

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica



**SVILUPPO DELLA MINIMUM ENTROPY DECONVOLUTION
PER LA DIAGNOSTICA DI CUSCINETTI VOLVENTI**

Relatore: Ch. mo Prof. Paolo PENNACCHI

Correlatore: Ing. Roberto RICCI

Tesi di Laurea di:

Elisa CARNEVALE Matr. 736492

Riccardo MARIANI Matr. 740006

Anno Accademico 2009 - 2010

Ringraziamenti

Vorremo innanzitutto ringraziare il nostro relatore, Prof. Paolo Pennacchi, che ci ha permesso di realizzare questo lavoro.

Inoltre un sentito ringraziamento va all'Ing. Roberto Ricci, che ci ha pazientemente seguito durante l'intera realizzazione della tesi.

Il primo ringraziamento va in assoluto ai miei genitori che, oltre ad avermi supportato sotto ogni punto di vista in questi anni, mi hanno formato con affetto durante la crescita per rendermi la persona che oggi va incontro ad un traguardo così importante.

Grazie alle mie sorelle ed a mio fratello: siete il regalo più prezioso che mamma e papà mi abbiano mai fatto.

Ringrazio le mie nonne, per tutta la gioia e la commozione che hanno dimostrato al superamento di ogni singolo esame, ed i miei nonni, perché sono certa che mi abbiano pensato spesso in questi anni, guidandomi in scelte difficili, ovunque essi siano.

Grazie a mio zio ed a mia zia, innanzitutto per l'entusiasmo e la forza che mi hanno sempre trasmesso ed inoltre per il grande aiuto nel perfezionamento dei componenti del banco.

Un ringraziamento ai miei compagni di corso, in particolare a Riccardo ed ad Irene, che hanno condiviso con me tutti i momenti, difficili e non, all'interno dell'ambiente universitario.

Un grazie ad Alessandra, l'amica di una vita, per aver ascoltato, e spesso risolto, i miei problemi, infondendomi una forte determinazione.

Ed infine, ma non in ordine di importanza, un grazie di cuore a Marco, non solo per aver costruito tutti i componenti meccanici utilizzati in questa tesi, ma soprattutto per aver amato quotidianamente per cinque interminabili anni la follia di un ingegnere.

Elisa

Questo lavoro di tesi, oltre a chiudere un percorso di studi durato cinque anni, segna la fine di un periodo della mia vita ricco di difficoltà ma anche di enormi soddisfazioni e rappresenta il punto di partenza per nuove prospettive e nuove esperienze che mi auguro siano ricche di serenità. Per questo motivo, non possono non dedicare queste righe conclusive a tutte quelle persone che mi hanno accompagnato in questi anni, a cui va il merito autentico della mia buona riuscita.

Innanzitutto ringrazio tutta la mia famiglia, le zie, gli zii, i cugini e le nonne. In particolare un grazie di cuore alla mamma che mi ha sempre incoraggiato e appoggiato; a Fabio che, se per ogni volta che mi ha chiesto se stessi preparando un esame l'avessi fatto veramente, adesso ne avrei sostenuti almeno un milione; a Dario (baldo) che ha perdonato tutte le mie fughe dai lavori domestici; ad Alberto (baldo) che (naturalmente) non avendo ascoltato i miei consigli ed avendo deciso comunque di studiare ingegneria, ha condiviso con me i viaggi verso l'università; a papà, che sono sicuro ci ha messo del suo e mi ha aiutato in un sacco di circostanze. Grazie a tutti voi, che mi avete sostenuto, mi avete mantenuto e, soprattutto, mi avete assecondato in ogni mia scelta presa nel corso di questi anni (anche stupida).

Ringrazio poi il bonfi, il cic, il moli, la spinga e tutti gli amici d'infanzia che in un modo nell'altro hanno avuto un ruolo nella mia vita fin da quando sono nato ed in modo particolare in questi anni di studio, in cui hanno perdonato spesso le mie rinunce ad uscire, accontentandosi della classica scusa "stasera non posso, devo studiare, ma giuro che venerdì prossimo recuperiamo...". Prometto di riuscire ad essere un po' più di compagnia in futuro. Grazie anche al lanfra, al cello ed al nico che mi sono stati vicino fin dai tempi del liceo.

Un sentito ringraziamento a tutti i compagni di università con cui ho condiviso questi anni, in particolare all'ely e all'ire che ho sopportato pazientemente nella maggior parte dei lavori a gruppo (scherzo..!!) e ai boys from PV con cui, negli ultimi due anni, ho condiviso pranzi e momenti bellissimi.

E infine un ringraziamento speciale va a Maura che tempo fa mi ha "trovato all'angolo coi pugni chiusi", che pazientemente mi ha aiutato a crescere ed a maturare, facendomi capire che stavo sbagliando prospettiva, e che alla fine mi ha travolto come "un'onda anomala". Grazie di avermi compreso, grazie di non aver mai mollato, grazie di avermi aiutato a credere in me stesso, grazie dei momenti sereni e felici che mi hai regalato, grazie per tutti quelli che sono sicuro mi regalerai...Grazie.

Ricki

Indice

Sommario	1
Abstract	1
1 Introduzione	3
1.1 La manutenzione dei cuscinetti	6
1.2 Obiettivo e sviluppo della tesi	7
2 Diagnostica sui cuscinetti volventi: stato dell'arte	9
2.1 Banco prova.....	9
2.2 Danneggiamento e diagnostica dei cuscinetti.....	12
2.2.1 Pista interna.....	13
2.2.2 Pista esterna.....	15
2.2.3 Elemento volvente.....	17
2.3 Tecniche di analisi dei segnali.....	19
2.3.1 Grandezze statistiche.....	20
2.3.2 Trasformata di Fourier	22
2.3.3 Envelope analysis.....	23
2.3.4 STFT	23
2.3.5 EMD e trasformata di Hilbert	25
2.3.6 MED.....	26
3 Progettazione e realizzazione del banco prova e delle prove sperimentali.....	31
3.1 Progettazione e realizzazione del banco prova.....	31
3.2 Scelta dei cuscinetti	39
3.2.1 Cuscinetto test	39
3.2.2 Cuscinetti laterali	42
3.2.3 Supporti dei cuscinetti.....	44
3.3 Scelta dei parametri di acquisizione e progettazione del sistema di acquisizione.....	46

3.3.1	Schede di acquisizione.....	46
3.3.2	Acquisizione delle velocità e delle coppie.....	47
3.3.3	Acquisizione della temperatura del cuscinetto test.....	48
3.3.4	Acquisizione delle vibrazioni del cuscinetto test.....	50
3.3.5	Acquisizione del riferimento 1x giro dell'albero.....	51
3.3.6	Acquisizione della forza applicata al cuscinetto test	52
3.3.7	Caratteristiche di funzionamento del banco prova	57
3.3.8	Frequenza di campionamento	57
4	Danneggiamento dei cuscinetti.....	61
4.1	Difetto sulla gabbia	62
4.2	Difetto sulla pista interna	64
4.3	Difetto sulla pista esterna.....	65
4.4	Difetto sull'elemento volvente.....	68
5	Sviluppo dell'algoritmo MED	71
5.1	Scrittura dell'algoritmo	71
5.2	Caratteristiche della tecnica	73
5.2.1	Segnale test	73
5.2.2	Andamento della norma Varimax.....	73
5.2.3	Numero di iterazioni	74
5.2.4	Lunghezza del filtro	76
5.2.5	Istante temporale iniziale	78
5.2.6	Lunghezza del segnale di ingresso	81
6	Analisi dei dati sperimentali mediante MED.....	83
6.1	Applicazione delle tecniche tradizionali	83
6.1.1	Indicatori statistici	83
6.2	Applicazione della tecnica MED	86
6.2.1	Assenza del difetto senza carico applicato	86
6.2.2	Assenza del difetto con carico applicato	94

6.2.3	Difetto sulla pista interna senza carico applicato	102
6.2.4	Difetto sulla pista interna con carico applicato	112
6.2.5	Difetto sulla pista interna senza carico applicato e con valore di coppia maggiore	122
6.2.6	Difetto sulla pista esterna senza carico applicato.....	125
6.2.7	Difetto sulla pista esterna con carico applicato.....	135
6.2.8	Difetto sulla pista esterna orientato in direzioni diverse rispetto alla zona di applicazione del carico	143
6.2.9	Difetto sull'elemento volvente senza carico applicato.....	148
6.2.10	Difetto sull'elemento volvente con carico applicato.....	154
6.2.11	Difetto sulla gabbia senza carico applicato	160
6.2.12	Difetto sulla gabbia con carico applicato	163
6.2.13	Riassunto risultati.....	166
7	Conclusioni e sviluppi futuri	169
	Allegato A	173
	Nomenclatura e lista degli acronimi	175
	Bibliografia	179
	Siti internet.....	181

Elenco delle figure

Figura 1.1: andamento dei costi di manutenzione.....	3
Figura 1.2: bathtub curve.	4
Figura 2.1: esempio di segnale simulato.	9
Figura 2.2: banco prova standard [2].	10
Figura 2.3: banco prova con due cuscinetti test (2-3) e due cuscinetti di supporto (1-4) e con sistema di carico [3].	11
Figura 2.4: tipi di danneggiamento sulla pista interna [3] - [2].	13
Figura 2.5: segnale di un difetto sulla pista interna [9].	14
Figura 2.6: envelope analysis di un difetto sulla pista interna.	15
Figura 2.7: tipi di danneggiamento sulla pista esterna [7].	15
Figura 2.8: segnale di un difetto sulla pista esterna [9].	16
Figura 2.9: envelope analysis di un difetto sulla pista esterna.	17
Figura 2.10: tipi di danneggiamento sull'elemento volvente [3] - [2].	17
Figura 2.11: segnale di un difetto sull'elemento volvente [9].	18
Figura 2.12: envelope analysis di un difetto sull'elemento volvente.	19
Figura 2.13: rappresentazione del valore <i>RMS</i> per una segnale sinusoidale.....	20
Figura 2.14: parametri del segnale che permettono di calcolare <i>CF</i> per un segnale sinusoidale.	21
Figura 2.15: rappresentazione del valore <i>PP</i> per un segnale sinusoidale.	21
Figura 2.16: andamento della norma Varimax [20].	29
Figura 3.1: banco prova iniziale.	32
Figura 3.2: banco prova progettato con l'ausilio di Solid Edge.	33
Figura 3.3: posizionamento dell'utilizzatore.....	34
Figura 3.4: messa in tavola dell'albero progettato.....	34
Figura 3.5: accoppiamento tra l'albero ed i motori.	35
Figura 3.6: posizionamento dei cuscinetti.....	36
Figura 3.7: alloggiamento dei cuscinetti.	37
Figura 3.8: posizionamento del cuscinetto test.	37
Figura 3.9: sistema per l'applicazione del carico al cuscinetto test.....	38
Figura 3.10: sede per la cella di carico.....	39
Figura 3.11: parametri caratteristici del cuscinetto test.	40
Figura 3.12: cuscinetto test smontato.....	41
Figura 3.13: parametri caratteristici dei cuscinetti di supporto.....	43
Figura 3.14: cuscinetti di supporto.....	43

Figura 3.15: parametri caratteristici dei supporti dei cuscinetti.	44
Figura 3.16: alloggiamenti dei cuscinetti.....	45
Figura 3.17: schede d'acquisizione, chassis e morsettiera.	46
Figura 3.18: sensori applicati al banco prova.	48
Figura 3.19: RTD.....	49
Figura 3.20: accelerometro.	50
Figura 3.21: disposizione degli accelerometri sul supporto del cuscinetto test..	51
Figura 3.22: captatore di prossimità.	52
Figura 3.23: cella di carico statica.	53
Figura 3.24: cella di carico dinamica.....	54
Figura 3.25: segnale fornito dalla cella di carico dinamica in assenza ed in presenza della forza.	55
Figura 3.26: andamento della rigidità della molla.	56
Figura 3.27: output MED $f_c=3413$ Hz.....	58
Figura 3.28: output MED $f_c=10240$ Hz.....	58
Figura 4.1: difetto sulla gabbia.	63
Figura 4.2: difetto sulla pista interna.	64
Figura 4.3: difetto sulla pista esterna.....	66
Figura 4.4: posizionamento del difetto sulla pista esterna.....	67
Figura 4.5: difetto sull'elemento volvente.	68
Figura 5.1: andamento del filtro iniziale.....	72
Figura 5.2: segnale test utilizzato.	73
Figura 5.3: andamento della norma Varimax in funzione del numero di iterazioni.	74
Figura 5.4: MED output senza un numero massimo di iterazioni.	75
Figura 5.5: MED output con un numero massimo di iterazioni pari a 5.	75
Figura 5.6: MED output $M=10\%$ del periodo del difetto.	76
Figura 5.7: MED output $M=50\%$ del periodo del difetto.	77
Figura 5.8: MED output $M=100\%$ del periodo del difetto.	77
Figura 5.9: andamento del valore minimo della norma Varimax al variare della lunghezza del filtro.	78
Figura 5.10: MED output con $T_0=0$ s.	79
Figura 5.11: MED output con $T_0=3$ s.	80
Figura 5.12: MED output con $T_0=5$ s.	80
Figura 5.13: MED output con $T_0=10$ s.	81
Figura 6.1: MED input del cuscinetto sano per la ricerca del difetto sulla pista interna per un'acquisizione a 500 rpm e 4 Nm	87

Figura 6.2: MED output del cuscinetto sano per la ricerca del difetto sulla pista interna per un'acquisizione a 500 rpm e 4 Nm.....	88
Figura 6.3: MED input del secondo cuscinetto sano per la ricerca del difetto sulla pista interna per un'acquisizione a 500 rpm e 4 Nm.....	89
Figura 6.4: MED output del secondo cuscinetto sano per la ricerca del difetto sulla pista interna per un'acquisizione a 500 rpm e 4 Nm.....	89
Figura 6.5: MED input del cuscinetto sano per la ricerca del difetto sulla pista esterna per un'acquisizione a 1500 rpm e 4 Nm.....	90
Figura 6.6: MED output del cuscinetto sano per la ricerca del difetto sulla pista esterna per un'acquisizione a 1500 rpm e 4 Nm.....	91
Figura 6.7: MED input del cuscinetto sano per la ricerca del difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione a 2500 rpm e 4 Nm	92
Figura 6.8: MED output del cuscinetto sano per la ricerca del difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione a 2500 rpm e 4 Nm.	92
Figura 6.9: MED input del cuscinetto sano per la ricerca del difetto sulla gabbia per un'acquisizione a 2500 rpm e 6 Nm.	93
Figura 6.10: MED output del cuscinetto sano per la ricerca del difetto sulla gabbia per un'acquisizione a 2500 rpm e 6 Nm.	94
Figura 6.11: MED input del cuscinetto sano per la ricerca del difetto sulla pista interna per un'acquisizione a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.....	95
Figura 6.12: MED output del cuscinetto sano per la ricerca del difetto sulla pista interna per un'acquisizione a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.....	96
Figura 6.13: MED input del secondo cuscinetto sano per la ricerca del difetto sulla pista interna per un'acquisizione a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato..	97
Figura 6.14: MED output del secondo cuscinetto sano per la ricerca del difetto sulla pista interna per un'acquisizione a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato..	97
Figura 6.15: MED input del cuscinetto sano per la ricerca del difetto sulla pista esterna per un'acquisizione a 1500 rpm e 4 Nm con carico applicato.	98
Figura 6.16: MED output del cuscinetto sano per la ricerca del difetto sulla pista esterna per un'acquisizione a 1500 rpm e 4 Nm con carico applicato.	98
Figura 6.17: MED input del cuscinetto sano per la ricerca del difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.	99
Figura 6.18: MED output del cuscinetto sano per la ricerca del difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.	100

Figura 6.19: MED input del cuscinetto sano per la ricerca del difetto sulla gabbia per un'acquisizione a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.....	101
Figura 6.20: MED output del cuscinetto sano per la ricerca del difetto sulla gabbia per un'acquisizione a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.....	101
Figura 6.21: MED input del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 500 rpm e 4 Nm.....	103
Figura 6.22: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 500 rpm e 4 Nm.	103
Figura 6.23: MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 500 rpm e 4 Nm.....	104
Figura 6.24: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 500 rpm e 4 Nm.	104
Figura 6.25: dettaglio del modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 500 rpm e 4 Nm.	105
Figura 6.26: MED input del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1500 rpm e 4 Nm.....	106
Figura 6.27: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1500 rpm e 4 Nm.	107
Figura 6.28: MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1500 rpm e 4 Nm.....	107
Figura 6.29: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1500 rpm e 4 Nm.	108
Figura 6.30: dettaglio del modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1500 rpm e 4 Nm.	108
Figura 6.31: MED input del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 2500 rpm e 4 Nm.....	110
Figura 6.32: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 2500 rpm e 4 Nm.	110
Figura 6.33: MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 2500 rpm e 4 Nm.....	111

Figura 6.34: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 2500 rpm e 4 Nm.....	111
Figura 6.35: MED input del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.	113
Figura 6.36: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.....	113
Figura 6.37: MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.	114
Figura 6.38: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.....	114
Figura 6.39: dettaglio del modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.....	115
Figura 6.40: MED input del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 4 Nm con carico applicato.	116
Figura 6.41: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 4 Nm con carico applicato.....	117
Figura 6.42: MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 4 Nm con carico applicato.	117
Figura 6.43: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 4 Nm con carico applicato.....	118
Figura 6.44: dettaglio del modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 4 Nm con carico applicato.	118
Figura 6.45: MED input del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.	120

Figura 6.46: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.	120
Figura 6.47: MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.....	121
Figura 6.48: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato	121
Figura 6.49: MED input del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 6 Nm con carico applicato.....	122
Figura 6.50: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 6 Nm con carico applicato.	123
Figura 6.51: MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 6 Nm con carico applicato.....	123
Figura 6.52: dettaglio del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 6 Nm con carico applicato.....	124
Figura 6.53: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 6 Nm con carico applicato.	124
Figura 6.54: dettaglio del modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 6 Nm con carico applicato.....	125
Figura 6.55: MED input del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm.....	126
Figura 6.56: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm.	127
Figura 6.57: MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm.....	127
Figura 6.58: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm.	128

Figura 6.59: dettaglio del modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm.....	128
Figura 6.60: MED input del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1500 rpm e 4 Nm.	129
Figura 6.61: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1500 rpm e 4 Nm.....	130
Figura 6.62: MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1500 rpm e 4 Nm.	130
Figura 6.63: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1500 rpm e 4 Nm.	131
Figura 6.64: dettaglio del modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1500 rpm e 4 Nm.....	131
Figura 6.65: MED input del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 2500 rpm e 4 Nm.	133
Figura 6.66: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 2500 rpm e 4 Nm.....	133
Figura 6.67: MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 2500 rpm e 4 Nm.	134
Figura 6.68: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 2500 rpm e 4 Nm.....	134
Figura 6.69: MED input del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.	135
Figura 6.70: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.....	136
Figura 6.71: MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.	136

Figura 6.72: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.	137
Figura 6.73: dettaglio del modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.	137
Figura 6.74: MED input del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1500 rpm e 4 Nm con carico applicato.....	138
Figura 6.75: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1500 rpm e 4 Nm con carico applicato.	139
Figura 6.76: MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1500 rpm e 4 Nm con carico applicato.....	139
Figura 6.77: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1500 rpm e 4 Nm con carico applicato.	140
Figura 6.78: dettaglio del modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1500 rpm e 4 Nm con carico applicato.	140
Figura 6.79: MED input del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.....	141
Figura 6.80: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.	142
Figura 6.81: MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.....	142
Figura 6.82: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.	143
Figura 6.83: MED input del cuscinetto con difetto sulla pista esterna a 90° per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 4 Nm.	144

Figura 6.84: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sulla pista esterna a 90° per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 4 Nm.....	144
Figura 6.85: MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna a 90° per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 4 Nm.	145
Figura 6.86: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna a 90° per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 4 Nm.....	145
Figura 6.87: MED input del cuscinetto con difetto sulla pista esterna a 180° per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 4 Nm.	146
Figura 6.88: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sulla pista esterna a 180° per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 4 Nm.	147
Figura 6.89: MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna a 180° per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 4 Nm.	147
Figura 6.90: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna a 180° per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 4 Nm.....	148
Figura 6.91: MED input del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm.	149
Figura 6.92: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm.....	150
Figura 6.93: MED output del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm.	150
Figura 6.94: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm.....	151
Figura 6.95: dettaglio del modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm.	151
Figura 6.96: MED input del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm.	152
Figura 6.97: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm.....	153

Figura 6.98: MED output del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm.....	153
Figura 6.99: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm.	154
Figura 6.100: MED input del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.....	155
Figura 6.101: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.....	155
Figura 6.102: MED output del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.....	156
Figura 6.103: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.....	156
Figura 6.104: dettaglio del modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.	157
Figura 6.105: MED input del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.....	158
Figura 6.106: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.....	158
Figura 6.107: MED output del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.....	159
Figura 6.108: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.....	159
Figura 6.109: MED input del cuscinetto con difetto sulla gabbia per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 6 Nm.....	161
Figura 6.110: MED output del cuscinetto con difetto sulla gabbia per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 6 Nm.....	162

Figura 6.111: dettaglio del MED output del cuscinetto con difetto sulla gabbia per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 6 Nm.	162
Figura 6.112: MED input del cuscinetto con difetto sulla gabbia per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1000 rpm e 6 Nm con carico applicato.	164
Figura 6.113: MED output del cuscinetto con difetto sulla gabbia per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1000 rpm e 6 Nm con carico applicato.	164
Figura 6.114: MED input del cuscinetto con difetto sulla gabbia per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.	165
Figura 6.115: MED output del cuscinetto con difetto sulla gabbia per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.	165
Figura 6.116: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla gabbia per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.....	166

Elenco delle tabelle

Tabella 3.1: parametri caratteristici del cuscinetto test.	40
Tabella 3.2: parametri caratteristici dei cuscinetti di supporto.	42
Tabella 3.3: parametri caratteristici dei supporti dei cuscinetti.	44
Tabella 3.4: parametri statistici calcolati sul segnale fornito dalla cella di carico dinamica in assenza ed in presenza della forza.	55
Tabella 3.5: valori sperimentali della rigidità della molla.	56
Tabella 4.1: frequenza e periodo di rotazione dell'albero al variare della velocità del motore.	62
Tabella 4.2: frequenza e periodo del difetto sulla gabbia al variare della velocità del motore.	63
Tabella 4.3: frequenza e periodo del difetto sulla pista interna al variare della velocità del motore.	65
Tabella 4.4: frequenza e periodo del difetto sulla pista esterna al variare della velocità del motore.	66
Tabella 4.5: frequenza e periodo del difetto sull'elemento volvente al variare della velocità del motore.	69
Tabella 5.1: relazioni tra il periodo di rotazione ed i periodi dei difetti.	71
Tabella 6.1: indicatori per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 500 rpm e 4 Nm.	83
Tabella 6.2: indicatori per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1000 rpm e 4 Nm.	84
Tabella 6.3: indicatori per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1000 rpm e 6 Nm.	85
Tabella 6.4: indicatori per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 2500 rpm e 4 Nm.	85
Tabella 6.5: indicatori per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1000 rpm e 4 Nm.	85
Tabella 6.6: indicatori per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1000 rpm e 4 Nm con carico applicato.	86
Tabella 6.7: confronto tra le frequenze ed i periodi teorici e quelli individuati dalla MED.	167
Tabella 7.1: riassunto dei risultati ottenuti dall'applicazione della tecnica.	171

Sommario

L'attività diagnostica, volta a monitorare il comportamento di componenti meccanici durante il loro periodo di funzionamento, è fondamentale per identificare la presenza di eventuali guasti e per pianificare un'adeguata opera di manutenzione. La tendenza attuale si muove verso il monitoraggio di parametri indicatori dello stato del componente, sui quali ci si basa per programmare la sostituzione. Uno dei processi di diagnosi più diffuso risulta essere quello rivolto ai cuscinetti a rotolamento, in quanto rappresentano uno dei componenti maggiormente diffusi ed utilizzati nell'ambito dell'industria meccanica. Sono state sviluppate molte tecniche che analizzano i segnali di vibrazione acquisiti su un cuscinetto, con l'obiettivo di rilevare la presenza di difetti. Nella fase iniziale di questo lavoro viene allestito un banco prova da laboratorio che permetta di effettuare prove sperimentali su cuscinetti. Successivamente si realizzano quattro tipi di danneggiamenti su quattro diversi cuscinetti: uno sulla pista interna, uno sulla pista esterna, un sull'elemento volvente ed uno sulla gabbia. Si acquisiscono quindi i segnali di vibrazione di ciascun cuscinetto in diverse condizioni di funzionamento del sistema. Infine i segnali sono analizzati utilizzando una tecnica, recentemente proposta in letteratura, denominata Minimum Entropy Deconvolution (MED), che permette di evidenziare la presenza del difetto sui cuscinetti.

Parole chiave: diagnostica, cuscinetti volventi, banco prova, slittamento, difetti cuscinetto, segnale di vibrazioni, MED (Minimum Entropy Deconvolution).

Abstract

Diagnostics of mechanical components is basic to identify failure and to plan a proper maintenance method. The current trend is to monitor these components during their work life and to identify any system parameter variation in order to program predictive maintenance. One of the most common diagnostics process is that of rolling element bearings. Many techniques, that have been developed to analyze vibrations of rolling element bearings, allow detecting the presence of damages. In the first part of the thesis, a laboratory test-rig has been realized in order to simulate real working conditions for a real bearing. Then four kind of faults have been artificially made on some roller bearings namely on the inner

race, on the outer race, on the rolling elements and on the cage. Vibration signals for healthy and damaged bearings have been measured by changing different working condition of the test-rig. In the second part vibration signals have been analyzed by means of the MED algorithm, in order to detect the fault presence on rolling element bearings and to test the diagnostic effectiveness of the approach.

Keywords: diagnostics, roller bearings, test rig, slippage, rolling element bearing fault, vibration signal, MED (Minimum Entropy Deconvolution).

Capitolo 1

Introduzione

La manutenzione in ambito aziendale è stata per molti anni vista come un costo inevitabile da sostenere, ma recentemente gli imprenditori hanno iniziato ad investire nel miglioramento di questa funzione con lo scopo di ridurre i costi ad essa connessi. La manutenzione è così diventata un'attività di cui si occupa un settore specifico dell'azienda, paragonabile agli altri, capace di aumentare il profitto se correttamente gestito.

I costi totali di manutenzione sono dati essenzialmente dalla somma di due tipologie di costo, quelli diretti e quelli di mancata produzione.

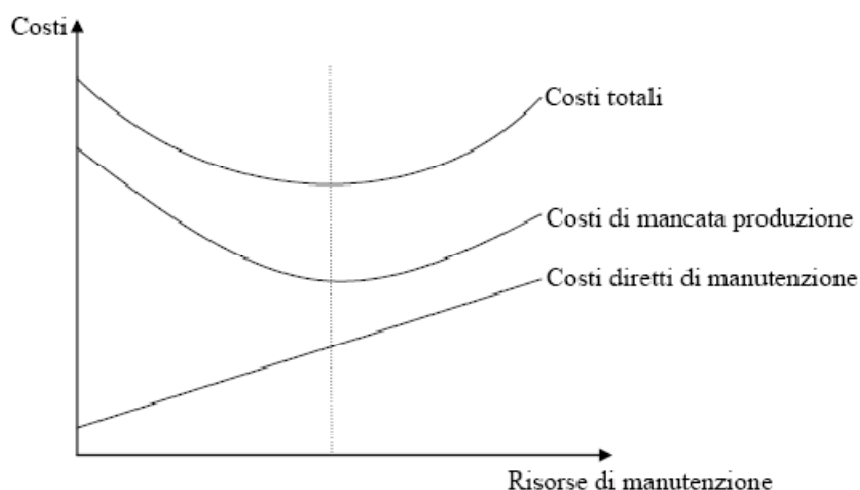


Figura 1.1: andamento dei costi di manutenzione.

I costi diretti di manutenzione comprendono i costi associati all'intervento di riparazione o sostituzione di un componente, ossia quelli della manodopera interna ed esterna fornita da terzi e quelli dei materiali delle parti di ricambio. I costi di mancata produzione sono legati alla ridotta disponibilità degli impianti, alla mancata qualità dovuta alla riduzione della capacità di processo ed ai ritardi nelle consegne. L'obiettivo della ricerca di un'ottimizzazione degli interventi di manutenzione, da parte delle aziende, consiste nella minimizzazione dei costi totali.

Un parametro che influenza notevolmente i costi di manutenzione è il tasso di guasto, che rappresenta la frequenza con cui un generico componente tende ad andare fuori uso. L'andamento di questo parametro nel tempo è solitamente rappresentato dalla *bathtub curve* (vedi figura 1.2).

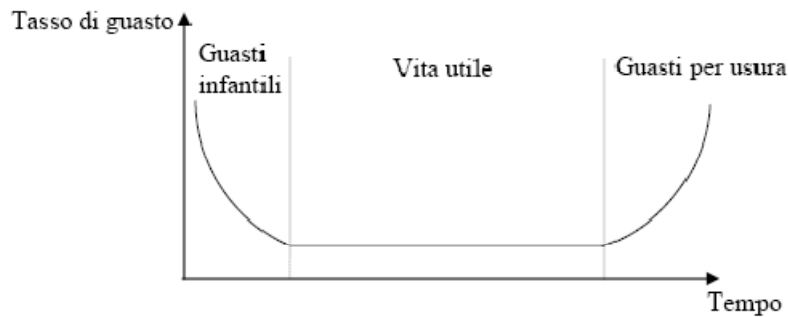


Figura 1.2: bathtub curve.

Durante la prima fase la probabilità di guasto è elevata poiché si manifestano problematiche legate alla messa in servizio del componente; nella fase intermedia l'andamento della curva è costante in quanto si ha un normale funzionamento della parte; infine la probabilità di guasto cresce rapidamente a causa dell'accentuazione dell'usura del componente. Lo scopo della manutenzione è quello di aumentare il tratto di vita utile della curva, riportando il componente nelle condizioni di funzionamento usuali.

A seconda del problema in esame, è necessario definire il tipo di manutenzione ottimale e pianificare una serie di interventi adeguati. Esistono svariate tipologie di metodi di manutenzione, tra cui le principali sono quella correttiva, quella preventiva ciclica, quella preventiva secondo condizione, quella preventiva predittiva, quella migliorativa e quella produttiva.

Storicamente, la più antica tipologia di manutenzione è quella correttiva o a guasto, in cui il componente meccanico, inserito all'interno di un impianto industriale, viene utilizzato finché l'entità del danno non è tale da imporre l'arresto del sistema. La parte viene quindi sostituita nel minor tempo possibile, in modo da ripristinare le condizioni di funzionamento normali. Questa tipologia di manutenzione prevede, da un lato, dei costi contenuti relativamente agli interventi di riparazione, che sono realizzati soltanto in caso di effettiva necessità, ed alla pianificazione dell'opera manutentiva. Dall'altro lato è necessario sostenere costi elevati legati, oltre alla mancata produzione, anche alla necessità di mantenere a magazzino un numero elevato di ricambi in modo

da minimizzare il periodo d'inoperatività della macchina. Inoltre risulta problematica la gestione del personale di manutenzione, in quanto si alternano periodi di eccessivo lavoro a periodi di inattività. Questa strategia di manutenzione risulta ancora oggi quella maggiormente utilizzata in quanto molte aziende considerano vantaggioso sostenere i costi connessi alla scelta della manutenzione correttiva piuttosto che impegnarsi economicamente nell'allestimento di un efficace sistema di misura volto all'attività diagnostica.

Con la manutenzione preventiva ciclica si definisce la vita media di ogni componente di una macchina industriale, prevedendo la sostituzione della parte dopo un periodo di tempo fissato in base al raggiungimento del valore atteso della vita media di funzionamento prevista. Il vantaggio di questo tipo di manutenzione risiede nella possibilità di programmare l'inattività della macchina in un periodo adatto, ad esempio di scarsa produzione, mentre lo svantaggio è il mancato utilizzo del componente per tutta la sua vita utile.

Nella manutenzione secondo condizione o CBM (Condition Based Maintenance) viene monitorato in modo continuo il sistema, definendo e calcolando degli indici caratteristici del suo stato. Quando i valori degli indicatori superano una soglia limite fissata, la probabilità di guasto del componente è elevata e quindi viene programmata la riparazione o la sostituzione a breve termine. Questa tipologia di manutenzione consente di conoscere le condizioni del sistema senza doverne interrompere il normale funzionamento e permette di attuare gli interventi solo sui componenti prossimi al danneggiamento.

La manutenzione predittiva prevede un sistema di monitoraggio dello stato del componente in modo da acquisire dei dati che, analizzati, consentano di prevedere il momento del guasto e di decidere opportune azioni di riparazione o di sostituzione.

Un'altra tipologia di manutenzione è quella migliorativa, dove vengono realizzate delle modifiche sui componenti danneggiati in modo da eliminare la causa del guasto.

Nella manutenzione produttiva, infine, il compito del monitoraggio è affidato ad un operatore specializzato, dedicato alla macchina, che deve essere in grado di valutare l'eventuale necessità di un intervento attraverso l'analisi di dati acquisiti, successivamente utilizzati per apportare dei miglioramenti al componente, eliminando la causa del guasto.

1.1 La manutenzione dei cuscinetti

I cuscinetti volventi nelle macchine rotanti sono tra i componenti meccanici maggiormente soggetti ad un danneggiamento prematuro. L'identificazione tempestiva della formazione del difetto consente di agire con una corretta manutenzione, garantendo non solo la sicurezza e l'affidabilità della macchina rotante, ma anche la riduzione dei tempi d'inoperatività, con un conseguente aumento dei profitti.

Esistono quattro diversi tipi di difetti che si possono presentare su un cuscinetto: sulla pista interna, sulla pista esterna, sugli elementi volventi e sulla gabbia.

Le cause di tali danneggiamenti possono essere diverse, come l'usura, causata ad esempio da una lubrificazione errata o assente, l'applicazione di un carico eccessivo, la presenza di detriti, urti o altri fenomeni non prevedibili. Se il difetto non viene individuato in tempo, si può arrivare al grippaggio del componente, che pregiudica il funzionamento del cuscinetto, a causa della difficoltà di rotazione di una o più delle sue parti e dell'albero su cui è calettato. La diagnostica dei difetti sui cuscinetti è quindi fondamentale per evitare la nascita di guasti di grave entità per la macchina, che porterebbero alla sospensione prolungata della sua attività, con un conseguente calo della produzione e del profitto.

Queste considerazioni mostrano come la manutenzione correttiva sia poco adatta al problema in esame, poiché comporta il rischio di sospendere l'intera produzione.

Le tipologie di manutenzione maggiormente utilizzate sui cuscinetti sono quelle preventive, in particolare quella correttiva. I cataloghi dei cuscinetti presentano delle formule approssimate per il calcolo della vita media del componente, in base alla quale viene fissato il momento della sostituzione.

Il tentativo attuale è quello di effettuare studi sulla diagnostica dello stato dei cuscinetti, per poter applicare una politica di manutenzione di tipo preventiva secondo condizione.

Il comportamento dei cuscinetti è monitorato in continuo con dei sensori, solitamente degli accelerometri, in grado di misurare le vibrazioni. Purtroppo, soltanto in alcuni casi questi rilevamenti sono ottenuti su macchine rotanti utilizzate in applicazioni industriali. Nella maggior parte degli studi, invece, i dati sono acquisiti su macchine rotanti impiegate in applicazioni particolari o su banchi prova appositamente progettati e realizzati oppure sono generati artificialmente per simulare il comportamento di un cuscinetto. I dati acquisiti

sono processati con tecniche dedicate, sviluppate con lo scopo di identificare ed evidenziare l'eventuale presenza del difetto.

L'obiettivo di questi sviluppi è quello di fornire un sistema di acquisizione dei dati facilmente applicabile alle macchine reali e dei programmi di analisi degli stessi in grado di fornire grafici interpretabili anche da utenti non esperti di vibrazioni. In realtà raggiungere i cuscinetti o i relativi supporti su una macchina rotante è un'operazione complessa, poiché solitamente sono posizionati in zone difficilmente penetrabili; inoltre l'analisi dei segnali acquisiti richiede una certa conoscenza del funzionamento di un cuscinetto e delle frequenze caratteristiche dei difetti.

1.2 Obiettivo e sviluppo della tesi

Nell'ottica di andare incontro alla necessità di avere strumenti in grado di analizzare i dati di vibrazioni sperimentali, nel presente lavoro di tesi sarà sviluppata una tecnica che consenta di effettuare la diagnostica sui cuscinetti.

Per applicare tale metodologia a segnali sperimentali, sarà progettato e realizzato un banco prova da laboratorio, che consenta, mediante alcuni sensori, di misurare le vibrazioni dei cuscinetti di prova che presentano diverse tipologie di danneggiamento.

Tali difetti saranno realizzati sui cuscinetti artificialmente, in modo tale che siano rilevabili dai sensori. Bisognerà quindi progettare il posizionamento opportuno del danneggiamento ed il metodo di realizzazione vincolato agli strumenti a disposizione in laboratorio.

Parallelamente verrà sviluppato via software l'algoritmo MED sulla base di quanto riportato nei lavori reperibili in letteratura.

Nella seconda fase si cercherà di individuare il danneggiamento attraverso l'analisi dei segnali mediante la tecnica realizzata.

In quest'ottica si è inteso organizzare il lavoro di tesi in una prima parte (capitolo 2) nella quale sarà presentato lo stato dell'arte dei banchi prova, dei danneggiamenti e della diagnostica sui cuscinetti e della MED. Tale stato dell'arte verrà realizzato a seguito di un attento esame degli articoli più recenti maggiormente utili ai fini dello sviluppo della tesi.

Nella seconda parte (capitolo 3) sarà descritta la fase di progettazione e realizzazione del banco prova in tutti i suoi componenti, la fase di scelta dei cuscinetti, sia quello di prova sia quelli di sostegno, la fase di scelta dei

parametri utilizzati durante le acquisizioni e la fase di progettazione del sistema di acquisizione.

Successivamente (capitolo 4) saranno presentati in dettaglio i quattro difetti realizzati sui cuscinetti, elencando le relative frequenze caratteristiche teoriche variabili in base alla velocità di rotazione dell'albero.

Nel capitolo 5 sarà fornita una precisa descrizione della modalità con cui è stato realizzato l'algoritmo della tecnica oggetto della tesi e delle sue caratteristiche principali, senza tuttavia entrare nel merito dei risultati ottenuti sui segnali acquisiti.

Quest'ultimo argomento sarà l'oggetto del capitolo 6, nel quale sono presentati i risultati più significativi ottenuti dall'applicazione della tecnica implementata, nell'ottica di valutare l'efficacia dell'algoritmo per la diagnostica dei cuscinetti basata sull'utilizzo dei segnali di vibrazione sperimentali.

Nel capitolo conclusivo (capitolo 7) vengono riportate alcune considerazioni finali in merito al lavoro svolto, mettendo in luce anche alcuni suggerimenti per sviluppi futuri, oggetto eventualmente di successivi lavori.

Capitolo 2

Diagnostica sui cuscinetti volventi: stato dell'arte

2.1 Banco prova

L'analisi di segnali di vibrazione relativi a cuscinetti danneggiati viene spesso effettuata utilizzando segnali simulati, realizzati [1] come una serie di impulsi ai quali viene sommato rumore casuale. I picchi si ripetono con una frequenza pari a circa quella del difetto in esame, non presentando una periodicità esatta in modo da riprodurre lo slittamento degli elementi volventi (vedi figura 2.1).

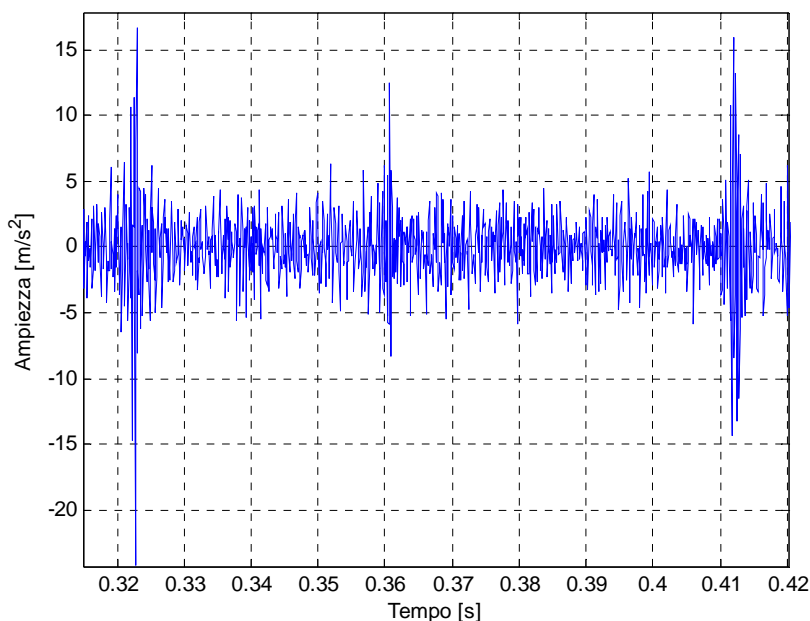


Figura 2.1: esempio di segnale simulato.

Per passare da segnali simulati ad applicazioni più vicine alla realtà alcuni autori [2]-[3]-[4]-[5]-[6]-[7] progettano dei banchi prova da laboratorio per eseguire delle prove sperimentali su cuscinetti danneggiati e ricavare segnali di vibrazione reali.

