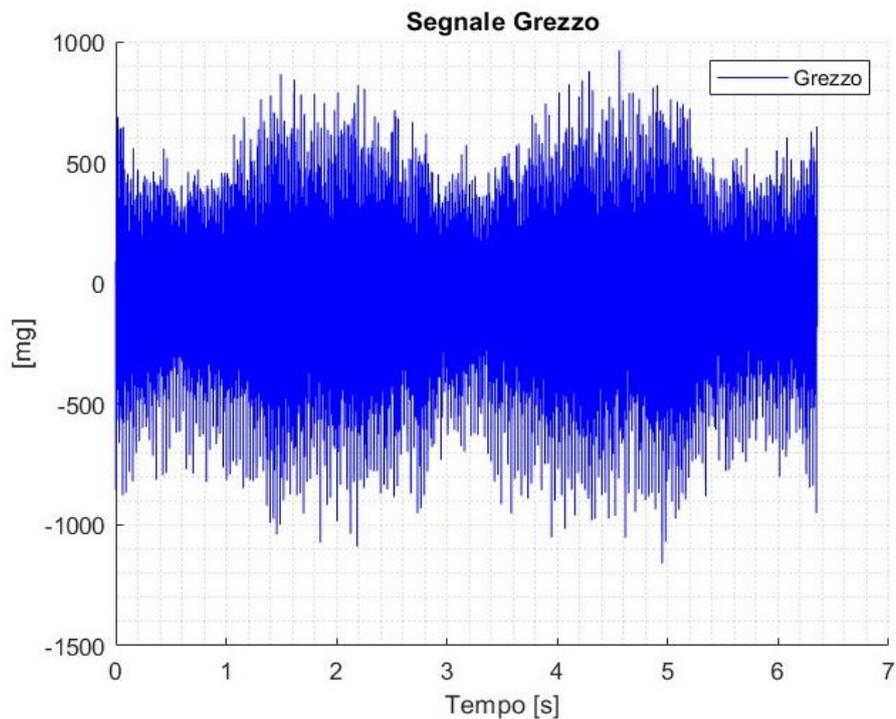
b)

Figura 5.1: indicatori di due segnali acquisiti con il sensore BV179B il 3 luglio 2019 (a) e l'11 novembre 2019 (b).

Essendo tutti gli indicatori mostrati in Figura 5.1b fuori dalle soglie, serve approfondire le condizioni di funzionamento della macchina, facendo analisi con i grafici. Si può partire dal segnale grezzo: in Figura 5.2a è rappresentato il segnale grezzo del 3 luglio del 2019 e in Figura 5.2b è rappresentato il segnale grezzo del 4 luglio del 2019.



a)

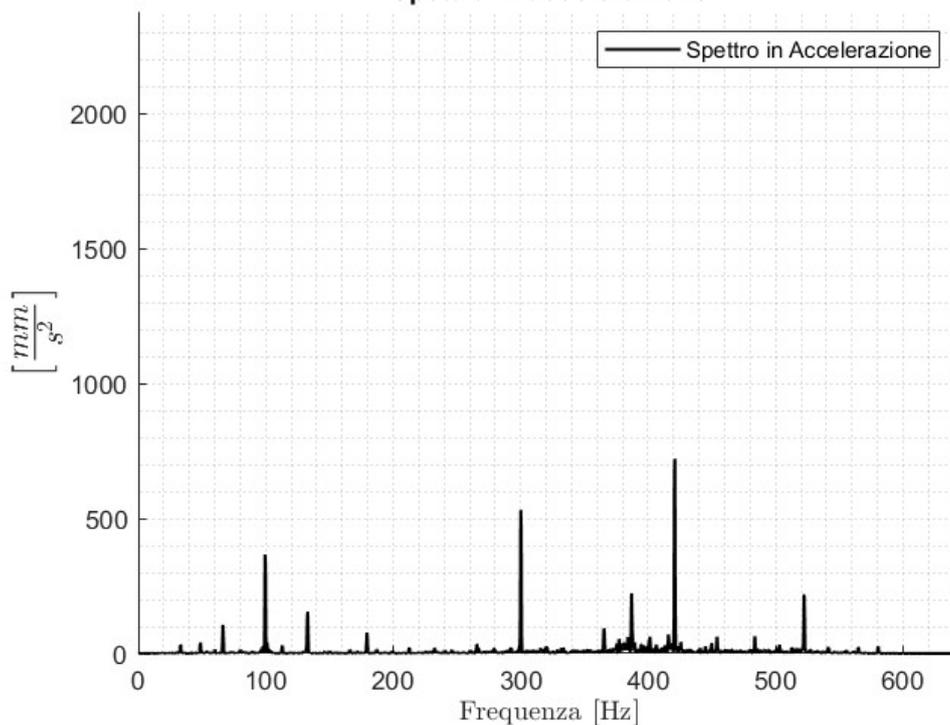


b)

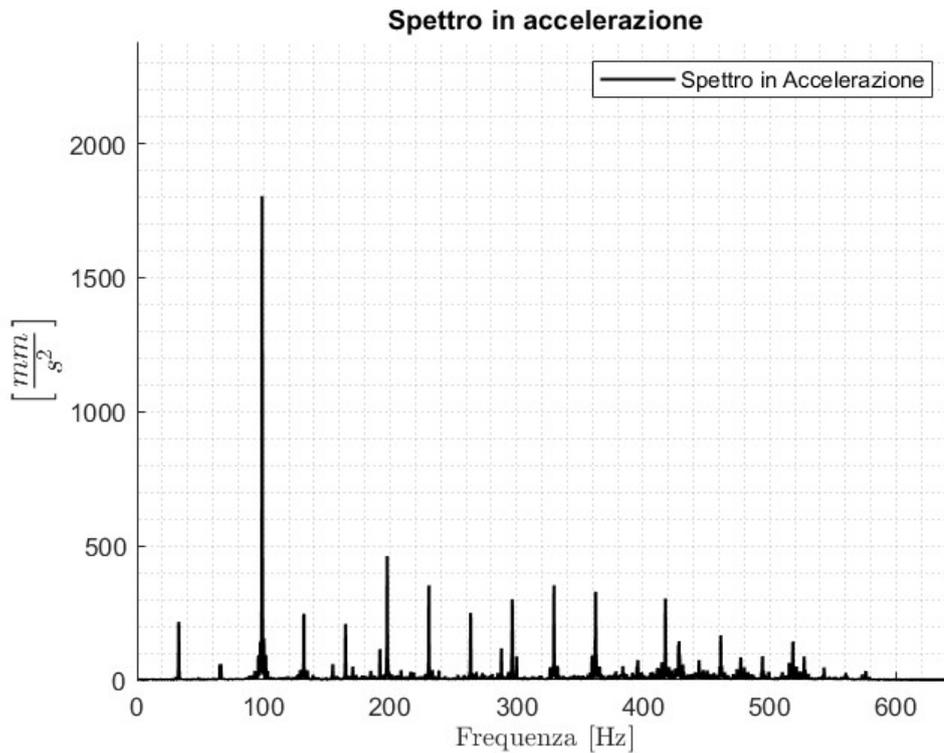
Figura 5.2: segnale grezzo del 3 luglio del 2019 (a) e segnale grezzo dell'11 novembre del 2019 (b).

Il grezzo di solito fornisce poche informazioni, ma in questo caso, nel segnale acquisito a novembre, si nota un'ampiezza che oscilla nel tempo con picchi molto più alti rispetto al segnale acquisito a luglio, il quale ha invece un'ampiezza che resta più o meno costante nel tempo. Questo fenomeno di modulazione lo si nota in tutti i segnali acquisiti dal 4 luglio del 2019 fino alla fine dell'anno. Per ottenere ulteriori informazioni è possibile analizzare gli spettri in accelerazione dei due segnali, rappresentati nelle Figure 5.3a (segnale di luglio) e 5.3b (segnale di novembre).

#### Spettro in accelerazione



a)



b)

Figura 5.3: spettri in accelerazione dei segnali acquisiti il 3 luglio del 2019 (a) e l'11 novembre del 2019 (b).

Osservando i due spettri si notano valori molto più elevati nel segnale di novembre nelle frequenze multiple di 33 Hz; tali frequenze sono evidenziate in Figura 5.4, graficando le prime 16 armoniche della frequenza di ingranamento tra pignone e corona.

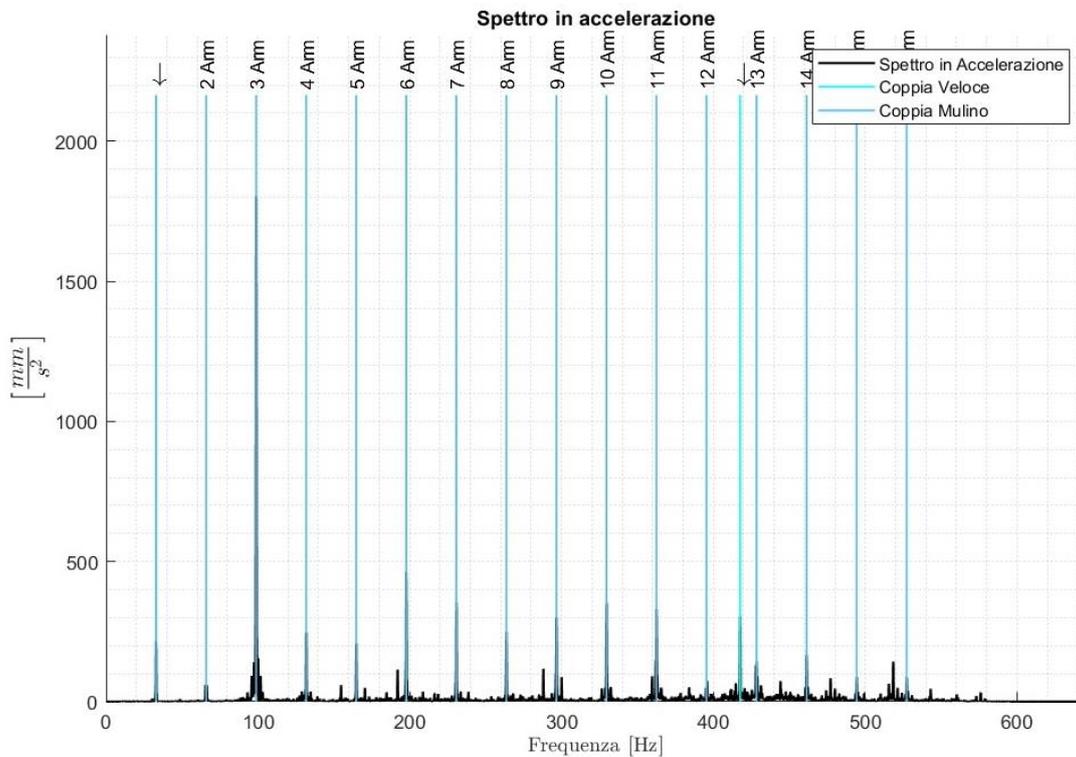


Figura 5.4: armoniche della frequenza di ingranamento tra pignone e corona.