I banchi prova presentati (vedi figura 2.2) prevedono un motore elettrico che mette in rotazione, a velocità costante, un albero su cui è montato il cuscinetto danneggiato con il relativo supporto. Su quest'ultimo si trovano accelerometri, posizionati in direzione verticale ed in direzione orizzontale, collegati ad una scheda di acquisizione che invia i segnali ad un calcolatore.

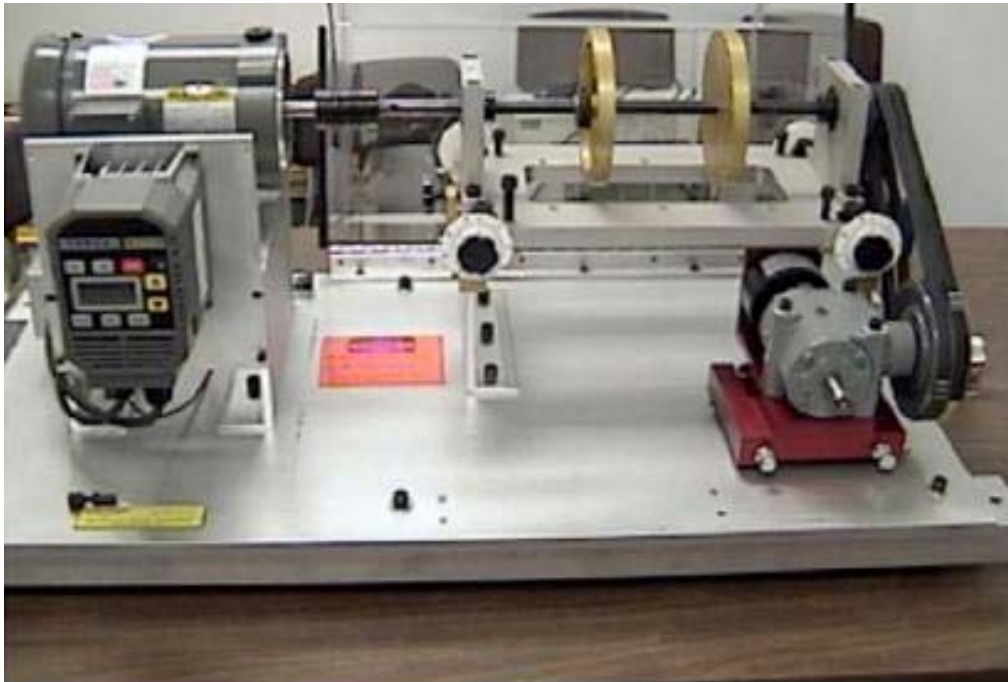


Figura 2.2: banco prova standard [2].

In letteratura sono riportati esempi di modifiche ed accorgimenti apportati ai banchi prova con l'obiettivo di migliorare la realizzazione delle prove sperimentali.

In alcuni casi [3]-[6], oltre al cuscinetto danneggiato, sono posizionati dei cuscinetti di supporto, il cui scopo è quello di evitare un'eccessiva inflessione dell'albero durante la sua rotazione (vedi figura 2.3).

In altri casi [4]-[7] si propone di realizzare il collegamento tra il motore e l'albero utilizzando un giunto flessibile, in modo da attenuare le vibrazioni torsionali indotte dal motore.

Inoltre, per accentuare la presenza del difetto, si propone di applicare un carico radiale costante sul cuscinetto test (vedi figura 2.3), ad esempio [3] utilizzando una pompa idraulica manuale che esercita una pressione su un pistone agente sul cuscinetto danneggiato ed un accumulatore che consente di stabilizzare la

pressione in modo da avere un carico costante. In alternativa [4], la pompa idraulica può applicare il carico all'albero attraverso un cuscinetto con un numero di elementi volventi molto maggiore rispetto a quello del cuscinetto test, in modo da non avere interferenza tra le frequenze caratteristiche dei due cuscinetti. Alcuni autori [6] applicano invece il carico al cuscinetto utilizzando un sistema meccanico a leva del tipo on-off, ossia in grado di applicare esclusivamente un unico valore di forza.

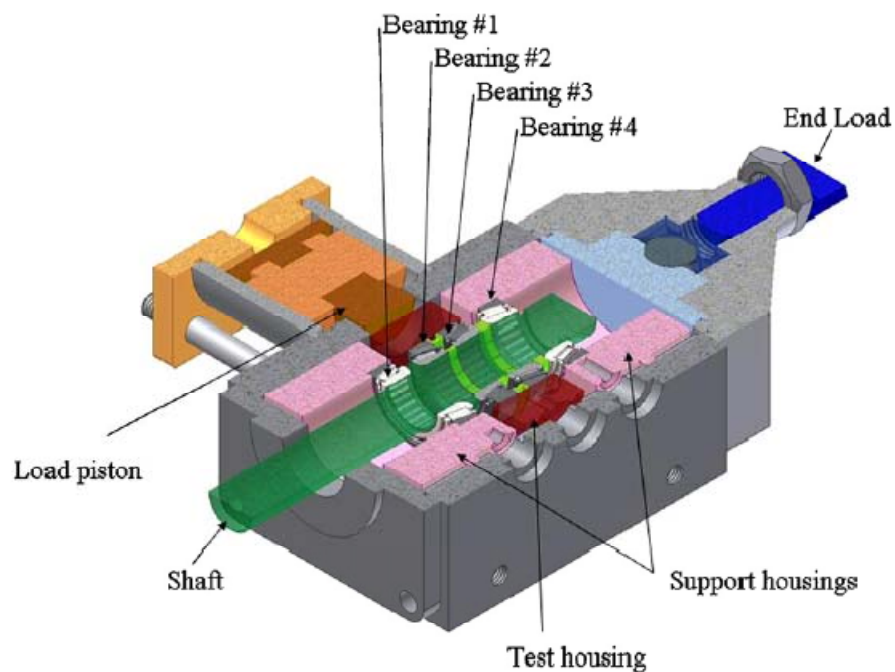


Figura 2.3: banco prova con due cuscinetti test (2-3) e due cuscinetti di supporto (1-4) e con sistema di carico [3].

Alcuni autori [3] prevedono l'utilizzo di termocoppie per misurare la temperatura ambiente e la temperatura dell'olio che viene fatto circolare all'interno dei cuscinetti con un apposito sistema di lubrificazione.

Inoltre [5] vengono acquisiti dal sistema la velocità e la coppia impressa all'albero dal motore elettrico.

2.2 Danneggiamento e diagnostica dei cuscinetti

Esistono due tipologie di difetti che possono presentarsi in un cuscinetto [8]: la prima comprende i difetti localizzati, che possono essere ad esempio una cricca o un'impronta; la seconda racchiude i difetti distribuiti, come ad esempio i disallineamenti tra le piste, l'eccentricità delle piste e la presenza di un elemento volvente di diametro leggermente maggiore rispetto agli altri. In questa sede si decide di porre l'attenzione sui danneggiamenti di tipo localizzato, trascurando quelli di tipo distribuito.

I difetti localizzati sui cuscinetti maggiormente studiati sono quello sulla pista interna, quello sulla pista esterna e quello sull'elemento volvente, mentre il danneggiamento della gabbia non è molto approfondito nella letteratura scientifica.

La principale causa di danneggiamento dei cuscinetti nelle applicazioni usuali, che porta ad avere delle micro cricche sulle piste, è dovuta al continuo contatto tra i componenti del cuscinetto sottoposto a fatica.

Esistono essenzialmente due modi per provocare un danneggiamento sul cuscinetto [3]: il primo, che richiede molto tempo, consiste nel far ruotare il cuscinetto fino alla comparsa del difetto, eventualmente accelerando il processo mediante l'applicazione di un carico o facendo ruotare l'albero ad una velocità elevata; il secondo consiste nel realizzare intenzionalmente il difetto sul cuscinetto utilizzando varie tecniche, come ad esempio l'attacco acido, l'elettro-erosione o il danneggiamento meccanico.

I difetti presenti sui cuscinetti non sono perfettamente sincroni con la rotazione dell'albero, poiché si verifica uno slittamento (*slippage*) tra gli elementi volventi. Infatti [1]-[9] l'angolo di contatto presente nelle formule caratteristiche dei difetti (vedi equazione (2.1)) varia in base alla posizione dell'elemento volvente nel cuscinetto, poiché varia il rapporto tra il carico radiale e quello assiale, portando gli elementi volventi a ruotare a velocità differenti tra loro. La gabbia obbliga però gli elementi volventi ad assumere una velocità media costante, provocando uno slittamento casuale pari a circa l'1-2% della frequenza di rotazione della gabbia. Per questo motivo, quando si applicano tecniche che tendono a mediare il segnale al fine di ridurre il rumore, come ad esempio la media sincrona, i picchi legati alla presenza del difetto non si sommano tra loro e non vengono quindi amplificati.

Sono perciò necessarie altre tecniche per la precisa identificazione del difetto presente sul cuscinetto. La tecnica più utilizzata per la diagnostica sui cuscinetti

è l'envelope analysis [7], in grado di individuare correttamente i difetti, in quanto riesce a separare le vibrazioni generate dal danneggiamento presente sul cuscinetto da quelle causate dagli altri elementi della macchina. Altre tecniche utilizzate sono la ciclostazionarietà del secondo ordine [1], la mappa di Poincare [2], il monitoraggio elettrostatico [3], l'utilizzo di trasduttori per misurare lo spostamento della pista esterna [4], la Self Adaptive Noise Cancellation (SANC) [9], l'analisi spettrale [5]-[10], la Morphological Undecimated Wavelet Decomposition [6].

2.2.1 Pista interna

Il difetto sulla pista interna può essere effettuato con uno strumento in grado di realizzare un taglio parallelo all'asse dell'albero [2] oppure mediante l'utilizzo di una macchina che permetta l'esecuzione di un'impronta nella zona centrale della pista [3] (vedi figura 2.4).

Vengono solitamente [6] provate diverse dimensioni del difetto, in modo da valutare la validità della tecnica di analisi all'aumentare della severità del danneggiamento.

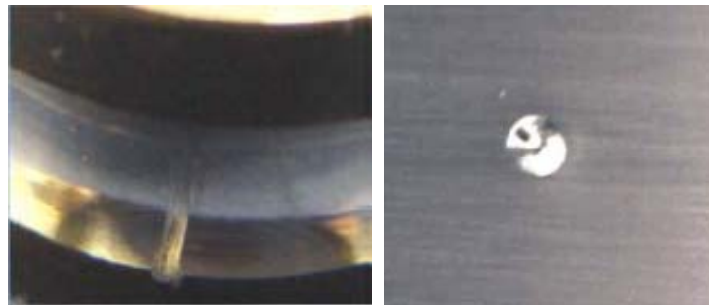


Figura 2.4: tipi di danneggiamento sulla pista interna [3]-[2].

Quando avviene il passaggio di un elemento volvente sul difetto presente sulla pista interna, si ha un urto che eccita i modi strutturali del cuscinetto e del supporto [1].

Questa serie di urti avviene con una frequenza chiamata Ball Pass Frequency Inner race (*BPMI*) [5]-[6].

$$BPMI = f_s \frac{z}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \quad (2.1)$$

dove:

- f_s è la frequenza di rotazione dell'albero

- z è il numero di elementi volventi
- d è il diametro del singolo elemento volvente
- D è il diametro medio del cuscinetto o diametro di pitch
- α è l'angolo di contatto tra l'elemento volvente e le piste del cuscinetto.

Misurando le vibrazioni di un cuscinetto che presenta un difetto sulla pista interna, si ottiene tipicamente [9] un segnale nel tempo caratterizzato da picchi distanziati tra loro di un intervallo temporale pari all'inverso della frequenza del difetto in esame ($BPFI$), modulati in ampiezza all'interno di un intervallo temporale pari all'inverso della frequenza di rotazione dell'albero, come riportato in figura 2.5.

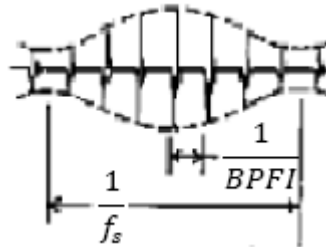


Figura 2.5: segnale di un difetto sulla pista interna [9].

Tale andamento deve essere imputato alla rotazione del difetto rispetto al carico applicato sul cuscinetto, in quanto [10] il danneggiamento viene sollecitato fortemente quando si trova nella zona del carico mentre è eccitato in modo meno significativo quando si allontana dalla forza. Il periodo della modulazione è legato alla frequenza con cui il difetto compie una rotazione completa rispetto al punto di applicazione del carico. In questo caso specifico questa frequenza è data dalla rotazione dell'anello interno, ossia dell'albero.

I risultati ottenuti con la maggior parte delle tecniche presentate precedentemente possono essere ricondotti a quelli determinati con l'envelope analysis, che nel dominio delle frequenze fornisce una rappresentazione analoga all'andamento del segnale nel tempo (vedi figura 2.6).

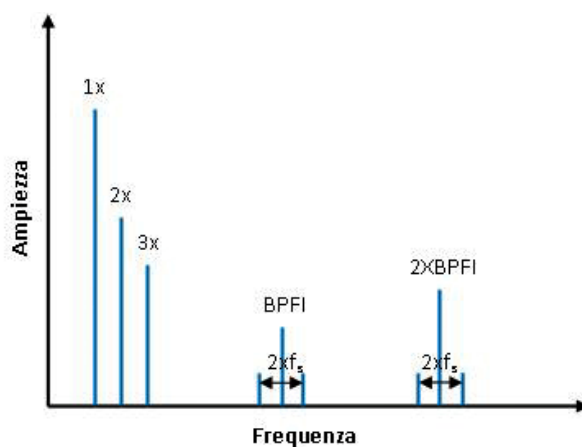


Figura 2.6: envelope analysis di un difetto sulla pista interna.

Il difetto sulla pista interna è rappresentato da delle bande centrate su una frequenza pari alla $BPFI$ ed alle sue armoniche e con bande laterali spaziate di una quantità pari alla frequenza di rotazione dell'albero. Nel dominio delle frequenze sono inoltre riconoscibili dei picchi corrispondenti alla f_s ed alle sue armoniche.

2.2.2 Pista esterna

Il difetto sulla pista esterna può essere realizzato attraverso l'utilizzo di uno strumento che incida la parte interna della pista [4], dove avviene il contatto con gli elementi volventi (vedi figura 2.7), oppure attraverso l'elettroerosione [7].

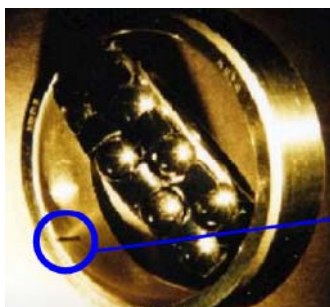


Figura 2.7: tipi di danneggiamento sulla pista esterna [7].

La fenomenologia di questo tipo di difetto è analoga a quella del difetto realizzato sulla pista interna, ossia si ha il contatto tra gli elementi volventi ed il danneggiamento con una frequenza indicata come Ball Pass Frequency Outer race ($BPFO$) [5]-[6].

$$BPFO = f_s \frac{z}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \quad (2.2)$$

In questo caso il segnale nel tempo di un cuscinetto danneggiato caricato [9] presenta dei picchi equispaziati di un intervallo temporale pari all'inverso della frequenza caratteristica del difetto sulla pista esterna, come riportato in figura 2.8.

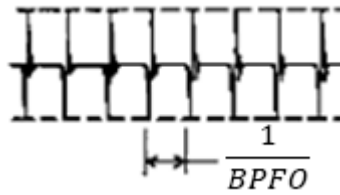


Figura 2.8: segnale di un difetto sulla pista esterna [9].

L'assenza della modulazione in ampiezza è determinata dall'assenza di movimento della pista esterna rispetto alla zona di applicazione del carico, durante la rotazione dell'albero. Il difetto, quindi, rimane in una posizione fissa rispetto alla forza applicata al cuscinetto.

I segnali acquisiti sul cuscinetto danneggiato sulla pista esterna, variano significativamente a seconda della posizione del danneggiamento rispetto al carico applicato. Per gli scopi per i quali il banco prova è stato progettato, risulta fondamentale [10], quindi, posizionare il cuscinetto in modo che il difetto sia in corrispondenza della zona di applicazione della forza, per ottenere un segnale nel dominio del tempo che contenga tutte le informazioni correlate alla presenza del danneggiamento.

Anche nel caso di difetto sulla pista esterna, il comportamento nel dominio delle frequenze, ottenuto tramite l'envelope analysis, conferma quanto riportato precedentemente (vedi figura 2.9).

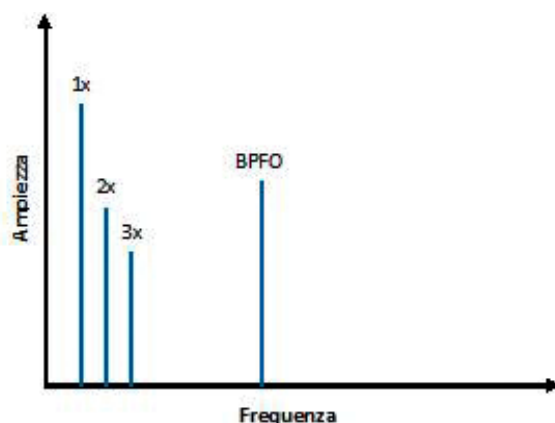


Figura 2.9: envelope analysis di un difetto sulla pista esterna.

Oltre ai picchi associati alla frequenza di rotazione dell'albero ed alle sue armoniche, sono visibili dei picchi posizionati in corrispondenza della *BPFO* e delle sue armoniche.

2.2.3 Elemento volvente

Per quanto riguarda il difetto sull'elemento volvente, in letteratura sono riportati casi relativi sia a danneggiamenti realizzati su sfere [3] sia a danneggiamenti realizzati su rulli [2]. Si tende comunque a privilegiare l'utilizzo di questi ultimi per eseguire le prove sperimentali, in quanto le sfere ruotano casualmente all'interno della gabbia e quindi non si ha la certezza di ottenere il contatto tra il difetto e le piste.

Il danneggiamento può essere realizzato mediante uno strumento che segni profondamente l'elemento volvente [3] oppure utilizzando un cutter, in grado di realizzare una lieve incisione [2] (vedi figura 2.10).

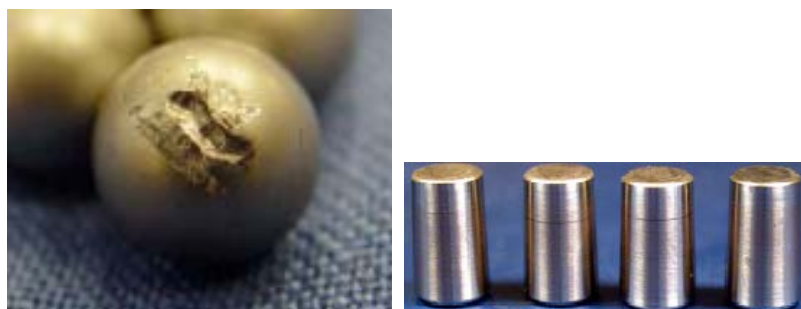


Figura 2.10: tipi di danneggiamento sull'elemento volvente [3]-[2].

Il difetto sull'elemento volvente impatta su una delle due piste del cuscinetto con una frequenza pari a quella di rotazione dell'elemento stesso, chiamata Ball Spin Frequency (*BSF*) [5]-[6].

$$BSF = f_s \frac{D}{2d} \left(1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 (\cos\alpha)^2 \right) \quad (2.3)$$

La frequenza del difetto è quindi pari a $2xBSF$, in quanto durante una rotazione dell'elemento volvente il difetto entra in contatto sia con la pista interna sia con quella esterna.

L'andamento di un segnale rappresentativo delle vibrazioni di un cuscinetto soggetto al danneggiamento in esame [9] mostra dei picchi principali, distanziati di un intervallo temporale pari all'inverso della frequenza di rotazione dell'elemento volvente (*BSF*) e dei picchi secondari, di ampiezza minore, equispaziati dai primi di un intervallo temporale pari alla frequenza del difetto ($2xBSF$) (vedi figura 2.11). Il segnale risulta modulato in ampiezza in un intervallo temporale di periodo pari all'inverso della frequenza di rotazione della gabbia, indicata come Fundamental Train Frequency (*FTF*) [5]-[6].

$$FTF = \frac{f_s}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos\alpha \right) \quad (2.4)$$

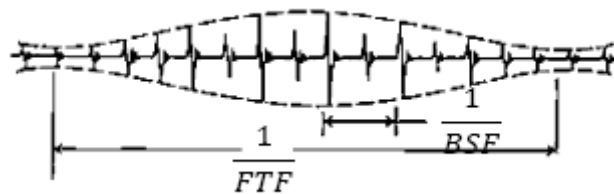


Figura 2.11: segnale di un difetto sull'elemento volvente [9].

Anche in questo caso, come presentato nell'analisi del difetto sulla pista interna, il segnale nel tempo è modulato poiché l'elemento volvente si muove rispetto al carico applicato sul cuscinetto. Il periodo impiegato dall'elemento volvente danneggiato per compiere una rotazione completa rispetto alla zona di applicazione della forza è pari al periodo impiegato dalla gabbia per realizzare la stessa rotazione, poiché è proprio la gabbia a trascinare gli elementi volventi. Conseguentemente, l'intervallo temporale della modulazione del segnale risulta legato alla frequenza di rotazione della gabbia.

Analogamente ai due casi precedenti, l'envelope analysis fornisce un andamento nel dominio delle frequenze che rispecchia il comportamento nel tempo del segnale acquisito su un cuscinetto con un elemento volvente danneggiato, come riportato in figura 2.12.

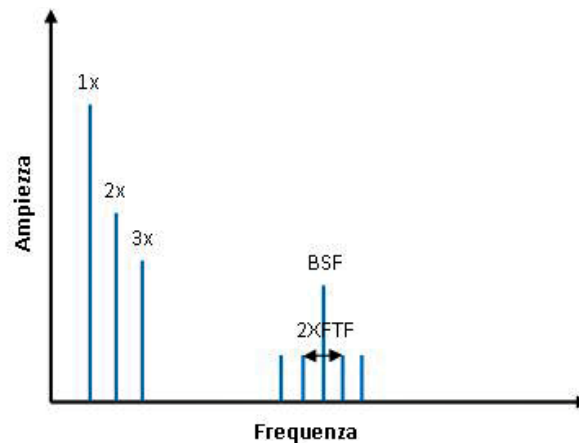


Figura 2.12: envelope analysis di un difetto sull'elemento volvente.

Nel dominio delle frequenze, sono presenti dei picchi relativi alla frequenza di rotazione dell'albero ed alle sue armoniche e delle bande associate, invece, alla presenza del difetto sull'elemento volvente. Tali bande presentano una frequenza centrale pari alla frequenza di rotazione dell'elemento volvente (BSF) ed alle sue armoniche e delle bande laterali distanziate di una quantità pari alla frequenza di rotazione della gabbia (FTF).

2.3 Tecniche di analisi dei segnali

Esistono varie tecniche di analisi dei segnali di vibrazione di cuscinetti volventi volte ad individuare l'eventuale presenza di un danneggiamento. In particolare la letteratura scientifica riporta tecniche, utili a tale scopo, che operano nel dominio della magnitudo, come le grandezze statistiche, nel dominio delle frequenze, come la trasformata di Fourier e l'envelope analysis, e nel dominio misto tempo-frequenza, come la Short Time Fourier Transform (STFT) e la trasformata di Hilbert. Per quanto riguarda il dominio del tempo, la letteratura propone l'algoritmo MED, che però non è utilizzato in modo diffuso, come le altre tecniche, per effettuare attività diagnostica dedicata all'identificazione di danneggiamenti sui cuscinetti.

2.3.1 Grandezze statistiche

I parametri statistici presi in considerazione sono quelle grandezze, stimabili nel dominio della magnitudo, che consentono di ricavare informazioni relative sia alle componenti impulsive presenti nel segnale di vibrazione che si sta analizzando sia all'energia trasportata dal segnale stesso [8]-[11].

La prima grandezza analizzata è il valore quadratico medio o Root Mean Square (*RMS*), che corrisponde al momento statistico non centrale del secondo ordine.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (2.5)$$

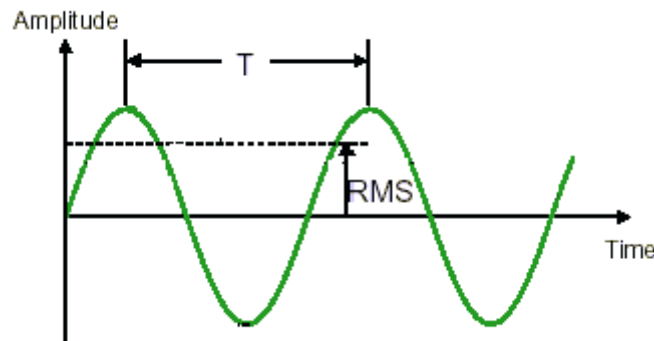


Figura 2.13: rappresentazione del valore *RMS* per un segnale sinusoidale.

Il valore *RMS* fornisce un'indicazione sull'energia, e quindi sulla potenza, trasportata dal segnale.

La seconda grandezza presa in esame è il Kurtosis (*K*), definito come il momento statistico centrale del quarto ordine adimensionale.

$$K = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^4}{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2 \right]^2} \quad (2.6)$$

Questo permette di definire il carattere impulsivo di un segnale, ossia misura l'entità dei picchi di una distribuzione e descrive l'appiattimento della curva di densità di probabilità di tale distribuzione, confrontandola con la curva Gaussiana, che presenta un valore di Kurtosis pari a 3. All'aumentare della

componente impulsiva di un segnale si presuppone che aumenti anche il valore assunto da questo indicatore statistico [11].

Il terzo parametro considerato è il Crest Factor (CF), definito come rapporto tra il valore del picco massimo ed il valore efficace di un segnale.

$$CF = \frac{\text{Peak}}{\text{RMS}} \quad (2.7)$$

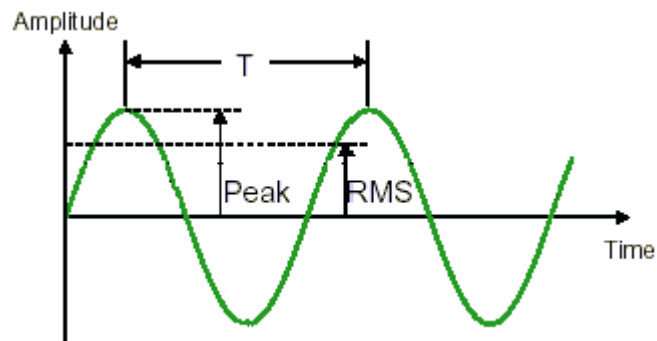


Figura 2.14: parametri del segnale che permettono di calcolare CF per un segnale sinusoidale.

Questa grandezza risulta fortemente influenzata dalla presenza di picchi nel segnale, ma non tiene conto della loro numerosità in quanto ne basta anche solo uno per avere una variazione del valore.

Il quarto parametro utilizzato è il valore Peak-Peak (PP), che corrisponde alla differenza tra il valore massimo ed il valore minimo di un segnale (vedi figura 2.15).

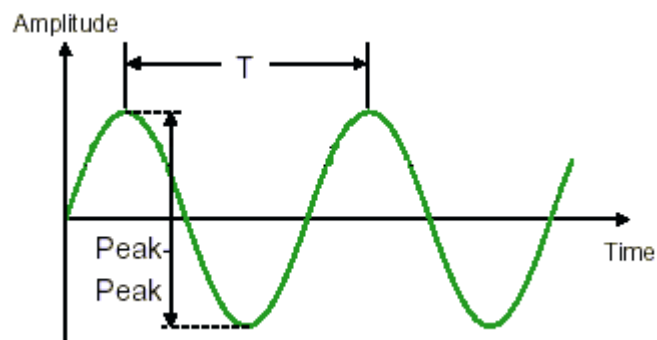


Figura 2.15: rappresentazione del valore PP per un segnale sinusoidale.

La presenza di un eventuale danneggiamento sull'elemento in esame si traduce solitamente in un aumento di questi parametri statistici oltre alcuni valori soglia considerati come confine tra assenza e presenza di un difetto. Queste grandezze permettono quindi di individuare la formazione di un danneggiamento, ma non consentono di caratterizzarlo. Inoltre questo metodo diagnostico risulta poco robusto in quanto può essere influenzato da una svariata gamma di variabili. Infatti, potrebbe bastare la presenza di una maggiore quantità di rumore in un'acquisizione a far aumentare l'energia del segnale ed indurre, quindi, anche un aumento nei parametri statistici con una conseguente analisi errata relativa ad un elemento privo di danneggiamento [4].

2.3.2 Trasformata di Fourier

Per effettuare un'analisi completa del segnale preso in esame, spesso è utile spostare l'analisi dal dominio del tempo a quello delle frequenze. La trasformata di Fourier consente di determinare le componenti in frequenza che compongono il segnale e di individuare quelle aventi maggiore energia. L'ipotesi principale su cui ci si basa per il passaggio al dominio delle frequenze, è la periodicità della storia temporale esaminata e quindi anche del fenomeno ad essa correlato. Infatti una caratteristica fondamentale dei segnali periodici risiede nella possibilità di essere descritti come somma di componenti armoniche. Solitamente però i segnali relativi a fenomeni reali non sono perfettamente periodici. Tuttavia, immaginando di allungare l'asse dei tempi (azione equivalente ad assumere che il periodo del segnale tenda ad infinito), si può considerare un qualsiasi segnale come periodico di periodo pari alla sua intera lunghezza. Prendendo in esame un segnale discreto, cioè costituito da una serie di N_p punti acquisiti a distanza temporale t_p uno dall'altro, di durata $T_p = N_p t_p$, la Discrete Fourier Transform (DFT) ne consente la trasformazione in uno spettro discretizzato avente $\frac{N_p}{2}$ componenti complesse, poste ad una distanza pari a $\frac{f_{Nyquist}}{N_p}$ (con $f_{Nyquist} = \frac{1}{2t_p}$) [12]-[13].

$$X_k = \sum_{n=1}^N x_n \cdot e^{-\frac{2\pi kn}{N_p}} \quad (2.8)$$

Tra le varie formulazioni che permettono di passare dal dominio del tempo a quello delle frequenze, si utilizza in questa sede la Fast Fourier Transform (FFT). Questo metodo consente di diminuire l'elevato peso computazionale

associato ai calcoli richiesti dalla DFT, riducendo il numero di operazioni necessarie a trasformare una serie temporale costituita da un numero elevato di punti [14]. Questa tecnica è molto utile per determinare le componenti principali del segnale e l'energia ad esse associata, nel dominio delle frequenze.

2.3.3 Envelope analysis

L'envelope analysis è una tecnica che consente di estrarre in modo efficace le componenti impulsive periodiche da un segnale di vibrazione di un generico componente meccanico. Il metodo è in grado di identificare anche quelle componenti aventi energia limitata, nascoste dalle componenti ad energia maggiore caratterizzanti il segnale [1]. Questa tecnica è molto efficace per l'attività diagnostica condotta su danneggiamenti presenti su macchinari che vedono le proprie componenti modulate con le frequenze caratteristiche della macchina stessa, come i danneggiamenti sui cuscinetti volventi [8].

Per effettuare l'envelope analysis, innanzitutto, si applica un filtro passa banda ad un segnale di vibrazioni, in modo da ottenere un segnale $s(t)$ che contiene soltanto le componenti impulsive periodiche, legate alla presenza di un danneggiamento. In seguito si valuta la trasformata di Hilbert di tale segnale [15], ricavandone la parte immaginaria $s_h(t)$, con la quale è possibile scrivere il segnale analitico come mostrato nell'equazione (2.9).

$$s_a(t) = s(t) + j \cdot s_h(t) \quad (2.9)$$

Infine si valuta il valore assoluto del segnale analitico e si applica la trasformata di Fourier per passare al dominio delle frequenze ed ottenere lo spettro di $|s_a(t)|$, in cui è possibile riconoscere in modo chiaro quelle componenti impulsive periodiche che risultavano nascoste nel segnale originale.

Considerando di associare gli impulsi periodici ad un eventuale danneggiamento di un cuscinetto volvente, l'envelope analysis permette non soltanto di individuare la presenza di tali impulsi, ma anche di localizzarne in modo preciso le componenti. Ciò consente pertanto di stabilire la presenza e la tipologia del difetto a cui è soggetto il cuscinetto che si sta analizzando [8].

2.3.4 STFT

Spesso, nell'ambito del monitoraggio e dell'attività diagnostica rivolta ai cuscinetti volventi, risulta necessario caratterizzare alcuni fenomeni nel dominio misto tempo-frequenza, che permette di analizzare in modo efficace un fenomeno il cui contributo armonico varia nel tempo.

La Short Time Fourier Transform (STFT) appartiene all'insieme di quelle tecniche di analisi dei segnali che operano in tale dominio ibrido e si basa essenzialmente sulla trasformata di Fourier [12]. Si considera, a titolo esemplificativo, un segnale ideale $f(t)$ continuo nel tempo, che può essere modellato, dal punto di vista reale, come un segnale acquisito ad una frequenza di campionamento $f_c \rightarrow \infty$ e finestrato con una finestra rettangolare di lunghezza $T_p \rightarrow \infty$. Applicando la STFT a $f(t)$, si ottiene lo spettro in frequenza sulle n sottofinestre di ampiezza T_i in cui viene suddiviso l'intero record. In sostanza questa tecnica applica l'algoritmo della trasformata di Fourier ad ogni singola sottofinestra in cui è suddiviso il segnale.

$$\text{STFT}[f(t); \omega; \tau] = \langle f(t), w(t - \tau) \cdot e^{j\omega t} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot w(t - \tau) \cdot e^{j\omega t} dt \quad (2.10)$$

La funzione di kernel $w(t - \tau) \cdot e^{j\omega t}$ che appare nell'equazione (2.10), presenta un fattore dipendente dalla frequenza, $e^{j\omega t}$, che consente l'estrazione dello spettro in frequenza, ed un fattore dipendente dal tempo, $w(t - \tau)$, che rappresenta la finestrazione in funzione del parametro τ (shift temporale). La finestra consente di limitare la trasformata di Fourier ad un sottointervallo temporale di ampiezza dipendente dalla finestra stessa.

Il risultato derivante dall'applicazione di questa tecnica è lo spettrogramma, ossia un grafico tridimensionale dove tempo e frequenza sono gli assi del piano, mentre il quadrato del modulo dello spettro è rappresentato come intensità cromatica. L'obiettivo di questo diagramma è quello di fornire la distribuzione energetica del segnale nel piano $\tau - f$.

I grandi vantaggi della tecnica consistono nella possibilità di localizzare un fenomeno circoscritto ad un limitato intervallo di tempo e di fornirne contemporaneamente il contenuto armonico. Inoltre, questa tecnica, permette anche di fornire indicazioni riguardo le variazioni di frequenze nel tempo per segnali formati da componenti armoniche i cui moduli e le cui frequenze risultano variabili nel dominio temporale [12].

Il limite principale di questa tecnica consiste nell'incapacità di fornire contemporaneamente buona localizzazione temporale e buona risoluzione in frequenza, poiché $\Delta t \cdot \Delta f = \text{costante}$. Inoltre, si osserva che l'informazione contenuta nello spettrogramma è maggiormente concentrata alle alte frequenze, rispetto alle basse, in corrispondenza delle quali è molto difficile riconoscere in

modo efficace componenti armoniche differenti, a meno di limitare la risoluzione temporale.

2.3.5 EMD e trasformata di Hilbert

Poiché la maggior parte delle tecniche nel dominio misto tempo-frequenza richiede un segnale stazionario e periodico, recentemente è stata sviluppata una tecnica ottenuta associando l'applicazione della Empirical Mode Decomposition (EMD) all'applicazione della trasformata di Hilbert.

Considerando un generico segnale $f(t)$, è necessario, innanzitutto, effettuare una scomposizione nelle sue componenti intrinseche semplici. Tale procedimento consiste nell'applicazione di un processo iterativo di sifting attraverso il quale si cerca di ricavare le varie Intrinsic Mode Functions (IMF), funzioni ortogonali che sommate tra loro permettono di riottenere il segnale originale [16].

Poiché la trasformata di Hilbert è realizzata in maniera preferenziale su segnali di tipo casuali e costituiti da un'unica componente, tale tecnica è applicata sui risultati ottenuti dall'applicazione dell'EMD al generico segnale. Considerando quindi un segnale monocomponente $x(t)$, ottenuto a seguito della decomposizione di $f(t)$ nelle sue componenti intrinseche semplici, si può applicare la trasformata di Hilbert [15].

$$Y(t) = \frac{1}{\pi} \cdot P \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(t')}{t-t'} dt' \quad (2.11)$$

Nelle equazione (2.11), t' rappresenta lo sfasamento temporale e P il valore principale di Cauchy, che permette l'integrazione di funzioni non limitabili nell'insieme di integrazione. Il risultato della trasformata, $Y(t)$, rappresenta la parte immaginaria del segnale $x(t)$ e consente di ottenere il segnale analitico.

$$s_a(t) = x(t) + j \cdot Y(t) = a(t) \cdot e^{j\theta(t)} \quad (2.12)$$

Avendo calcolato il segnale analitico, risulta immediato ricavare modulo e fase.

$$a(t) = \sqrt{x(t)^2 + Y(t)^2} \quad (2.13)$$

$$\theta(t) = \tan^{-1} \left[\frac{Y(t)}{x(t)} \right] \quad (2.14)$$

L'equazione (2.14) permette di ricavare la fase istantanea del segnale analitico, che è stata resa dipendente dal tempo dall'applicazione della trasformata di Hilbert [17]. Si può quindi ricavare la frequenza istantanea:

$$f_{is} = \frac{d\theta(t)}{2 \cdot \pi \cdot dt} \quad (2.15)$$

La frequenza istantanea, così come calcolata nell'equazione precedente (vedi equazione (2.15)), associa il segnale ad un solo valore della frequenza per ogni istante temporale.

Quindi, dopo aver decomposto il segnale in IMF, applicato ad esse la trasformata di Hilbert e calcolato la frequenza istantanea (in accordo con le equazioni (2.11), (2.12) e (2.15)), è possibile rappresentare il segnale originale, come riportato nell'equazione (2.16).

$$x(t) = \sum_{i=1}^n a_i(t) \cdot e^{(j \int \omega_i(t) dt)} \quad (2.16)$$

L'ampiezza variabile nel tempo e la frequenza istantanea hanno permesso alla serie di accogliere componenti non stazionarie. Con le IMF, l'ampiezza e la modulazione in frequenza risultano separate in modo chiaro, portando alla possibilità di rappresentare frequenze ed ampiezze variabili attraverso un'espressione numerica [15]. Dall'equazione (2.16) deriva dunque la possibilità di creare un grafico tridimensionale, che prende il nome di spettro di Hilbert-Huang $H(f_{is}, t)$, nel quale, per ogni valore dell'asse temporale e di quello delle frequenze, viene a trovarsi un valore energetico espresso in ampiezza.

2.3.6 MED

La tecnica denominata Minimum Entropy Deconvolution (MED) è stata ideata da Ralph Wiggins nel 1978 per lo studio dei segnali sismici ed è stata poi riproposta e migliorata da vari autori negli anni seguenti.

L'entropia di un segnale è correlata alla quantità di informazioni contenute nel segnale stesso. Tale quantità è tanto maggiore quanto più il segnale è casuale [18]. La MED cerca di ridurre la casualità di un segnale minimizzando la sua entropia, obiettivo raggiunto evidenziando i picchi di ampiezza maggiore presenti nell'acquisizione e riducendo quelli di ampiezza minore. La tecnica utilizza una trasformazione lineare, ossia un filtro, per convertire una sequenza

in un'altra, diminuendo tutte le componenti del segnale in ingresso tranne una, quella con energia maggiore. Si ottiene così un segnale risultante che presenta dei picchi isolati in corrispondenza della porzione di segnale in input in cui si ha la massima concentrazione di energia.

La MED è in grado di determinare il periodo di un segnale periodico o quasi-periodico, individuando il punto di maggiore energia non all'interno dell'intero segnale, ma all'interno del periodo considerato. In questo modo, riesce anche ad individuare la periodicità di un fenomeno nascosto dalle altre componenti contenute nel segnale.

Il segnale originario può essere visto come convoluzione di due termini, a cui può essere sommato un terzo contributo.

$$x(n) = z(n) * w(n) + \eta(n) \quad (2.17)$$

Nell'equazione (2.17) [19], z è la componente del segnale associata al comportamento della struttura, indicata come reflectivity negli studi sismici, w è la parte associata alla sorgente che eccita il sistema, chiamata wavelet, e η è la componente casuale associata al rumore contenuto nel segnale. L'obiettivo è estrapolare z dall'input x .

Il segnale viene processato [19] attraverso un filtro, ottenendo il segnale di output:

$$y(n) = x(n) * f(n) = z(n) * w(n) * f(n) + \eta(n) * f(n) = \sum_{i=0}^{M-1} f(i)x(n-i) \quad (2.18)$$

$$n = 0, 1, \dots, T + M - 2$$

Indicando con M la lunghezza, che deve essere opportunamente valutata, del filtro di deconvoluzione f e con T la lunghezza dell'input x , si ottiene un segnale y che presenta una lunghezza pari a $N = T + M - 2$.

Il filtro convoluto con la prima componente del segnale origina [19] delle funzioni simili ad una delta di Dirac, mentre la convoluzione con η consente di attenuare significativamente la presenza del rumore nel segnale. L'output che si ottiene ha una caratteristica fondamentale, chiamata *parsimony*, ossia è una *soluzione semplice* o *con una struttura minima*, nel senso che presenta il massimo ordine possibile. In pratica [20], l'output è costituito da una serie di valori prossimi allo zero, tranne pochi termini che assumono dei valori nettamente superiori.