In Figura 5.4 è evidenziata anche la frequenza di ingranamento della ruota dell'albero lento con la ruota dell'albero intermedio.

Osservando il picco presente a circa 100 Hz si notano anche delle bande laterali, evidenziate in Figura 5.5. Le bande sono disegnate a una distanza di circa 1.4 Hz, corrispondente alla velocità di rotazione dell'albero del pignone.

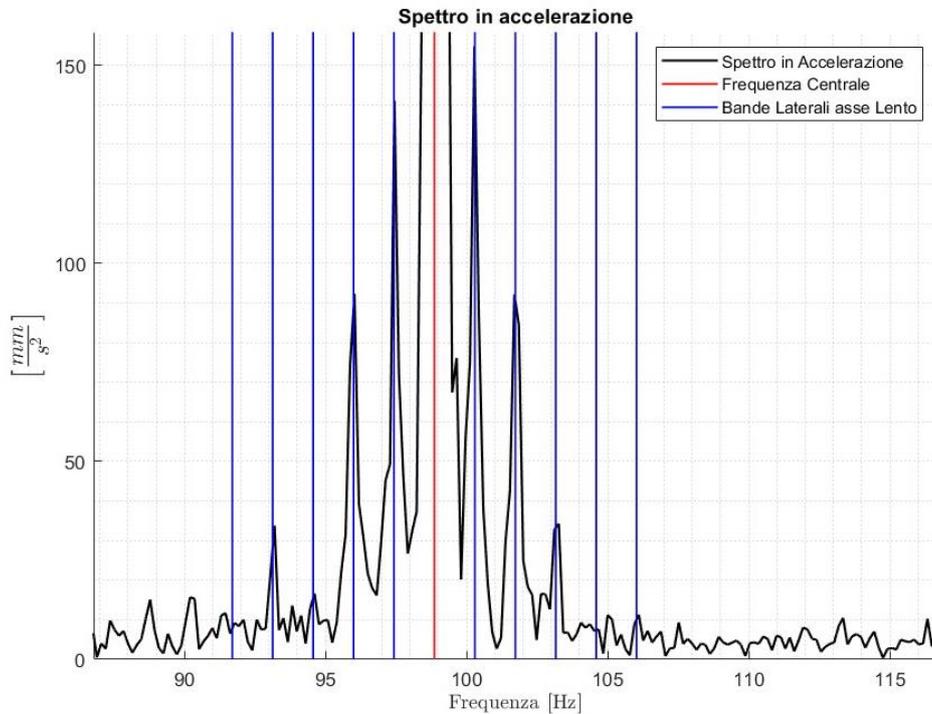


Figura 5.5: bande laterali disegnate intorno al picco presente a circa 100 Hz a una distanza di circa 1.4 Hz.

Nel segnale è quindi presente modulazione attorno alla terza armonica della frequenza di ingranamento di pignone e corona, in una banda limitata tra circa 90 Hz e 105 Hz.

Considerando quindi:

- Valori molto elevati nello spettro alle armoniche della frequenza di ingranamento tra pignone e corona;
- Bande laterali attorno alla terza armonica della frequenza di ingranamento tra pignone e corona, distanti della frequenza di rotazione dell'albero del pignone;
- Il modo con cui un difetto in un ingranaggio si presenta nello spettro (descritto nel capitolo 2.5),

è possibile ipotizzare un difetto distribuito su più denti del pignone; i tecnici di Sacmi affermano che è comune che il pignone e la corona siano disallineati, per via del loro peso e per il fatto che la trasmissione è composta da numerosi elementi, per cui si può supporre che questo sia il difetto che è stato evidenziato dallo spettro.

È possibile utilizzare altre due analisi per supportare l'ipotesi:

- Applicando la demodulazione al segnale del novembre del 2019, tra 90 Hz e 110 Hz, con risultato quello rappresentato in Figura 5.6: si notano dei picchi distanziati di 1.4 Hz, che è anche la frequenza di rotazione del pignone;
- Confrontando i cepstrum del segnale del luglio del 2019 e del segnale del novembre del 2019, rappresentati rispettivamente in Figura 5.7a e 5.7b: dal confronto dei due cepstrum si

notano, in entrambi i casi, dei picchi alle quefrenze multiple di 0.03 secondi, ovvero multiple dell' inverso della frequenza di ingranamento tra pignone e corona (circa 33 Hz), ma nel segnale di novembre (5.7b) tali picchi sono più alti e molto più evidenti, con la presenza di picchi aggiuntivi alle quefrenze multiple di 0.7 secondi, ovvero multiple della frequenza di rotazione del pignone (circa 1.4 Hz); la componente di ingranamento tra pignone e corona nel cepstrum del segnale del novembre del 2019 è quindi molto più evidente.

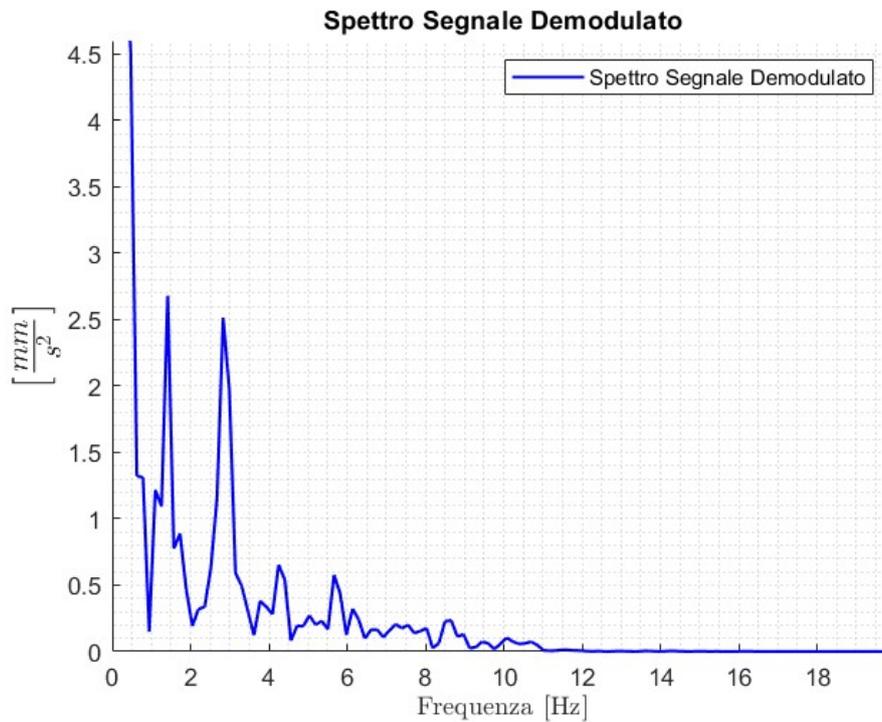
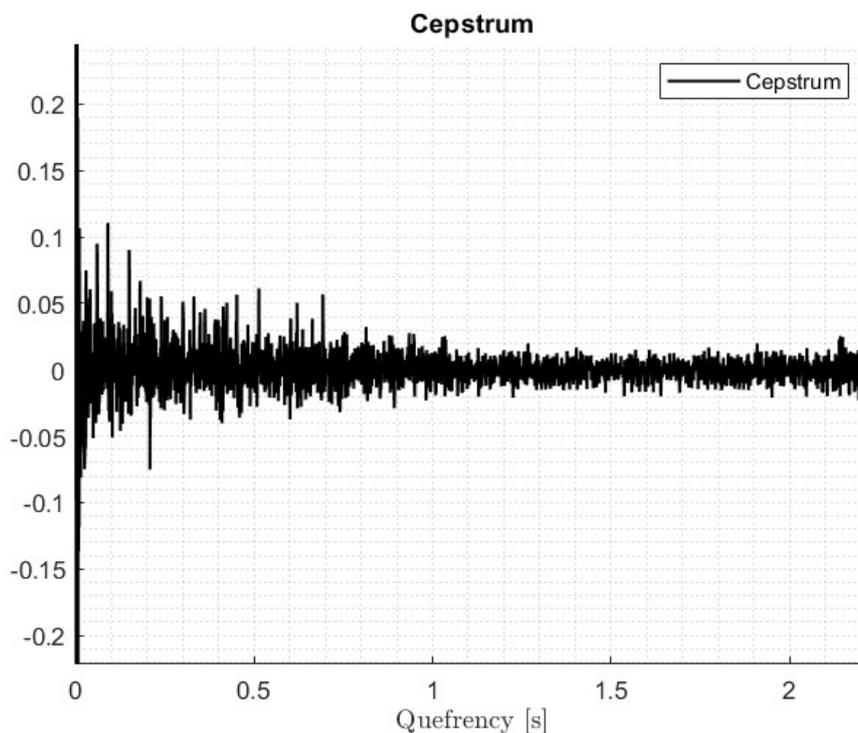
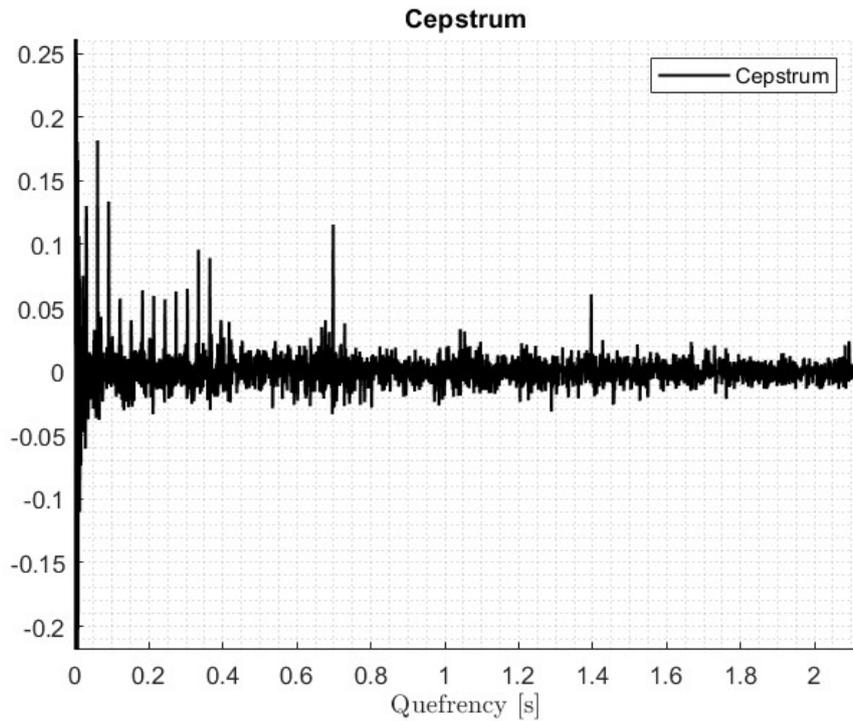


Figura 5.6: risultato della demodulazione, in una banda compresa tra i 90 Hz e i 110 Hz, del segnale acquisito a novembre del 2019.