La *parsimony* di un segnale può essere misurata mediante il calcolo della norma Varimax [18].

$$V(y) = \frac{\sum_{j=0}^N y^4(j)}{(\sum_{j=0}^N y^2(j))^2} \quad (2.19)$$

Massimizzando questa quantità rispetto i coefficienti del filtro f , si minimizza l'entropia del segnale sotto esame, determinando l'output y che meglio approssima la componente del segnale z .

$$\frac{\partial V(y)}{\partial f(n)} = 0 \quad (2.20)$$

Si ottiene così un sistema di M equazioni

$$V(y) \sum_{i=0}^{M-1} f(i) \sum_{j=0}^N x(j-i)x(j-k) = \sum_{j=0}^N \frac{y^3(j)x(j-k)}{\|y\|^2} \quad (2.21)$$

$$k = 0, 1, \dots, M-1$$

che può essere riscritto in forma matriciale come

$$V(y)R_{xx}f = \frac{1}{\|y\|^2}g \quad (2.22)$$

dove:

- R_{xx} è la matrice di Toeplitz dell'autocorrelazione di x , di dimensioni $M \times M$
- g è un vettore di dimensioni $2T + M - 4$ contenente la cross correlazione tra x ed il cubo di y .

Il sistema matriciale scritto (vedi equazione (2.22)) non è lineare, quindi bisogna costruire un algoritmo iterativo per determinare la soluzione ottimale:

- si ipotizza un filtro iniziale che approssima una funzione delta di Dirac, del tipo $f_0 = [0 \dots 0 \ 1 \ 0 \dots 0]$;
- si calcolano y , $V(y)$, R_{xx} , $\|y\|$ e g ;

- si determinano i nuovi coefficienti di f invertendo il sistema matriciale (vedi equazione (2.22));
- si ricomincia dal secondo punto fino al raggiungimento del valore massimo della norma Varimax.

Ad ogni iterazione la norma Varimax cresce, fino a diventare stazionaria [20], come riportato in figura 2.16, rendendo quindi impossibile l'aumento ulteriore della *parsimony* del segnale.

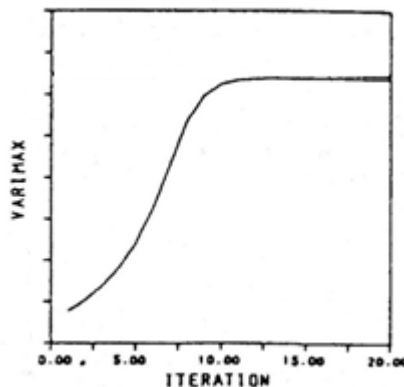


Figura 2.16: andamento della norma Varimax [20].

Per ridurre il tempo computazionale richiesto per l'analisi condotta con la MED, l'algoritmo può essere fermato prima del raggiungimento del massimo, utilizzando diversi criteri d'arresto. Innanzitutto si può fissare [18] una tolleranza sulla differenza tra due consecutivi valori della norma Varimax. Se si ottiene un valore di tale differenza minore del limite fissato terminano le iterazioni. Questa tolleranza deve essere tale da permettere all'algoritmo di compiere almeno tra le 5 e le 10 iterazioni. Un altro criterio per arrestare l'algoritmo iterativo [21] consiste nel calcolare il coefficiente di correlazione tra il filtro ad una certa iterazione e quello al passo precedente ed evitare che il valore di tale coefficiente superi una tolleranza prefissata. Come ultima alternativa [21] è possibile imporre direttamente un numero massimo di iterazioni.

La scelta della lunghezza del filtro è uno dei punti fondamentali per il corretto funzionamento della tecnica. M , infatti, deve essere tale da consentire di identificare la periodicità del segnale che si sta analizzando, e quindi deve assumere un valore compreso tra il 50% ed il 100% del periodo che si vuole

valutare. Se la lunghezza scelta è errata, la MED non è in grado di determinare il valore massimo della norma Varimax, e, di conseguenza, non riesce ad estrapolare dall'input la parte di segnale di interesse [19]. Il valore ottimo di M viene determinato [20] applicando diverse lunghezze al filtro e valutando di volta in volta il segnale di output migliore che si ottiene.

Infine si deve valutare la lunghezza dell'input necessaria ad avere un buon compromesso tra la significatività della soluzione ottenuta ed i tempi di calcolo. Per tale motivo, T deve essere scelto in modo da contenere almeno tre periodi del fenomeno che si vuole valutare [18]. Aumentando il valore di T cresce significativamente il tempo computazionale necessario all'applicazione dell'algoritmo, senza peraltro ottenere nessun miglioramento nella soluzione finale.

Realizzando diverse prove per ottimizzare i parametri modificabili della MED, identificabili nel criterio per fermare il numero di iterazioni, nella lunghezza del filtro e nella lunghezza dell'input, la tecnica permette di valutare sia la zona di massima concentrazione dell'energia all'interno dell'intero segnale, sia la periodicità di un qualsiasi fenomeno nascosto nell'input.

Capitolo 3

Progettazione e realizzazione del banco prova e delle prove sperimentali

3.1 Progettazione e realizzazione del banco prova

Per la realizzazione dell'attività diagnostica sui cuscinetti danneggiati, invece di utilizzare segnali simulati e poiché non si disponeva di dati relativi ad applicazioni reali, è stato deciso di utilizzare un banco prova dedicato, realizzato sulla base delle indicazioni riportate nel capitolo 2.1.

Il banco prova, utilizzato per eseguire le prove sperimentali sui cuscinetti danneggiati, è stato progettato a partire da un banco situato presso il laboratorio meccanico della Sede di Piacenza, scarsamente utilizzato perché affetto da problemi agli azionamenti. I principali componenti sono due motori elettrici Drive-Ax della SIEI, uno funzionante da motore, ossia utilizzato per erogare potenza, ed uno funzionante da utilizzatore, ossia in grado di assorbire potenza, necessario a causa dell'impossibilità di collocare in laboratorio un vero impianto utilizzatore. Tali motori sono controllati tramite due inverter (vedi figura 3.1).



Figura 3.1: banco prova iniziale.

I parametri di velocità di rotazione del motore e di coppia dell'utilizzatore che è possibile fornire al sistema, possono essere direttamente controllati dall'utente mediante computer e sistema di acquisizione. La velocità angolare può variare da 0 a 2500 rpm, mentre la coppia resistente può variare da 0 a 10 Nm.

I valori imposti a queste due grandezze vengono trasferiti ai due inverter, che modificano la resistenza elettrica del motore R per ottenere la potenza W desiderata.

$$W = Ri^2 = C'\omega \quad (3.1)$$

Un manicotto flessibile permette di collegare il motore elettrico funzionante da utilizzatore alla trasmissione (vedi figura 3.1), costituita da due ruote dentate coniche, a denti elicoidali, con rapporto di trasmissione τ pari al rapporto tra la velocità angolare del motore ω_m e la velocità angolare dell'utilizzatore ω_u .

$$\tau = \frac{\omega_m}{\omega_u} = 2 \quad (3.2)$$

Questo valore del rapporto di trasmissione indica la presenza di 17 denti per il lato motore e di 34 denti per il lato utilizzatore. Il fattore di ricoprimento è compreso tra 2 e 3, ossia si hanno sempre almeno due coppie di denti in presa, in modo tale che la trasmissione risulti regolare e poco rumorosa.

Sull'albero che collega la trasmissione all'utilizzatore è posizionato un trasduttore di prossimità, in grado di rilevare il passaggio di un riferimento presente sull'albero ad ogni rotazione compiuta dallo stesso. Tale sistema consente quindi di conoscere la posizione angolare e, conseguentemente, di valutare il numero di rotazioni effettuate dal sistema nell'intervallo temporale dell'acquisizione.

La configurazione originale è stata in seguito modificata, per rendere il banco adatto alla realizzazione delle prove sperimentali sui cuscinetti. Innanzitutto sono stati riparati i componenti che non funzionavano in modo corretto (ad esempio gli inverter), in modo da poter controllare perfettamente i motori. In seguito è stata effettuata la progettazione tramite l'ausilio di un software specialistico (Solid Edge), che ha consentito la realizzazione del modello virtuale del nuovo banco prova (vedi figura 3.2).

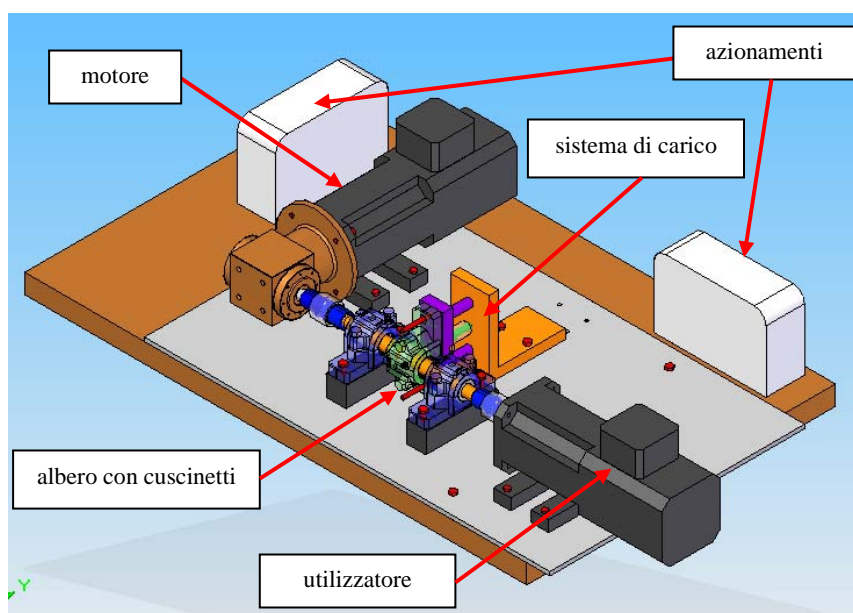


Figura 3.2: banco prova progettato con l'ausilio di Solid Edge.

A seguito della progettazione virtuale, tutti i componenti più complessi sono stati realizzati appositamente in officina attraverso lavorazioni meccaniche, mentre quelli più semplici sono stati acquistati da catalogo.

Sul banco a disposizione, poiché deve essere posizionato un albero su cui calettare il cuscinetto test, si è reso necessario spostare l'utilizzatore fino a collocare le viti posteriori del supporto al limite del banco in legno. Per consentire un fissaggio sicuro di questo motore, è stata posizionata una piastra in

ferro di spessore pari a 10 mm sopra al banco prova iniziale, come si osserva in figura 3.3.



Figura 3.3: posizionamento dell'utilizzatore.

Il banco deve essere facilmente smontabile, poiché deve permettere di cambiare in modo agevole il cuscinetto centrale, diverso a seconda della tipologia di danneggiamento che presenta, per poter acquisire tutti i segnali di interesse. L'albero realizzato (vedi figura 3.4) è costituito da tre sezioni circolari di diametro crescente dall'estremità al centro ($D_1 = 24\text{ mm}$, $D_2 = 25\text{ mm}$ e $D_3 = 30\text{ mm}$) ed ha una lunghezza di 440 mm.

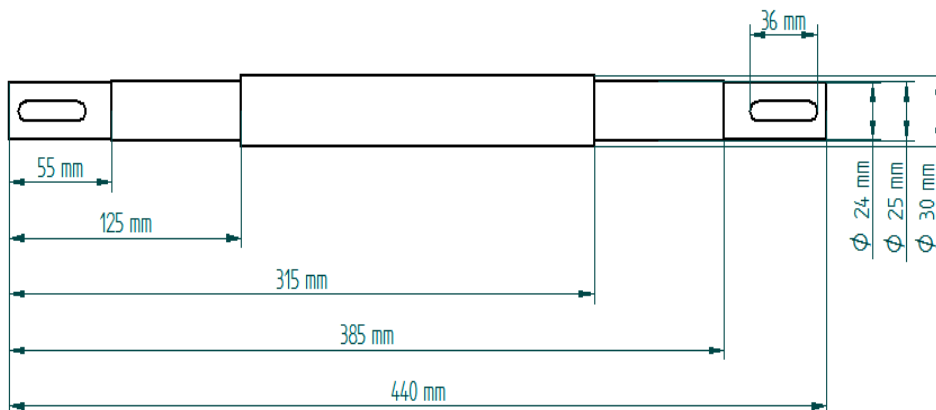


Figura 3.4: messa in tavola dell'albero progettato.

Alle estremità dell'albero sono state posizionate due linguette smontabili manualmente che consentono l'accoppiamento con due giunti, in modo da collegare l'albero ai due motori elettrici mediante due manicotti flessibili (vedi figura 3.5).

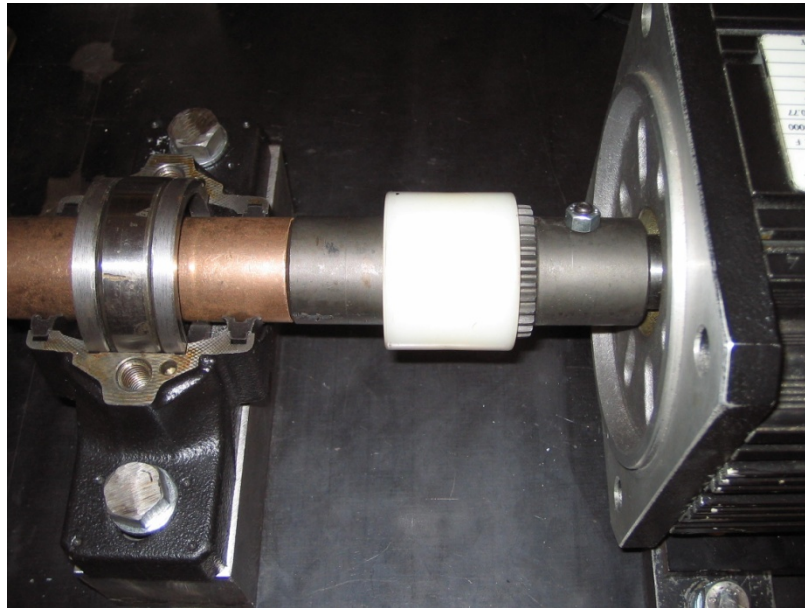


Figura 3.5: accoppiamento tra l'albero ed i motori.

L'utilizzo di questo tipo di accoppiamento ha consentito di non trasmettere vibrazioni torsionali dagli alberi dei motori a quello del cuscinetto.

Sull'albero sono stati calettati due cuscinetti di supporto ed un cuscinetto test, collocati nei relativi alloggiamenti. La zona centrale delle sedi ha una dimensione maggiore rispetto alla larghezza dei cuscinetti scelti, quindi sono stati previsti due distanziali (vedi figura 3.6) aventi le dimensioni dei diametri, esterno ed interno, pari a quelle della pista esterna del cuscinetto, in modo da appoggiare esclusivamente su questa parte fissa senza interferire nella rotazione dell'anello interno, della gabbia e degli elementi volventi.

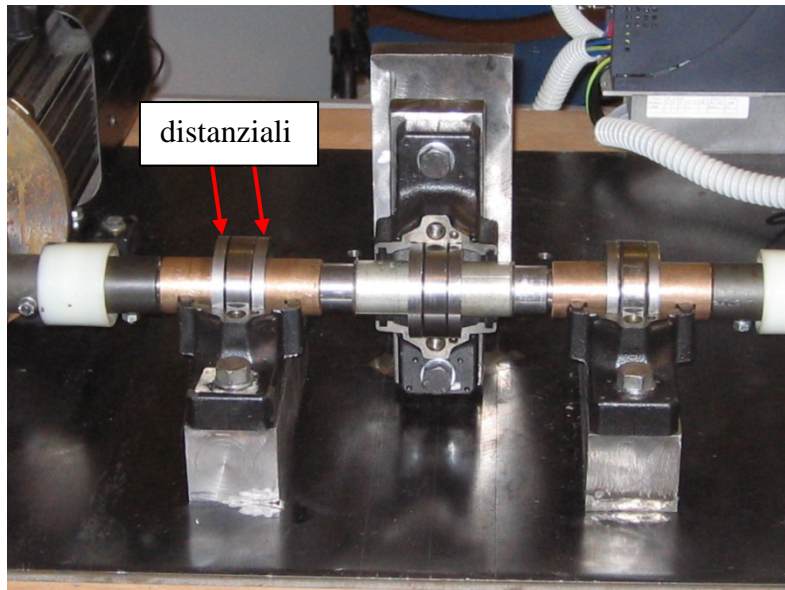


Figura 3.6: posizionamento dei cuscinetti.

Per quanto riguarda i due cuscinetti di supporto, sono state predisposte due basi che permettono di sostenere e vincolare al banco i due alloggiamenti.

Per ognuno di questi due cuscinetti, sono state realizzate due bronzine di diametro interno pari al diametro dell'albero nella zona di interesse, ossia $D_2 = 25 \text{ mm}$, e di diametro esterno pari a $D_b = 35 \text{ mm}$. La bronzina più esterna va in battuta da una parte contro il giunto e dall'altra contro il cuscinetto, mentre quella più interna appoggia da una parte contro lo spallamento esistente sull'albero e dall'altra contro il cuscinetto. Lo spallamento progettato sull'albero consentirebbe di far andare direttamente in battuta il cuscinetto di supporto, ma i paraoli del suo alloggiamento hanno un diametro maggiore rispetto a quello che presenta l'albero nella sua parte centrale, quindi in assenza della bronzina si avrebbe una continua fuoriuscita di grasso durante la rotazione dei cuscinetti.

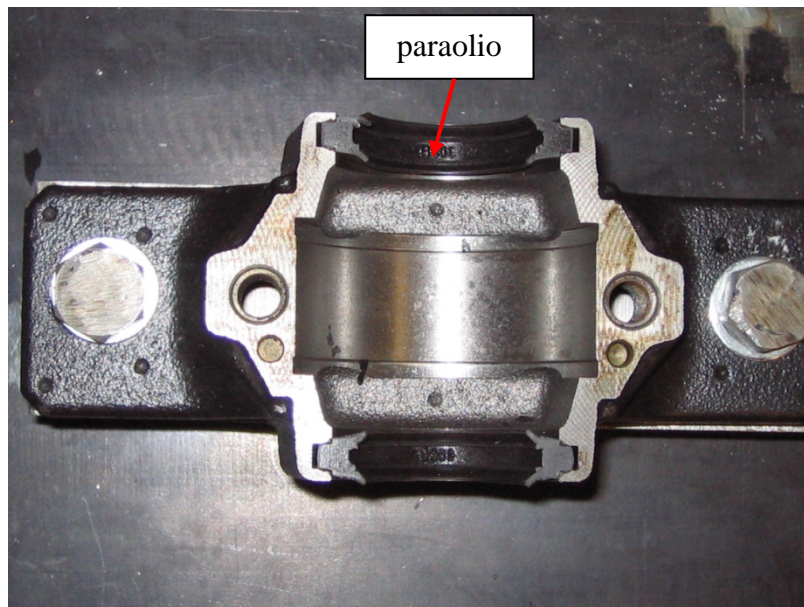


Figura 3.7: alloggiamento dei cuscinetti.

Per il bloccaggio del cuscinetto centrale, sono stati progettati sull'albero le sedi per il posizionamento di due anelli elastici seiger (vedi figura 3.8), sui quali vanno a battuta le estremità più esterne di due boccole di diametro interno pari a $D_3 = 30 \text{ mm}$ e di diametro esterno $D_b = 35 \text{ mm}$.

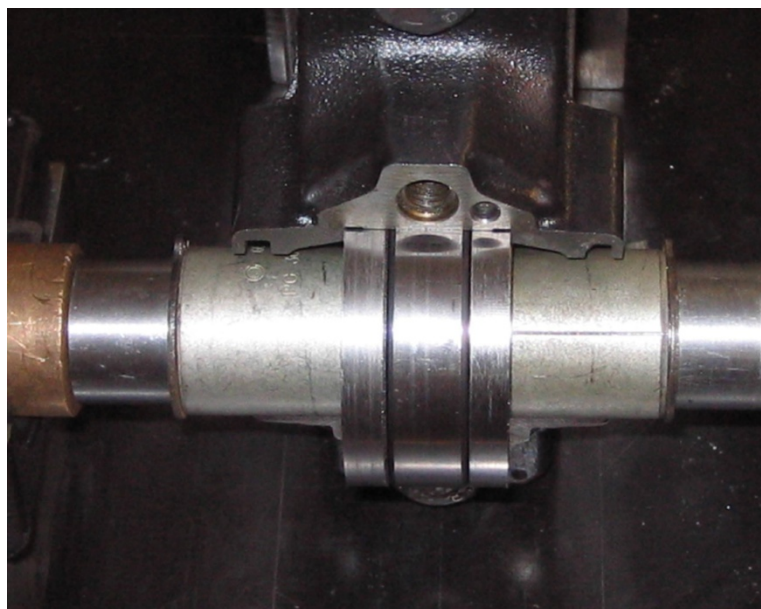


Figura 3.8: posizionamento del cuscinetto test.

L'alloggiamento del cuscinetto centrale è stato posizionato verticalmente per permettere il montaggio del sistema progettato per applicare un carico radiale al cuscinetto di prova. La forza applicata è necessaria per eccitare il difetto, consentendone la successiva identificazione analizzando i segnali acquisiti. Il sistema di carico è costituito sostanzialmente da una vite che preme, attraverso un piattino posizionato alla sua estremità, su una molla, agente da smorzatore all'interno del sistema. La molla scarica la forza che le viene impressa dalla vite su una staffa, collegata mediante due viti al supporto del cuscinetto centrale, che trasferisce il carico al cuscinetto test.

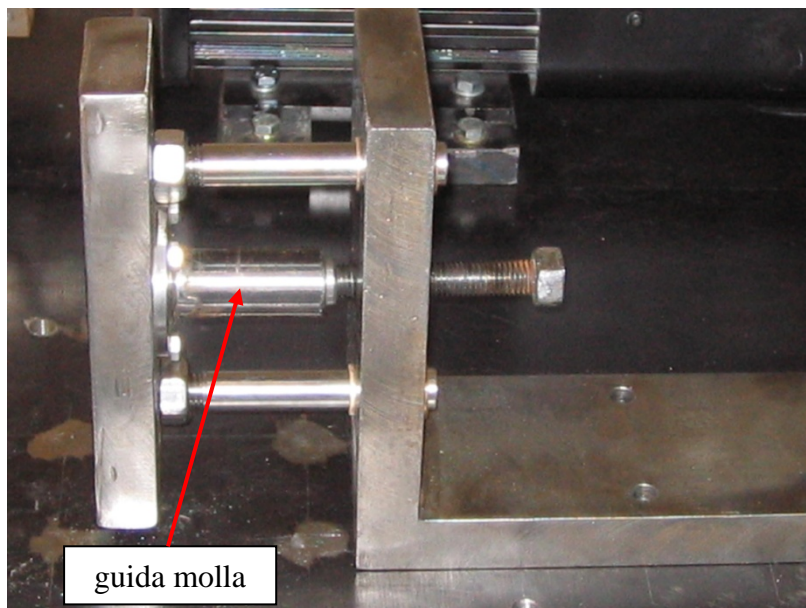


Figura 3.9: sistema per l'applicazione del carico al cuscinetto test.

La molla è stata inserita all'interno di una guida per evitare un'eccessiva deformazione trasversale durante il suo accorciamento, mentre la vite è stata posizionata all'interno di una staffa ad L, vincolata alla piastra mediante due viti, come riportato in figura 3.9.

Le altre due guide consentono alla staffa piana di muoversi liberamente nella direzione di applicazione del carico, evitando contemporaneamente l'eventuale movimento rotatorio dell'alloggiamento e della pista esterna del cuscinetto test durante la rotazione dell'albero.

Per misurare la forza impressa al cuscinetto centrale, è stato previsto inizialmente di utilizzare una cella di carico. All'interno della staffa piana, per un adeguato posizionamento dello strumento di misura, è stata realizzata

un'opportuna sede avente uno scavo laterale per consentire la fuoriuscita del filo. La guida della molla è stata fissata alla staffa mediante quattro viti, in modo da consentire lo smontaggio del componente ed il posizionamento del sensore (vedi figura 3.10).

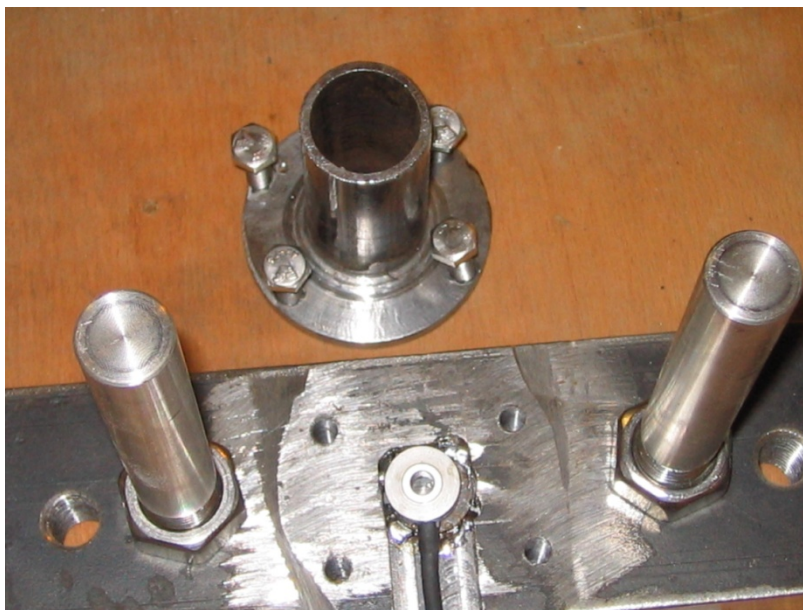


Figura 3.10: sede per la cella di carico.

La progettazione del banco e la scelta dei supporti dei cuscinetti, discussa in seguito, sono state guidate dalla necessità di sostituire il cuscinetto test quando la realizzazione delle prove sperimentali lo richiedesse.

3.2 Scelta dei cuscinetti

I tre cuscinetti presenti nel sistema in esame, uno utilizzato come cuscinetto test e altri due come cuscinetti di sostegno, ed i relativi supporti sono scelti dal catalogo tecnico SKF.

3.2.1 Cuscinetto test

Il cuscinetto centrale deve essere interamente smontabile per consentire il danneggiamento delle sue componenti principali, ossia della pista interna, della pista esterna, di un elemento volvente e della gabbia. E' stato scelto quindi un cuscinetto ad una corona di rulli cilindrici, della serie NJ 206 ECP, i cui dati principali sono riportati in tabella 3.1 ed in figura 3.11.

Tabella 3.1: parametri caratteristici del cuscinetto test.

Diametro interno	D_i [mm]	30
Diametro esterno	D_e [mm]	62
Diametro di pitch	D [mm]	46
Larghezza	b [mm]	16
Diametro dei rulli	d [mm]	9
Numero di rulli	z	13
Angolo di contatto	α [°]	0
Coefficiente di carico dinamico	C [kN]	44
Coefficiente di carico statico	C_0 [kN]	36.5
Carico limite di fatica	P_u [kN]	4.55
Velocità di riferimento	v_{rif} [rpm]	13000
Velocità limite	v_{lim} [rpm]	14000
Massa	m [kg]	0.24

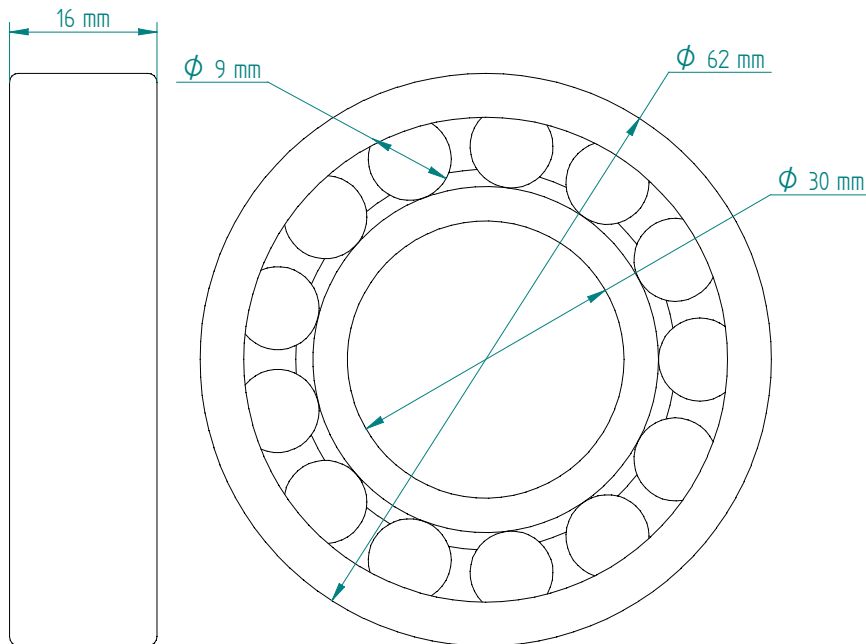


Figura 3.11: parametri caratteristici del cuscinetto test.

La scelta di un cuscinetto con una corona di rulli cilindrici garantisce il contatto tra il difetto posizionato sull'elemento volvente e le due piste. Infatti, come già illustrato precedentemente (vedi paragrafo 2.2.3), le sfere ruotano in maniera casuale nella gabbia, quindi è possibile che, durante una rotazione completa di quest'ultima, non avvenga mai il contatto tra il difetto presente sull'elemento volvente e le piste. Questo renderebbe impossibile l'identificazione del difetto

nell'analisi del segnale a causa della mancanza delle informazioni relative agli urti provocati dal contatto tra il danneggiamento e gli anelli. Per quanto riguarda un cuscinetto a rulli, invece, un qualsiasi punto della sua superficie laterale viene a contatto con entrambe le piste ad ogni rotazione dell'elemento volvente, assicurando la possibilità di ricavare dei dati legati agli impatti nel segnale acquisito.

L'anello esterno del cuscinetto in esame possiede due orletti integrali, mentre quello interno ne ha uno soltanto, permettendo così l'estrazione della pista interna senza bisogno di alcuno strumento. Inoltre, non avendo l'impedimento dell'anello interno, i rulli possono essere facilmente smontati esercitando una leggera pressione nella zona compresa tra la pista esterna e la gabbia. A seguito dello smontaggio di tutti i rulli, la gabbia non risulta più vincolata all'anello esterno e può quindi essere estratta (vedi figura 3.12).



Figura 3.12: cuscinetto test smontato.

Questa tipologia di cuscinetti, tra l'altro, permette di raggiungere facilmente le zone da danneggiare, ossia la superficie esterna della pista interna, la superficie interna della pista esterna, la superficie laterale di un rullo e i due anelli esterni della gabbia. Inoltre, il cuscinetto scelto possiede la gabbia realizzata in plastica, il che ne permette il danneggiamento senza l'utilizzo di una strumentazione particolare.

3.2.2 Cuscinetti laterali

Dal momento che l'alloggiamento centrale non è vincolato a terra, il suo peso, insieme a quello dell'albero e del cuscinetto test, si scaricherebbe interamente sulle guide presenti tra la staffa piana del sistema di carico e quella ad L. Per sostenere il sistema, sono quindi necessari i due cuscinetti di supporto posizionati alle estremità dell'albero, che consentono di scaricare il peso della struttura rotante sulla base.

Questi cuscinetti, inoltre, assicurano la riduzione dell'inflessione dell'albero, causata dal peso del cuscinetto test e del suo alloggiamento. Se l'albero presentasse una deformazione, il suo asse, non rettilineo, ruoterebbe attorno alla linea congiungente gli alberi dei due motori. Questo comportamento porterebbe a dei risultati analoghi a quelli che si otterrebbero con un'eventuale eccentricità dell'albero, ossia si introdurrebbe una componente uno per giro sulla rotazione che andrebbe a sommarsi alle vibrazioni dei cuscinetti nascondendole.

I due cuscinetti in esame, non devono però funzionare come due incastri per il sistema, ma devono permettere all'albero di avere un leggero gioco assiale, in modo da recuperare eventuali errori nella realizzazione dei pezzi. Sono stati scelti pertanto due cuscinetti orientabili a rulli, della serie 21305 CC (vedi tabella 3.2 e figura 3.13), poiché non sono sensibili a lievi spostamenti dell'albero rispetto all'alloggiamento.

Tabella 3.2: parametri caratteristici dei cuscinetti di supporto.

Diametro interno	D_i [mm]	25
Diametro esterno	D_e [mm]	62
Diametro di pitch	D [mm]	43.5
Larghezza	b [mm]	17
Diametro dei rulli	d [mm]	8
Numero di rulli	z	15x2
Angolo di contatto	α [°]	0
Coefficiente di carico dinamico	C [kN]	41.4
Coefficiente di carico statico	C_0 [kN]	41.5
Carico limite di fatica	P_u [kN]	4.55
Velocità di riferimento	v_{rif} [rpm]	8500
Velocità limite	v_{lim} [rpm]	12000
Massa	m [kg]	0.28

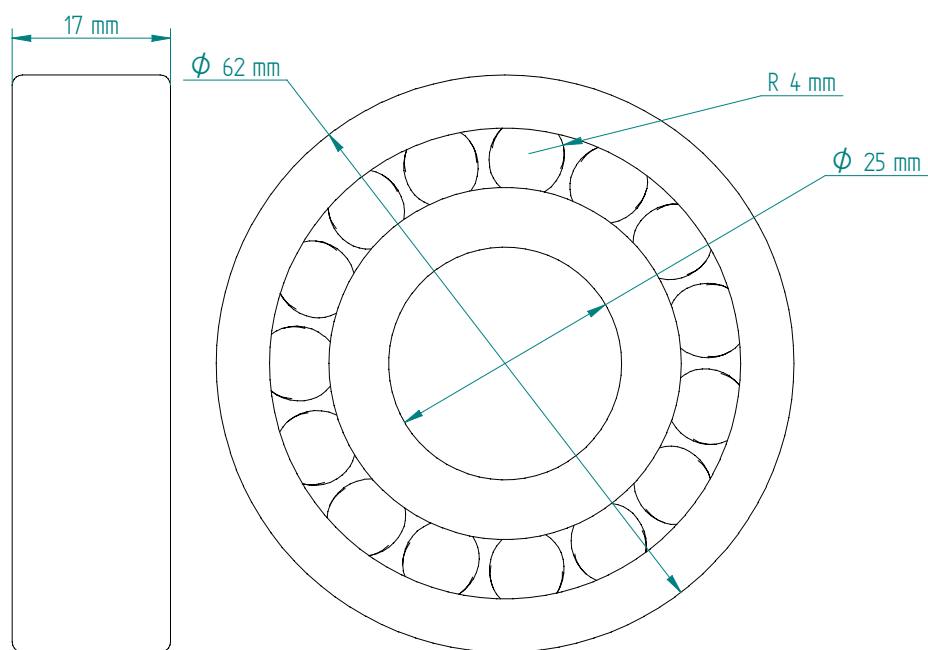


Figura 3.13: parametri caratteristici dei cuscinetti di supporto.

I cuscinetti scelti presentano due corone di elementi volventi, un'unica pista sferica sull'anello esterno e due piste sull'anello interno, disposte con una certa angolazione rispetto all'asse trasversale del cuscinetto (vedi figura 3.14).



Figura 3.14: cuscinetti di supporto.

3.2.3 Supporti dei cuscinetti

I tre cuscinetti presenti nel banco prova sono stati alloggiati in supporti costituiti da due parti, con due fori sulla base per i bulloni di fissaggio. In questo modo la fase di smontaggio risulta notevolmente agevolata. Infatti togliendo la parte superiore degli alloggiamenti si può estrarre facilmente il sistema, senza la necessità di smontare l'intero supporto con le relative basi (vedi figura 3.6). Sono stati scelti quindi dei supporti della serie SNL 206-305 (vedi tabella 3.3 e figura 3.15), identici per il cuscinetto test e per i cuscinetti di sostegno, poiché presentano lo stesso diametro esterno.

Tabella 3.3: parametri caratteristici dei supporti dei cuscinetti.

Diametro dei paraoli	D_b [mm]	35
Diametro esterno della sede	D_a [mm]	62
Larghezza della sede	C_a [mm]	32
Larghezza	A [mm]	77
Lunghezza	L [mm]	185
Altezza	H [mm]	89
Massa	m [kg]	1.9

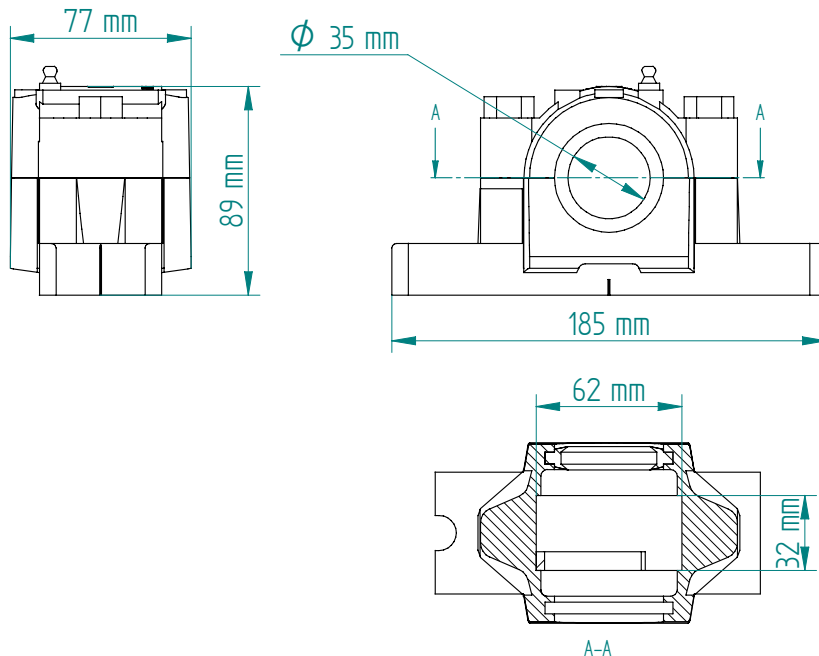


Figura 3.15: parametri caratteristici dei supporti dei cuscinetti.

I supporti selezionati sono provvisti di un sistema di tenuta a labbro, ossia in corrispondenza dei due fori laterali sono presenti due paraoli in gomma, divisi in due metà in modo analogo al supporto (vedi figura 3.7). Questa tipologia di tenuta è ottima nel caso di ingrassatura, poiché assicura il contenimento del lubrificante all'interno della sede.

Per lubrificare i cuscinetti durante la rotazione, è stato iniettato nei supporti chiusi, mediante l'ausilio di un'apposita pompa e grazie ad opportune aperture presenti sugli alloggiamenti, del grasso. Per i due alloggiamenti esterni è stato utilizzata l'apertura centrale, che consente una distribuzione del grasso all'interno della camera maggiormente uniforme, mentre per il supporto del cuscinetto test è stato impiegato l'ingrassatore laterale, poiché quello centrale è chiuso per favorire il posizionamento dell'accelerometro (vedi capitolo 3.3).

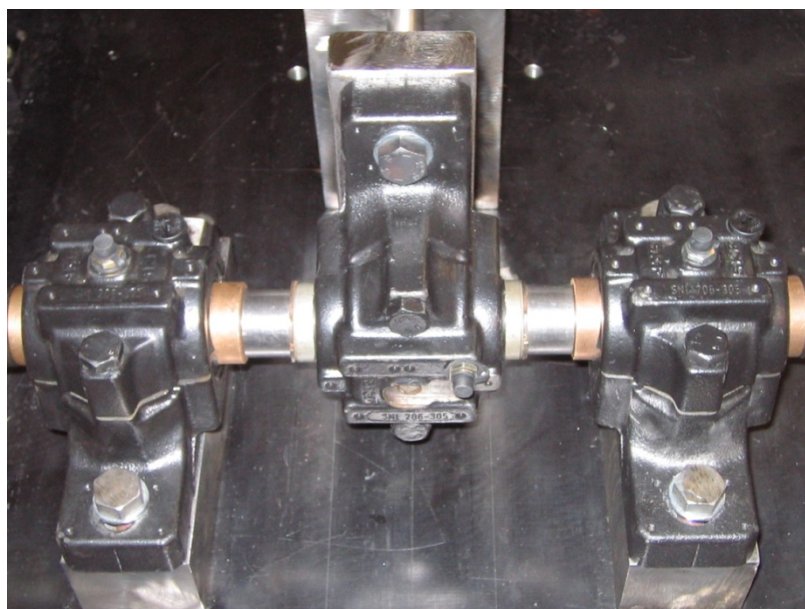


Figura 3.16: alloggiamenti dei cuscinetti.

La larghezza della sede, come già riportato nel capitolo 3.1, è maggiore rispetto alla larghezza dei cuscinetti, quindi sono stati utilizzati i distanziali precedentemente descritti che permettono di bloccare assialmente il cuscinetto all'interno del supporto.

La base del supporto è stata rinforzata con delle nervature intorno ai fori per i bulloni di fissaggio, allo scopo di migliorare l'adesione della base stessa alla superficie d'appoggio ed assicurare un'elevata stabilità al sistema.

Per semplificare il montaggio ed ottenere un allineamento più preciso, sulla parte superiore della base del supporto sono presenti due fori, che devono essere abbinati alle rispettive spine esistenti nella parte inferiore del coperchio.

3.3 Scelta dei parametri di acquisizione e progettazione del sistema di acquisizione

La necessità di poter controllare i parametri di velocità del motore e di coppia dell'utilizzatore da applicare al sistema durante le prove sperimentali, unita al bisogno di poter acquisire i dati di vibrazioni attraverso vari canali di misura, ha portato all'allestimento di un sistema di acquisizione opportuno. Tale sistema, controllato da un unico calcolatore, è composto essenzialmente da un software dedicato e da una serie di componenti fisici descritti in seguito.