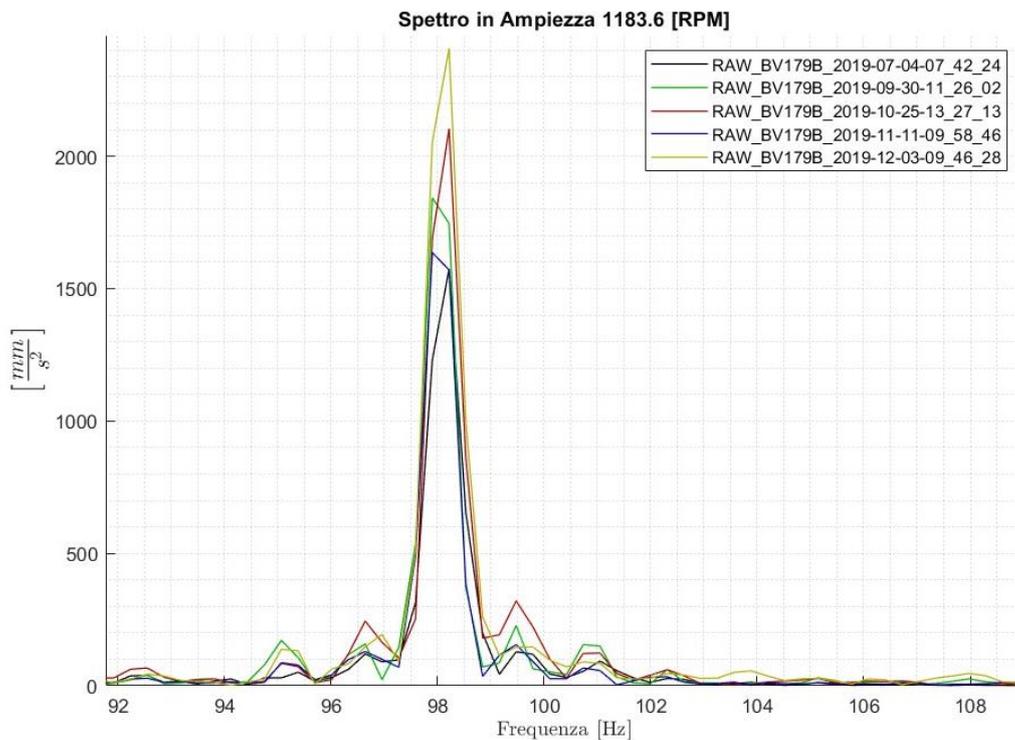
a)



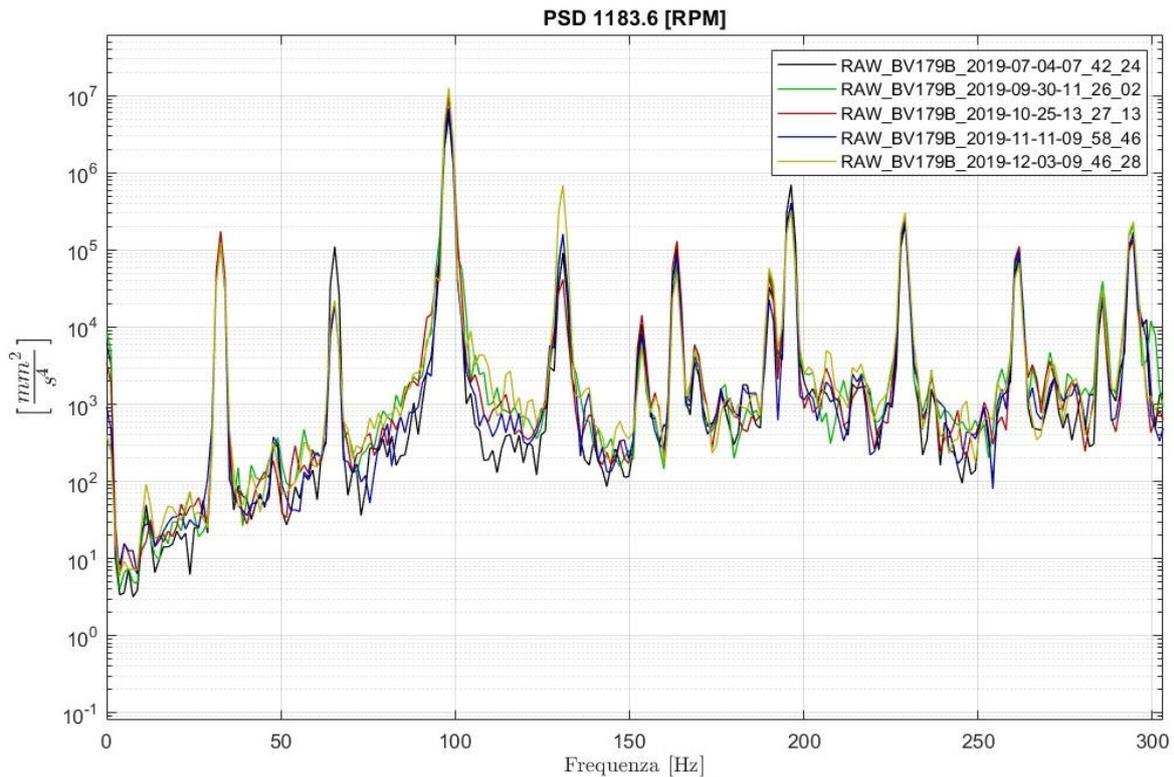
b)

Figura 5.7: confronto dei cepstrum del segnale del luglio del 2019 (a) e del segnale del novembre del 2019 (b).

Può risultare utile capire anche nel tempo come è cambiato il difetto; in Figura 5.8 sono rappresentati lo spettro in ampiezza, tra circa 90 Hz e 110 Hz (Figura 5.8a), e lo spettro di potenza, tra 0 e circa 300 Hz (Figura 5.8b), di 5 segnali acquisiti il 4 luglio 2019, il 30 settembre 2019, il 25 ottobre 2019, l'11 novembre 2019 e il 3 dicembre 2019 (gli intervalli nella rappresentazione sono scelti per rendere più chiaro ed evidente il confronto).



a)



b)

Figura 5.8: confronto di cinque segnali per osservare la variazione del difetto nel tempo, utilizzando il loro spettro di ampiezza (a) e il loro spettro di potenza (b).

Confrontando i segnali le differenze sono minime, per cui si può supporre che dal 4 luglio fino a dicembre del 2019 le condizioni della macchina siano rimaste pressoché invariate, con un difetto di disallineamento tra pignone e corona.

## 5.2 Secondo Periodo di Osservazione

Nel periodo che va da ottobre del 2024 al febbraio del 2025 si sono notate delle differenze, nei segnali acquisiti con i sensori montati sul riduttore e sui cuscinetti dell'albero del pignone, rispetto ai segnali acquisiti dall'1 al 3 luglio del 2019 con gli stessi sensori. Possiamo quindi analizzare nel dettaglio due segnali acquisiti dal sensore BV176B il 3 luglio del 2019 e l'11 dicembre del 2024.

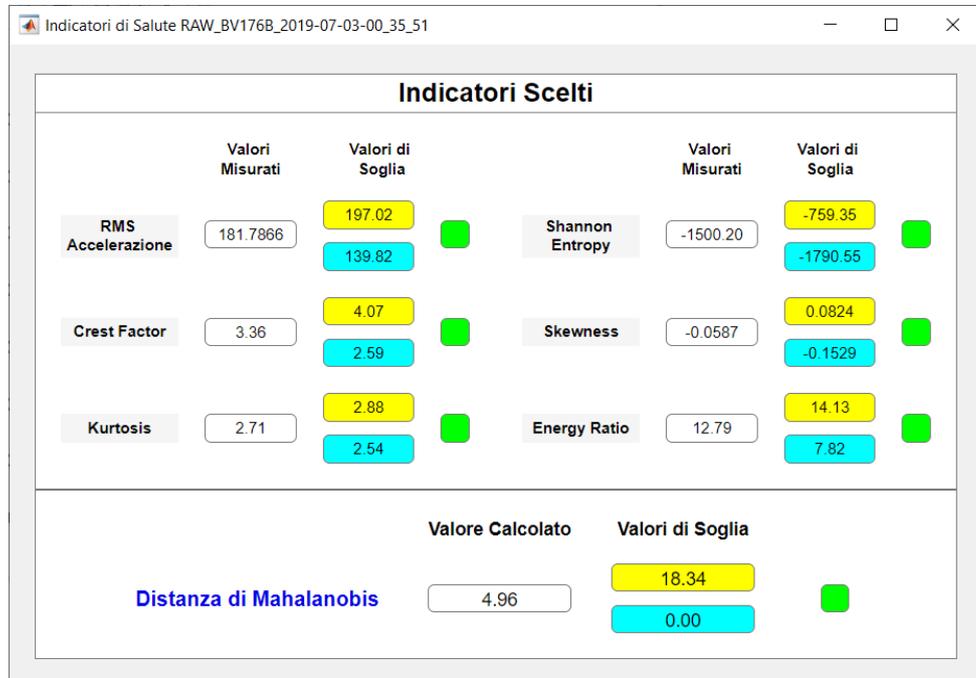
La prima analisi è con gli indicatori, rappresentati in Figura 5.9: in Figura 5.9a sono rappresentati gli indicatori del segnale di luglio e in Figura 5.9b sono rappresentati gli indicatori del segnale di febbraio; nel primo caso si nota come tutti i valori calcolati siano all'interno delle soglie impostate, ma nel secondo caso RMS in accelerazione, curtosi, skewness e energy ratio sono fuori dalle soglie.