3.3.1 Schede di acquisizione

L'acquisizione dei dati avviene attraverso quattro schede di acquisizione della National Instruments, posizionate in uno chassis collegato via USB al computer per consentire la trasmissione diretta dei dati (vedi figura 3.17).

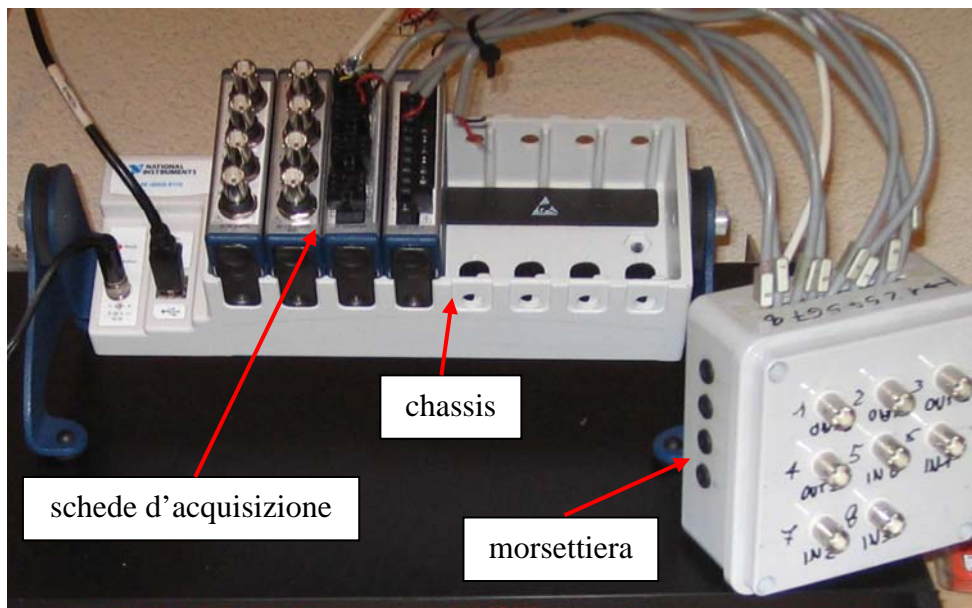


Figura 3.17: schede d'acquisizione, chassis e morsettiera.

Alla prima scheda d'acquisizione, della serie NI 9233, sono stati collegati i sensori che necessitano dell'alimentazione: due accelerometri ed un captatore di prossimità.

Alla seconda scheda d'acquisizione, della serie NI 9215, sono stati connessi i canali che non necessitano di alimentazione, ossia quelli che trasmettono i dati in uscita dagli inverter, permettendo di misurare la velocità e la coppia del motore e dell'utilizzatore.

La terza scheda d'acquisizione, della serie NI 9263, ha permesso di acquisire il segnale inviato da una termocoppia posizionata sul supporto del cuscinetto test. Questa scheda, così come la quarta scheda d'acquisizione, della serie NI 9219, è stata collegata ad una scatola morsettiera (vedi figura 3.17), alla quale sono stati collegati i canali che permettono di inviare i valori di input relativi alla velocità del motore ed alla coppia dell'utilizzatore agli inverter.

3.3.2 Acquisizione delle velocità e delle coppie

I valori di velocità e coppia sono comunicati agli inverter direttamente dal calcolatore, grazie all'ausilio di un software (LabView) che permette di fissare i parametri e memorizzare la serie dei dati acquisiti in un apposito file.

Gli inverter forniscono in uscita il valore reale della velocità del motore e quello della coppia dell'utilizzatore, che si discostano leggermente da quelli imposti, il valore della velocità dell'utilizzatore, pari a circa metà di quella del motore poiché il rapporto di trasmissione è $\tau = 2$, ed il valore della coppia del motore, calcolata direttamente dal sistema in base a quella dell'utilizzatore.

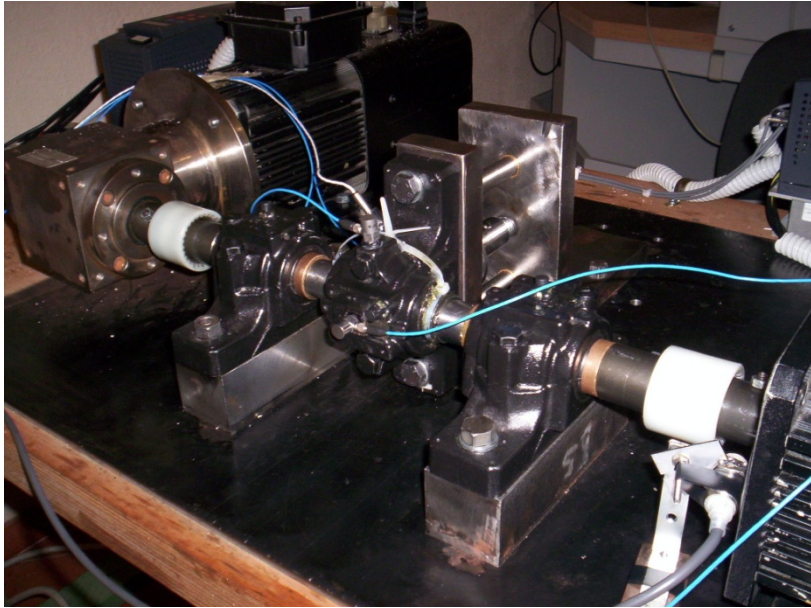


Figura 3.18: sensori applicati al banco prova.

3.3.3 Acquisizione della temperatura del cuscinetto test

La misurazione della temperatura del cuscinetto test richiederebbe l'applicazione di un Resistance Temperature Detector (RTD) in prossimità del cuscinetto stesso: tale operazione non può essere realizzata perché il cuscinetto è collocato all'interno del supporto, chiuso durante il funzionamento del sistema, e non risulta quindi raggiungibile. L'RTD è stato quindi posizionato sull'alloggiamento, ottenendo una temperatura misurata minore rispetto alla temperatura reale del cuscinetto danneggiato.

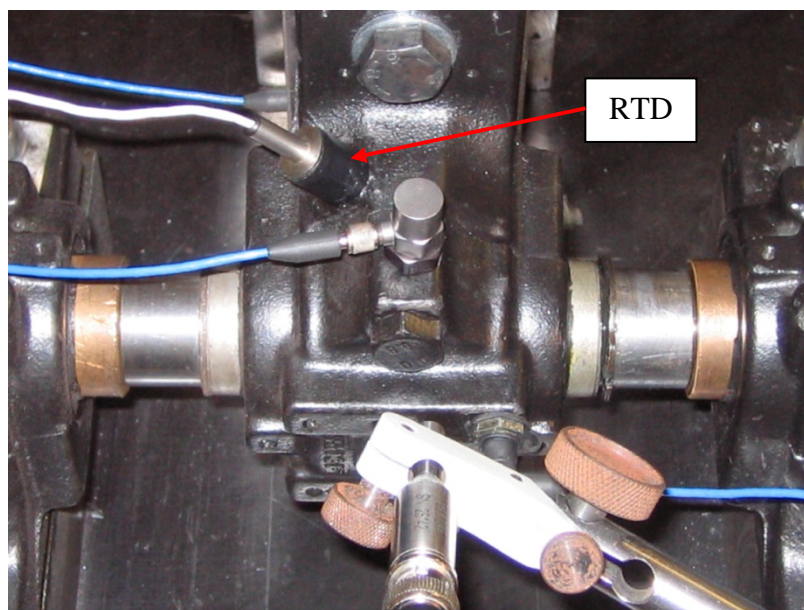


Figura 3.19: RTD.

La presenza di questo sensore ha consentito di scoprire eventuali aumenti eccessivi della temperatura, in modo da poter arrestare la rotazione del sistema. Un cuscinetto che presenta una qualsiasi tipologia di danneggiamento provoca, durante la sua rotazione, un aumento della temperatura maggiore rispetto a quella che si avrebbe nel caso di un cuscinetto sano. Questo fenomeno è dovuto ai ripetuti urti che si hanno sia quando gli elementi volventi impattano su un difetto presente su una delle due piste sia quando l'elemento volvente danneggiato viene a contatto con i due anelli durante la propria rotazione.

Nel sistema in esame, l'intervallo temporale in cui il sistema è stato fatto ruotare è limitato, quindi l'aumento della temperatura non è risultato problematico.

La RTD è stata anche impiegata per indicare la temperatura quando, montato un nuovo cuscinetto, il sistema veniva messo nuovamente in rotazione. Era infatti necessario attendere che la temperatura sul supporto raggiungesse una certa soglia prima di acquisire, in modo da lasciare il tempo al lubrificante di distribuirsi uniformemente nel cuscinetto e di scaldarsi adeguatamente, per compiere al meglio la sua funzione. In questo modo si ha la certezza di lavorare su un sistema stabile, ossia che non presenti scostamenti collegati ad una bassa temperatura.

Prima di acquisire i segnali, quindi, il sistema è stato fatto ruotare "a vuoto" fino al raggiungimento di una temperatura di circa 20°C, individuata empiricamente

come valore soglia poiché, una volta raggiunta, essa è mantenuta senza incrementi significativi anche per funzionamenti prolungati del banco prova.

3.3.4 Acquisizione delle vibrazioni del cuscinetto test

Per misurare le vibrazioni del cuscinetto test, vengono utilizzati due accelerometri piezoelettrici, modello PCB 352C33 (vedi figura 3.20), le cui caratteristiche sono riportate in Allegato A.



Figura 3.20: accelerometro.

I due accelerometri sono stati fissati sul supporto del cuscinetto test, mediante della cera, lungo due direzioni: uno è stato posizionato in senso verticale, l'altro è stato disposto orizzontalmente, come riportato in figura 3.21. Per favorire l'alloggiamento di quest'ultimo sensore è stata creata una superficie piatta nella zona centrale del coperchio del supporto, progettando uno scavo che permetta la fuoriuscita del cavo. L'ingrassatore centrale è stato chiuso con una vite, successivamente tagliata, prestando attenzione a non far sporgere del materiale all'interno del supporto per evitare il contatto con la pista esterna del cuscinetto.

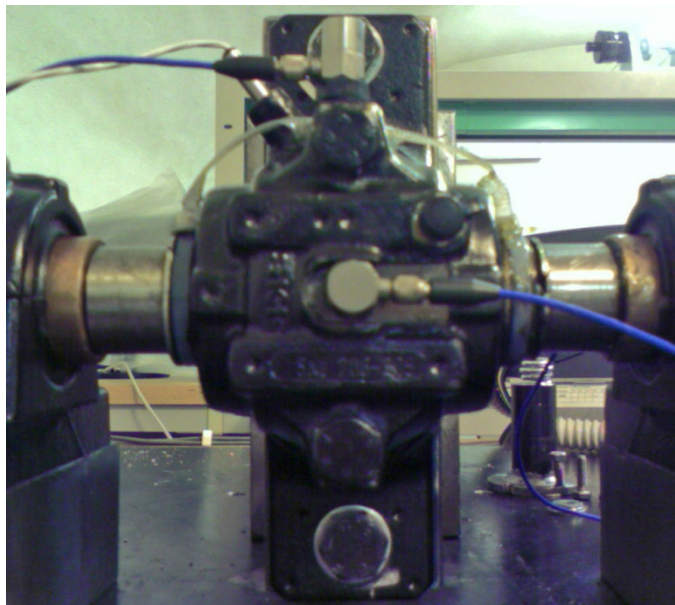


Figura 3.21: disposizione degli accelerometri sul supporto del cuscinetto test.

Questo tipo di posizionamento dei due accelerometri, consente di conoscere le vibrazioni del cuscinetto test in due direzioni perpendicolari tra loro. In particolare, l'accelerometro orizzontale, posizionato nella direzione lungo la quale viene applicata la forza, dovrebbe misurare efficacemente gli urti dovuti ai difetti quando questi entrano nella zona di carico, ossia quando sono maggiormente eccitati. Per questo motivo questo sensore dovrebbe fornire dei segnali con un elevato contenuto informativo, che permettano di individuare il difetto anche per acquisizioni in cui l'accelerometro verticale non riesce a percepire alcun urto collegabile al danneggiamento. La disposizione adottata, tuttavia, rappresenta soltanto una possibilità e quindi i risultati che ne deriveranno dovranno poi confermare le considerazioni sopra presentate.

3.3.5 Acquisizione del riferimento 1x giro dell'albero

Per conoscere il numero di rotazioni compiute dall'albero durante l'intervallo temporale delle acquisizioni, è stato posizionato in corrispondenza del giunto dell'albero dell'utilizzatore un captatore di prossimità o proxymitor (vedi figura 3.22). Questo sensore, che era già presente sul banco originale e che è stato soltanto riposizionato, è in grado di rilevare il passaggio del dado posto sul giunto, producendo un segnale composto da una serie di onde quadre che permettono di valutare il numero di punti presente in un periodo della rotazione dell'albero.

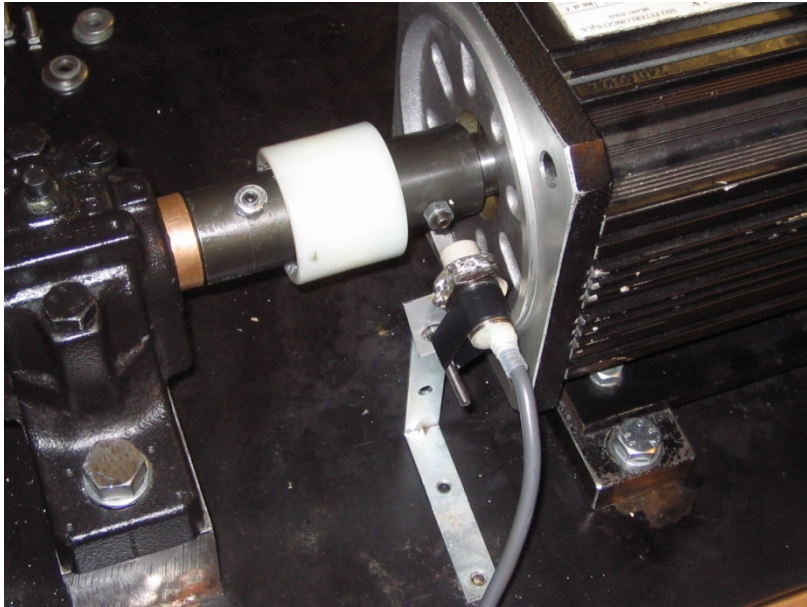


Figura 3.22: captatore di prossimità.

Il sensore è stato montato su un lamierino di alluminio, soluzione che ha consentito lo spostamento del proxymitor, per evitare il danneggiamento del dispositivo durante lo smontaggio del sistema, e che ha permesso un agevole riposizionamento per ottenere un'acquisizione efficace dell'onda quadra legata alla rotazione.

3.3.6 Acquisizione della forza applicata al cuscinetto test

Ai fini dell'analisi dei dati sperimentali si è rivelato utile la conoscenza dell'entità del carico che, durante le singole prove, è stata applicata al cuscinetto test tramite l'azione di una vite (vedi capitolo 3.1). In realtà la molla è sempre leggermente precaricata, anche quando non viene avvitata la vite, in quanto è necessario un carico, anche se di entità ridotta, per eccitare il difetto del cuscinetto e renderlo visibile durante l'analisi dei segnali.

Per conoscere il valore della forza, è stata scartata a priori la possibilità di utilizzare una cella di carico statica, alloggiata nello scavo presente sulla staffa piana del sistema di carico.

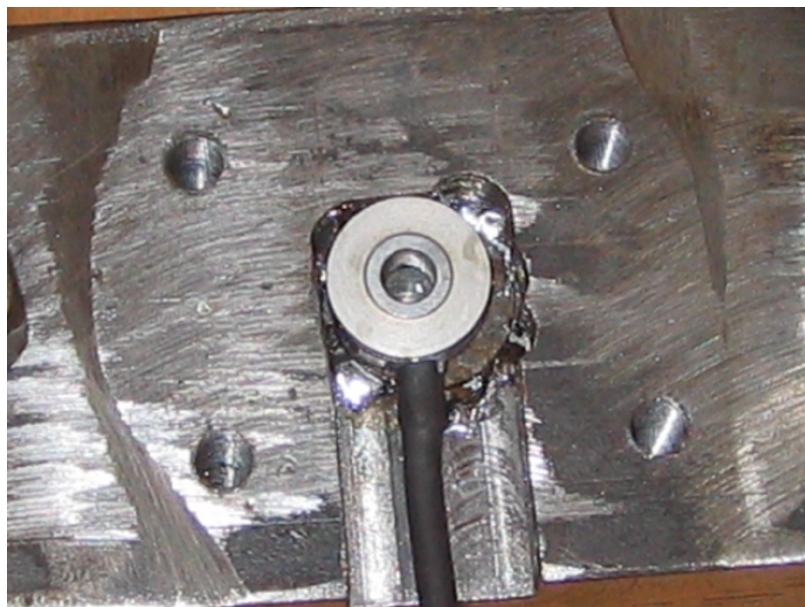


Figura 3.23: cella di carico statica.

Un sensore di questo tipo (vedi figura 3.23) è adatto a calcolare il valore del carico nel caso in cui esso risulti costantemente applicato ad un sistema statico. Il problema in esame non rispecchia, però, questi requisiti poiché è un sistema rotante e le forzanti durante il moto possono dare luogo a continue variazioni del carico.

E' stato ipotizzato, allora, di misurare l'entità della forza utilizzando una cella di carico dinamica (vedi figura 3.24) (modello PCB 208C03, sensibilità pari a 2.306 mV/N), posta nella stessa sede riportata in figura 3.23.



Figura 3.24: cella di carico dinamica.

Confrontando i segnali acquisiti per una configurazione di velocità di rotazione e di coppia applicata di riferimento, senza e con il carico applicato, è stato possibile notare differenze che indicano effettive variazioni della forza applicata (vedi figura 3.25).

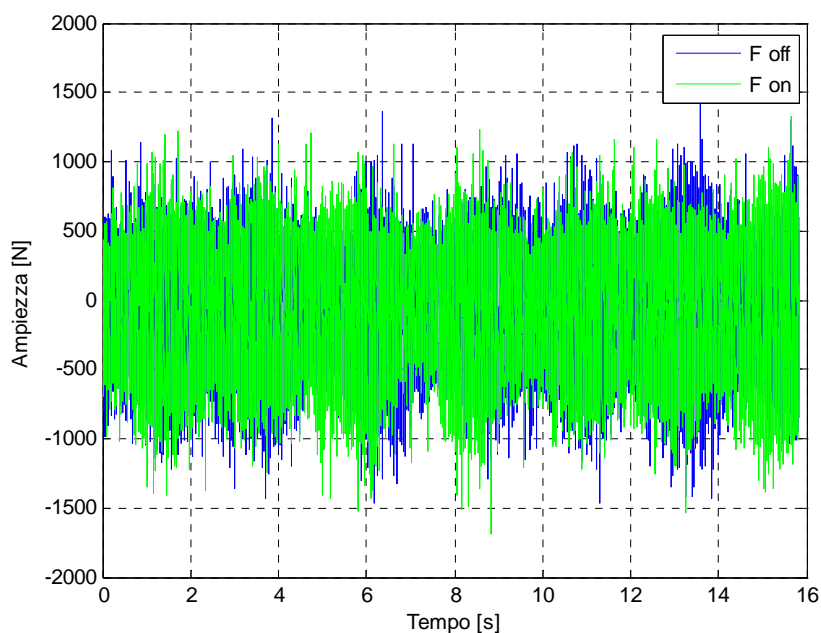


Figura 3.25: segnale fornito dalla cella di carico dinamica in assenza ed in presenza della forza.

Per conoscere il valore del carico applicato, sono stati calcolati alcuni indicatori solitamente usati per valutare le differenze tra due segnali in termini di picchi (vedi paragrafo 2.3.1), ossia il valore *RMS*, il Kurtosis, il Crest Factor ed il Peak-Peak.

Tabella 3.4: parametri statistici calcolati sul segnale fornito dalla cella di carico dinamica in assenza ed in presenza della forza.

	F off	F on
RMS	0.265	0.251
K	4.079	4.266
CF	5.954	7.693
PP	2.969	3.175

Come si può notare in tabella 3.4, il valore di questi indicatori non varia significativamente tra il segnale acquisito senza carico e quello che prevede la presenza della forza. Non è stato quindi possibile calcolare il valore della forza applicata al cuscinetto test utilizzando le indicazioni fornite dalla cella di carico dinamica.

A questo scopo è pertanto stato deciso di sfruttare la rigidità assiale della molla, espressa in N/mm, che consente, conoscendo l'accorciamento imposto nelle due condizioni considerate durante le prove sperimentali, di conoscere il

valore del carico applicato. Poiché il valore della rigidità non è stato fornito dal catalogo, sono state realizzate alcune semplici misure sperimentali, i cui risultati sono riportati in tabella 3.5, che consentono di conoscere l'accorciamento della molla sottoposta a diversi carichi.

Tabella 3.5: valori sperimentali della rigidità della molla.

m [kg]	Δl [mm]
2	1.8
3	2.3
4	3
7	4.5
8	5
9	5.5
10	6

E' stata calcolata l'equazione della curva che meglio approssima l'andamento di questi dati sperimentali (vedi figura 3.26), ottenendo, con un valore del coefficiente di regressione indice dell'esattezza dell'approssimazione pari a $R^2 = 0.9986$, un andamento esponenziale descritto dall'equazione (3.3).

$$m = 0.9312 \Delta l^{1.341} \quad (3.3)$$

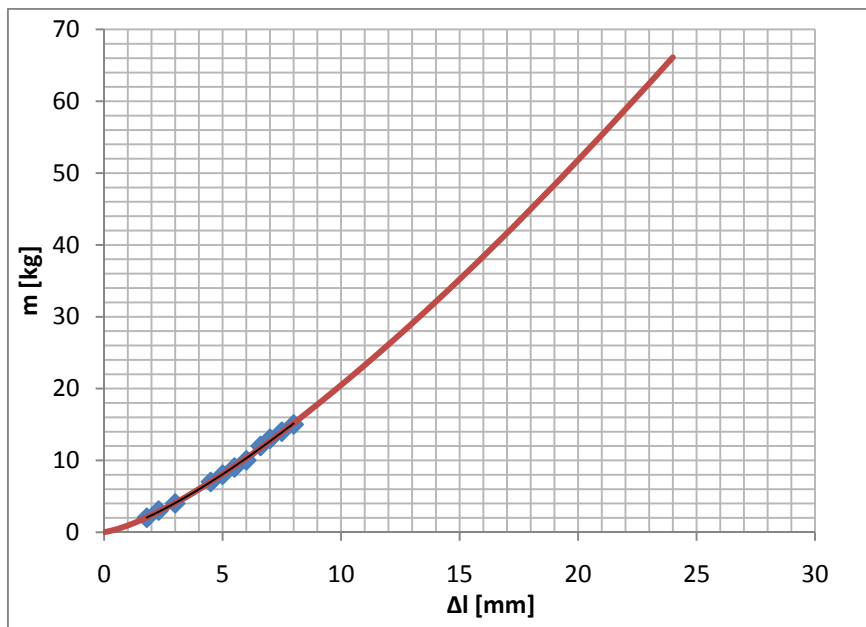


Figura 3.26: andamento della rigidità della molla.

Sapendo che in condizioni di assenza del carico, la molla è precaricata di una lunghezza pari a $\Delta l_{pr} = 4 \text{ mm}$, è stato ottenuto un valore del precarico pari a circa $F_{pr} = 59 \text{ N}$. Quando invece è applicato il carico al cuscinetto test, per lasciare anche in questo una certa libertà agli spostamenti, è stato deciso di lasciare 5 mm rispetto alla condizione di molla a pacco. In questa configurazione è stato ottenuto, quindi, un accorciamento della molla pari a $\Delta l_{carico} = 19 \text{ mm}$, che dà luogo, secondo le curve estrapolanti i dati sperimentali, ad una forza $F = 474 \text{ N}$.

3.3.7 Caratteristiche di funzionamento del banco prova

Nell'esecuzione delle prove sperimentali è stato deciso di far variare sia la velocità del motore sia la coppia dell'utilizzatore, in modo da poter realizzare un confronto completo al momento dell'analisi dei risultati. Come indicato precedentemente (vedi capitolo 3.1), la velocità minima e massima del motore sono rispettivamente pari a 0 rpm ed a 2500 rpm. Per quanto riguarda invece la coppia dell'utilizzatore, i suoi valori limite valgono 0 Nm e 10 Nm.

Le acquisizioni sono state realizzate a 500 rpm, 1000 rpm, 1500 rpm, 2000 rpm e 2500 rpm. Per ognuna di queste velocità, è stata imposta una coppia dell'utilizzatore pari a 4 Nm, 6 Nm e 8 Nm. Ogni acquisizione ha una durata pari a $\Delta t = 15 \text{ s}$. Ognuna di queste acquisizioni è stata ripetuta sia in condizioni di assenza di carico applicato al cuscinetto test (ad esclusione del precarico della molla), sia nel caso della presenza di un carico applicato, come specificato nel paragrafo precedente.

3.3.8 Frequenza di campionamento

La frequenza di campionamento è stata scelta pari a $f_c = 10240 \text{ Hz}$ per avere un elevato numero di punti all'interno di ogni periodo della rotazione. Ciò consente di ottenere dei segnali temporali con un elevato contenuto informativo. Infatti, durante l'analisi dei risultati, è emerso che la tecnica MED, utilizzata per processare i segnali, è efficace a qualsiasi velocità solo se la frequenza d'acquisizione è sufficientemente elevata.

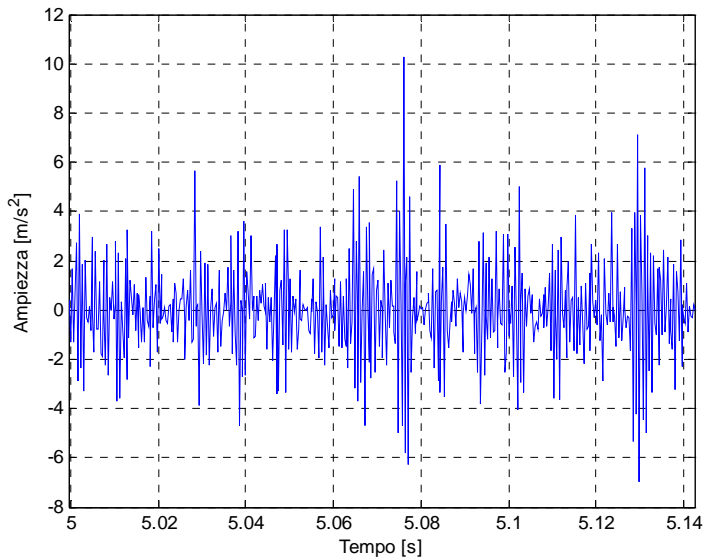


Figura 3.27: output MED $f_c=3413$ Hz.

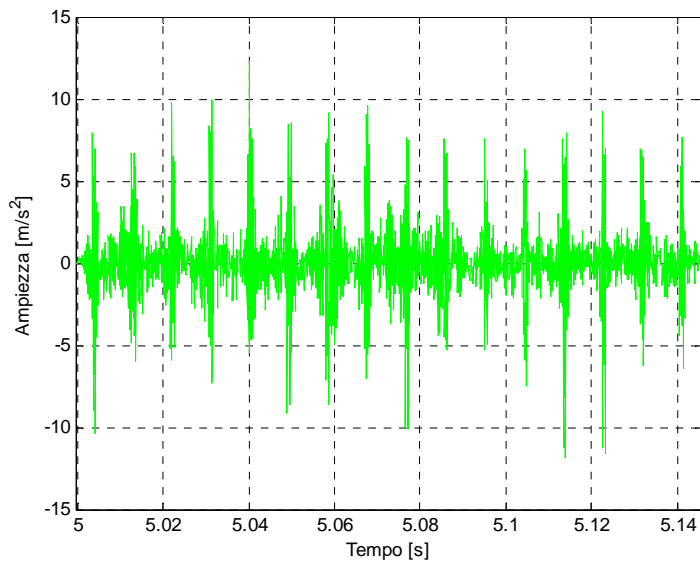


Figura 3.28: output MED $f_c=10240$ Hz.

I grafici messi a confronto rappresentano l'output della MED quando viene dato in input un segnale acquisito dall'accelerometro orizzontale ad una velocità del motore pari a 2500 rpm ed ad una coppia dell'utilizzatore pari 4 Nm, prendendo in esame tre periodi della rotazione dell'albero su cui è stato montato un cuscinetto che presenta un difetto sulla pista esterna.

Il primo grafico (vedi figura 3.27) è stato ottenuto analizzando il segnale acquisito con una frequenza di campionamento pari a $f_{c,err} = 3413 \text{ Hz}$, mentre il secondo (vedi figura 3.28) rappresenta l'output nel caso in cui l'acquisizione sia stata ottenuta con una frequenza di campionamento pari a $f_c = 10240 \text{ Hz}$.

Alle alte velocità, se la frequenza d'acquisizione è bassa, la MED non è in grado di individuare i picchi legati alla presenza del danneggiamento. Poiché il periodo del difetto, fatta eccezione per quello sulla gabbia, è minore del periodo della rotazione, avere uno scarso numero di punti in un periodo di rotazione comporta la presenza di numero di punti all'interno di un periodo del danneggiamento maggiormente inferiore. Le informazioni contenute nei dati acquisiti non risultano quindi sufficienti per la diagnostica dei difetti sui cuscinetti.

Capitolo 4

Danneggiamento dei cuscinetti

Per la realizzazione delle prove sperimentali è stato necessario provocare dei danneggiamenti sui vari cuscinetti test a disposizione. La tipologia, la collocazione e l'entità del difetto è stata scelta di volta in volta sulla base sia delle indicazioni riportate negli articoli scientifici (vedi capitolo 2.2) sia sulla base di considerazioni empiriche personali (a buon senso).

Come mostrato precedentemente (vedi paragrafo 3.2.1), il cuscinetto preposto ad essere danneggiato è facilmente smontabile nelle sue componenti principali, composte dalla pista interna, dalla pista esterna, dai rulli e dalla gabbia.

Utilizzando vari strumenti, è stato possibile danneggiare ciascuna di queste componenti per acquisire ed analizzare separatamente i segnali delle vibrazioni prodotte dal funzionamento dei cuscinetti danneggiati.

Introducendo i parametri caratteristici del cuscinetto centrale (vedi tabella 3.1) nelle equazioni per il calcolo delle frequenze dei difetti (vedi equazione (2.1), equazione (2.2), equazione (2.3) ed equazione (2.4)) è stata ricavata la periodicità teorica con cui si presentano i vari danneggiamenti. Le frequenze ottenute sono state confrontate con quelle relative alla rotazione dell'albero, calcolate in base alla velocità nominale tramite la formula riportata nell'equazione (4.1).

$$f_s = \frac{\omega_m}{60\tau} \quad (4.1)$$

In tabella sono riportate le diverse frequenze di rotazione dell'albero al variare della velocità imposta al motore attraverso l'inverter ed il periodo della rotazione, calcolato come l'inverso della relativa frequenza.

Tabella 4.1: frequenza e periodo di rotazione dell'albero al variare della velocità del motore.

ω_m [rpm]	f_s [Hz]	T_s [s]
500	4.17	0.24
1000	8.33	0.12
1500	12.5	0.08
2000	16.67	0.06
2500	20.83	0.048

Conducendo delle prove sperimentali su un banco da laboratorio, si ottengono delle frequenze reali che si discostano leggermente dai valori calcolati analiticamente. Un discorso analogo può essere fatto anche per le frequenze dei difetti, dove è presente anche il fenomeno dello slittamento, caratterizzato da una componente aleatoria, che porta ad avere una periodicità non costante tra un impulso rappresentativo del danneggiamento ed il successivo.

Durante la fase sperimentale, ciascun cuscinetto è stato contrassegnato con un riferimento numerico progressivo in modo tale da tener traccia del difetto introdotto. I cuscinetti n_1 e n_{1bis} sono due cuscinetti sani, utilizzati come confronto per i cuscinetti danneggiati.

4.1 Difetto sulla gabbia

Cronologicamente il difetto sulla gabbia è l'ultimo ad essere stato realizzato, ma per comprendere a fondo la fenomenologia degli altri danneggiamenti è necessario capire la relazione esistente tra la rotazione dell'albero e la rotazione della gabbia.

Per realizzare il difetto sulla gabbia (vedi figura 4.1), collocato sul cuscinetto n_6 , si è rivelato necessario smontare completamente il cuscinetto. In seguito all'estrazione manuale dell'anello interno dalla sua sede, sono stati tolti i rulli per consentire la fuoriuscita della gabbia. Quest'ultima è costruita in plastica, quindi è risultato sufficiente utilizzare un cutter per realizzare il danneggiamento voluto, che consiste in due tagli posizionati sui due anelli esterni. La dimensione del difetto è tale da permettere alla gabbia di ottenere una certa flessibilità, in modo che gli intagli possano liberamente aprirsi e chiudersi, di una quantità minima, durante la rotazione.



Figura 4.1: difetto sulla gabbia.

I parametri fondamentali per il calcolo della frequenza del difetto in esame (*FTF*) sono riportati in tabella 3.1, dalla quale si può notare che l'angolo di contatto tra l'elemento volvente e le piste per un cuscinetto a rulli è nullo. Questo porta ad una semplificazione della formula per il calcolo delle *FTF* (vedi equazione (4.2)), i cui valori, variabili con la frequenza di rotazione dell'albero, sono riportati in tabella 4.2, insieme al valore del periodo del difetto.

$$FTF = f_s \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \right) \quad (4.2)$$

Tabella 4.2: frequenza e periodo del difetto sulla gabbia al variare della velocità del motore.

ω_m [rpm]	f_s [Hz]	FTF [Hz]	T_s [s]	T_{cage} [s]
500	4.17	32.38	0.24	0.6
1000	8.33	64.76	0.12	0.3
1500	12.5	97.15	0.08	0.2
2000	16.67	129.53	0.06	0.15
2500	20.83	161.91	0.048	0.12

La gabbia ruota ad una velocità minore rispetto a quella dell'albero: infatti, come si può notare dalla tabella sopra riportata, il suo periodo di rotazione è pari a 2.5 volte quello dell'albero.

Il rapporto tra la frequenza caratteristica del difetto (*FTF*) e la frequenza di rotazione dell'albero (f_s) permette di individuare il numero di impulsi provocati

dal contatto del difetto con le altre componenti del cuscinetto in un periodo della rotazione. Nel caso analizzato, questo rapporto è pari a 0.4, ossia per individuare un picco legato al difetto in esame, è stato necessario considerare 2.5 periodi di rotazione dell'albero, in modo da esaminare un intero periodo di rotazione della gabbia.

Nel capitolo dedicato all'analisi dei segnali (vedi capitolo 6.2), sarà esaminato un numero di periodi di rotazione dell'albero multiplo di 2.5, in modo da considerare un numero intero di periodi di rotazione della gabbia.

4.2 Difetto sulla pista interna

Il difetto sulla pista interna è stato effettuato sul cuscinetto n_2 . L'anello interno è stato estratto manualmente dal cuscinetto e posizionato in morsa, per essere completamente bloccato. Tramite l'ausilio di un cutter, è stata realizzata un'incisione sulla superficie esterna dell'anello, in direzione parallela all'asse di rotazione del cuscinetto (vedi figura 4.2). L'intaglio presenta una lunghezza pari alla larghezza della pista interna, mentre la larghezza e la profondità sono relativamente contenute, limitatamente alle caratteristiche dello strumento utilizzato per realizzare il danneggiamento. L'entità dell'incisione è stata stabilita in modo tale che il difetto sia eccitato dal passaggio dei corpi volventi ma non sia rilevabile manualmente.



Figura 4.2: difetto sulla pista interna.

La formula semplificata per il calcolo della frequenza caratteristica del difetto sulla pista interna ed i valori delle *BPFI*, variabili con la frequenza di rotazione dell'albero, sono riportati rispettivamente nell'equazione (4.3) e nella tabella 4.3, insieme alla periodicità del fenomeno.

$$BPFI = f_s \frac{z}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \right) \quad (4.3)$$

Tabella 4.3: frequenza e periodo del difetto sulla pista interna al variare della velocità del motore.

ω_m [rpm]	f_s [Hz]	BPFI [Hz]	T_s [s]	T_{inner} [s]
500	4.17	32.38	0.24	0.031
1000	8.33	64.76	0.12	0.015
1500	12.5	97.15	0.08	0.01
2000	16.67	129.53	0.06	0.008
2500	20.83	161.91	0.048	0.006

L'anello interno ruota sincrono all'albero su cui è applicato, mentre la gabbia obbliga i rulli a ruotare attorno all'asse dell'albero ad una velocità minore. Quando un rullo tocca il difetto, si ha un impulso che viene registrato dagli accelerometri. Il periodo del difetto sulla pista interna è dato dall'intervallo temporale che intercorre tra due contatti successivi ed il suo valore è minore del periodo della rotazione, poiché durante un giro dell'albero si hanno diversi urti. Il numero di impatti tra gli elementi volventi ed il difetto sull'anello interno durante una rotazione completa dell'albero è dato dal rapporto, costante, tra le *BPFI* e le f_s ed è pari a 7.77. Questo significa che durante un periodo di rotazione si dovrebbero avere tra i 7 e gli 8 urti tra i rulli ed il danneggiamento.

4.3 Difetto sulla pista esterna

Il difetto sulla pista esterna, realizzato sul cuscinetto n_5 , è stato posizionato nella zona interna dell'anello. Per realizzarlo è stato smontato completamente il cuscinetto, in modo da facilitare il raggiungimento della zona di interesse: a seguito dell'estrazione dell'anello interno dalla sua sede, sono stati rimossi tutti i rulli, permettendo così l'asportazione finale della gabbia. Successivamente la pista esterna è stata posizionata in una morsa e, utilizzando un cutter, è stata realizzata un'incisione diretta parallelamente all'asse dell'albero (vedi figura 4.3). Come nel caso presentato precedentemente, il difetto ha una lunghezza pari

alla larghezza dell'anello esterno ed una larghezza ed una profondità non eccessive.



Figura 4.3: difetto sulla pista esterna.

La formula semplificata per il calcolo della frequenza caratteristica di un difetto sulla pista esterna, ottenuta ponendo l'angolo di contatto $\alpha = 0^\circ$, ed i valori delle *BPFO* e del periodo al variare della frequenza di rotazione dell'albero, ossia della velocità angolare del motore, sono riportati di seguito (vedi equazione (4.4) e tabella 4.4).

$$BPFO = f_s \frac{z}{2} \left(1 - \frac{d}{D}\right) \quad (4.4)$$

Tabella 4.4: frequenza e periodo del difetto sulla pista esterna al variare della velocità del motore.

ω_m [rpm]	f_s [Hz]	BPFO [Hz]	T_s [s]	T_{outer} [s]
500	4.17	21.78	0.24	0.046
1000	8.33	43.57	0.12	0.023
1500	12.5	65.35	0.08	0.015
2000	16.67	87.14	0.06	0.011
2500	20.83	108.92	0.048	0.009

La pista esterna è l'unico componente di un cuscinetto a non subire nessuna tipologia di movimento durante la rotazione dell'albero. Durante un giro di quest'ultimo, il numero di urti è dato dal rapporto tra le frequenze del difetto e la

frequenza di rotazione dell'albero, pari a 5.23. Quindi in un periodo della rotazione dell'albero si dovrebbero presentare tra i 5 ed i 6 urti. Moltiplicando il valore trovato per 2.5, cifra che rappresenta la relazione tra la velocità angolare della gabbia e quella dell'albero, si ottiene circa 13, ovvero il numero di rulli che durante un giro completo della gabbia dovrebbe andare a contatto con il difetto posizionato sulla pista esterna.

Poiché la pista esterna non si muove rispetto all'albero, il difetto è sempre posizionato all'interno della zona di carico, quindi nell'analisi dei risultati dovrebbero essere visibili 5 o 6 picchi ogni periodo della rotazione dell'albero, in accordo con quanto descritto sopra.

La posizione del danneggiamento è stata indicata da un segno sulla parte esterna del cuscinetto, in modo da rendere individuabile il difetto dopo il montaggio (vedi figura 4.4). Conoscere la posizione del difetto in questo particolare caso è stato fondamentale, poiché sono state realizzate diverse prove che presentano un differente orientamento dell'intaglio presente sul cuscinetto rispetto alla zona di applicazione della forza.

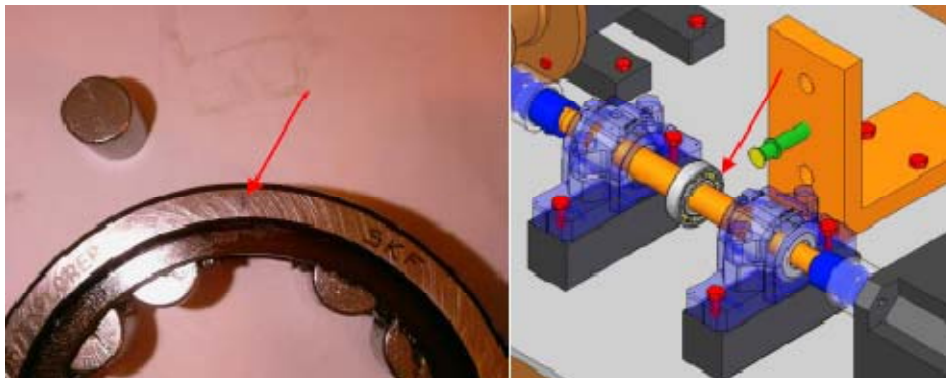


Figura 4.4: posizionamento del difetto sulla pista esterna.