Serve quindi approfondire l'analisi utilizzando altre tecniche; il segnale grezzo di per sé non fornisce alcuna informazione utile, per cui si possono analizzare gli spettri in accelerazione: in Figura 5.10 sono rappresentati lo spettro in accelerazione del segnale acquisito a luglio del 2019 (Figura 5.10a) e lo spettro in accelerazione del segnale acquisito a dicembre del 2024 (Figura 5.10b); tra i due segnali si notano numerose differenze:

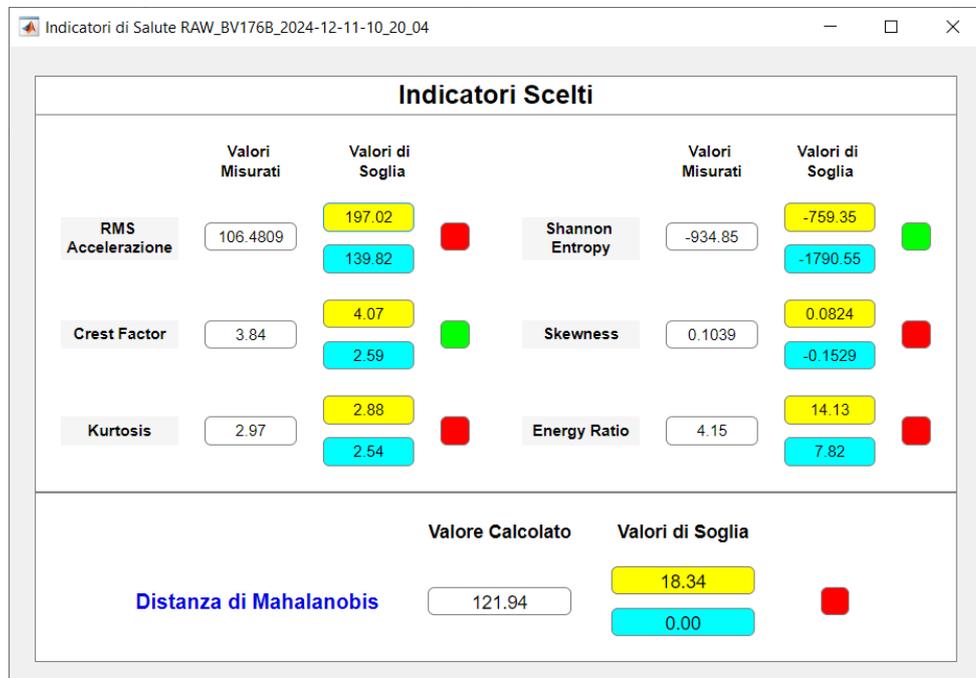
- In generale lo spettro del segnale di luglio ha picchi più alti, nelle armoniche della frequenza di ingranamento di pignone e corona (circa 33 Hz e multipli), nel picco alla frequenza di

ingranamento dell'ingranaggio veloce (circa 420 Hz) e alla frequenza di circa 520 Hz (tale frequenza la si è attribuita alla decima armonica della frequenza caratteristica dell'anello interno del cuscinetto dell'albero intermedio del riduttore);

- Il segnale del dicembre del 2024 ha numerosi picchi non presenti nel segnale di luglio del 2019, come quelli intorno ai 170 Hz e quelli intorno ai 360 Hz;

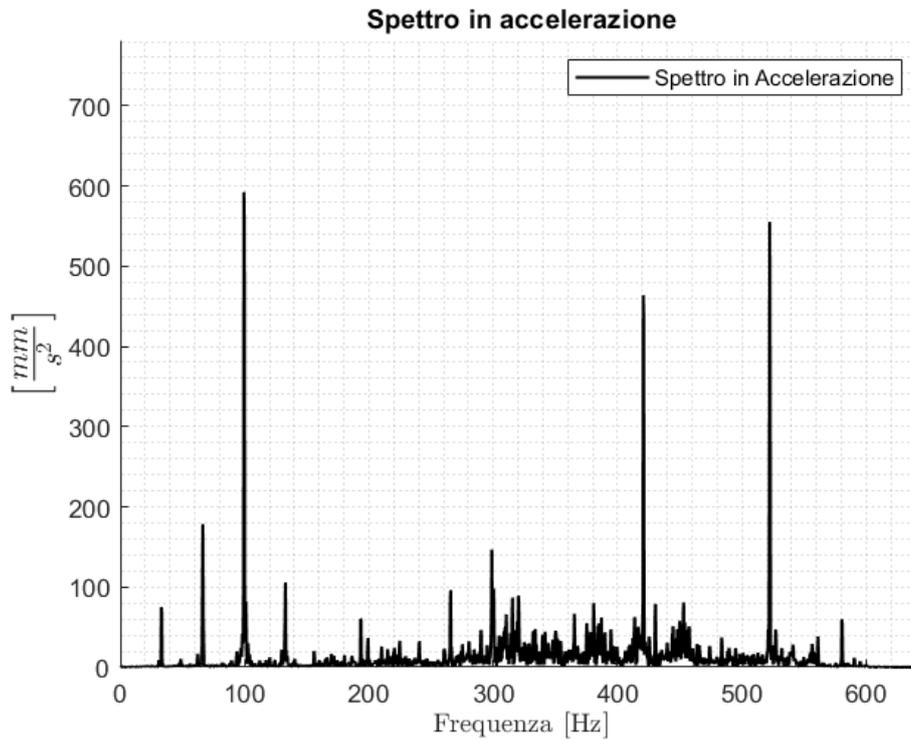


a)

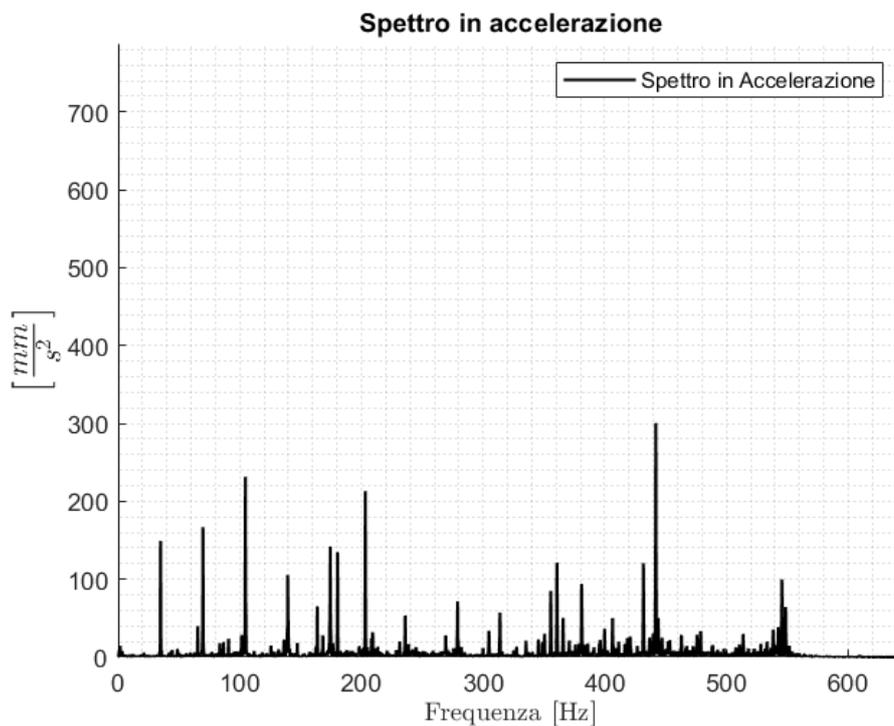


b)

Figura 5.9: indicatori di due segnali acquisiti con il sensore BV176B il 3 luglio 2019 (a) e l'11 dicembre 2024 (b).



a)



b)

Figura 5.10: : spettri in accelerazione dei segnali acquisiti il 3 luglio del 2019 (a) e l'11 novembre del 2019 (b).

I segnali analizzati fino ad ora avevano una banda di acquisizione impostata sul quadro della macchina compresa tra 0.5 e 500 Hz. In questo caso, però, risulta interessante analizzare segnali con frequenze di campionamento superiori, arrivando fino a una banda compresa tra 0.5 e 1000 Hz; in Figura 5.11 è quindi rappresentato lo spettro di un segnale, acquisito sempre l'11 dicembre 2024, ma con frequenza di campionamento circa doppia rispetto ai segnali precedentemente analizzati.

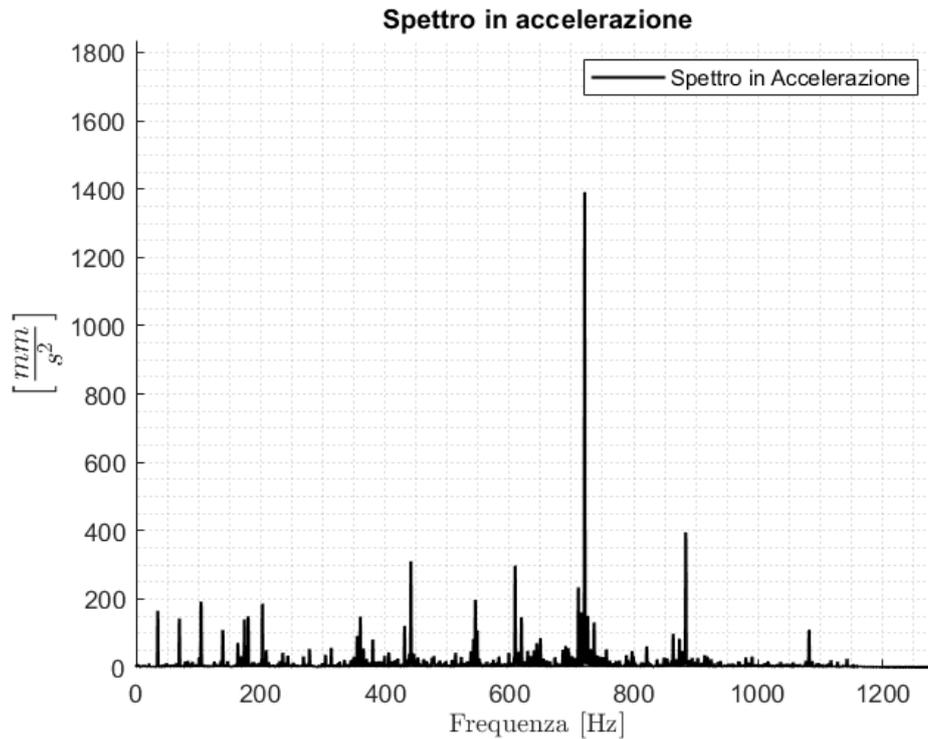


Figura 5.11: spettro in accelerazione del segnale acquisito l'11 dicembre 2024 con banda compresa tra 0.5 e 1000 Hz.

Superati i 500 Hz si notano numerosi picchi, tra cui uno a 720 Hz che domina lo spettro; è necessario quindi determinare ogni picco dello spettro a quale componente appartiene; si può partire dagli ingranaggi, graficandone le bande (Figura 5.12) e supponendo che essi siano in buone condizioni, da un lato perché è stata fatta la revisione con liquidi penetranti a settembre del 2024, dall'altro perché i picchi alle loro frequenze caratteristiche, non presentano modulazione.