Posizionando il difetto a 90° rispetto al punto indicato in figura 4.4, il difetto non è eccitato dal carico applicato e, quindi, non dovrebbe risultare visibile dagli accelerometri. Analogamente, nel caso in cui il danneggiamento sia posto a 180° rispetto al punto segnato, ossia dalla parte opposta dell'albero rispetto al punto di applicazione del carico, gli accelerometri non dovrebbero essere in grado di percepire i contatti tra il difetto ed i rulli. L'intaglio in questa configurazione è scarico, poiché, a causa della sua posizione, tenderebbe a chiudersi per la presenza della forza applicata. Quando invece il difetto è situato in corrispondenza del punto stabilito, tenderebbe ad aprirsi conseguentemente

all'applicazione del carico, aumentando l'entità degli urti che nascono dai contatti con i rulli. Soltanto in quest'ultima configurazione, infatti, il danneggiamento dovrebbe risultare sufficientemente eccitato da essere rilevabile dai sensori.

4.4 Difetto sull'elemento volvente

Il difetto sull'elemento volvente è stato effettuato sul cuscinetto n_4 . Dopo aver smontato completamente il cuscinetto per avere a disposizione un rullo libero dagli ingombri degli altri componenti, l'elemento è stato posizionato in morsa ed è stato realizzato un intaglio utilizzando un cutter. L'incisione, parallela all'asse dell'albero, presenta una lunghezza pari a quella del rullo e le altre due dimensioni fortemente vincolate allo strumento di taglio (vedi figura 4.5). Il rullo presenta infatti una superficie curva, per cui si ottiene con difficoltà una larghezza ed una profondità ridotta ed omogenea. Anche in quest'ultimo caso, la severità dell'incisione è stata stabilita in modo che il difetto risulti adeguatamente eccitato, senza però che esso sia rilevabile manualmente.



Figura 4.5: difetto sull'elemento volvente.

Di seguito è riportata la formula semplificata che consente di determinare la frequenza di rotazione del rullo (BSF). La tabella 4.5 contiene, oltre alle frequenze ed al periodo di rotazione dell'albero, le BSF ed i periodi relativi,

calcolati al variare della velocità angolare del motore, e le frequenze del difetto ($2xBSF$) con la periodicità associata.

$$BSF = f_s \frac{D}{2d} \left(1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right) \quad (4.5)$$

Tabella 4.5: frequenza e periodo del difetto sull'elemento volvente al variare della velocità del motore.

ω_m [rpm]	f_s [Hz]	BSF [Hz]	$2xBSF$ [Hz]	T_s [s]	$2xT_{roller}$ [s]	T_{roller} [s]
500	4.17	10.24	20.48	0.24	0.098	0.049
1000	8.33	20.48	40.96	0.12	0.049	0.024
1500	12.5	30.72	61.44	0.08	0.033	0.016
2000	16.67	40.96	81.92	0.06	0.024	0.012
2500	20.83	51.2	102.41	0.048	0.02	0.01

La frequenza indicata come BSF rappresenta la velocità di rotazione del rullo attorno al proprio asse. Il difetto posizionato sull'elemento volvente è eccitato sia quando entra in contatto con la pista interna sia quando tocca la pista esterna, quindi due volte durante il moto di rotazione: la frequenza del difetto è perciò doppia rispetto a quella di rotazione del componente in esame. Il numero di urti tra le due piste e l'intaglio sul rullo, dato dal rapporto tra le $2xBSF$ e le rispettive f_s , è pari a 4.92. Quindi in un periodo della rotazione dell'albero si dovrebbero avere circa 5 impulsi legati alla presenza del danneggiamento. Per analizzare correttamente il fenomeno bisogna valutare il numero di impulsi in un periodo di rotazione della gabbia, che coincide con l'intervallo temporale impiegato dall'elemento volvente per compiere il moto di rivoluzione attorno all'asse dell'albero. Questo valore, dato dal prodotto tra i 5 impulsi determinati precedentemente e i 2.5 periodi di rotazione dell'albero corrispondenti ad un periodo di rotazione della gabbia, è pari a 12.3.

Nell'analisi dei segnali acquisiti sul cuscinetto n_4 , si valuterà il fenomeno considerando un numero di periodi di rotazione dell'albero multiplo di 2.5. Non dovrebbero essere visibili tutti i 12.3 picchi calcolati analiticamente, poiché il rullo, conseguentemente al suo moto di rivoluzione, si allontana periodicamente dalla zona di carico. Gli accelerometri dovrebbero quindi riuscire a percepire solo gli impatti che avvengono quando il rullo danneggiato è situato in questa zona.

Capitolo 5

Sviluppo dell'algoritmo MED

In questo capitolo è descritta la metodologia con cui è stato possibile realizzare l'algoritmo della MED e sono riportate tutte le caratteristiche principali della tecnica. Per convenzione, si decide di indicare il segnale originale come MED input e quello risultante dalla tecnica come MED output.

5.1 Scrittura dell'algoritmo

L'algoritmo della MED è concepito per la diagnostica dei difetti sui cuscinetti, mediante l'analisi dei segnali acquisiti, in base a quanto riportato negli articoli scientifici reperiti in letteratura (vedi paragrafo 2.3.6).

La tecnica ha l'obiettivo di individuare la periodicità del difetto, evidenziando il punto che presenta la maggiore concentrazione di energia all'interno di ogni periodo del danneggiamento. Invertendo il valore del periodo trovato, si stima una frequenza che consente di diagnosticare la tipologia di difetto presente sul cuscinetto.

Sfruttando il segnale fornito dal canale captatore di prossimità è possibile calcolare il periodo di rotazione dell'albero, da cui si ricava il periodo teorico del difetto, dividendo T_s per il rapporto tra la frequenza del difetto e quella di rotazione dell'albero.

Tabella 5.1: relazioni tra il periodo di rotazione ed i periodi dei difetti.

$T_{\text{inner}} = \frac{T_s}{7.77}$	$T_{\text{outer}} = \frac{T_s}{5.23}$	$T_{\text{roller}} = \frac{T_s}{4.92}$	$T_{\text{cage}} = \frac{T_s}{0.4}$
---------------------------------------	---------------------------------------	--	-------------------------------------

La lunghezza del filtro (M) durante l'applicazione dell'algoritmo, viene fatta variare fino ad un massimo pari alla lunghezza del periodo del difetto, ad esempio M può essere cambiato dal 10% al 100% del periodo con passo 5%. In questo modo si ottengono tanti segnali di output quanti sono i valori impostati e si può valutare l'influenza della lunghezza del filtro sull'efficienza della MED.

Per ogni valore di M , parte un algoritmo iterativo che consente di calcolare l'output della tecnica. Si costruisce un filtro iniziale simile ad una delta di Dirac,

del tipo $f_0 = [0 \dots 0 \ 1 \ 0 \dots 0]$ (vedi figura 5.1), che, convoluto con il segnale acquisito, origina il segnale di output:

$$y(n) = x(n) * f_0(n) \quad (5.1)$$

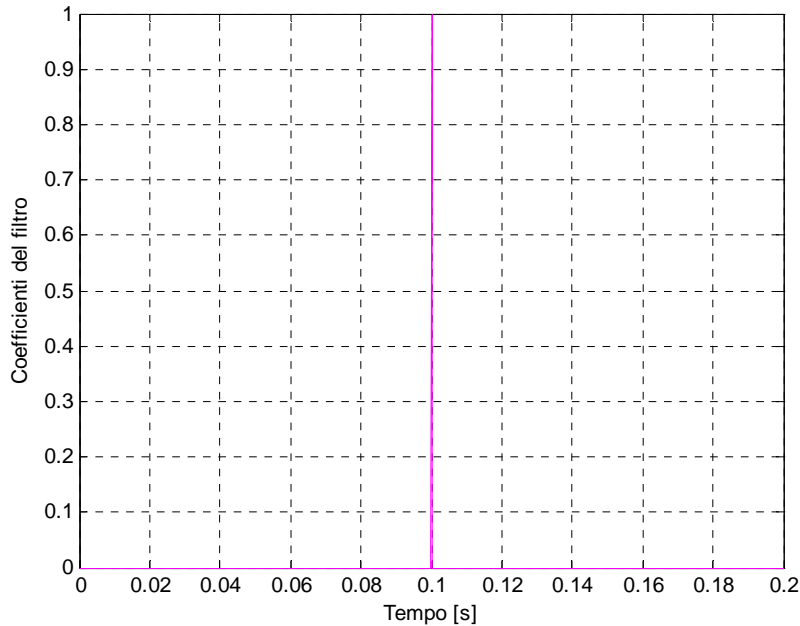


Figura 5.1: andamento del filtro iniziale.

Successivamente si calcola la norma Varimax:

$$V(y) = \frac{\sum_{j=0}^N y^4(j)}{(\sum_{j=0}^N y^2(j))^2} \quad (5.2)$$

Utilizzando la funzione *fminunc* di Matlab, si minimizza l'inverso della Varimax, modificando, mediante un procedimento iterativo, i valori dei coefficienti del filtro. Ad ogni iterazione, il filtro calcolato è convoluto con il segnale di input, ottenendo un nuovo output ed un nuovo valore della norma. Le iterazioni terminano quando l'inverso della Varimax non decresce ulteriormente, per cui si sono determinati il filtro e l'output finale.

Si crea infine il grafico dell'input e dell'output, in modo da valutare visivamente se la tecnica individua un picco, non presente nel segnale originale, ogni periodo del difetto.

L'utilizzo di una programma di calcolo dotato di un'apposita funzione di minimizzazione permette di tralasciare il calcolo delle matrici (vedi equazione (2.22)) ottenute ponendo pari a zero la derivata della Varimax rispetto ai coefficienti del filtro, ed evita quindi l'operazione di inversione che richiederebbe un elevato onere computazionale.

5.2 Caratteristiche della tecnica

5.2.1 Segnale test

Si considera, a titolo esemplificativo, un segnale prova di riferimento acquisito tramite l'accelerometro orizzontale sul cuscinetto con il difetto sulla pista esterna, ad una velocità del motore di 2500 rpm ed una coppia dell'utilizzatore di 4 Nm, in assenza della forza applicata sul cuscinetto test (vedi figura 5.2).

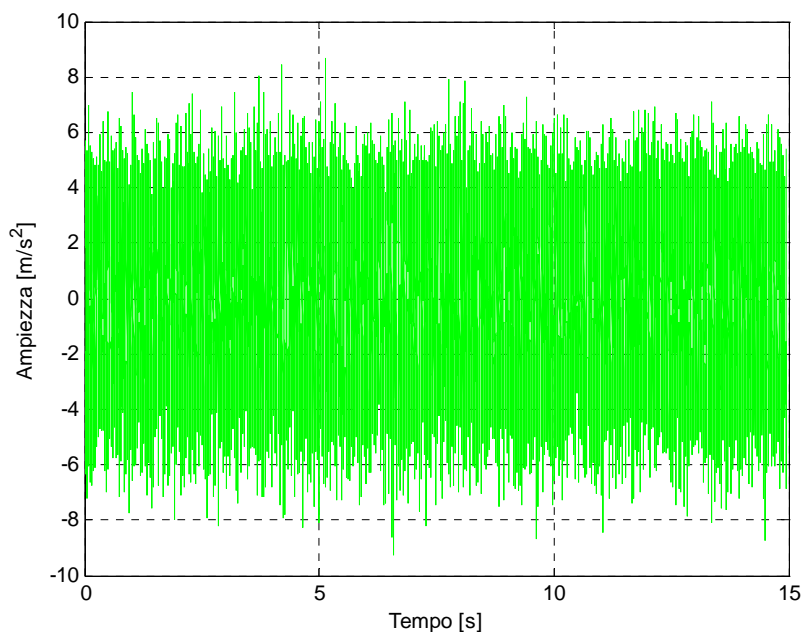


Figura 5.2: segnale test utilizzato.

Su tale segnale è applicato l'algorithmo della tecnica di cui si fanno variare i parametri caratteristici, registrando la loro influenza sui risultati ottenuti.

5.2.2 Andamento della norma Varimax

Durante il procedimento di massimizzazione, la norma Varimax presenta l'andamento caratteristico mostrato nel paragrafo 2.3.6 (vedi figura 2.16). Nell'algorithmo presentato in precedenza tuttavia, poiché si ricorre ad una

funzione di minimizzazione, è necessario considerare il valore inverso della norma. Se si rappresenta l'andamento dell'inverso della Varimax in funzione del numero di iterazioni compiute, si osserva che l'andamento teorico previsto è rispettato. Infatti la curva decresce con concavità opposta rispetto a quella del grafico riportato nella figura 2.16, fino al raggiungimento di un punto oltrepassato il quale la funzione si mantiene costante (vedi figura 5.3).

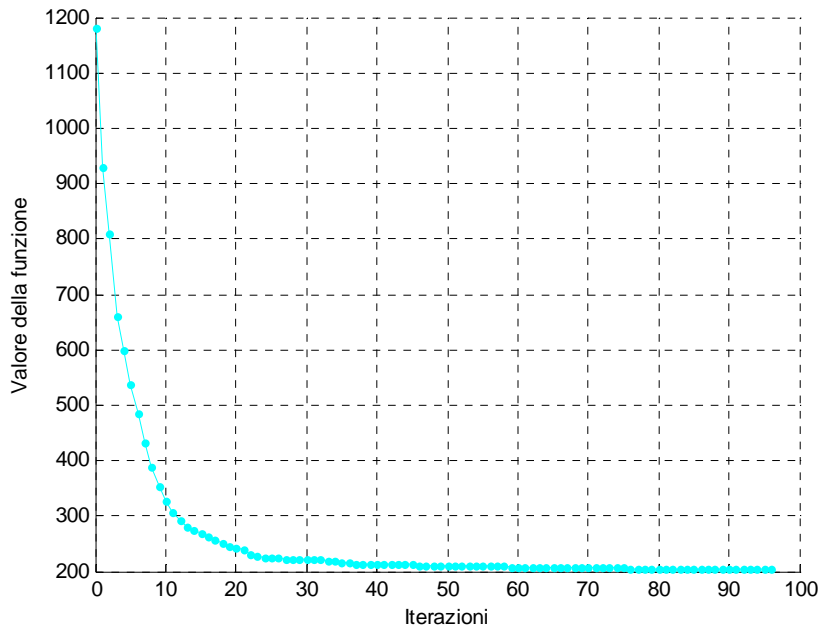


Figura 5.3: andamento della norma Varimax in funzione del numero di iterazioni.

5.2.3 Numero di iterazioni

Poiché l'applicazione della tecnica richiede un notevole numero di operazioni, si decide di stabilire un criterio di arresto del procedimento iterativo prima del raggiungimento del valore minimo, in modo tale da ridurre lo sforzo computazionale richiesto. Si decide, allora, di imporre un numero massimo di iterazioni pari a 5 e si applica l'algoritmo al segnale in esame, ottenuto considerando una lunghezza del filtro pari al 50% del periodo del difetto sulla pista esterna (vedi paragrafo 5.2.4), confrontando il risultato con quello ottenibile senza imporre tale limite. Come si può notare dai grafici riportati in figura 5.4 ed in figura 5.5, il risultato che si ottiene non varia significativamente con la presenza del vincolo sul numero massimo di iterazioni imposto, ottenendo però una considerevole riduzione dei tempi di calcolo.

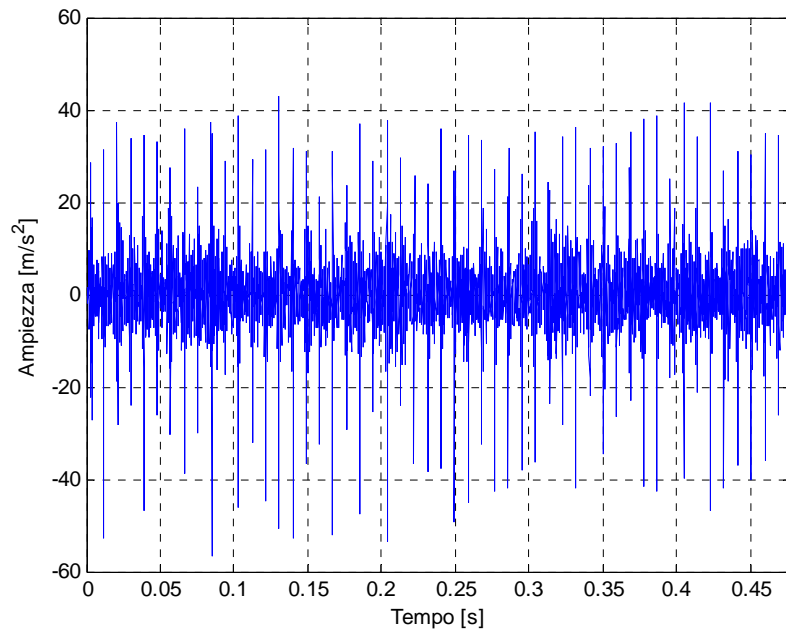


Figura 5.4: MED output senza un numero massimo di iterazioni.

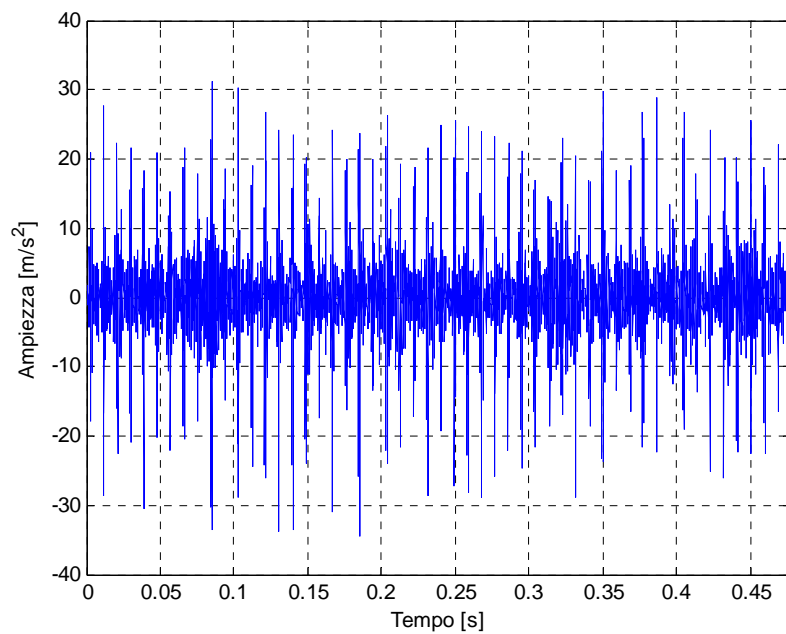


Figura 5.5: MED output con un numero massimo di iterazioni pari a 5.

5.2.4 Lunghezza del filtro

Si vuole verificare l'influenza della lunghezza del filtro (M) sui risultati ottenuti dall'applicazione della MED, per constatare se sia possibile stabilirne un valore di ottimo, da utilizzare in tutti i successivi impieghi della tecnica. Per questo motivo si procede nell'analisi del segnale di riferimento facendo variare la lunghezza del filtro da un valore minimo del 10% fino ad un a valore massimo del 100% della lunghezza del periodo del difetto, con un passo di variazione pari al 5%. Le analisi sono effettuate imponendo all'algoritmo un numero massimo di iterazioni pari a 5, come illustrato nel paragrafo 5.2.3. I grafici ottenuti, riportati in seguito, permettono di apprezzare i risultati di questa variazione (vedi figura 5.6, figura 5.7 e figura 5.8). Dalla loro analisi si può notare che la lunghezza del filtro non influenza il risultato ottenuto dall'applicazione della tecnica. Pertanto nelle applicazioni successive si può scegliere un valore di M a priori, in modo da ridurre ulteriormente l'onere computazionale richiesto.

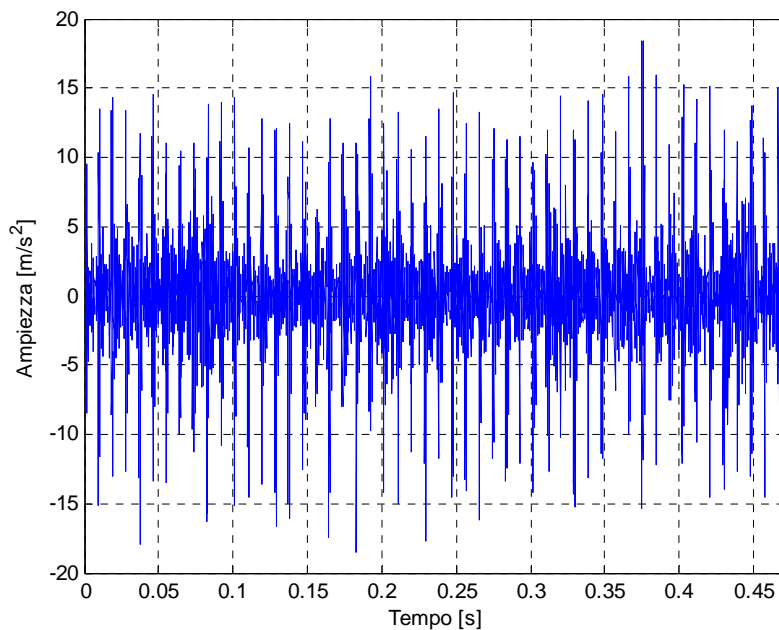


Figura 5.6: MED output $M=10\%$ del periodo del difetto.

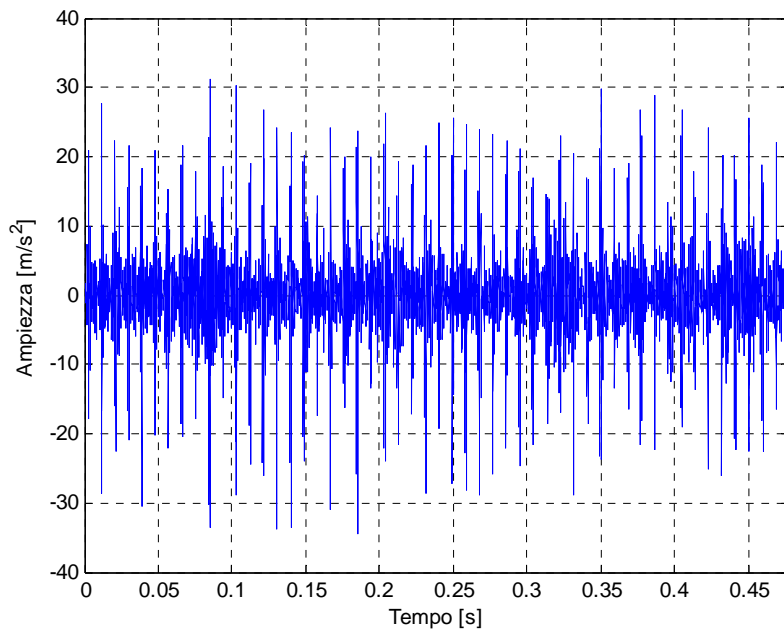


Figura 5.7: MED output M=50% del periodo del difetto.

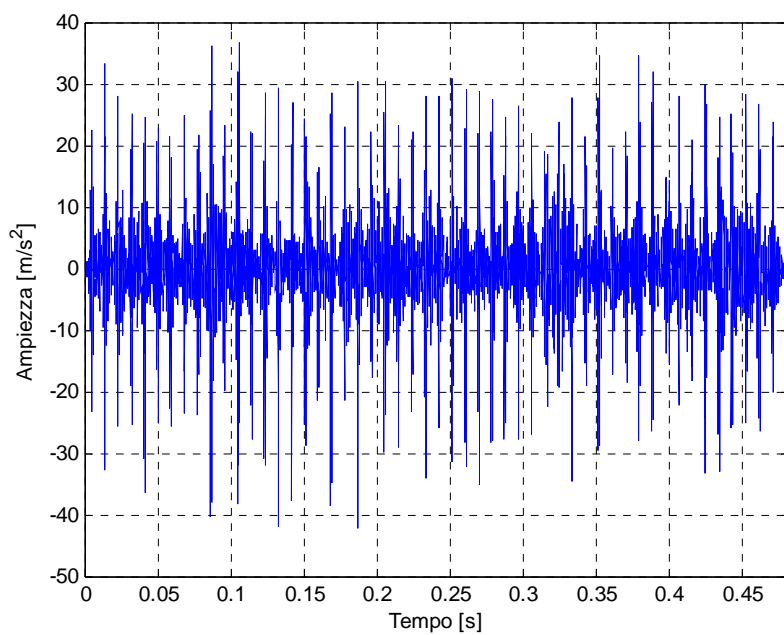


Figura 5.8: MED output M=100% del periodo del difetto.

Considerando il valore iniziale delle norma Varimax, calcolato dall'output ottenuto dalla convoluzione dell'input con il filtro ad impulso f_0 , si nota che tale

quantità non cambia al variare della lunghezza del filtro ed assume un valore pari a 339.615 (la norma Varimax è un numero puro, privo di unità di misura). Si considera successivamente il valore finale della norma, ottenuto al termine del processo di minimizzazione, e lo si rappresenta su un grafico in funzione della lunghezza del filtro. Dalla figura 5.9 si nota che il valore finale, che rappresenta l'inverso del valore massimo della norma, non cambia sensibilmente al variare di M .

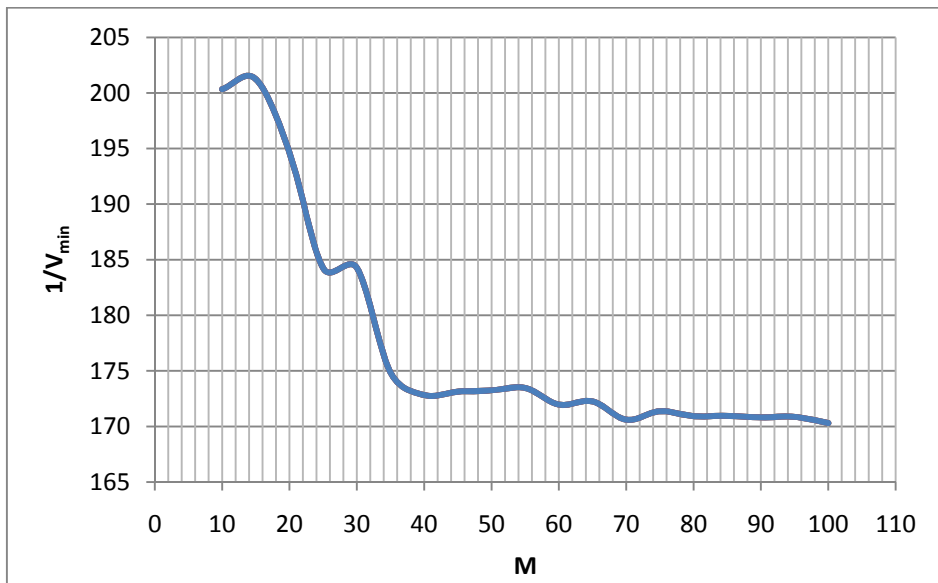


Figura 5.9: andamento del valore minimo della norma Varimax al variare della lunghezza del filtro.

L'andamento rappresentato indica, di conseguenza, che il risultato ottenuto non varia significativamente al variare della lunghezza del filtro, fornendo un'ulteriore conferma in merito alla decisione di non far variare M durante l'applicazione dell'algoritmo. Inoltre, poiché il comportamento della funzione risulta pressoché costante per una lunghezza del filtro pari o superiore al 35% del periodo del difetto, si decide di utilizzare un valore che permetta di mantenersi all'interno di questa zona. In particolare si sceglie M pari al 50% della lunghezza del periodo del difetto.

5.2.5 Istante temporale iniziale

Poiché l'analisi dell'intero segnale acquisito comporterebbe un elevato onere computazionale, è necessario considerare un numero limitato di periodi di rotazione dell'albero. L'algoritmo realizzato consente di scegliere l'istante temporale iniziale T_0 dei periodi esaminati. Per valutare l'influenza di questo

parametro nell'applicazione della tecnica, lo si fa variare imponendo vari valori ed osservando i risultati. In particolare si fa variare l'istante iniziale facendogli assumere il valore di 0, 3, 5 e 10 secondi. Osservando qualitativamente i grafici riportati in seguito (vedi figura 5.10, figura 5.11, figura 5.12 e figura 5.13), si nota che il risultato ottenuto dall'applicazione dell'algorithmo non varia al variare dell'istante iniziale di riferimento. Si può quindi concludere che l'analisi risulta indipendente da questo parametro, potendo così affermare che i segnali si mantengono stabili durante l'intervallo temporale dell'acquisizione e che la tecnica è robusta. Di conseguenza, nelle applicazioni successive sarà utilizzato un valore dell'istante iniziale fissato a $T_0 = 5 \text{ s}$.

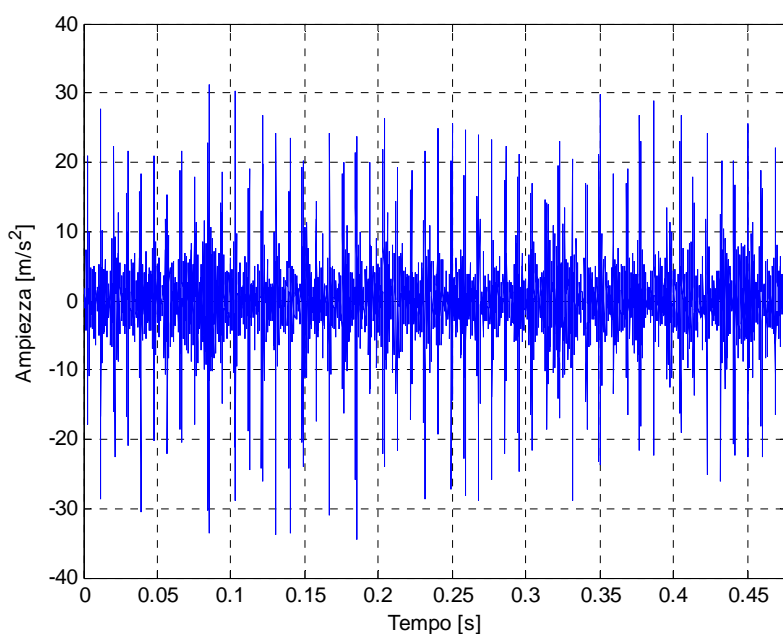


Figura 5.10: MED output con $T_0=0 \text{ s}$.

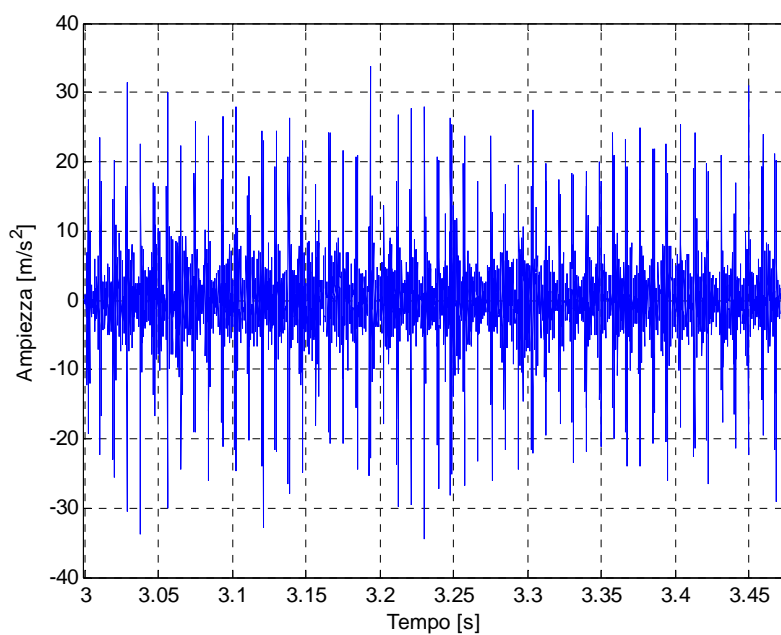


Figura 5.11: MED output con $T_0=3$ s.

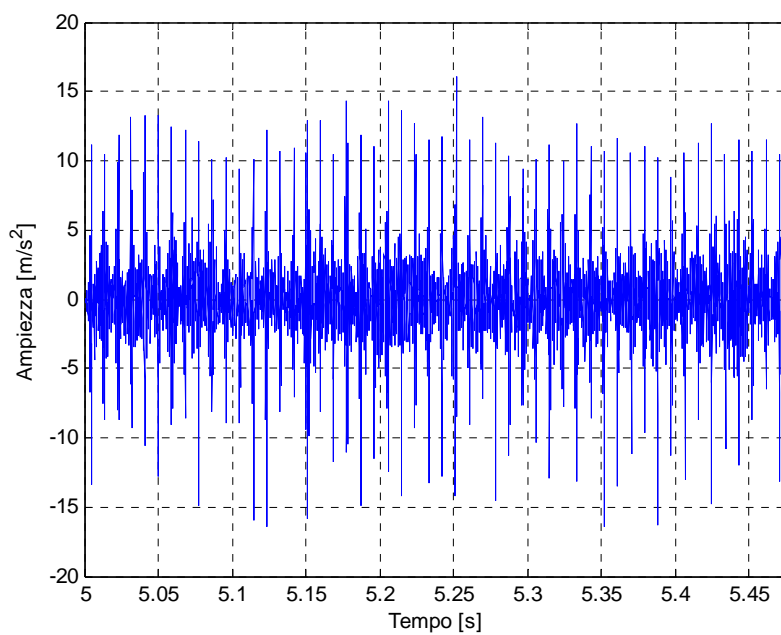


Figura 5.12: MED output con $T_0=5$ s.

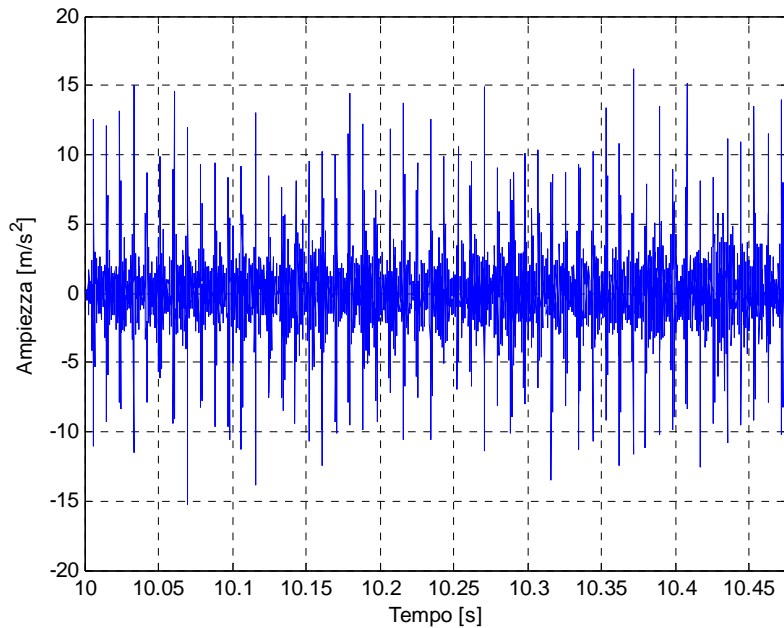


Figura 5.13: MED output con $T_0=10$ s.

5.2.6 Lunghezza del segnale di ingresso

Per quanto riguarda la lunghezza dell'input (T), analizzando un periodo di rotazione dell'albero la tecnica individua correttamente i picchi del difetto previsti teoricamente. Per evidenziare la ripetitività del fenomeno durante tutta l'acquisizione, si sceglie di analizzare più periodi del segnale. In particolare, si utilizzano da 5 a 15 periodi del segnale per l'analisi condotta sui cuscinetti danneggiati sulla pista interna ed esterna, in modo da evidenziare anche il periodo di rotazione dell'albero. Si utilizzano, invece, 15 periodi per il cuscinetto danneggiato sull'elemento volvente e 20 periodi per il cuscinetto avente il difetto sulla gabbia, per mettere in evidenza anche il periodo di rotazione di quest'ultima.

Capitolo 6

Analisi dei dati sperimentali mediante MED

6.1 Applicazione delle tecniche tradizionali

Inizialmente si applicano ai segnali acquisiti le tecniche tradizionali, solitamente utilizzate per la diagnostica degli elementi meccanici e, in modo particolare, per la diagnostica rivolta ai cuscinetti volventi. In particolare si effettua un'analisi nel dominio della magnitudo, valutando varie grandezze statistiche per le acquisizioni ottenute (*RMS*, Crest Factor, Peak-Peak, Kurtosis).

6.1.1 Indicatori statistici

Le grandezze discusse nel paragrafo 2.3.1 sono applicate sia ai due cuscinetti sani che a tutti i cuscinetti sottoposti ai singoli difetti introdotti, in modo tale da poterne valutare la variazione nei diversi casi. Inizialmente si considera il segnale acquisito senza l'applicazione della forza, alla velocità di 500 rpm ed alla coppia di 4 Nm, per le vibrazioni misurate dall'accelerometro verticale.

Tabella 6.1: indicatori per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 500 rpm e 4 Nm.

	RMS	K	CF	PP
Cuscinetto non danneggiato 1	0.34745	3.0892	4.8913	3.2043
Cuscinetto non danneggiato 2	0.31178	3.0091	4.0869	2.3164
Difetto pista interna	0.51525	14.4978	11.7224	11.6234
Difetto pista esterna	0.30287	4.3727	7.1164	4.2133
Difetto elemento volvente	0.39767	12.0573	13.5119	9.8114
Difetto gabbia	0.2736	3.0822	4.1326	2.0536

Osservando i risultati riportati in tabella 6.1, si nota come entrambi i cuscinetti non danneggiati presentino circa gli stessi valori per tutte le grandezze prese in esame. Considerando i cuscinetti danneggiati, si nota invece un aumento, anche sensibile, dei parametri per tutti i tipi di danneggiamenti escluso quello realizzato sulla gabbia. In particolare si ha una crescita del Kurtosis e del Crest Factor, che indicano un aumento della presenza dei picchi presenti nel segnale. Inoltre si riscontra un comportamento anomalo del cuscinetto danneggiato sulla

pista esterna, in cui il valore *RMS* risulta inferiore rispetto a quello trovato per entrambi i cuscinetti non danneggiati. Per quanto riguarda il cuscinetto danneggiato sulla gabbia, si osserva che gli indicatori non variano sensibilmente rispetto a quelli relativi ai cuscinetti non danneggiati. Da queste valutazioni si può affermare che, benché ci sia in generale un aumento degli indicatori statistici passando dai cuscinetti non danneggiati a quelli danneggiati, ad indicazione della presenza di un difetto, non è comunque possibile stabilire, basandosi solamente su questo tipo di analisi, né il tipo di difetto che si sta considerando né l'entità di tale difetto.

Il calcolo dei parametri statistici è stato condotto anche su segnali relativi ad acquisizioni del medesimo canale, ma realizzate a valori differenti di velocità e di coppia applicata. In particolare si analizzano i segnali a 1000 rpm e 4 Nm, a 1000 rpm e 6 Nm ed a 2500 rpm e 4 Nm, tutti quanti ottenuti senza l'applicazione del carico sul cuscinetto di prova. Osservando i risultati per le varie acquisizioni analizzate si nota che, come nel caso precedente, passando dai cuscinetti non danneggiati a quelli danneggiati, si ha un aumento di tutti gli indicatori applicati. Le uniche eccezioni rimangono il valore *RMS* del cuscinetto danneggiato per la pista esterna, che assume un valore inferiore a quello calcolato per i due cuscinetti privi di difetto, e gli indicatori relativi al difetto sulla gabbia, che variano di poco rispetto a quelli dei cuscinetti non danneggiati. Si evidenzia inoltre che variando coppia applicata e velocità di rotazione (vedi tabella 6.3 e tabella 6.4), non si hanno differenze significative nei valori ottenuti per questi indicatori.

Tabella 6.2: indicatori per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1000 rpm e 4 Nm.

	RMS	K	CF	PP
Cuscinetto non danneggiato 1	0.86206	2.9016	4.4075	6.9875
Cuscinetto non danneggiato 2	0.83985	2.8374	4.1479	6.8302
Difetto pista interna	1.4616	9.9417	10.3941	27.592
Difetto pista esterna	0.68696	3.6832	5.6033	7.1906
Difetto elemento volvente	1.1113	7.7525	11.2862	21.5878
Difetto gabbia	0.6335	3.0259	4.2283	5.3268

Tabella 6.3: indicatori per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1000 rpm e 6 Nm.

	RMS	K	CF	PP
Cuscinetto non danneggiato 1	0.89357	2.9256	4.2935	7.5458
Cuscinetto non danneggiato 2	0.94288	3.0097	3.7315	7.0275
Difetto pista interna	1.4109	13.6618	11.751	30.4717
Difetto pista esterna	0.6305	3.9609	6.467	7.0528
Difetto elemento volvente	1.0921	8.8542	11.2077	21.9942
Difetto gabbia	0.6486	3.1449	4.9715	6.2438

Tabella 6.4: indicatori per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 2500 rpm e 4 Nm.

	RMS	K	CF	PP
Cuscinetto non danneggiato 1	2.455	2.5835	3.9228	18.8298
Cuscinetto non danneggiato 2	1.9973	2.573	3.9152	14.5765
Difetto pista interna	3.9662	13.7297	10.4513	82.3604
Difetto pista esterna	2.7245	4.9866	5.466	28.9835
Difetto elemento volvente	3.0773	12.7987	11.1224	63.0375
Difetto gabbia	1.5699	3.0824	5.3531	14.8687

In ultima analisi si applicano i vari indicatori per un canale di acquisizione differente e per un'acquisizione realizzata con applicazione del carico sul cuscinetto test. In particolare si riportano i risultati dell'analisi condotta su un segnale acquisito tramite l'accelerometro orizzontale, a 1000 rpm e 4 Nm, senza l'applicazione del carico (vedi tabella 6.5); essi vengono confrontati con i dati ottenuti su un segnale acquisito tramite accelerometro orizzontale, agli stessi valori di velocità di rotazione e di coppia applicata, ma con la presenza di un carico che agisce sul cuscinetto in esame (vedi tabella 6.6). Dai risultati, si deduce che anche variando il canale di acquisizione utilizzato ed a seguito dell'applicazione del carico sul cuscinetto test, non vi sono variazioni sensibili rispetto alle osservazioni effettuate per i casi precedenti.