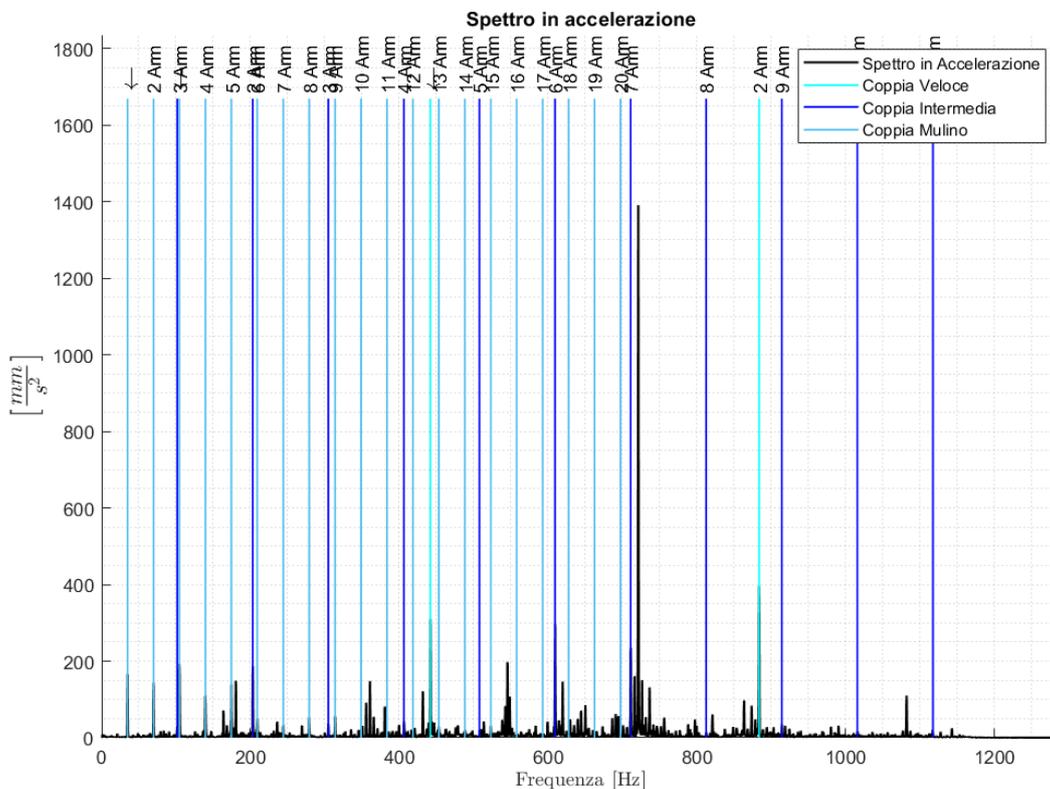


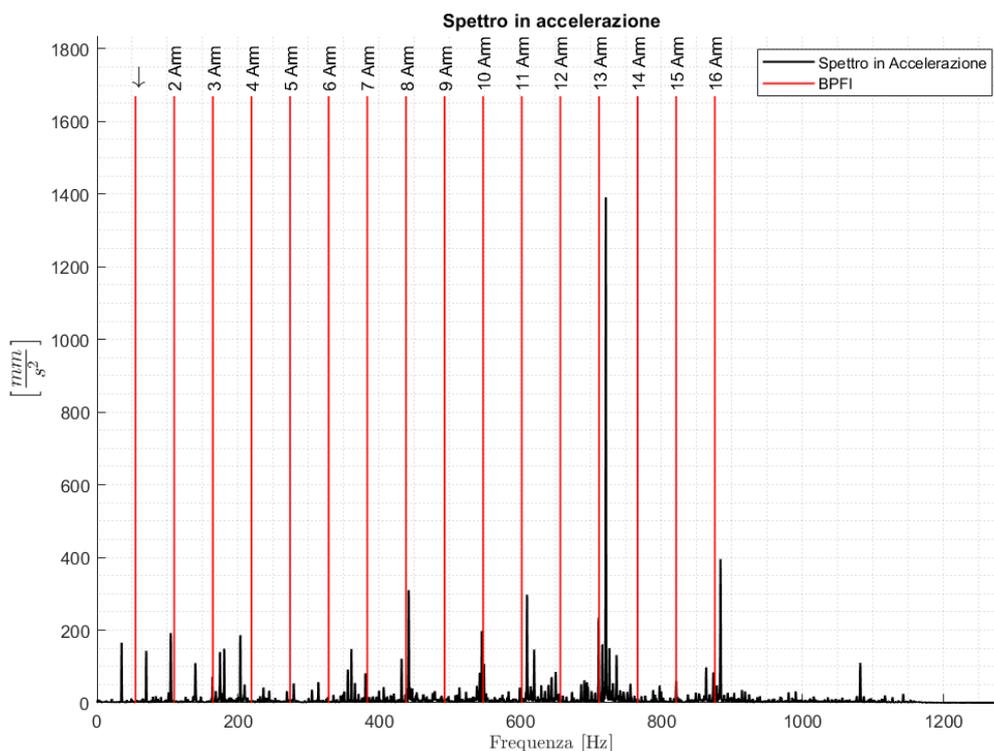
Figura 5.12: spettro in accelerazione con evidenziate le armoniche degli ingranaggi.

Le armoniche raffigurate in Figura 5.12 sono le prime due dell'ingranaggio veloce, le prime 11 dell'ingranaggio intermedio e le prime 20 dell'ingranaggio lento; molti dei picchi presenti nello spettro sono quindi coperti dalle bande disegnate, ma altri restano ignoti, come quelli a 162 Hz, 180 Hz, 360 Hz, 550 Hz, 720 e 1080 Hz. Questi ultimi, di fatto, sono riconducibili ad armoniche delle frequenze caratteristiche del cuscinetto montato sull'albero intermedio del riduttore:

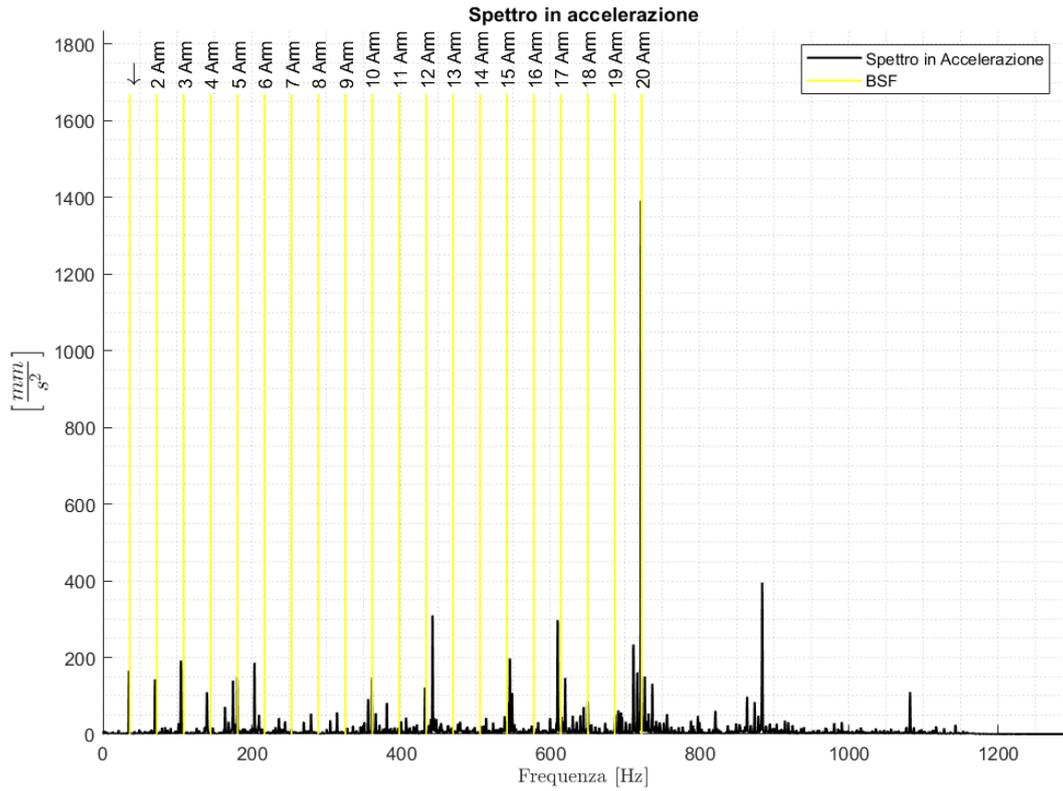
- Graficando le prime 16 armoniche della frequenza caratteristica dell'anello interno (Figura 5.13a) si spiegano, tra i vari picchi, anche quelli a 162 Hz (terza armonica) e 550 Hz (decima armonica); il picco a 550 Hz è presente anche in Figura 5.10a (la frequenza in quel caso è un po' più bassa per il fatto che la macchina funzionava a velocità minore), per cui si può supporre che l'anello interno non sia un componente difettoso;
- Graficando le prime 20 armoniche della frequenza caratteristica dei corpi rotolanti (Figura 5.13b), si spiegano, tra i vari picchi, anche quelli a 180 Hz (quinta armonica), a 360 Hz (decima armonica), a 720 Hz (ventesima armonica) e a 1080 Hz (trentesima armonica). Tutti i picchi coperti dalle armoniche della frequenza caratteristica dei corpi rotolanti non sono presenti nello spettro rappresentato in Figura 5.10a, per cui si può supporre la presenza di un difetto su tali componenti.

Sempre sullo spettro in accelerazione, è possibile osservare una modulazione distribuita su un range di frequenze molto ampio, dai 300 ai 900 Hz. La modulazione è analizzata in Figura 5.14:

- In Figura 5.14a si nota la presenza di numerosi picchi tra i 300 e i 900 Hz;
- In Figura 5.14b sono disegnate 20 bande laterali, distanti della frequenza di rotazione dell'albero intermedio del riduttore, partendo dalla frequenza di uno dei picchi (circa 710 Hz). Si può notare come praticamente tutti i picchi dai 600 agli 800 Hz, presenti nello spettro, si trovino in corrispondenza di una delle bande disegnate. Il risultato lo si ottiene anche spostandosi in altre zone dello spettro, come ad esempio tra i 300 e i 500 Hz (Figura 5.14c).