Tabella 6.5: indicatori per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1000 rpm e 4 Nm.

	RMS	K	CF	PP
Cuscinetto non danneggiato 1	0.57899	2.8957	5.1816	5.7092
Cuscinetto non danneggiato 2	0.54987	2.856	4.0675	4.3088
Difetto pista interna	0.89518	9.6832	9.3855	13.1775
Difetto pista esterna	0.62957	4.1007	5.5747	6.757
Difetto elemento volvente	0.87846	8.6328	11.0808	18.2521
Difetto gabbia	0.4356	3.1578	4.4238	3.8309

Tabella 6.6: indicatori per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1000 rpm e 4 Nm con carico applicato.

	RMS	K	CF	PP
Cuscinetto non danneggiato 1	0.82058	3.138	5.1235	7.9235
Cuscinetto non danneggiato 2	0.7768	3.071	4.8645	7.1906
Difetto pista interna	1.356	7.485	9.0342	24.385
Difetto pista esterna	0.75069	3.1421	4.8489	7.0594
Difetto elemento volvente	1.5186	12.2678	10.9729	32.0523
Difetto gabbia	0.5909	3.0692	4.3371	5.0272

In conclusione, il confronto tra il valore *RMS*, il coefficiente di Kurtosis, il Crest Factor ed il valore Peak-Peak dei cuscinetti volventi privi di difetti e di quelli danneggiati in modi differenti, permette di individuare la presenza del difetto legata ad un aumento del valore dei parametri stessi. Tale aumento è determinato da una crescita dell'energia del segnale, indotta dalla presenza del danneggiamento, che però non è localizzabile né caratterizzabile. Di conseguenza queste grandezze non consentono di ricavare indicazioni precise riguardo alla tipologia ed alla collocazione del difetto presente sul cuscinetto.

6.2 Applicazione della tecnica MED

Come riportato nel capitolo 5, per ottenere una semplificazione nella dicitura, si decide di indicare il segnale originale come MED input e quello risultante dall'applicazione della tecnica come MED output.

6.2.1 Assenza del difetto senza carico applicato

La prima fase dell'analisi dei risultati attraverso la tecnica sviluppata, consiste nell'esaminare i segnali di un cuscinetto privo di danneggiamento. Il periodo di rotazione calcolato utilizzando la misura fornita dal captatore di prossimità, viene diviso per i vari coefficienti riportati al denominatore nella tabella 5.1. Conducendo un'analisi di questo tipo, si cerca in sostanza la presenza dei vari difetti all'interno del segnale del cuscinetto sano.

A titolo esemplificativo, per ogni tipo di difetto, in realtà in questo caso inesistente, si considera una delle acquisizioni che verranno analizzate in seguito, in modo da avere il confronto diretto tra la MED applicata al cuscinetto sano ed al cuscinetto difettoso. Si sceglie di esaminare prevalentemente le acquisizioni attraverso il canale accelerometro orizzontale, poiché ci si aspetta che questo sia il sensore più sensibile alla presenza di vibrazioni provocate dal danneggiamento (essendo quello in direzione del carico).

Si considera inizialmente la ricerca di un difetto sulla pista interna, per il segnale dell'accelerometro verticale a 500 rpm ed a 4 Nm. Come si può notare dai due grafici riportati in figura 6.1 ed in figura 6.2, la MED non riesce ad identificare nessun picco legato all'eventuale presenza del difetto sulla pista interna. I picchi visibili nel segnale risultante sono, infatti, legati al periodo di rotazione dell'albero. Il grafico riportato in figura 6.2 mostra chiaramente che il cuscinetto non presenta un intaglio sull'anello interno.

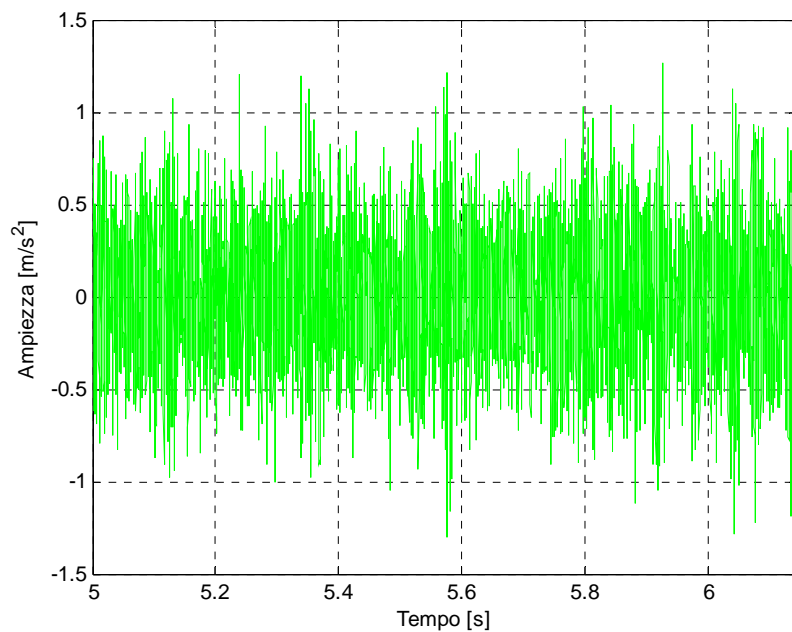


Figura 6.1: MED input del cuscinetto sano per la ricerca del difetto sulla pista interna per un'acquisizione a 500 rpm e 4 Nm

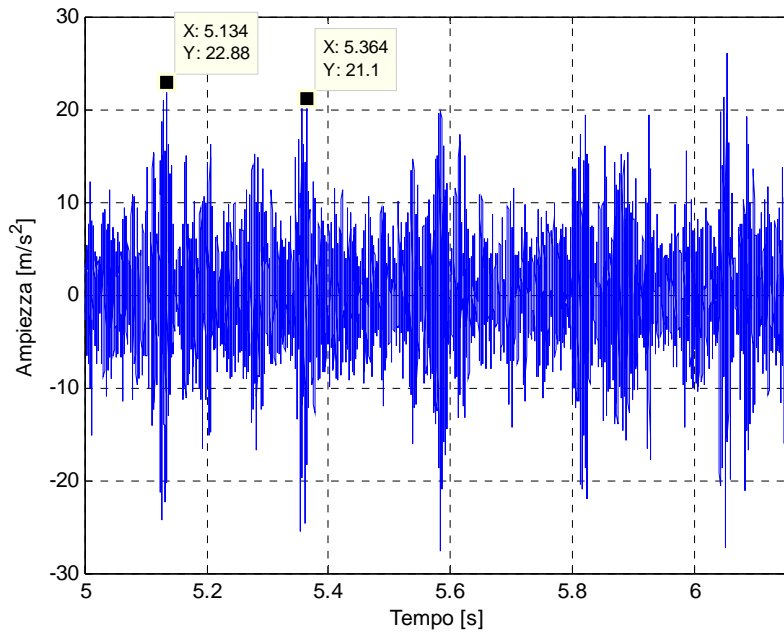


Figura 6.2: MED output del cuscinetto sano per la ricerca del difetto sulla pista interna per un'acquisizione a 500 rpm e 4 Nm.

Per avere la certezza che il risultato ottenuto non sia casuale, si ripete l'analisi sulle acquisizioni del secondo cuscinetto sano. Anche l'analisi di questi risultati porta alle medesime conclusioni presentate precedentemente, ossia che il cuscinetto non presenta alcun difetto sulla pista interna.

Inoltre il confronto tra la figura 6.2 e la figura 6.4, permette di evidenziare la stabilità del banco prova realizzato, in quanto i due grafici conducono alle stesse conclusioni. La conferma di ciò si può trovare analizzando i valori degli indicatori di stato dei due segnali acquisiti nelle stesse condizioni di velocità e di coppia sui due cuscinetti non danneggiati (vedi tabella 6.1).

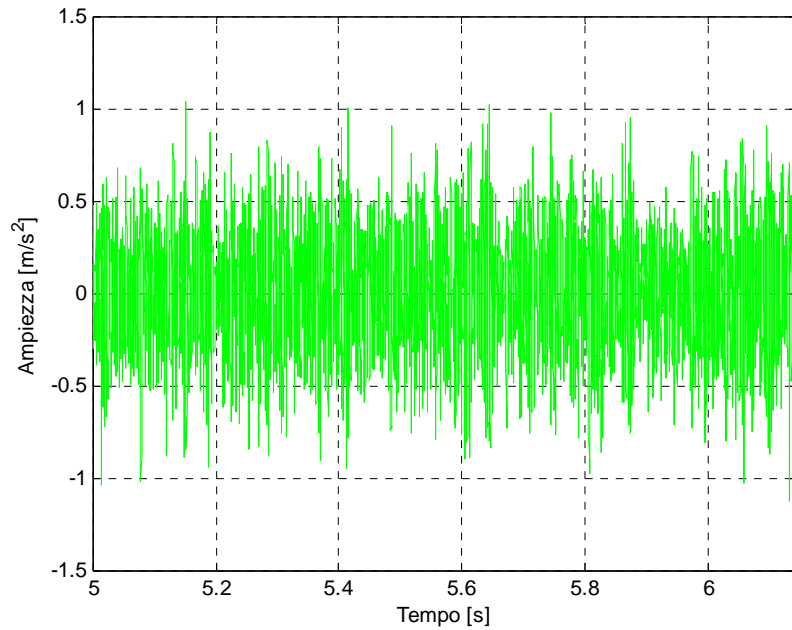


Figura 6.3: MED input del secondo cuscinetto sano per la ricerca del difetto sulla pista interna per un'acquisizione a 500 rpm e 4 Nm.

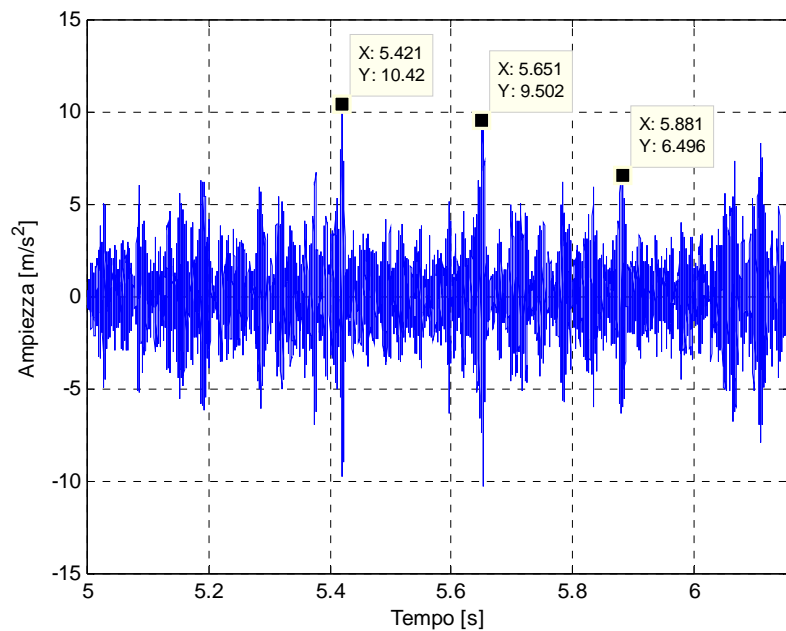


Figura 6.4: MED output del secondo cuscinetto sano per la ricerca del difetto sulla pista interna per un'acquisizione a 500 rpm e 4 Nm.

Si modifica il periodo di riferimento per la lunghezza del filtro in modo da cercare, su uno dei due cuscinetti sani, un difetto sulla pista esterna. In questo caso si sceglie di valutare il segnale dell'accelerometro orizzontale a 1500 rpm ed a 4 Nm, in modo da mostrare che la tecnica fornisce i risultati corretti a diverse condizioni di funzionamento del sistema meccanico. Anche in questo caso, la MED non identifica nessun picco provocato dal contatto tra il difetto sulla pista esterna ed i rulli, mostrando quindi la mancanza di questa tipologia di danneggiamento sul cuscinetto in esame. Si notano solo dei picchi legati al periodo di rotazione dell'albero, anche se meno evidenti rispetto ai casi precedenti (vedi figura 6.6).

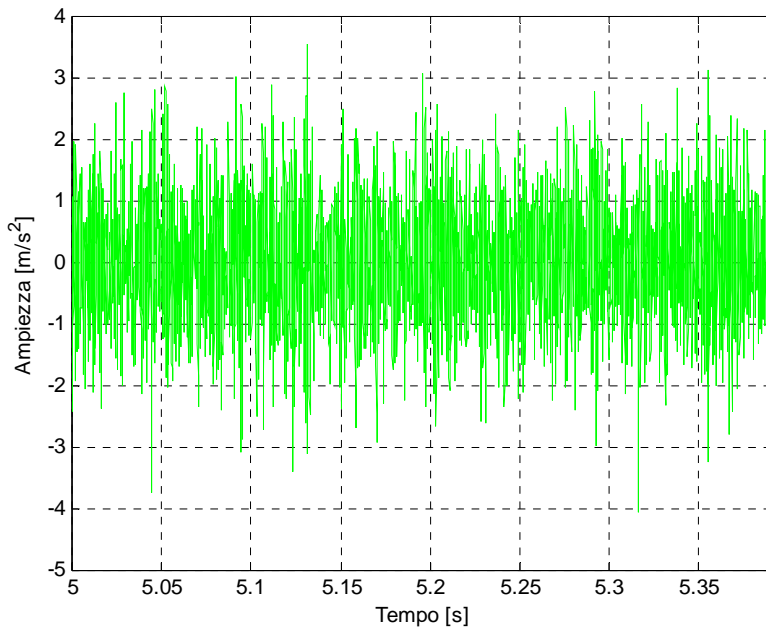


Figura 6.5: MED input del cuscinetto sano per la ricerca del difetto sulla pista esterna per un'acquisizione a 1500 rpm e 4 Nm.

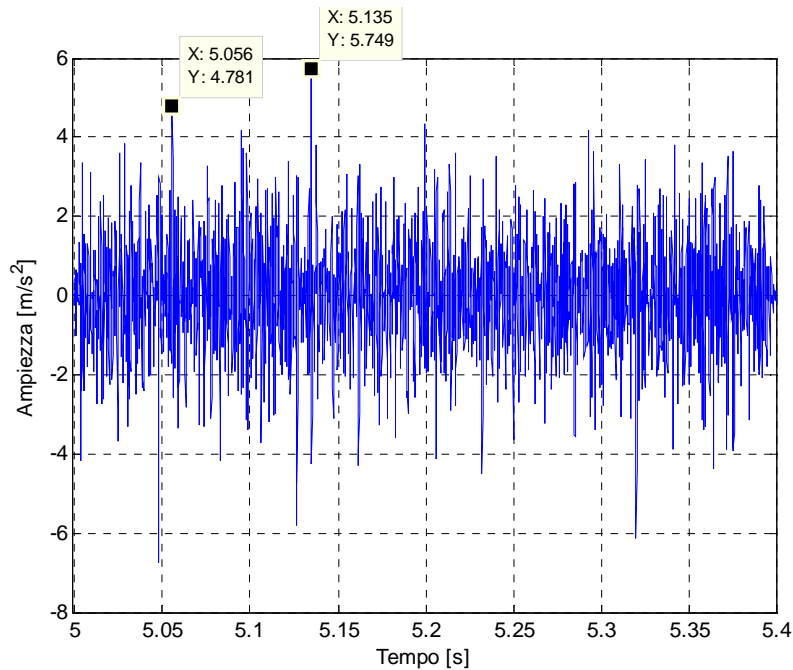


Figura 6.6: MED output del cuscinetto sano per la ricerca del difetto sulla pista esterna per un'acquisizione a 1500 rpm e 4 Nm.

Si ripete lo stesso procedimento imponendo un valore di M pari al 50% del periodo del difetto sull'elemento volvente, calcolato dividendo il periodo di rotazione dell'albero per il relativo coefficiente. Per la ricerca di questa tipologia di difetto, si analizza il segnale acquisito dall'accelerometro orizzontale a 2500 rpm ed a 4 Nm. Come per i due difetti precedenti, la tecnica non evidenzia picchi legati al difetto sul rullo, quindi si può concludere che il cuscinetto è sano (vedi figura 6.8).

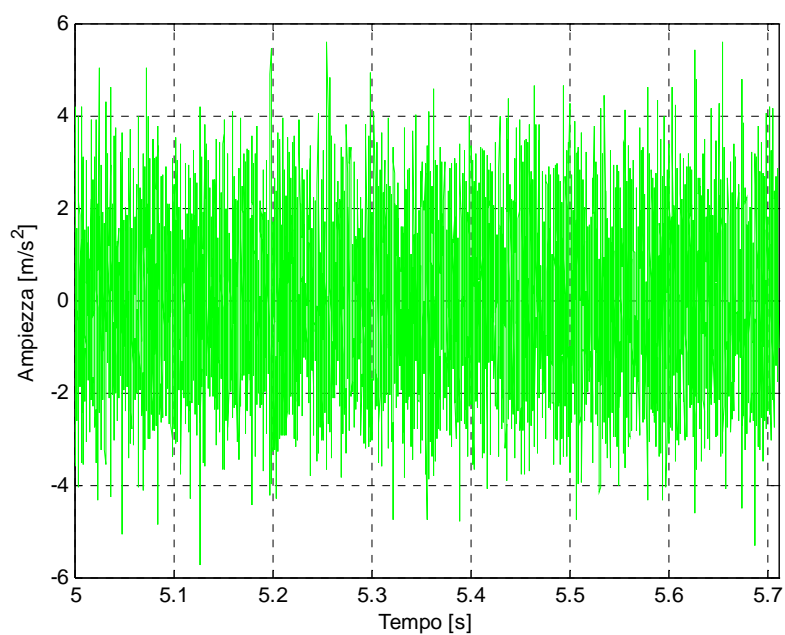


Figura 6.7: MED input del cuscinetto sano per la ricerca del difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione a 2500 rpm e 4 Nm

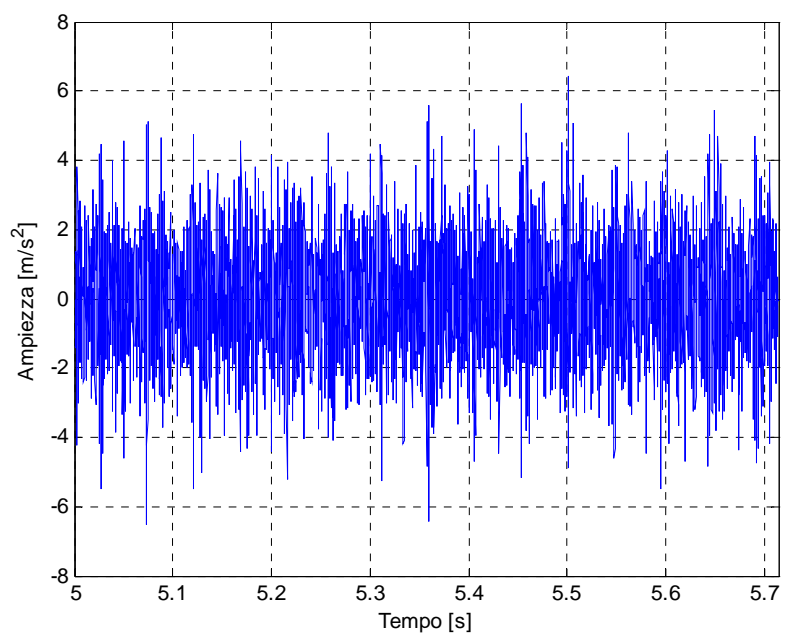


Figura 6.8: MED output del cuscinetto sano per la ricerca del difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione a 2500 rpm e 4 Nm.

Per quanto riguarda l'intaglio sulla gabbia, si sceglie in questa sede di esaminare il segnale dell'accelerometro orizzontale acquisito a 2500 rpm ed a 6 Nm. In questa analisi vengono considerati 20 periodi di rotazione dell'albero, in modo da esaminare un numero significativo di rotazioni della gabbia, che si muove con un periodo 2.5 volte superiore a quello dell'albero. Siccome il periodo del difetto in questo particolare caso è maggiore rispetto al periodo di rotazione dell'albero, la MED individua con chiarezza 20 picchi distanziati tra loro di un intervallo temporale pari all'inverso della frequenza di rotazione $f_s = 20.83 \text{ Hz}$ (come si può vedere dai riferimenti posti nel grafico in figura 6.10). Nel segnale risultante dalle MED non sono, però, presenti altri picchi imputabili alla presenza del difetto sulla gabbia, per cui è possibile concludere che il cuscinetto in esame è sano.

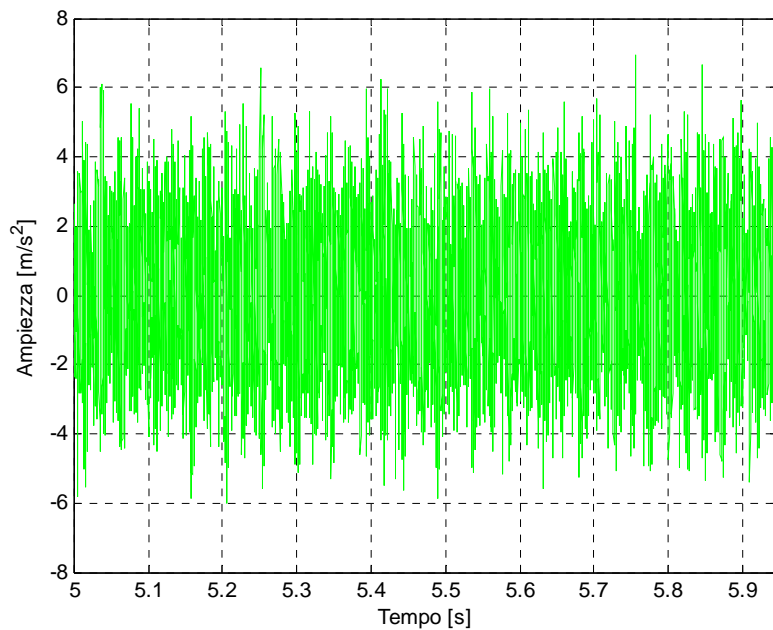


Figura 6.9: MED input del cuscinetto sano per la ricerca del difetto sulla gabbia per un'acquisizione a 2500 rpm e 6 Nm.

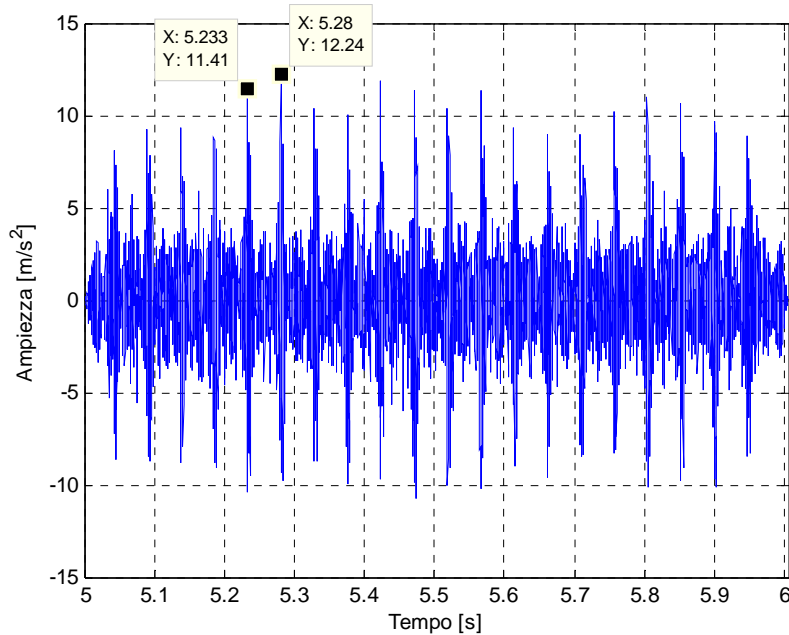


Figura 6.10: MED output del cuscinetto sano per la ricerca del difetto sulla gabbia per un'acquisizione a 2500 rpm e 6 Nm.

I grafici fin qui riportati e le considerazioni condotte, sono utilizzati come termine di confronto rispetto ai risultati che saranno ottenuti sui cuscinetti che presentano le diverse tipologie di danneggiamento. Questo consentirà di valutare l'efficacia dell'algoritmo MED applicato in quest'ambito.

6.2.2 Assenza del difetto con carico applicato

In questo paragrafo si cerca di identificare la presenza di uno dei quattro difetti sul cuscinetto sano quando viene applicato un carico pari a $F = 474 N$.

Per la ricerca dei vari difetti, si considerano i segnali acquisiti nelle medesime condizioni dei record che verranno analizzati successivamente nel caso di cuscinetti danneggiati, in modo tale da consentire il confronto immediato tra i risultati.

Definendo la lunghezza del filtro in base al periodo del difetto sulla pista interna, la MED, applicata al segnale ottenuto tramite l'accelerometro orizzontale a 500 rpm ed a 4 Nm, non rileva dei picchi correlabili alla presenza del danneggiamento, confermando quindi l'integrità del cuscinetto test. Il grafico dell'output della tecnica, riportato in figura 6.12, mostra degli impulsi distanziati tra loro di una quantità pari all'inverso della frequenza di rotazione $f_s = 4.29 Hz$. Tale comportamento è giustificato dal fatto che il sistema è

eccitato dalla presenza della forza, quindi viene evidenziato questo fenomeno a velocità basse.

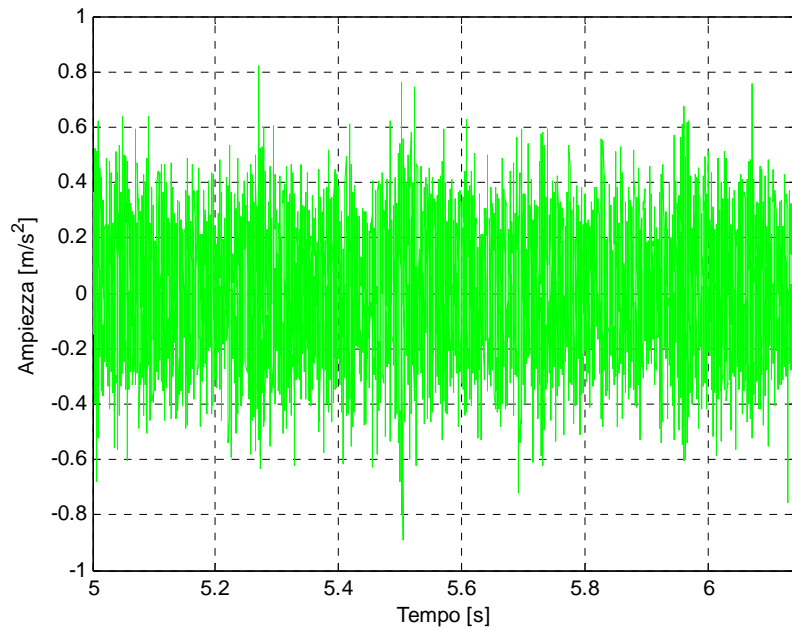


Figura 6.11: MED input del cuscinetto sano per la ricerca del difetto sulla pista interna per un'acquisizione a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

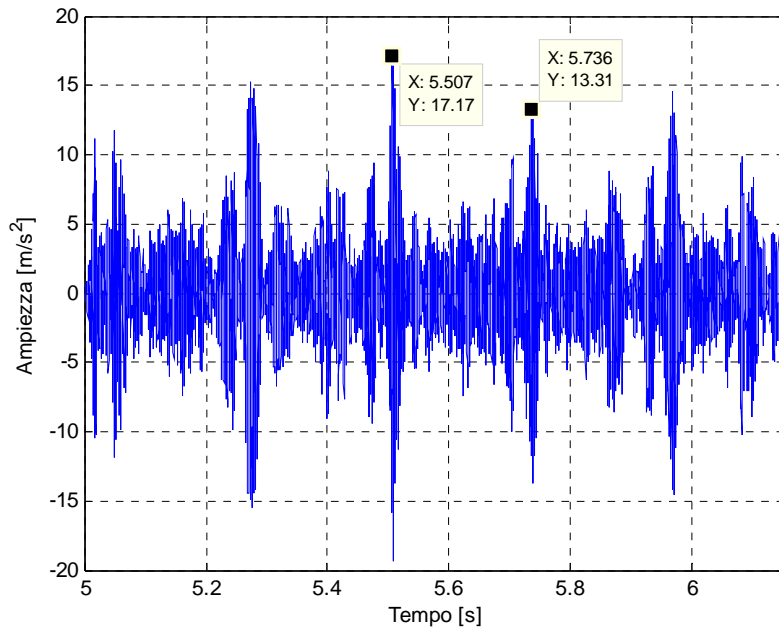


Figura 6.12: MED output del cuscinetto sano per la ricerca del difetto sulla pista interna per un'acquisizione a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

Per valutare la stabilità della analisi sul sistema meccanico, si analizza lo stesso segnale acquisito sul secondo cuscinetto privo di danneggiamenti. Come nel caso dell'analisi senza l'applicazione del carico, i due cuscinetti sani mostrano chiaramente che il banco prova e la procedura di diagnosi utilizzata sono stabili (vedi figura 6.12 e figura 6.14), poiché i risultati ottenuti sono ripetibili.

Nell'analisi del cuscinetto sano, imponendo la ricerca di un difetto sulla pista esterna, la MED (vedi figura 6.16) non identifica i picchi legati al difetto, dimostrando che il cuscinetto in esame è sano. I picchi visibili nel grafico, sono legati alla rotazione dell'albero, ma non sono così chiari come quelli presentati nella ricerca del difetto sulla pista interna.

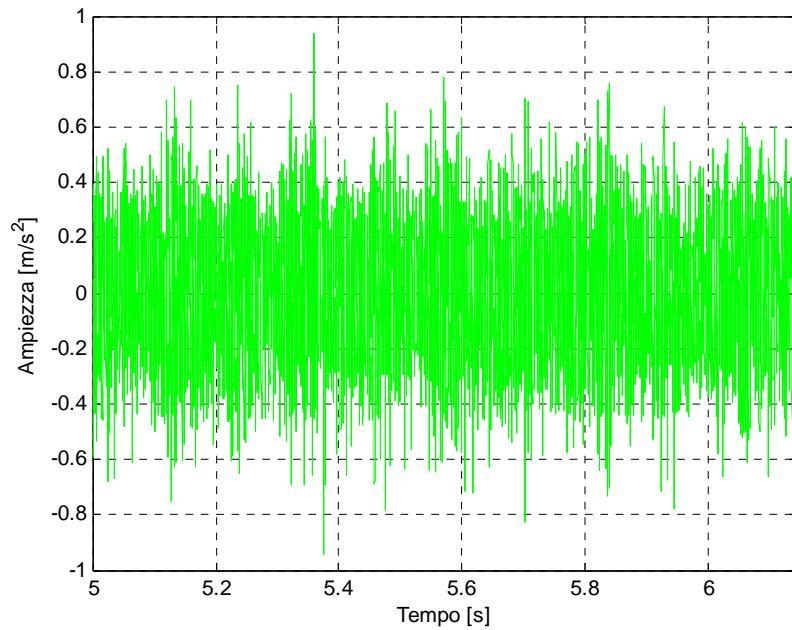


Figura 6.13: MED input del secondo cuscinetto sano per la ricerca del difetto sulla pista interna per un'acquisizione a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

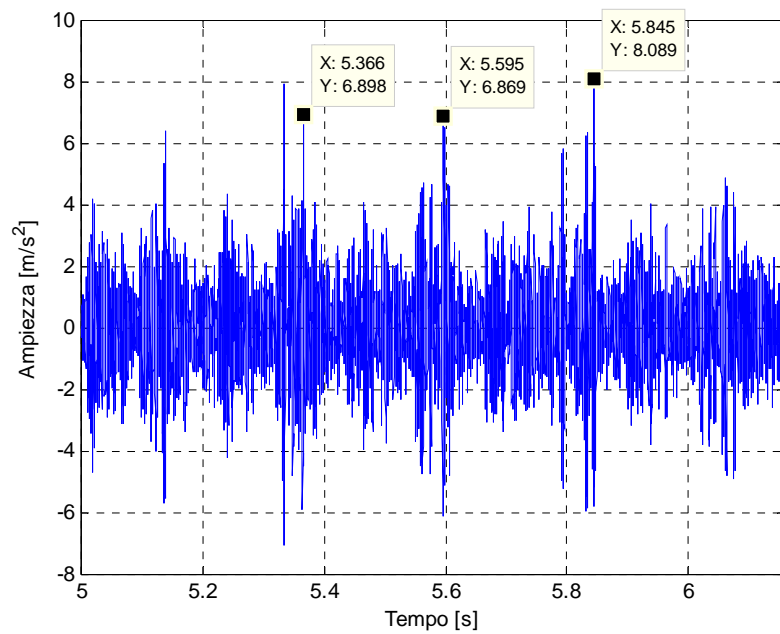


Figura 6.14: MED output del secondo cuscinetto sano per la ricerca del difetto sulla pista interna per un'acquisizione a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

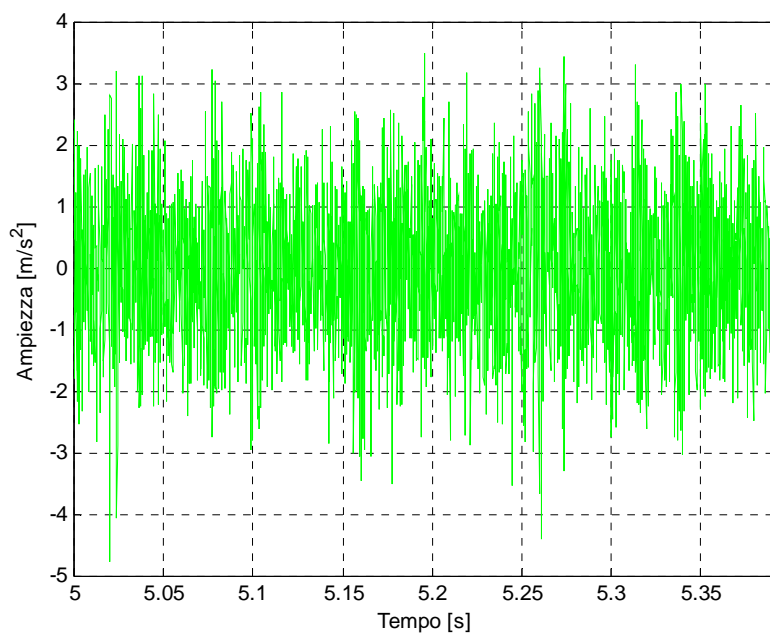


Figura 6.15: MED input del cuscinetto sano per la ricerca del difetto sulla pista esterna per un'acquisizione a 1500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

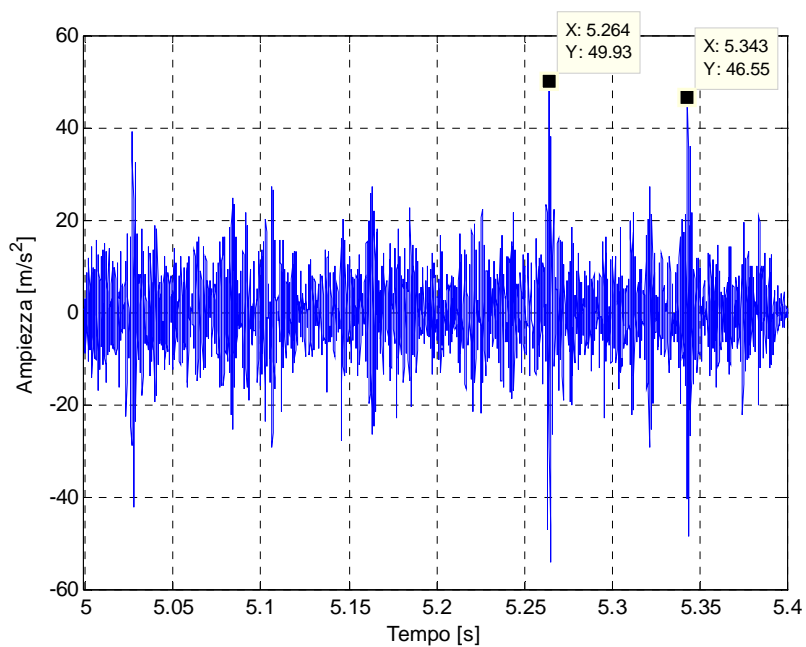


Figura 6.16: MED output del cuscinetto sano per la ricerca del difetto sulla pista esterna per un'acquisizione a 1500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

Imponendo un valore della lunghezza del filtro pari alla metà del periodo del difetto sul rullo, la MED (vedi figura 6.18) fornisce un output che non presenta picchi riconducibili alla presenza di un difetto sull'elemento volvente. Il cuscinetto risulta quindi privo della tipologia di intaglio sotto esame.

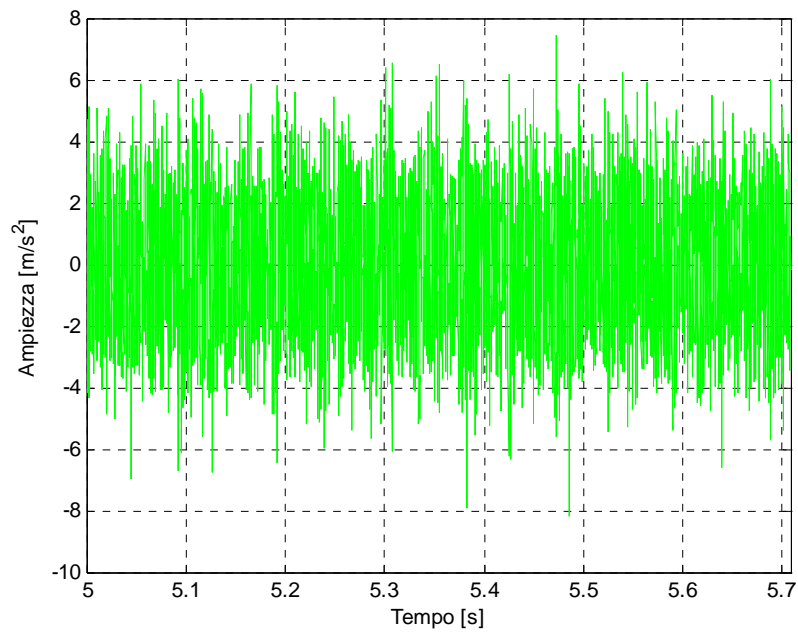


Figura 6.17: MED input del cuscinetto sano per la ricerca del difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

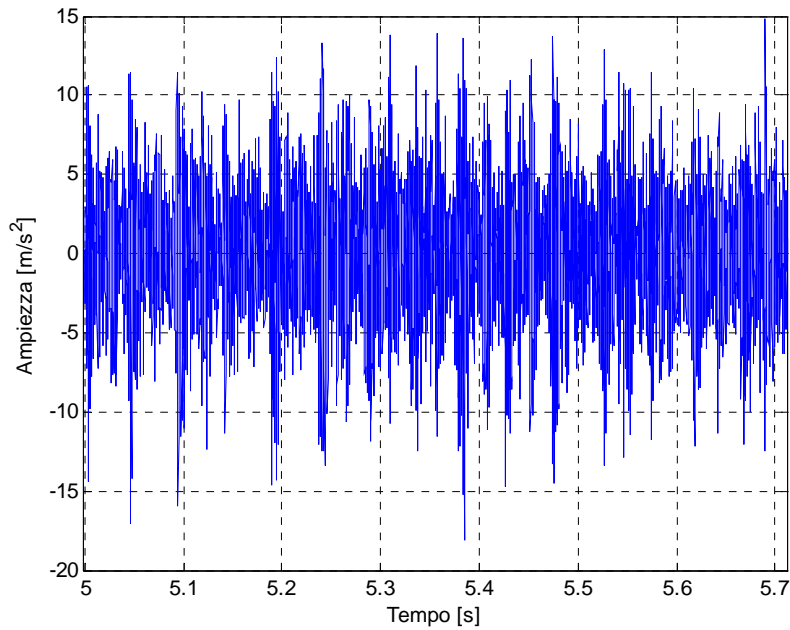


Figura 6.18: MED output del cuscinetto sano per la ricerca del difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

Per quanto riguarda la ricerca di un danneggiamento sulla gabbia, si sceglie a titolo esemplificativo il segnale dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm ed a 4 Nm. Osservando la figura 6.20, si nota chiaramente l'individuazione di 20 picchi distanziati di un intervallo temporale pari circa all'inverso della frequenza di rotazione $f_s = 21 \text{ Hz}$. La MED non identifica invece alcun picco correlabile alla presenza di un difetto sulla gabbia.

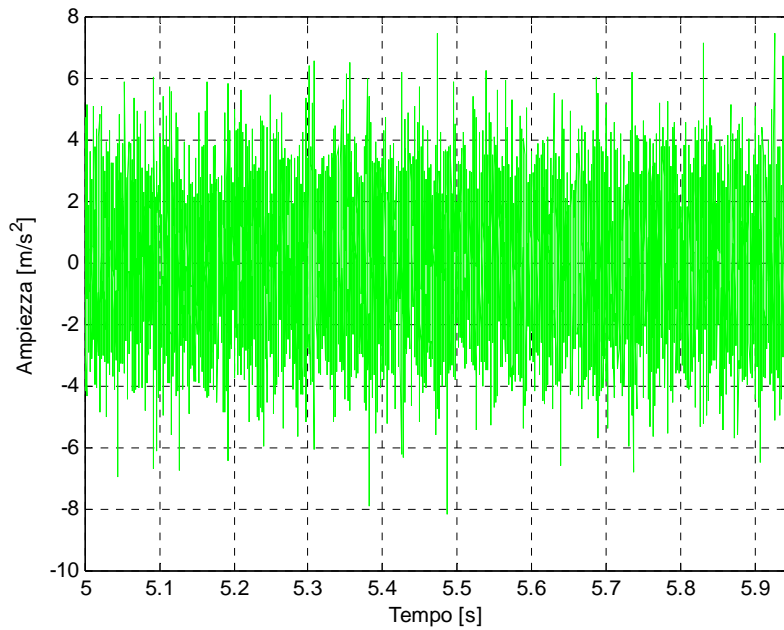


Figura 6.19: MED input del cuscinetto sano per la ricerca del difetto sulla gabbia per un'acquisizione a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

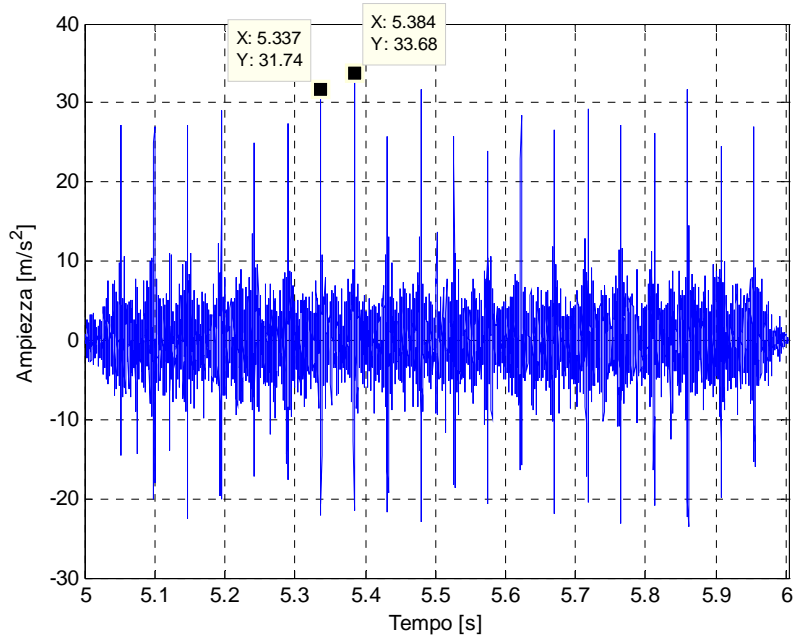


Figura 6.20: MED output del cuscinetto sano per la ricerca del difetto sulla gabbia per un'acquisizione a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

Come già anticipato, i grafici riportati e le considerazioni proposte verranno utilizzate come termine di confronto per i risultati ottenuti sui cuscinetti danneggiati, in modo da valutare l'efficacia diagnostica della MED.

6.2.3 Difetto sulla pista interna senza carico applicato

Per quanto riguarda l'individuazione del difetto sulla pista interna, si analizza innanzitutto il segnale relativo all'acquisizione effettuata ad una velocità del motore di 500 rpm ed ad una coppia dell'utilizzatore di 4 Nm, tramite il canale accelerometro verticale, utilizzando una porzione di segnale pari a 5 periodi di rotazione dell'albero. Osservando la parte di segnale in ingresso all'algoritmo della MED (vedi figura 6.21), si riconoscono alcuni picchi che sono legati alla rotazione dell'albero, distanziati l'uno dall'altro di un intervallo temporale pari all'inverso della frequenza di rotazione ($f_s = 4.22 \text{ Hz}$). Tuttavia il segnale risulta affetto da una notevole quantità di rumore e la sua rappresentazione risulta difficilmente leggibile. Lo spettro ottenuto da tale segnale, riportato in figura 6.22, mostra soltanto alcune componenti legate alla rotazione dell'albero, ma non è in grado di evidenziare quelle correlate alla presenza del difetto.

L'analisi del grafico rappresentante il segnale che si ottiene dall'applicazione dell'algoritmo MED (vedi figura 6.23), mostra dei picchi legati al difetto sulla pista interna che risultano notevolmente amplificati rispetto all'input, distanziati tra loro di un intervallo temporale pari circa all'inverso della frequenza del difetto sulla pista interna ($T_{inner} = 0.0271 \text{ s}$). I picchi legati a fenomeni casuali, come il rumore, o legati ad altre componenti del segnale diverse da quelle del difetto e della rotazione dell'albero, appaiono invece notevolmente ridotti. Il diagramma, inoltre, mette in evidenza soltanto un numero limitato di picchi relativi al difetto rispetto ai 7 o 8 contatti tra l'intaglio e gli elementi volventi previsti dalla teoria (vedi capitolo 4.2). Gli impulsi visibili sono legati agli urti che avvengono in corrispondenza della zona di carico, esistente conseguentemente al precarico fornito dalla molla. Nello spettro del segnale di output della MED (vedi figura 6.24 e figura 6.25), le varie frequenze risultano difficilmente identificabili, a causa della presenza di un numero elevato di componenti. Si possono osservare delle bande centrate a frequenze maggiori di 200 Hz, in cui si distinguono le componenti distanziate di un valore pari a $BPFI = 30 \text{ Hz}$, che corrisponde circa alla frequenza caratteristica del difetto.

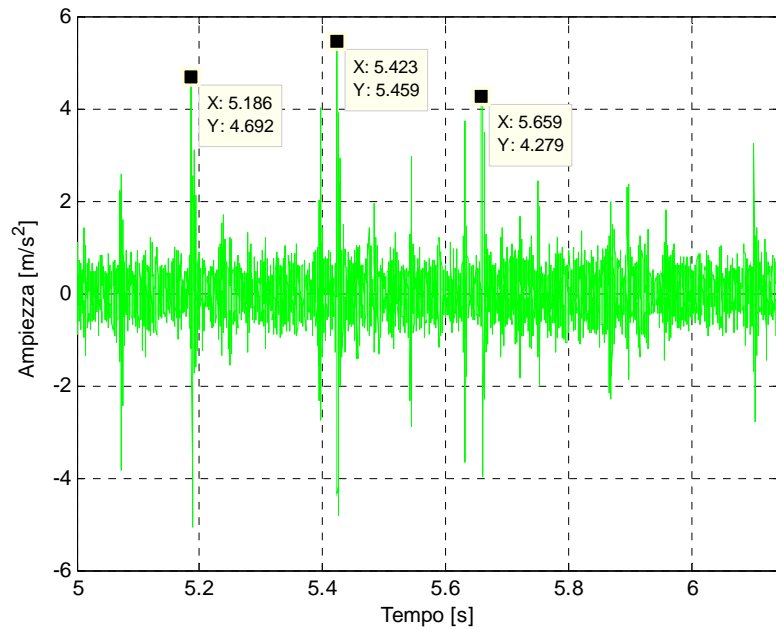


Figura 6.21: MED input del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 500 rpm e 4 Nm.

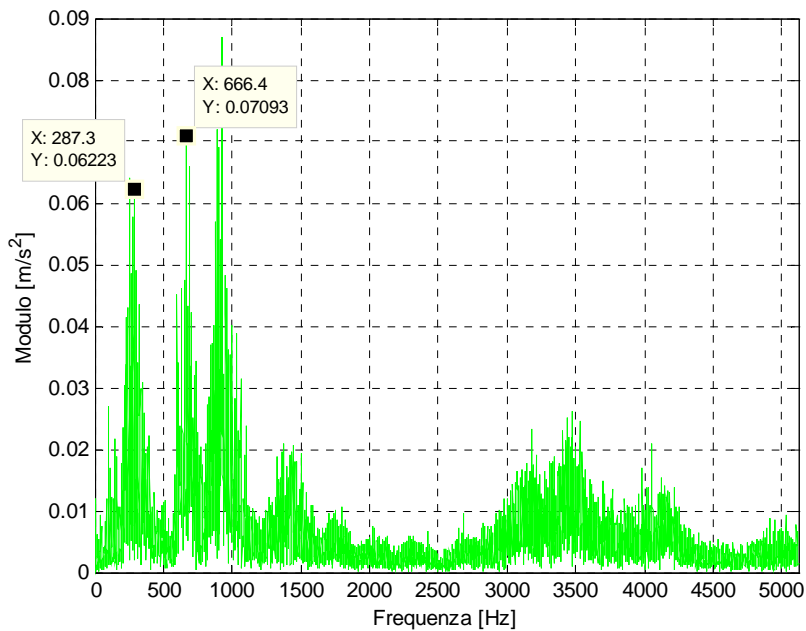


Figura 6.22: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 500 rpm e 4 Nm.

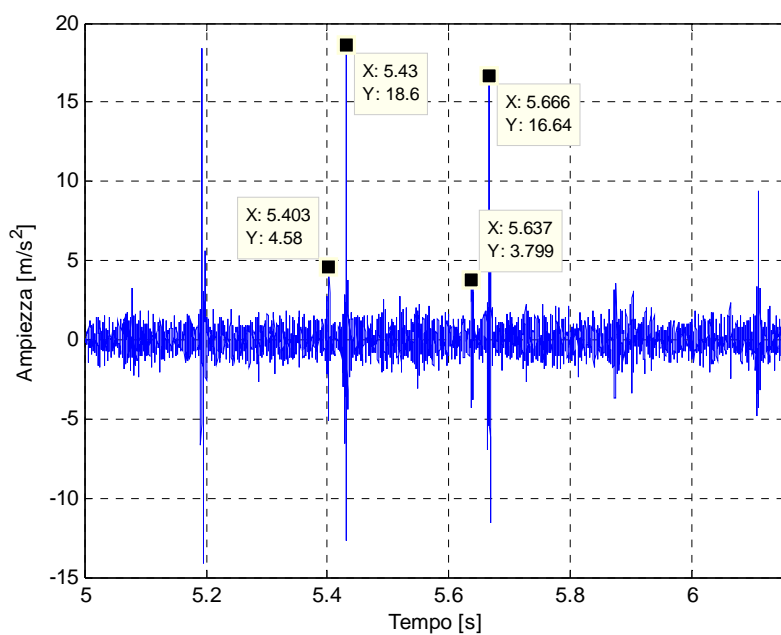


Figura 6.23: MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 500 rpm e 4 Nm.

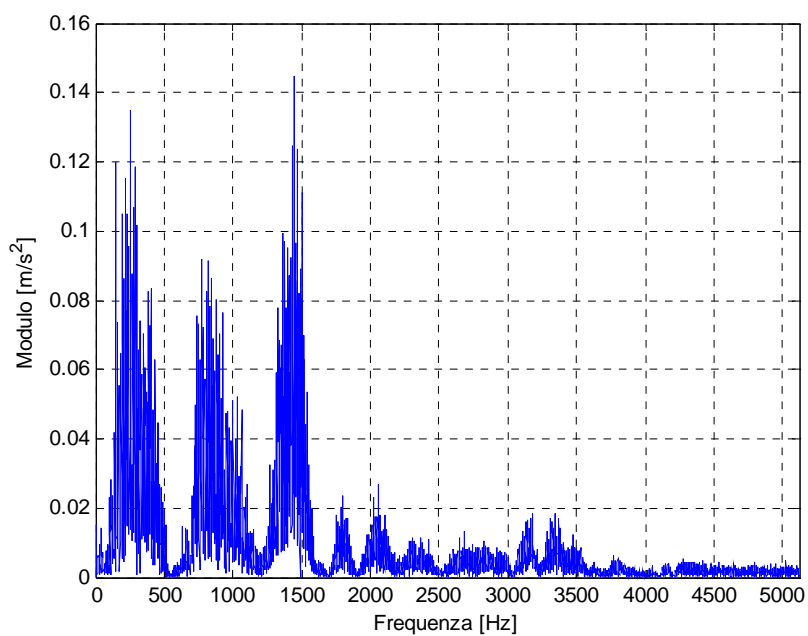


Figura 6.24: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 500 rpm e 4 Nm.

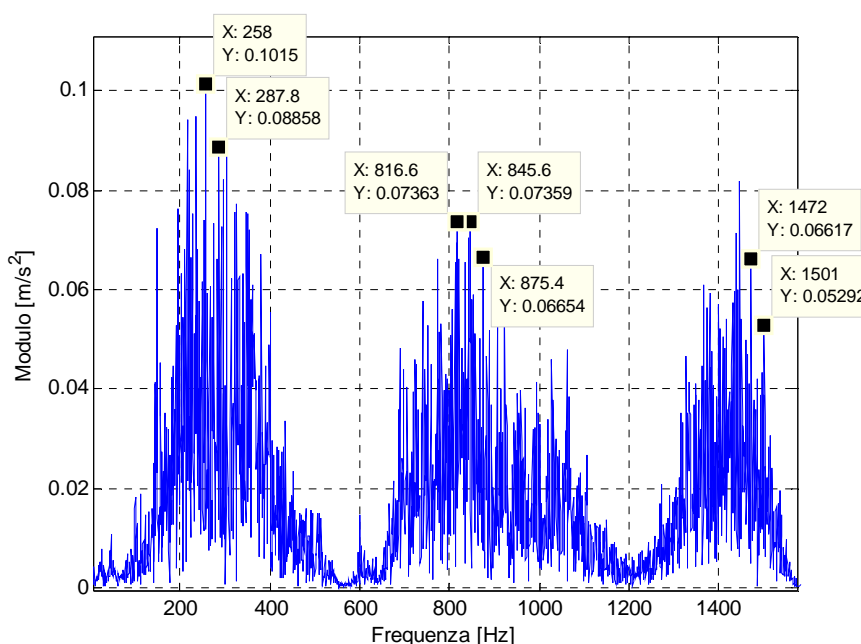


Figura 6.25: dettaglio del modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 500 rpm e 4 Nm.

Si analizza in seguito il segnale acquisito ad una velocità di 1500 rpm ed ad una coppia di 4 Nm utilizzando l'accelerometro orizzontale, considerando una lunghezza pari a 15 periodi di rotazione dell'albero.

Osservando il diagramma del segnale passato alla MED (vedi figura 6.26), si nota che vi è la presenza di una notevole quantità di componenti che tendono a nascondere quelle di interesse. In particolare, mentre i picchi legati alla rotazione sono riconoscibili, sebbene in modo poco chiaro, quelli legati alla presenza del difetto non sono messi in evidenza. Discorso analogo può essere condotto passando al dominio della frequenza (vedi figura 6.27), in cui appaiono in modo chiaro delle componenti distanziate tra loro di un valore circa pari a 25 Hz, che costituisce la seconda armonica ($2x$) della frequenza di rotazione dell'albero. Le componenti legate al difetto non sono invece identificabili.

Il grafico di output dalla tecnica, riportato in figura 6.28, presenta dei picchi più ampi distanziati dell'inverso della frequenza di rotazione dell'albero e dei picchi correlati alla presenza del danneggiamento sulla pista interna, distanziati dell'inverso della frequenza caratteristica del difetto stesso ($T_{inner} = 0.01$ s). Analizzando lo spettro di questo segnale (vedi figura 6.29), si osservano delle bande centrate alle alte frequenze, le cui componenti principali appaiono distanziate di un valore pari a $BPFI = 99$ Hz, ad indicazione della presenza del

danneggiamento presente sulla pista interna del cuscinetto test. Inoltre si notano ulteriori componenti ad energia inferiore, distanziate da quelle connesse alla presenza del difetto di un valore pari circa alla frequenza di rotazione dell'albero $f_s = 12.5 \text{ Hz}$ (vedi figura 6.30).

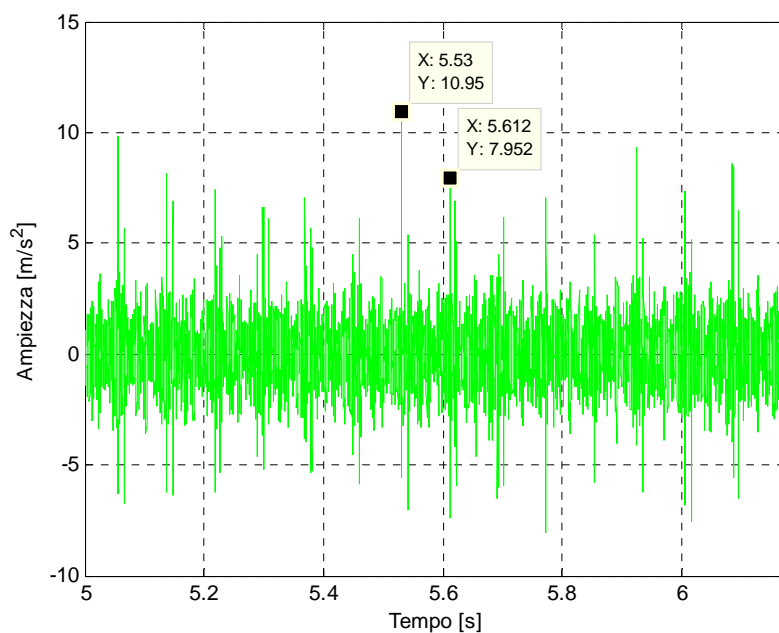


Figura 6.26: MED input del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1500 rpm e 4 Nm.

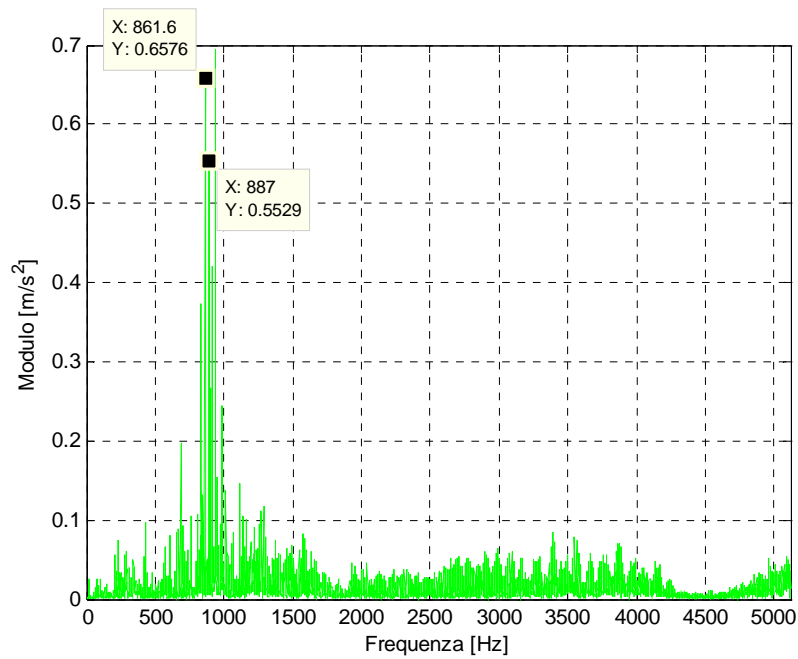


Figura 6.27: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1500 rpm e 4 Nm.

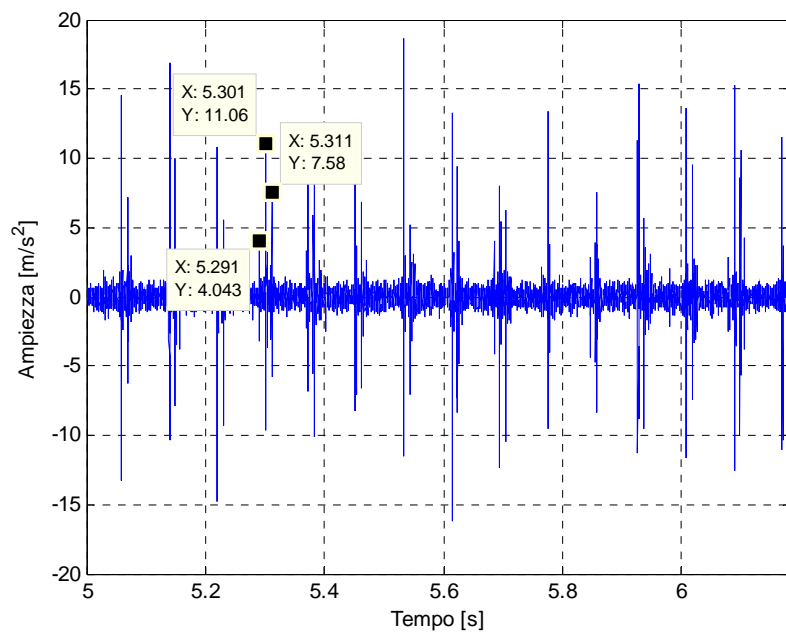


Figura 6.28: MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1500 rpm e 4 Nm.

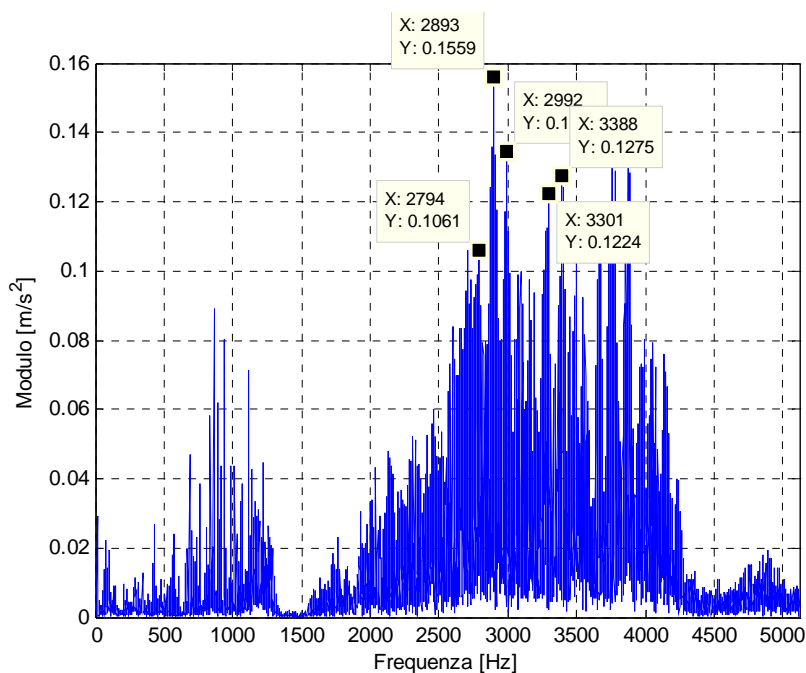


Figura 6.29: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1500 rpm e 4 Nm.

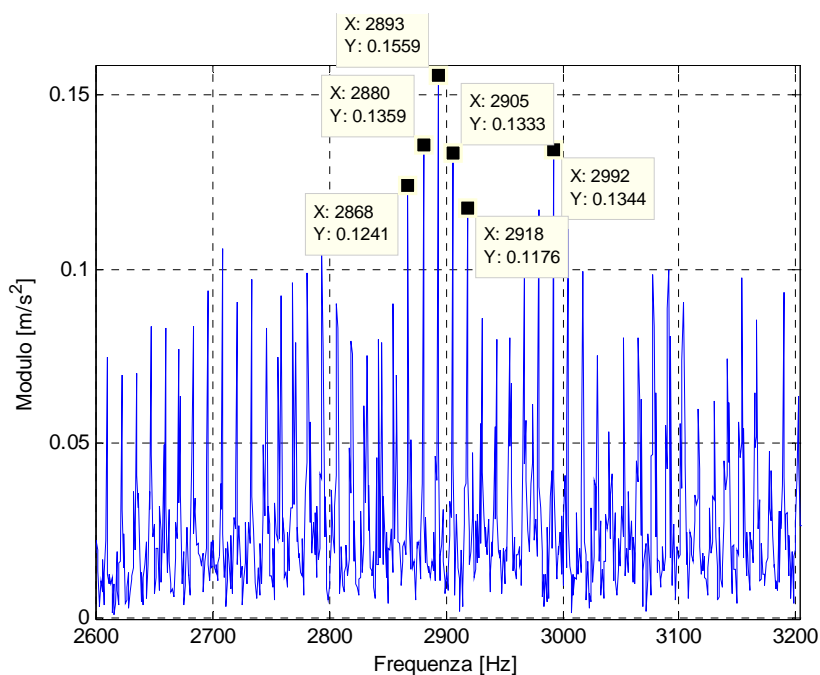


Figura 6.30: dettaglio del modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1500 rpm e 4 Nm.

Si ripete nuovamente l'analisi per un segnale di lunghezza pari a 5 periodi di rotazione dell'albero, acquisito dall'accelerometro verticale alla velocità di rotazione di 2500 rpm e con coppia pari a 4 Nm.

Analizzando il grafico della porzione di segnale prima dell'applicazione della tecnica (vedi figura 6.31), si nota che sono facilmente identificabili dei picchi legati alla rotazione dell'albero su cui è calettato il cuscinetto test, mentre quelli legati alla presenza del difetto sono nascosti dalla presenza di altre componenti nel segnale. Queste considerazioni possono essere estese anche al dominio delle frequenze (vedi figura 6.32), in cui le componenti più evidenti risultano quelle connesse alla rotazione dell'albero, mentre risultano assenti quelle legate alla presenza del difetto.

Il grafico di output della tecnica (vedi figura 6.33) mette in risalto, oltre ai picchi relativi alla rotazione dell'albero, anche quelli legati alla presenza del difetto sulla pista interna, che risultano distanziati di un intervallo temporale pari all'inverso della frequenza caratteristica del difetto ($T_{inner} = 0.006$ s). Lo spettro del segnale di output, riportato in figura 6.34, mostra una banda, collocata alle alte frequenze, in cui le varie componenti principali sono poste ad una distanza pari alla frequenza caratteristica del difetto sulla pista interna ($BPFI = 165$ Hz). Ciò contribuisce a rafforzare i risultati ottenuti nel dominio del tempo, consentendo l'identificazione del danneggiamento.

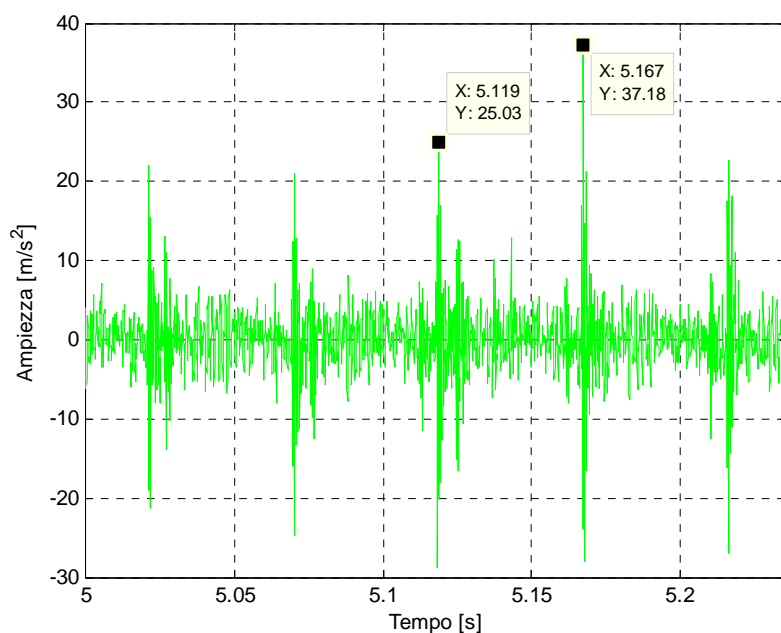


Figura 6.31: MED input del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 2500 rpm e 4 Nm.

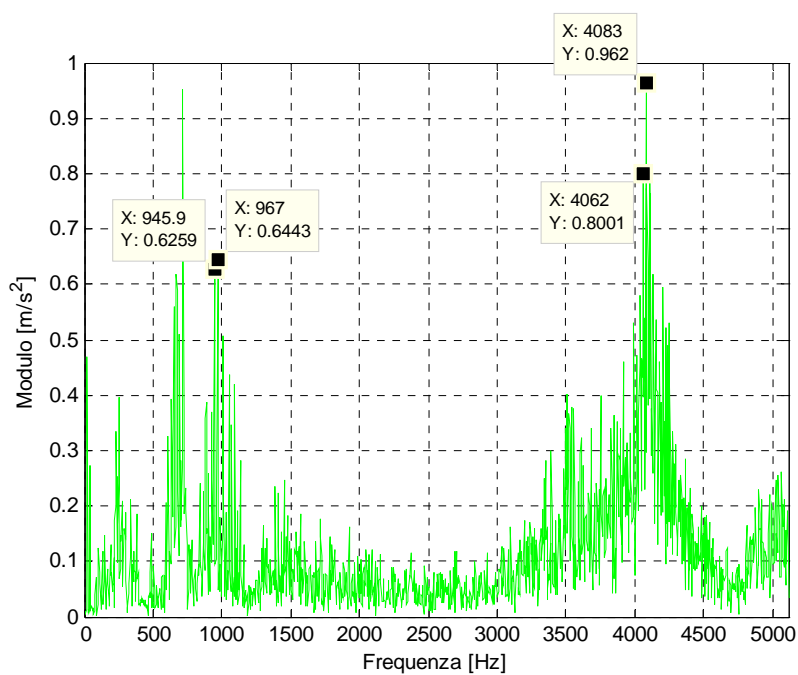


Figura 6.32: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 2500 rpm e 4 Nm.

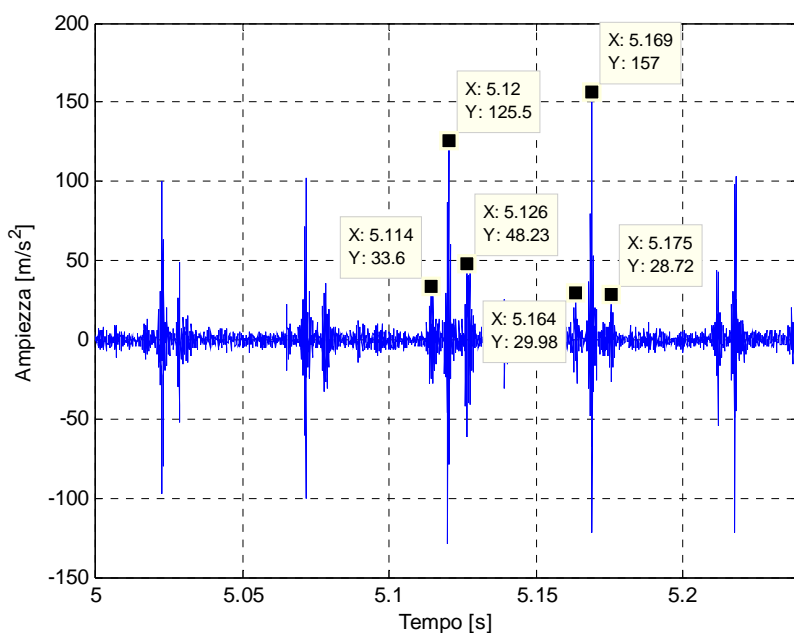


Figura 6.33: MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 2500 rpm e 4 Nm.

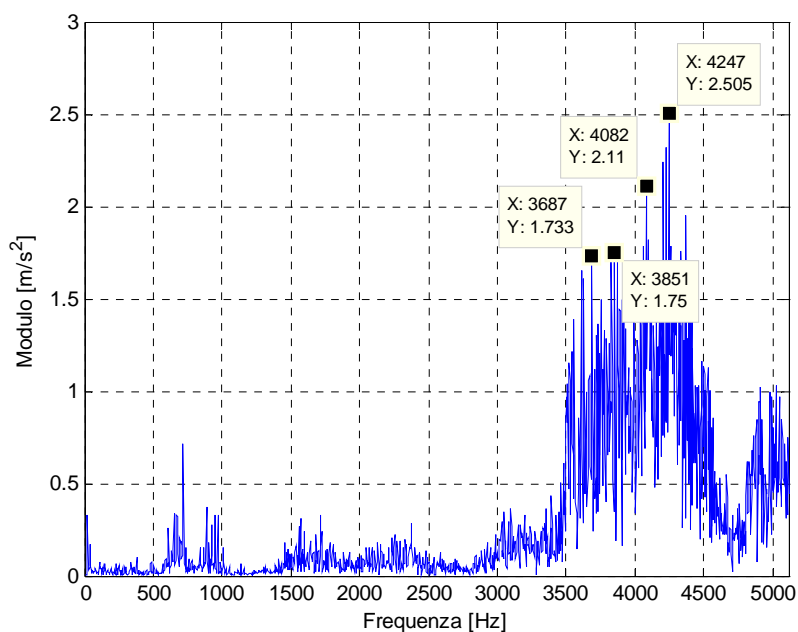


Figura 6.34: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 2500 rpm e 4 Nm.

6.2.4 Difetto sulla pista interna con carico applicato

Si effettua nuovamente l'analisi sui segnali acquisiti applicando un carico al cuscinetto test.

Innanzitutto si considera il segnale dell'accelerometro orizzontale di lunghezza pari a 10 periodi di rotazione dell'albero, relativo all'acquisizione effettuata a 500 rpm ed a 4 Nm.

Osservando il segnale di input, riportato in figura 6.35, si nota che sono visibili alcuni picchi relativi alla rotazione dell'albero ed alla presenza del difetto, che però risultano poco chiari a causa della presenza di altre componenti. Lo spettro di tale segnale (vedi figura 6.36) presenta alcune bande di ampiezza molto elevata tra i 200 ed i 1200 Hz, in cui però non è possibile riconoscere delle componenti riconducibili alla presenza del danneggiamento sulla pista interna del cuscinetto.

Il grafico di output della tecnica, rappresentato in figura 6.37, mette maggiormente in risalto le componenti relative al difetto realizzato sulla pista interna, che si evidenzia sottoforma di picchi equispaziati di un intervallo pari all'inverso della frequenza caratteristica del danneggiamento stesso, ossia pari a $T_{inner} = 0.03 s$. Rispetto all'analisi realizzata sulla stessa acquisizione per il caso in cui non è applicata la forza sul cuscinetto test, si osserva che l'applicazione della forza contribuisce a migliorare l'efficacia della tecnica nell'amplificare quelle componenti legate al danneggiamento. Nello spettro del segnale in uscita dalla MED (vedi figura 6.38 e figura 6.39), nonostante siano rintracciabili molte componenti, è possibile riconoscere frequenze equispaziate di un valore pari alla $BPFI = 33 Hz$ e che quindi sono da imputare alla presenza del danneggiamento sulla pista interna.

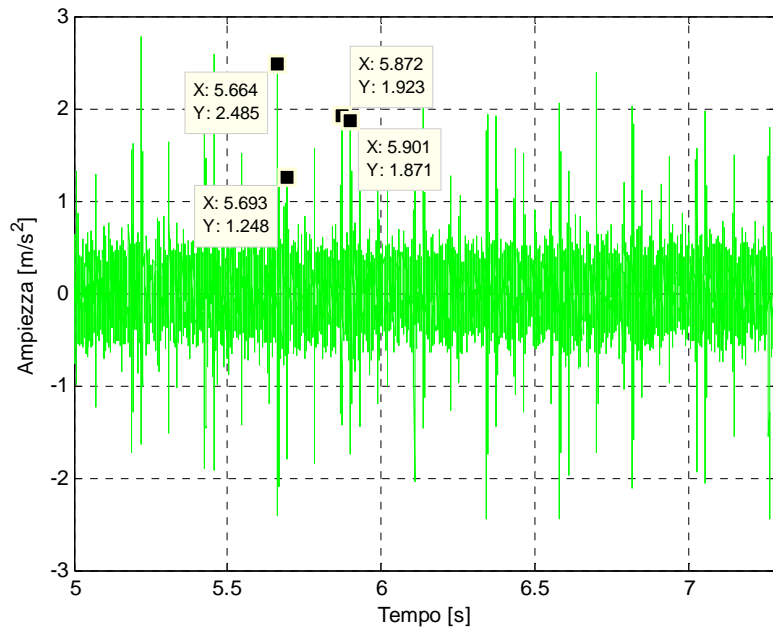


Figura 6.35: MED input del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

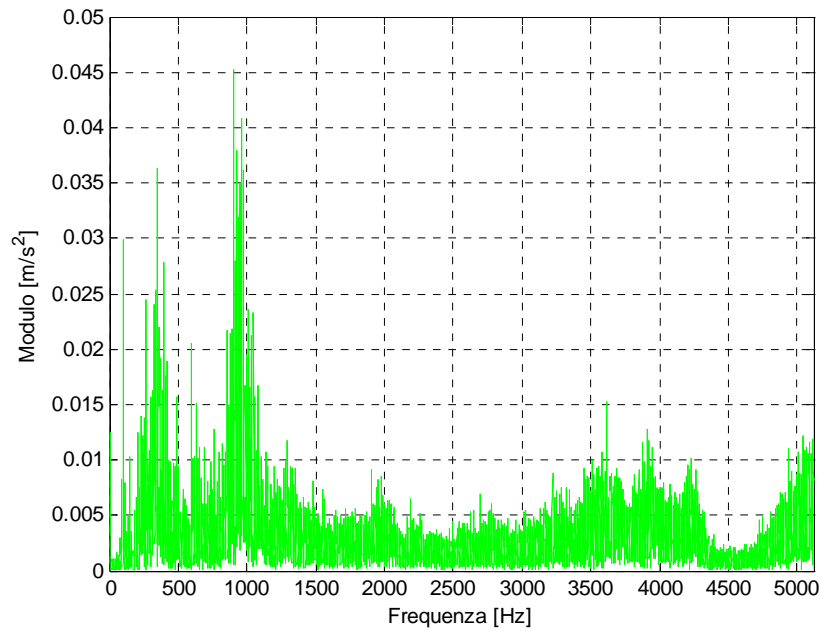


Figura 6.36: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

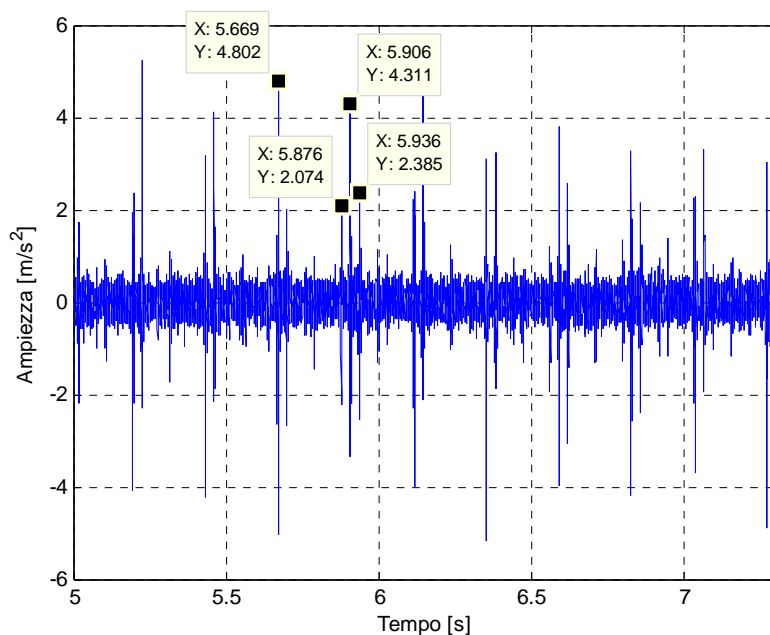


Figura 6.37: MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

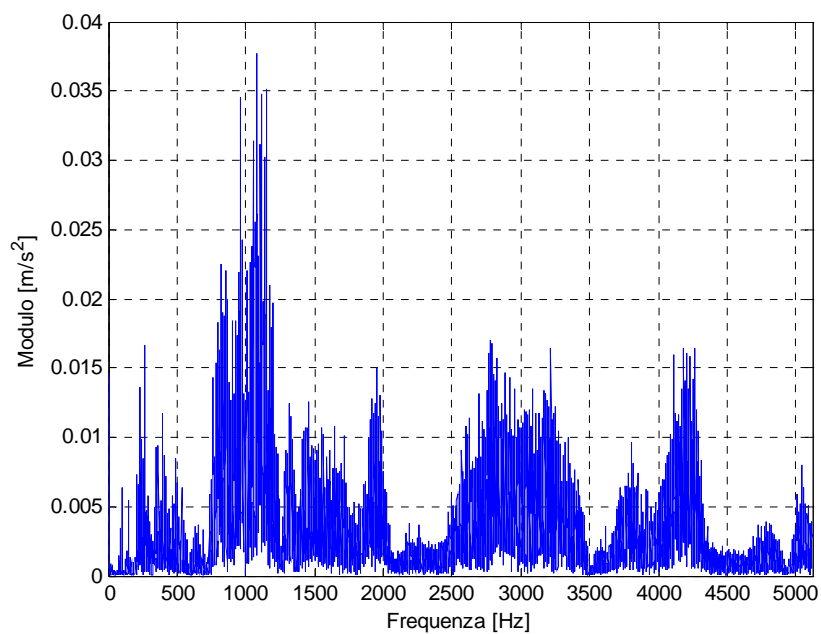


Figura 6.38: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

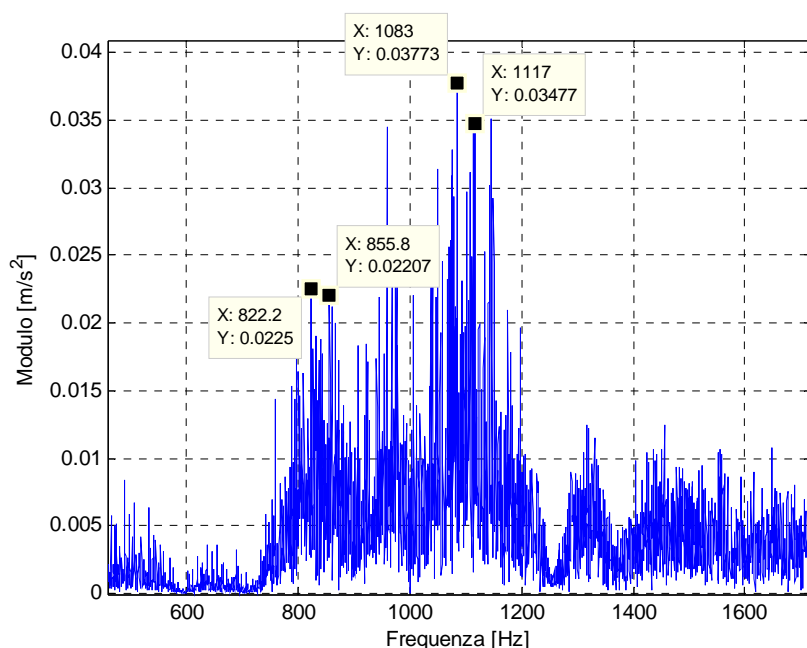


Figura 6.39: dettaglio del modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

Si applica nuovamente la MED ad un segnale di lunghezza pari a 15 periodi di rotazione dell'albero, acquisito a 1500 rpm ed a 4 Nm tramite l'accelerometro verticale.