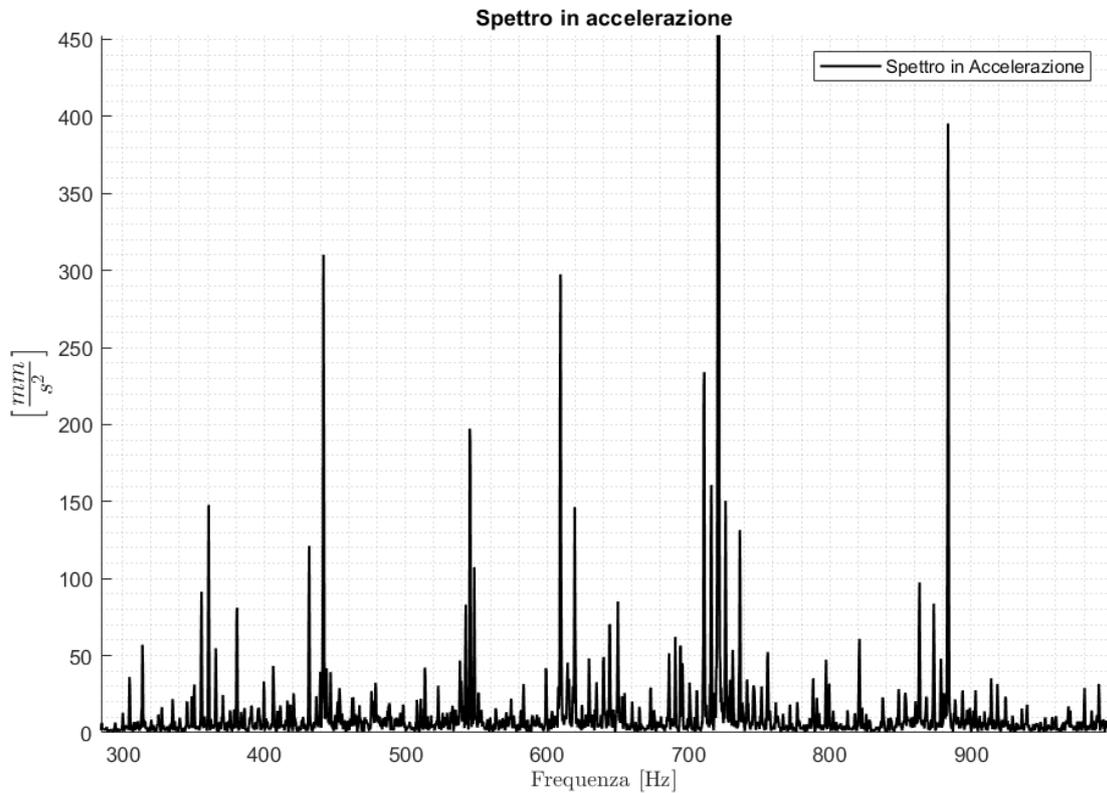


a)

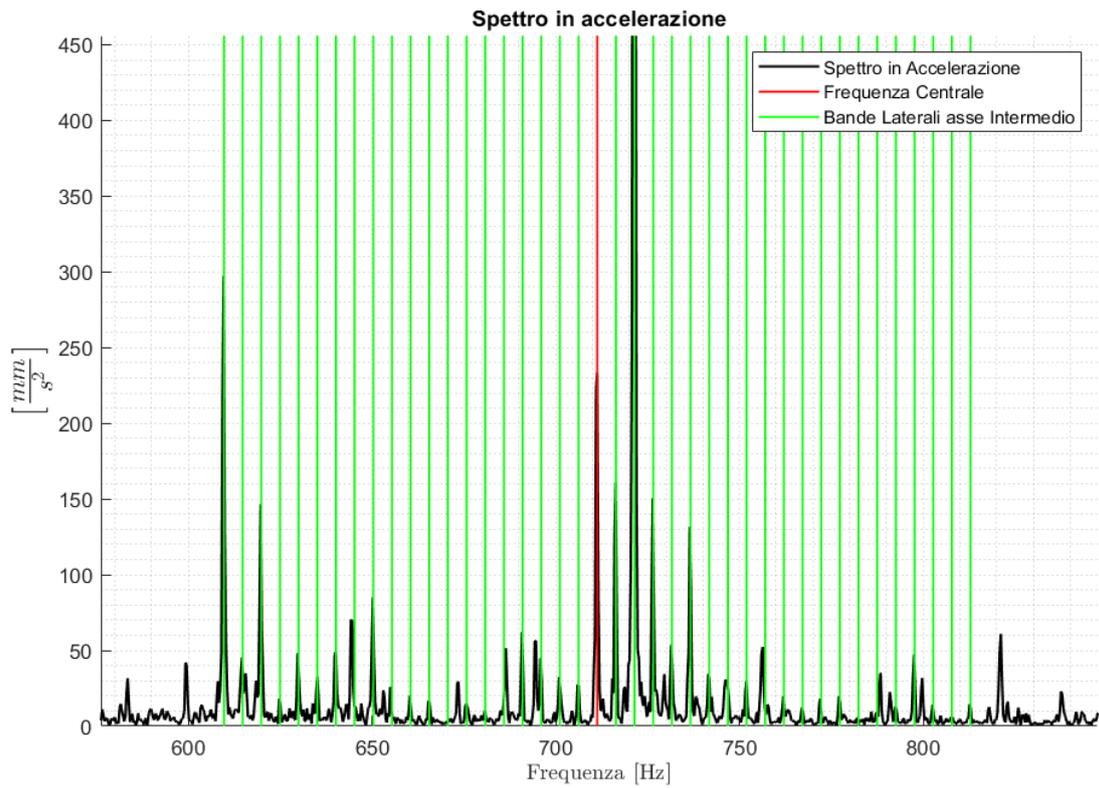


b)

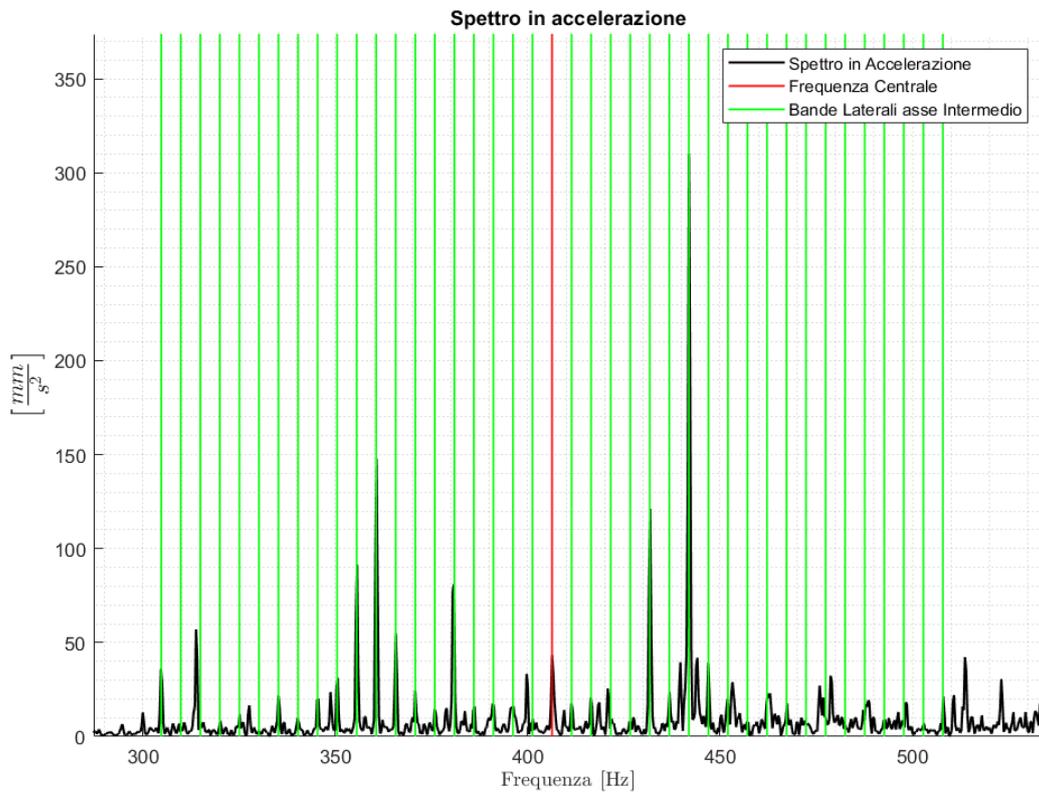
Figura 5.13: spettro in ampiezza con evidenziate le armoniche della frequenza caratteristica dell'anello interno del cuscinetto dell'albero intermedio del riduttore.



a)



b)



c)

Figura 5.14: analisi modulazione, con ingrandimento nella banda tra i 300 e i 900 Hz (a), con bande laterali tra i 600 e gli 800 Hz (b) e con bande laterali tra i 300 e i 500 Hz (c).

Considerando quindi la presenza di picchi nello spettro in corrispondenza di numerose armoniche della frequenza caratteristica dei corpi rotolanti del cuscinetto montato sull'albero intermedio del riduttore e la presenza di modulazione su un range di frequenza molto ampio, con picchi distanti della frequenza di rotazione dell'albero intermedio del riduttore, si può ipotizzare un difetto sul cuscinetto dell'albero intermedio del riduttore.

A supporto dell'ipotesi fatta è possibile utilizzare anche altre analisi:

- Demodulazione: in Figura 5.15 è mostrato il risultato della demodulazione in una banda compresa tra i 690 e i 750 Hz (scelta manualmente senza l'utilizzo del curtogramma); è possibile notare numerosi picchi distanti di circa 5 Hz, ovvero della frequenza di rotazione dell'albero intermedio del riduttore, che evidenziano il fenomeno di modulazione descritto nello spettro in accelerazione;
- Cepstrum: in Figura 5.16 sono mostrati i cepstrum del segnale acquisito a luglio del 2019 (Figura 5.16a) e del segnale acquisito a dicembre del 2024 (Figura 5.16b); nel primo segnale si notano numerosi picchi, non molto evidenti, alle quefrenze multiple di 0.029 secondi, ovvero multiple dell'inverso della frequenza di ingranamento del pignone con la corona (circa 34 Hz); nel secondo segnale si notano gli stessi picchi ogni 0.029 secondi, ma si hanno anche altri picchi più evidenti alle quefrenze multiple di 0.2 secondi, ovvero multiple dell'inverso della frequenza di rotazione dell'albero intermedio del riduttore (5 Hz). La presenza di picchi nei grafici alle quefrenze multiple di 0.029 secondi è abbastanza normale, in quanto l'ingranamento tra pignone e corona è una componente molto rumorosa del segnale, ma i picchi alle quefrenze multiple di 0.2 secondi non dovrebbero esserci, per cui li si possono considerare come un'indicazione della presenza di un difetto.

Tutte le analisi evidenziano dunque la modulazione e rafforzano quindi l'ipotesi della presenza di un difetto nella zona dell'albero intermedio del riduttore, essendo la frequenza della modulazione uguale alla frequenza di rotazione di quest'ultimo.

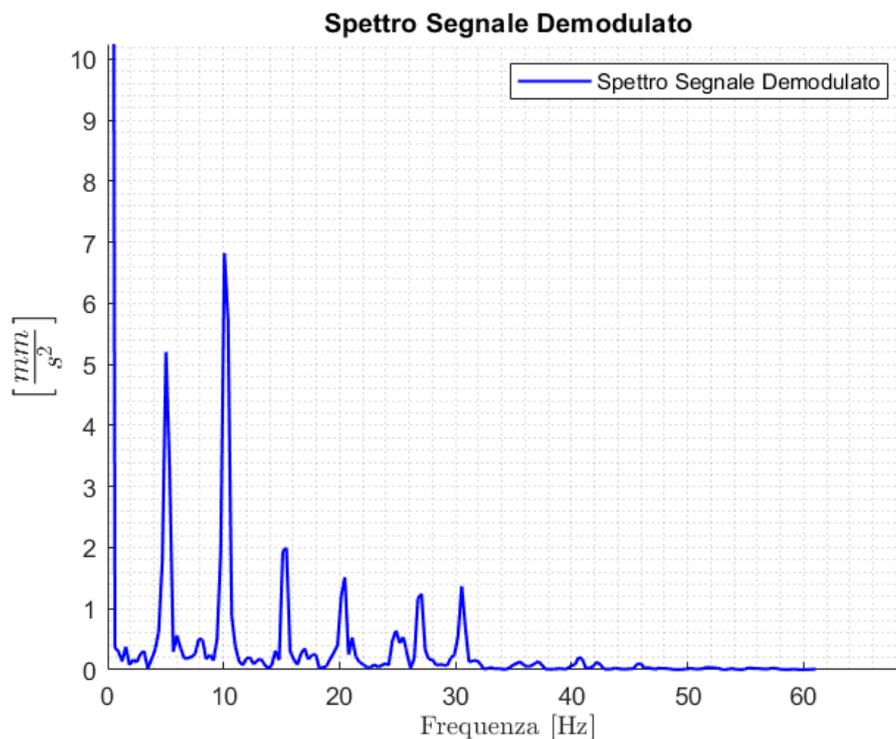
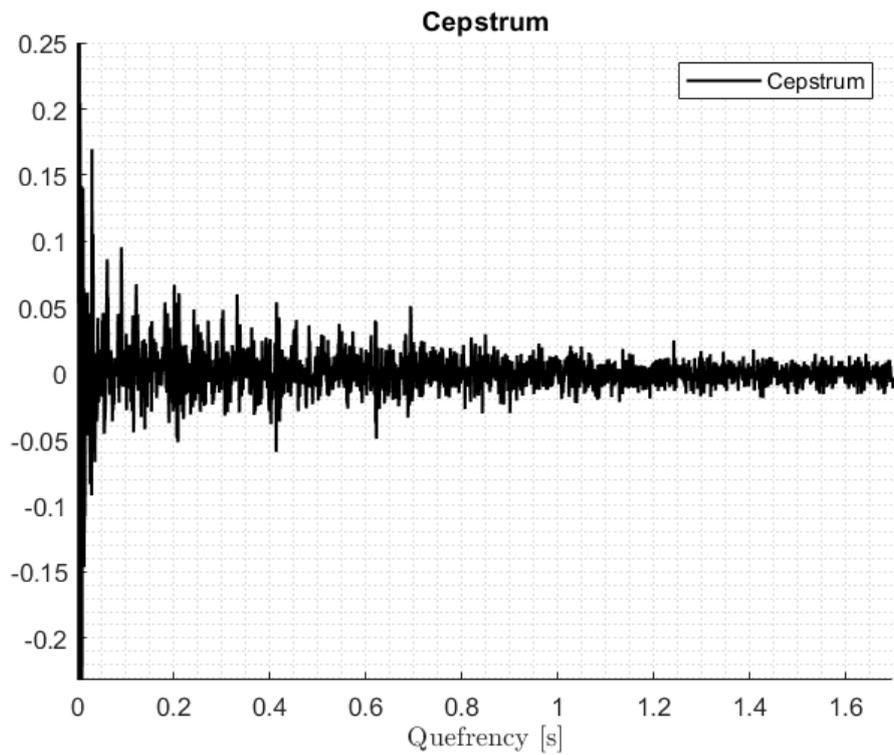
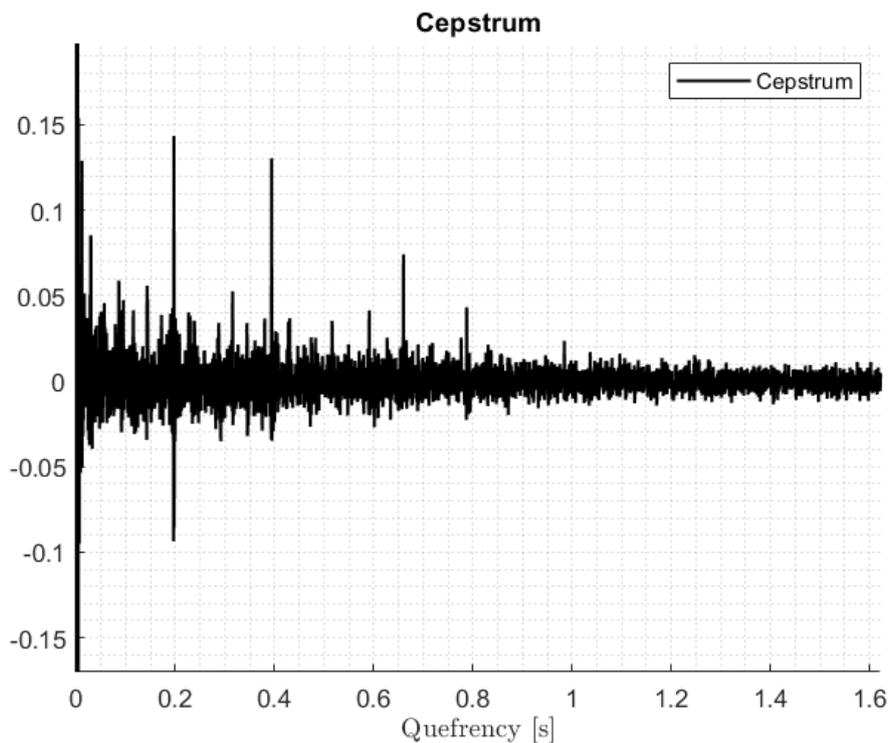


Figura 5.15: risultato della demodulazione sul segnale del dicembre 2024, in una banda compresa tra i 690 e i 750 Hz.



a)



b)

Figura 5.16: confronto dei cepstrum del segnale del luglio del 2019 (a) e del segnale del dicembre del 2024 (b).

È possibile anche analizzare come sta variando il difetto nel tempo: in Figura 5.17 sono rappresentati lo spettro in accelerazione tra i 670 e i 720 Hz (Figura 5.17a) e lo spettro di potenza tra i 660 e i 740 Hz (Figura 5.17b) di quattro segnali, acquisiti con il sensore BV176B il 25

novembre del 2024, il 29 novembre del 2024, l'11 dicembre del 2024 e il 4 febbraio del 2025; gli intervalli nelle due rappresentazioni si sono scelti per rendere più chiaro il confronto.

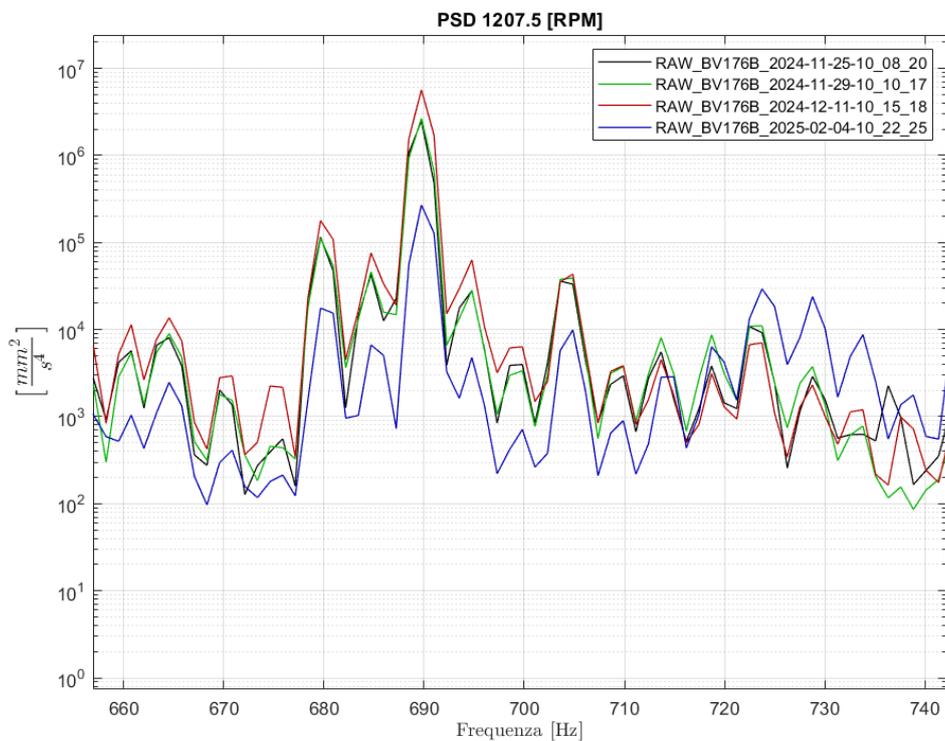
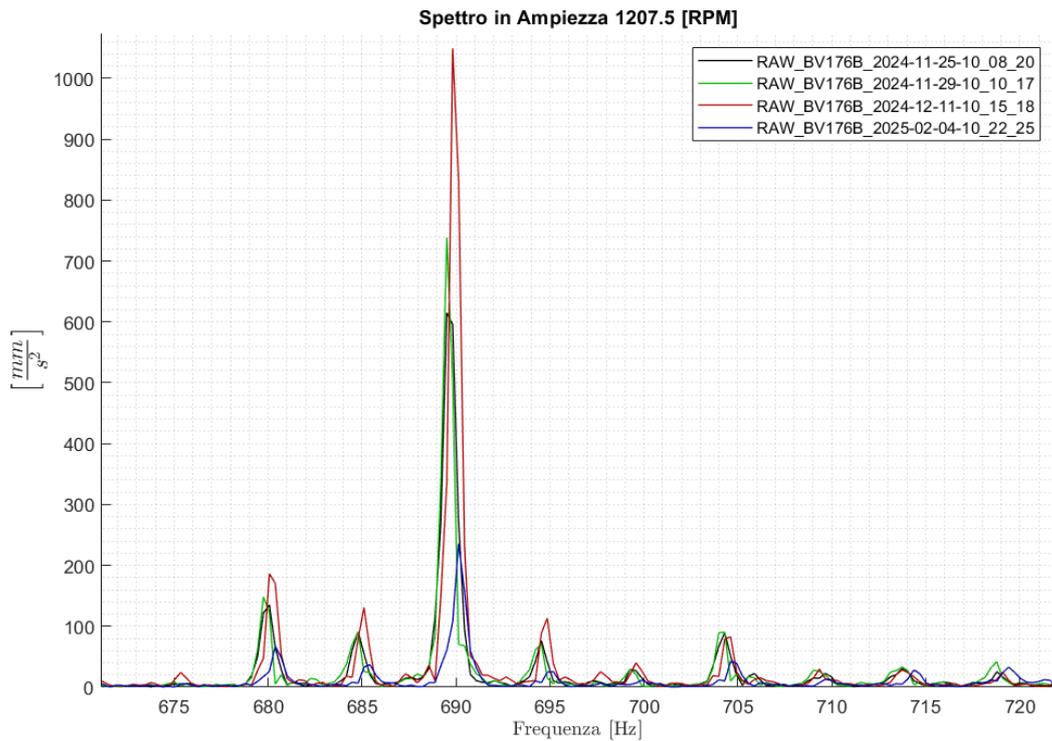


Figura 5.17: confronto di quattro segnali per osservare la variazione del difetto nel tempo, utilizzando il loro spettro di ampiezza (a) e il loro spettro di potenza (b).

Dai due grafici rappresentati in Figura 5.17 si nota come i quattro segnali abbiano lo stesso andamento al variare della frequenza, con quello di febbraio del 2025 che si discosta leggermente dagli altri, con picchi più bassi alle frequenze caratteristiche del difetto; in questo caso risulta interessante analizzare gli stessi quattro segnali anche alle frequenze caratteristiche di altri elementi della macchina, ad esempio utilizzando il grafico rappresentato in Figura 5.18, in cui si mostra lo spettro di potenza in un range di frequenze compreso tra i 280 e i 460 Hz. Si nota come, alle frequenze caratteristiche degli ingranaggi, evidenziate con le bande blu, i picchi del segnale di febbraio siano in generale più alti, mentre alle frequenze del difetto, evidenziate con le bande gialle, i picchi del segnale di febbraio siano in generale più bassi.

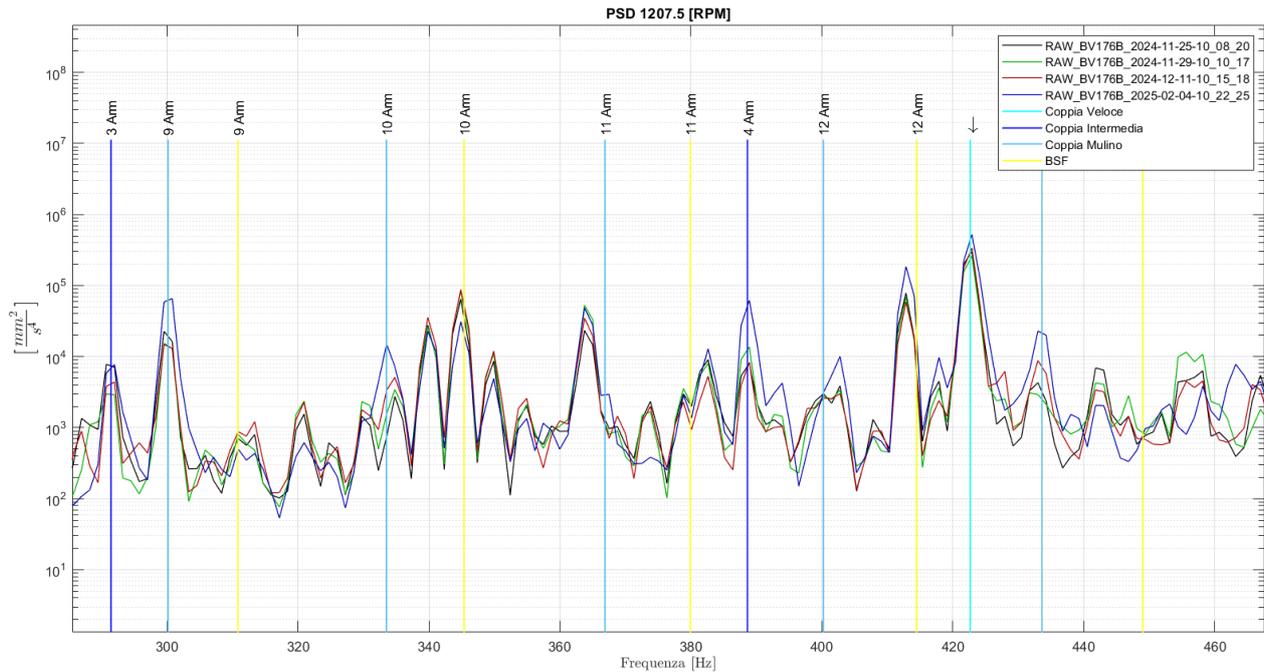


Figura 5.18: confronto di quattro segnali per osservare la variazione degli spettri di potenza nel tempo, evidenziando le frequenze caratteristiche degli ingranaggi (in blu) e le frequenze caratteristiche dei corpi rotolanti del cuscinetto montato sull'albero intermedio del riduttore (in giallo).

Col passare del tempo sembra che le condizioni della macchina siano leggermente migliorate; questa variazione potrebbe derivare dalla differenza di velocità della macchina nei vari segnali, in quanto nel segnale di febbraio i motori ruotavano a una velocità di circa 50 rpm in meno degli altri segnali graficati, oppure dal fatto che la zona in cui è presente il difetto si sia usurata durante il funzionamento, con conseguenti contatti più morbidi con le altre parti del cuscinetto.

## 6 Conclusioni e Sviluppi Futuri

In questo testo si sono studiate e applicate diverse tecniche per analizzare i segnali acquisiti da un mulino a tamburo per la macinazione ad umido continua:

- Si sono analizzati venti indicatori e la distanza di Mahalanobis, per utilizzarli per determinare se la macchina è in buone condizioni o meno;
- Si sono utilizzate diverse analisi su grafici per riuscire a fare ipotesi sulla posizione e sul tipo di difetto; le analisi su grafici possono essere anche utilizzate per confrontare segnali diversi tra loro, per osservare come varia un difetto nel tempo o per renderne più facile l'individuazione.

Per poter utilizzare al meglio le diverse analisi studiate si è creata un'applicazione su Matlab, che legge i segnali acquisiti dalla macchina, salvati in file Excel, e li elabora in diversi modi a seconda delle scelte fatte dall'utente; si è cercato di creare l'applicazione la più completa possibile, con all'interno diverse funzioni per analizzare e gestire gli indicatori e diverse funzioni per studiare i diversi grafici, in modo chiaro e semplice.

Con l'applicazione che si è creata si sono quindi analizzati i segnali acquisiti dal mulino e si sono stimate le condizioni della macchina in tre periodi diversi: nei primi tre giorni di luglio del 2019 si è ipotizzato che la macchina fosse in buone condizioni, dal 4 luglio fino alla fine del 2019 si è ipotizzato un disallineamento tra pignone e corona e da ottobre del 2024 fino a febbraio del 2025 si è ipotizzato un difetto sui corpi rotolanti del cuscinetto montato sull'albero intermedio del riduttore.

Le ipotesi fatte non sono state ancora confermate da controlli fatti sulla macchina, ma possono essere utilizzate in futuro per guidare le manutenzioni direttamente nella zona in cui si è ipotizzata la presenza di un difetto.

Il lavoro fatto può essere ulteriormente sviluppato in diversi modi:

- Migliorando ulteriormente l'applicazione creata su Matlab, aggiungendo ulteriori analisi e funzioni; si può ad esempio aggiungere la possibilità di disegnare bande sui grafici del cepstrum e della demodulazione, funzione al momento non presente;
- Traducendo il programma che genera l'applicazione anche in altri linguaggi, come ad esempio Python, per poter utilizzare le stesse analisi anche senza avere la licenza Matlab;
- Implementando la schermata di Figura 4.6 nel quadro della macchina; di fatto alcuni indicatori già vengono calcolati e viene segnalato se alcuni di essi escono dalle soglie, ma la funzione potrebbe essere migliorata seguendo questo studio;
- Utilizzando l'applicazione per analizzare altre macchine; modificando alcuni parametri (come le frequenze caratteristiche dei componenti della macchina) è possibile analizzare anche macchine molto diverse da quella presente in questo studio, purché funzionino sempre a velocità costante.

## Bibliografia

- [1] Alfonso Fernandez, Low frequency fault diagnosis, White Paper available at: <https://power-mi.com/content/low-frequency-fault-diagnosis>.
- [2] Alfonso Fernandez, Gears, White Paper available at: <https://power-mi.com/content/gears>.
- [3] Alfonso Fernandez, Rolling element bearings, White Paper available at: <https://power-mi.com/content/rolling-element-bearings>.
- [4] R. B. Randall, Vibration-based Condition Monitoring: industrial, automotive and aerospace applications. United Kingdom. John Wiley & Sons, Ltd, 2021.
- [5] D. Kim, S. Lee and D. Kim, An Applicable Predictive Maintenance Framework for the Absence of Run-to-Failure Data, mdpi, 2021, <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/11/5180>.
- [6] J. Sim, S. Kim, H. J. Park, J. Choi, A Tutorial for Feature Engineering in the Prognostics and Health Management of Gears and Bearings, mdpi, 2020, <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/16/5639>.
- [7] Bonnardot F., Randall R.B. and Antoni J., Enhanced unsupervised noise cancellation using angular resampling for planetary bearing fault diagnosis. International Journal of Acoustics and Vibration 9 (2), 2004.
- [8] Antoni J., Fast computation of the kurtogram for the detection of transient faults. Mechanical Systems and Signal Processing 21 (1), 2006.
- [9] M. Sinnott, P. W. Cleary, R. Morrison, Simulation of overflow ball mill discharge and trommel flow using combined DEM and SPH, SAG 2015, Vancouver, Canada, september 2015.
- [10] Sacmi, Tecnologia ceramica applicata, Volume I, Ed. La Mandragora, Imola (BO), 2001.
- [11] Sacmi, Tecnologia ceramica applicata, Volume II, Ed. La Mandragora, Imola (BO), 2001.
- [12] Rao, S. S. (2011). Mechanical Vibrations, prentice Hall. Indianapolis, IN.