Nel grafico del segnale di input della tecnica, riportato in figura 6.40, sono riconoscibili dei picchi correlati alla rotazione dell'albero ed alla presenza del difetto, che tuttavia non si presentano in modo chiaro a causa della presenza di una notevole quantità di altre componenti. Lo spettro di questo segnale presenta delle componenti di ampiezza molto elevata distanziate tra loro di un valore pari a circa il doppio della frequenza di rotazione dell'albero, quindi armoniche di rotazione dell'albero (vedi figura 6.41), ma non mostra componenti relative al danneggiamento presente sulla pista interna.

L'applicazione della tecnica consente di rendere più chiare ed evidenti, oltre alle componenti poste ad una distanza temporale pari all'inverso della frequenza di rotazione $T_s = 0.071$ s, anche quelle connesse alla presenza del danneggiamento, che si presentano come picchi distanziati di un intervallo temporale $T_{inner} = 0.01$ s, pari all'inverso della frequenza caratteristica del difetto stesso (vedi figura 6.42). Passando all'analisi di questo segnale nel dominio delle frequenze, si ottiene lo spettro riportato in figura 6.43 e figura

6.44, che mostra in modo chiaro le componenti legate alla presenza del difetto sulla pista interna, equispaziate di una frequenza pari a $BPFI = 99 \text{ Hz}$.

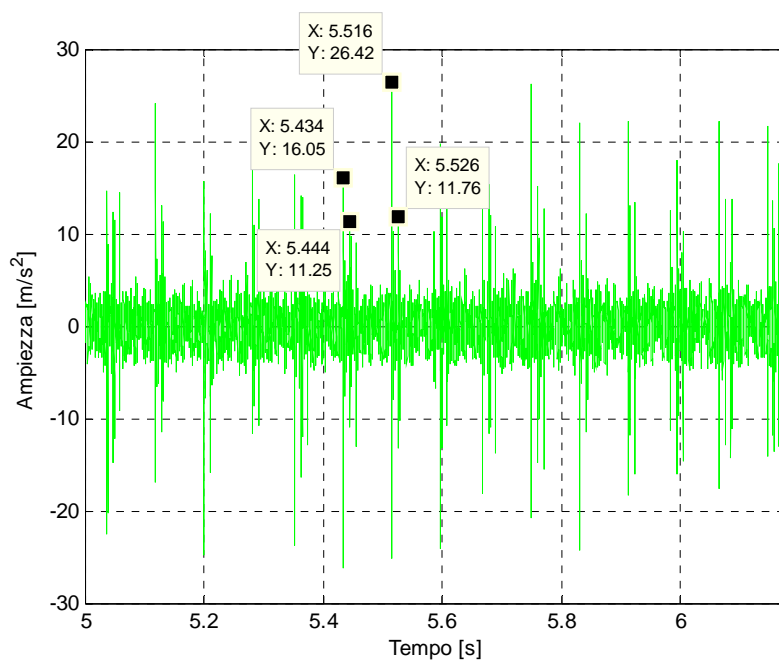


Figura 6.40: MED input del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

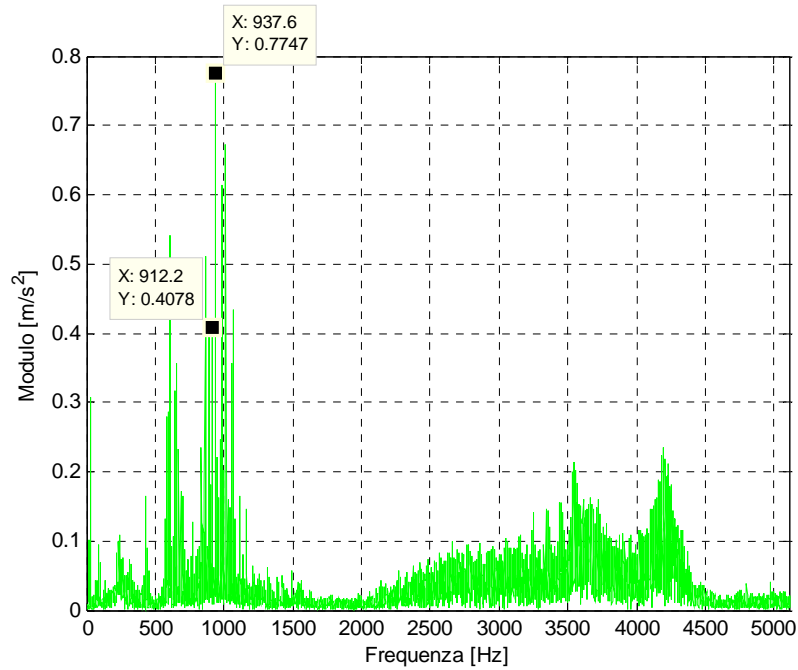


Figura 6.41: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

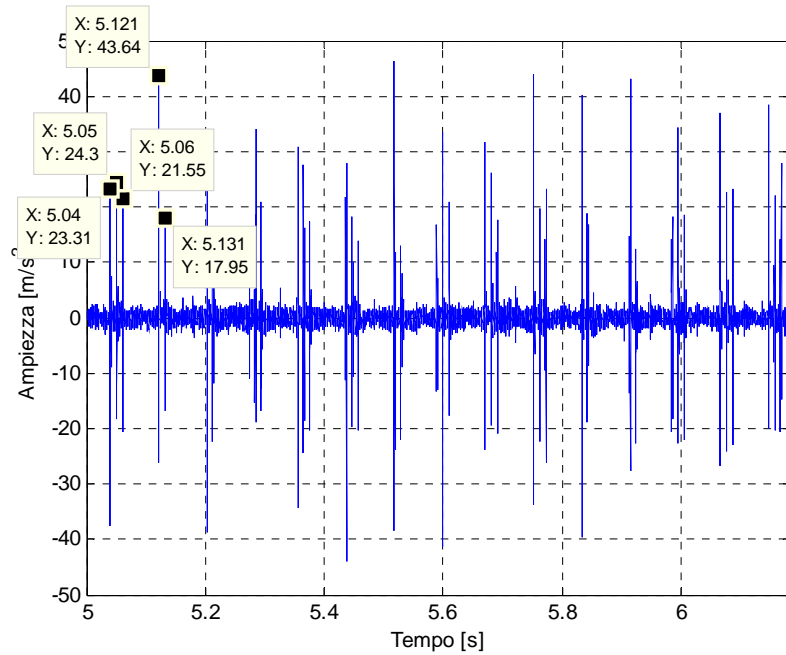


Figura 6.42: MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

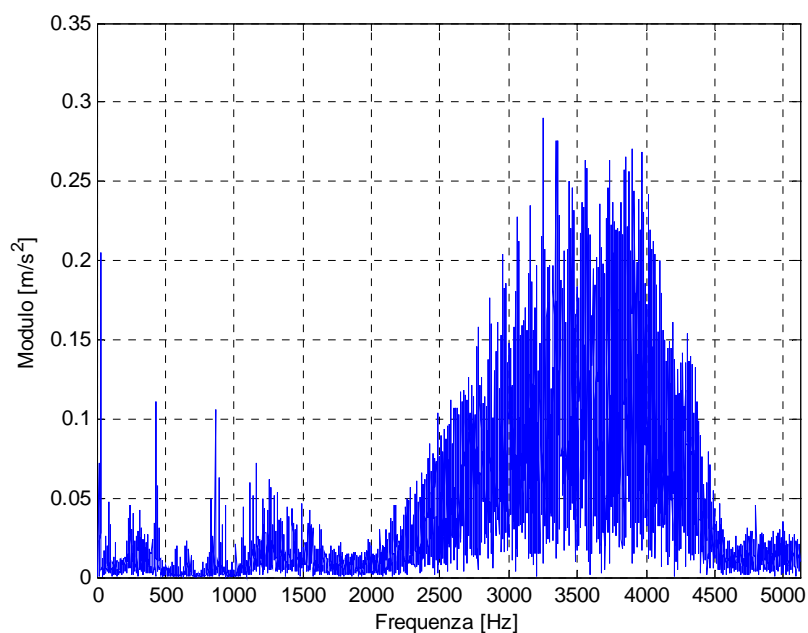


Figura 6.43: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

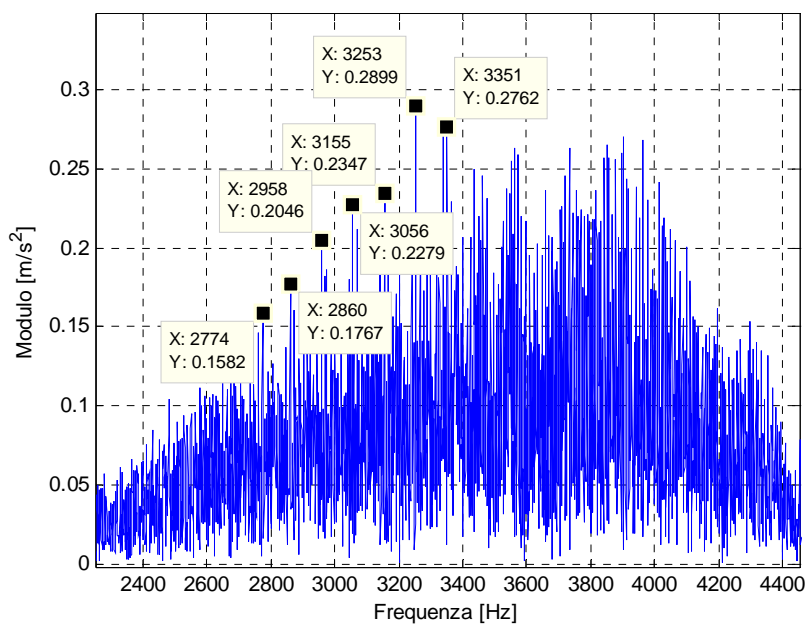


Figura 6.44: dettaglio del modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

Si ripete l'analisi sul segnale di lunghezza pari a 10 periodi di rotazione dell'albero, acquisito alla velocità di rotazione di 2500 rpm ed a 4 Nm di coppia, tramite l'accelerometro orizzontale.

Nel grafico rappresentante il segnale di input alla tecnica (vedi figura 6.45) sono riconoscibili sia dei picchi legati alla rotazione dell'albero sia dei picchi legati al difetto, anche se non sono molto evidenti a causa delle altre componenti presenti. Lo spettro di tale segnale, oltre a mostrare le componenti del segnale correlate alla rotazione dell'albero, presenta anche delle bande alle alte frequenze, di ampiezza minore rispetto alle prime, in cui è possibile riconoscere anche delle componenti equispaziate di un valore pari alla frequenza caratteristica del difetto $BPFI = 163 \text{ Hz}$ (vedi figura 6.46).

Il grafico di output, riportato in figura 6.47, mette in risalto, oltre ai picchi legati alla rotazione dell'albero, anche quelli connessi alla presenza del difetto sulla pista interna, che risultano distanziati di un intervallo temporale pari all'inverso della frequenza caratteristica del difetto ($T_{inner} = 0.006 \text{ s}$), ad indicazione della sua presenza. Lo spettro di tale segnale (vedi figura 6.48) contribuisce ad evidenziare la presenza del danneggiamento presentando un'ampia banda centrata attorno ai 3500 Hz, le cui componenti sono distanziate tra loro di un valore pari alla frequenza caratteristica $BPFI$. Tali componenti dominano lo spettro, a differenza di quello che si poteva notare nello spettro del segnale in ingresso, dove presentavano un'ampiezza non significativa.

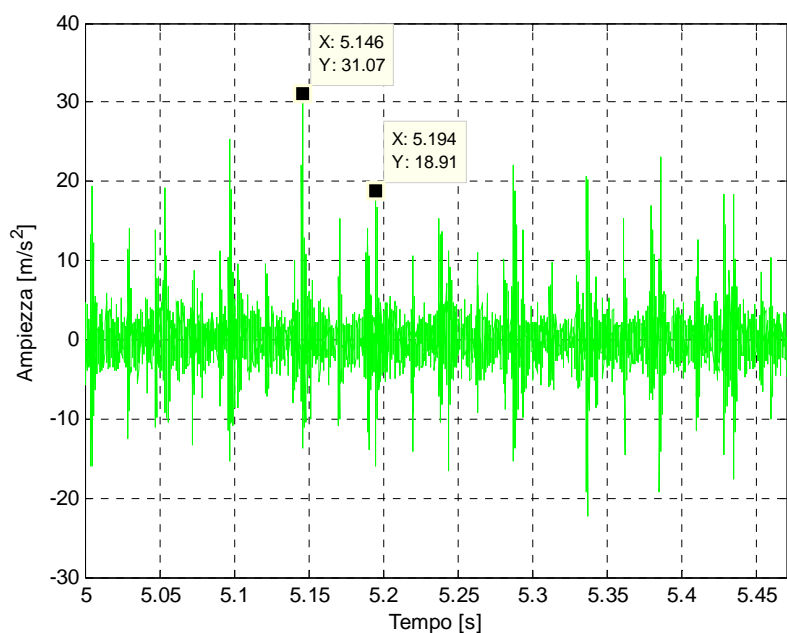


Figura 6.45: MED input del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

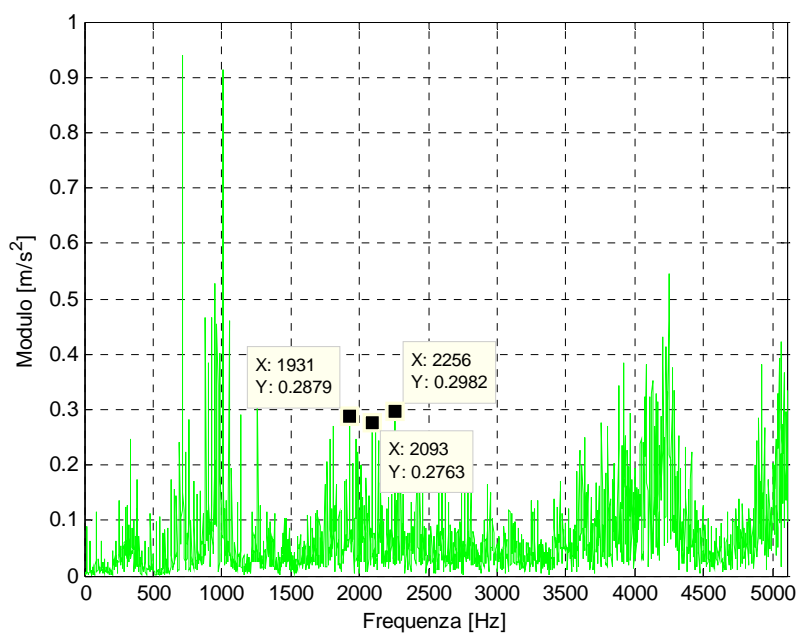


Figura 6.46: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

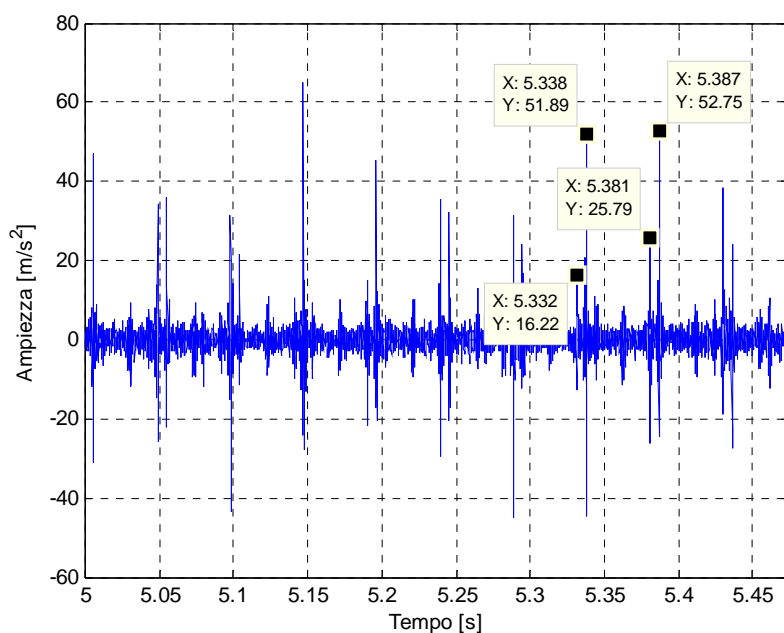


Figura 6.47: MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

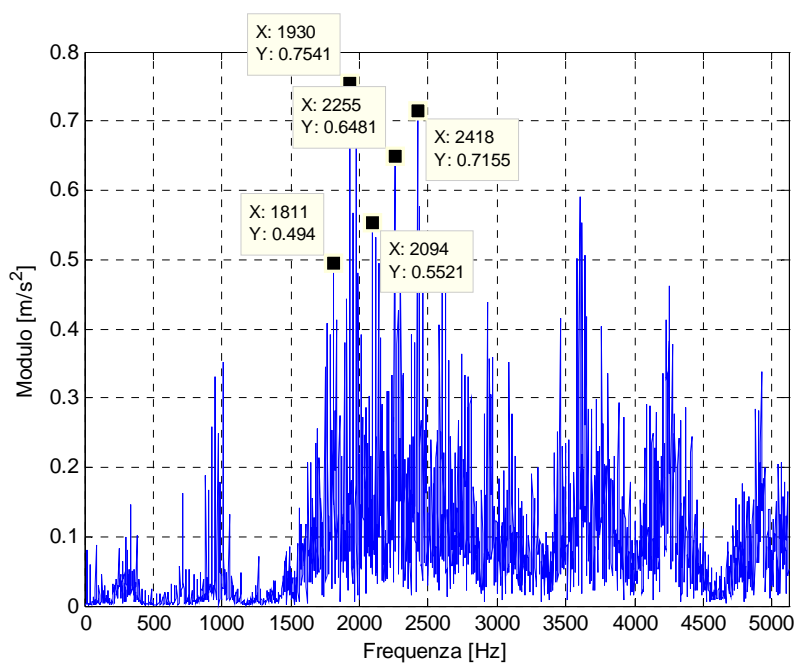


Figura 6.48: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato

6.2.5 Difetto sulla pista interna senza carico applicato e con valore di coppia maggiore

Si applica l'algoritmo MED ad un segnale relativo ad un'acquisizione effettuata a valore di coppia maggiore, per valutare l'influenza di questo parametro sull'efficienza della tecnica. In particolare si analizza il segnale di lunghezza pari a 15 periodi di rotazione dell'albero, acquisito dall'accelerometro verticale a 1500 rpm ed a 6 Nm, in condizioni di applicazione del carico al cuscinetto test. Anche per un valore diverso della coppia applicata, si possono verificare gli stessi risultati riportati nel paragrafo precedente. In particolare il grafico del segnale di output dall'algoritmo MED, riporto in figura 6.51 ed in figura 6.52, mostra dei picchi connessi alla presenza del difetto sulla pista interna, che appaiono distanziati di un intervallo temporale pari a $T_{inner} = 0.001$ s, che corrisponde all'inverso della frequenza caratteristica del difetto, ad indicazione della presenza del danneggiamento sul cuscinetto in esame. Anche lo spettro di questo segnale permette di riconoscere la presenza del difetto in esame, in quanto presenta una banda centrata alle alte frequenze in cui è possibile riconoscere delle componenti equispaziate di un valore pari alla frequenza caratteristica $BPFI = 98$ Hz (vedi figura 6.53 e figura 6.54).

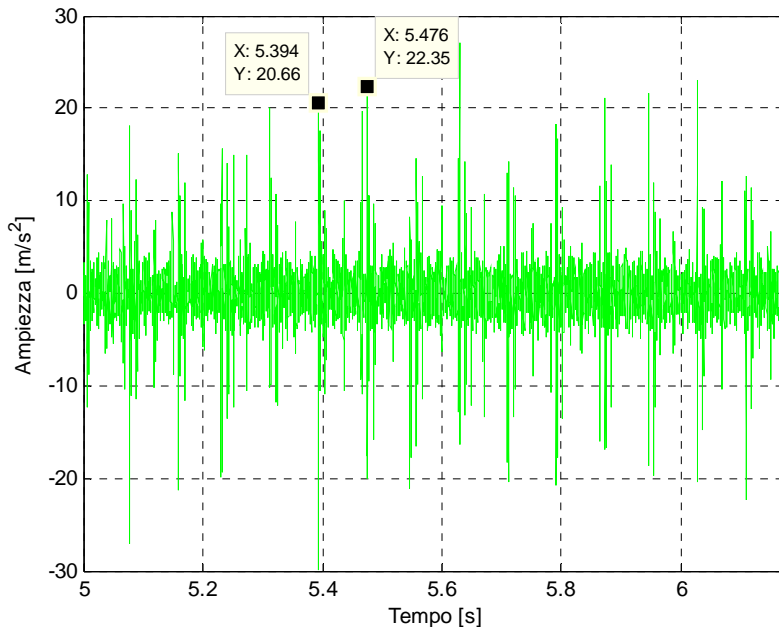


Figura 6.49: MED input del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 6 Nm con carico applicato.

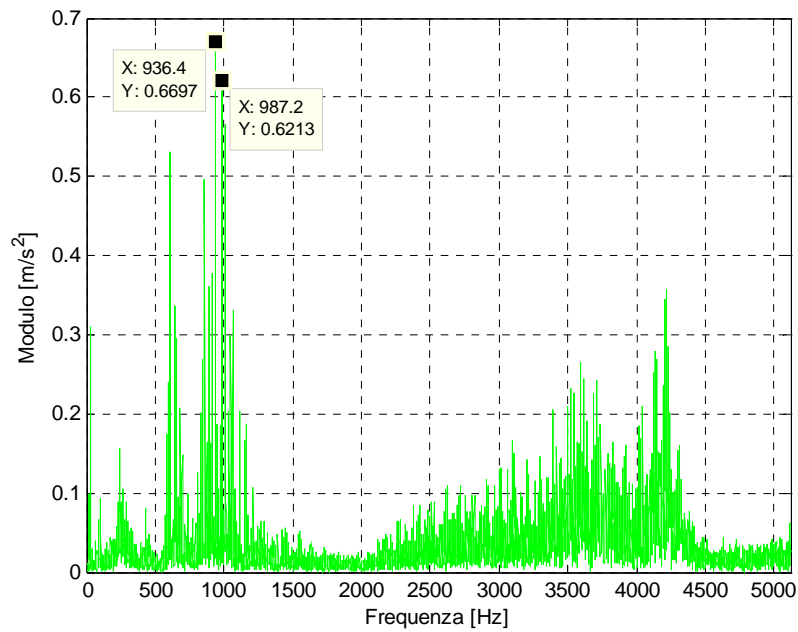


Figura 6.50: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 6 Nm con carico applicato.

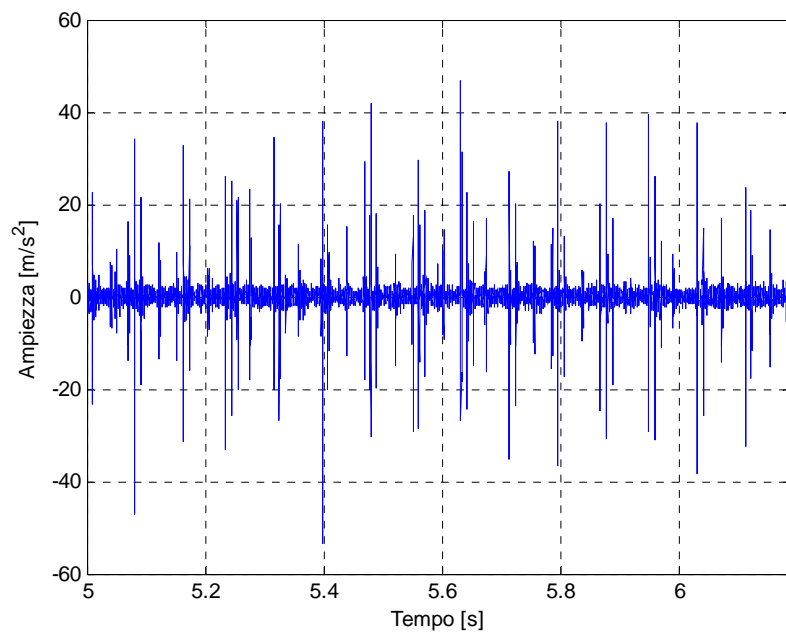


Figura 6.51: MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 6 Nm con carico applicato.

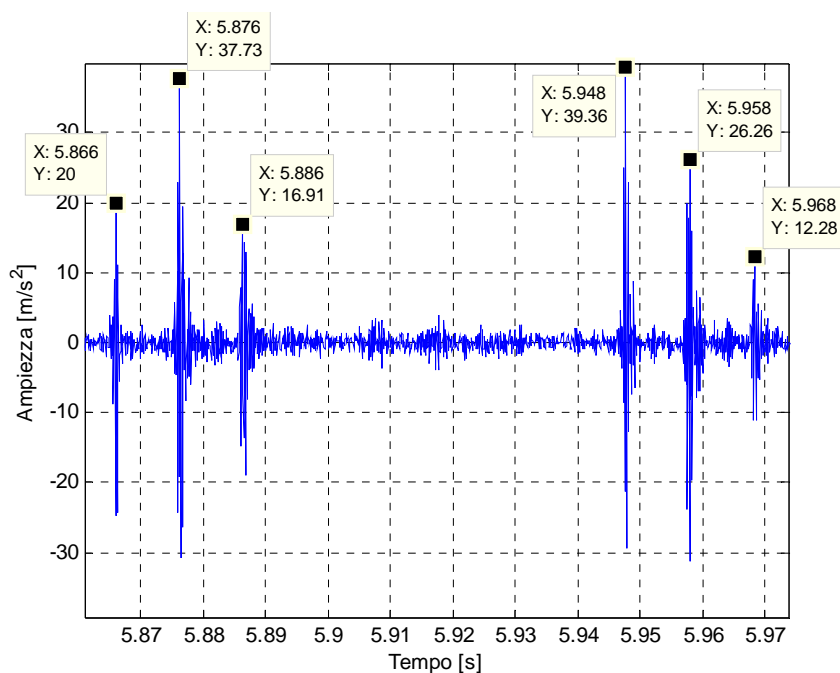


Figura 6.52: dettaglio del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 6 Nm con carico applicato.

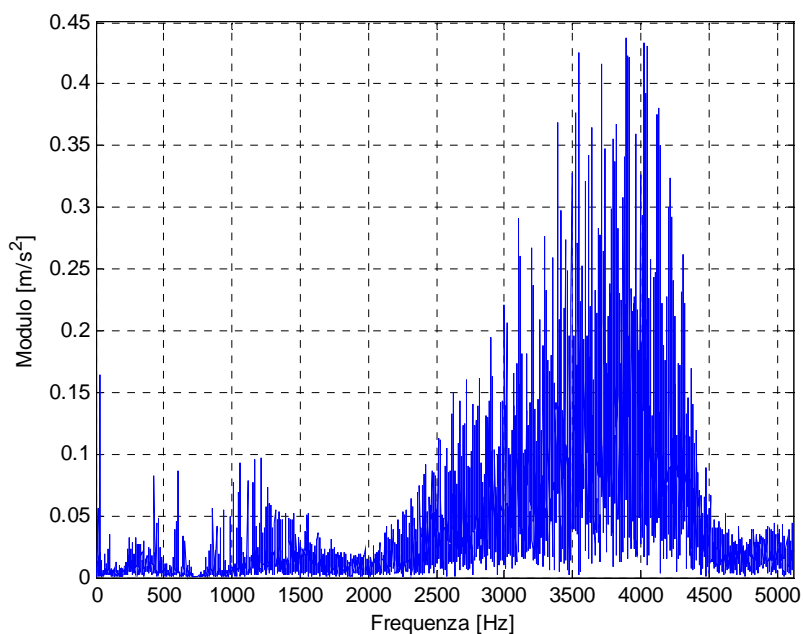


Figura 6.53: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 6 Nm con carico applicato.

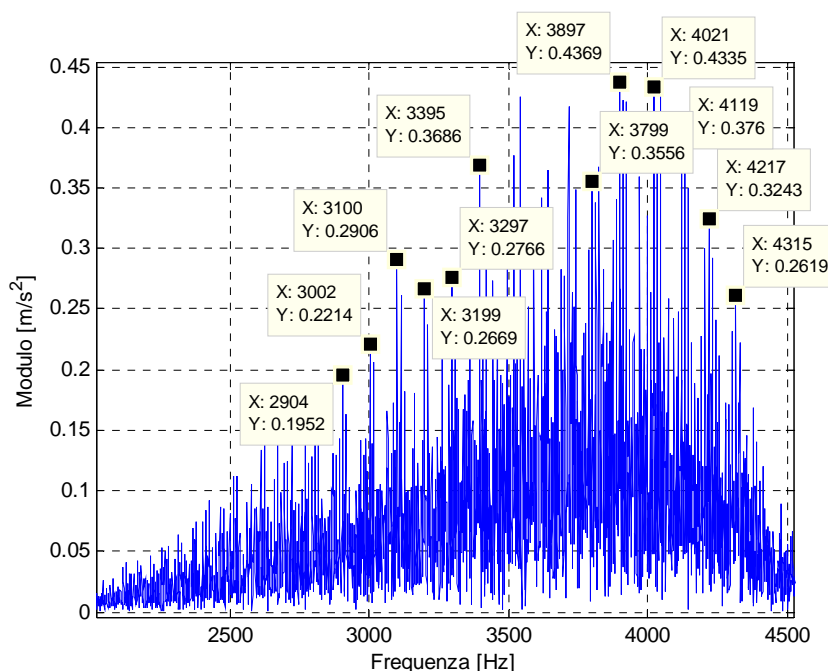


Figura 6.54: dettaglio del modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista interna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 6 Nm con carico applicato.

6.2.6 Difetto sulla pista esterna senza carico applicato

Per quanto riguarda l'analisi dei segnali relativi al cuscinetto con difetto sulla pista esterna, in primo luogo si analizza il segnale dell'accelerometro orizzontale, relativo all'acquisizione effettuata alla velocità di 500 rpm ed alla coppia di 4 Nm, considerando un intervallo temporale di lunghezza pari a 5 periodi di rotazione dell'albero.

L'applicazione della MED al segnale originale, riportato in figura 6.55, consente di mettere in evidenza un numero elevato di picchi, connessi sia alla rotazione dell'albero che alla presenza del difetto e di ridurre invece le altre componenti, tra cui il rumore. Osservando la figura 6.57, infatti, si possono notare dei picchi distanziati di un intervallo temporale ($T_{outer} = 0.044$ s) pari all'inverso della frequenza caratteristica del difetto.

Per quanto riguarda il dominio delle frequenze, nel modulo dello spettro dell'input (vedi figura 6.56) non sono visibili ed identificabili in modo chiaro le componenti legate alla presenza del difetto. Nel modulo dello spettro dell'output (vedi figura 6.58 e figura 6.59), invece, si riconoscono delle bande alle alte frequenze in cui le varie componenti principali sono poste ad una distanza pari alla frequenza caratteristica del difetto sulla pista esterna. Tali componenti risultano maggiormente amplificate rispetto alle stesse riportate nello spettro del

segnale in ingresso alla tecnica e quindi permettono di identificare la presenza del danneggiamento in maniera più efficace.

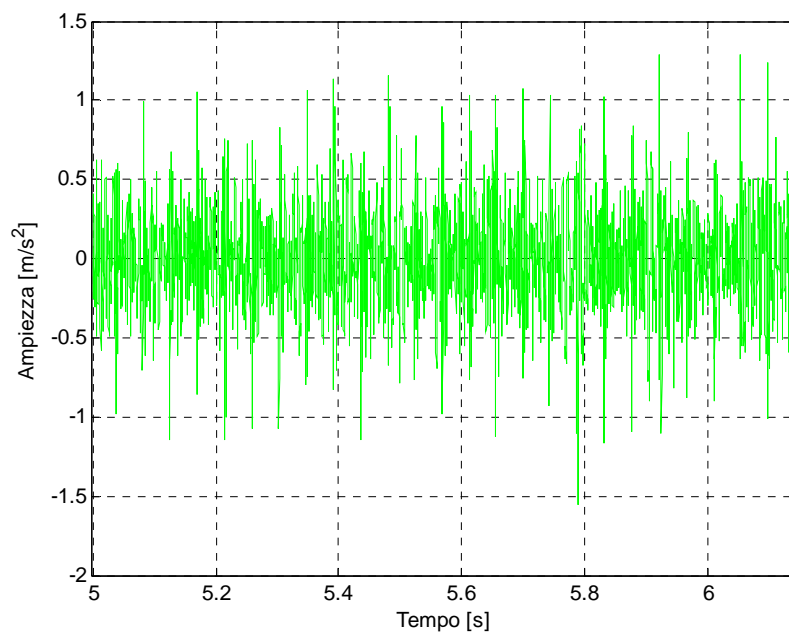


Figura 6.55: MED input del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm.

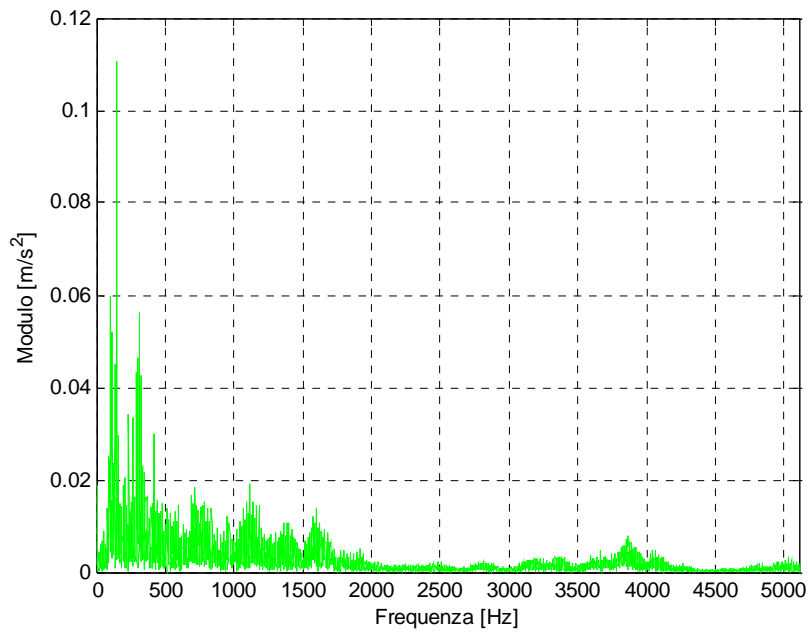


Figura 6.56: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm.

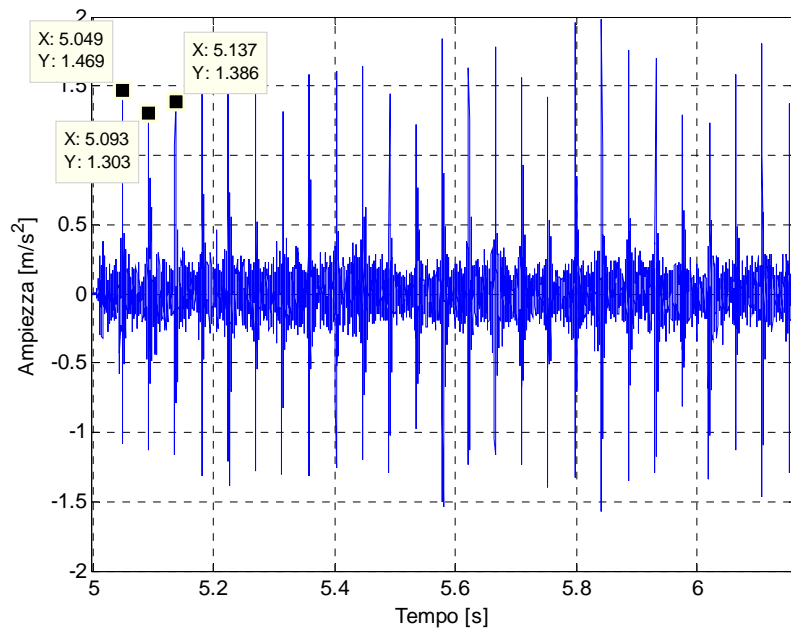


Figura 6.57: MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm.

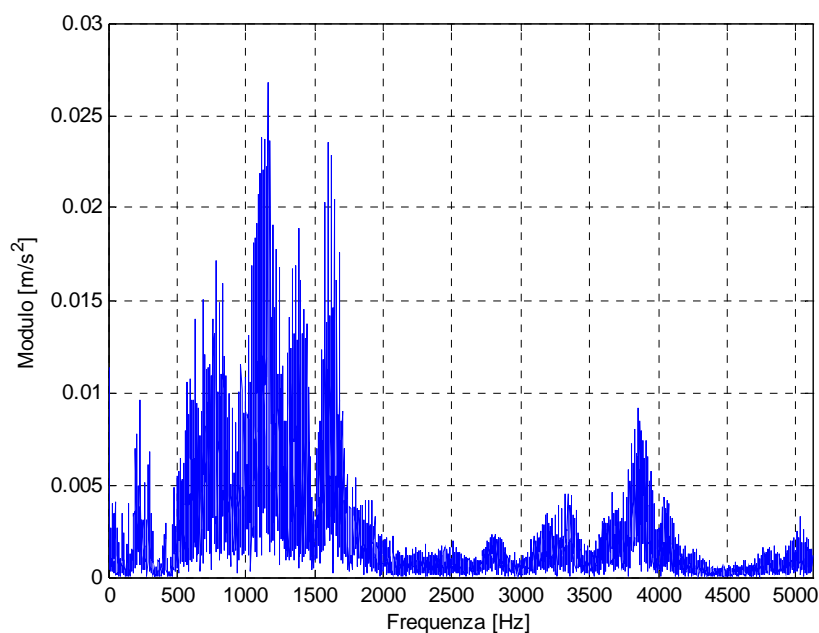


Figura 6.58: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm.

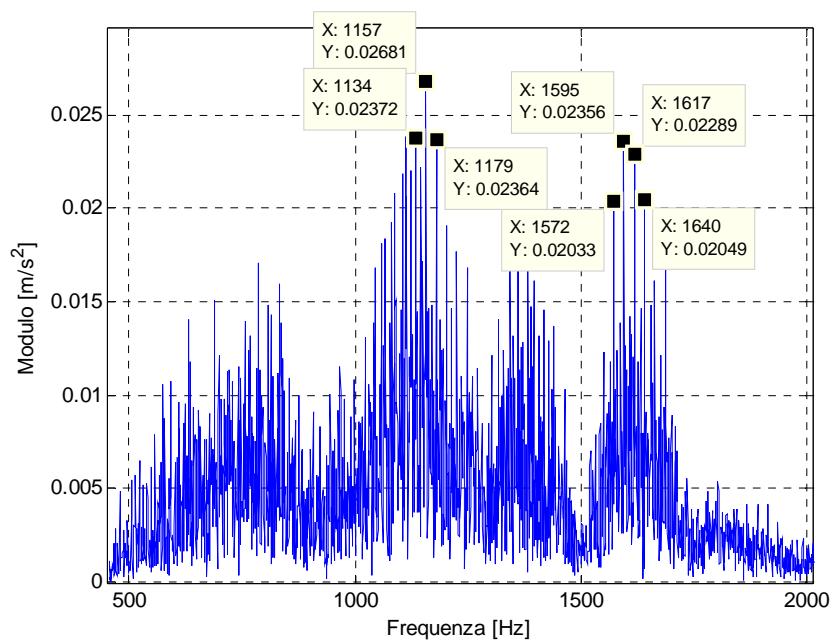


Figura 6.59: dettaglio del modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm.

Si ripete nuovamente l'analisi per il segnale di lunghezza pari a 5 periodi di rotazione dell'albero, acquisito a 1500 rpm ed a 4 Nm tramite il canale accelerometro orizzontale.

Dall'analisi di questa acquisizione si osserva che le componenti principali, non correlate al danneggiamento presente, ed il rumore presente nel segnale (vedi figura 6.60) risultano notevolmente ridotti nel segnale di output, riportato in figura 6.62, nel quale è possibile identificare in modo chiaro e preciso i picchi connessi alla presenza del difetto sulla pista esterna, equispaziati di un valore pari all'inverso della sua frequenza caratteristica ($T_{outer} = 0.015$ s).

Inoltre lo spettro del segnale originale (vedi figura 6.61) non consente di diagnosticare la presenza del difetto, poiché non è in grado di rendere riconoscibili in modo chiaro le componenti relative al danneggiamento. Lo spettro del segnale di output (vedi figura 6.63 e figura 6.64) mostra, invece, delle bande di frequenze in cui le componenti sono indicatrici della presenza del danneggiamento realizzato sulla pista esterna, poiché risultano equispaziate di un valore pari $BPFO = 66$ Hz.

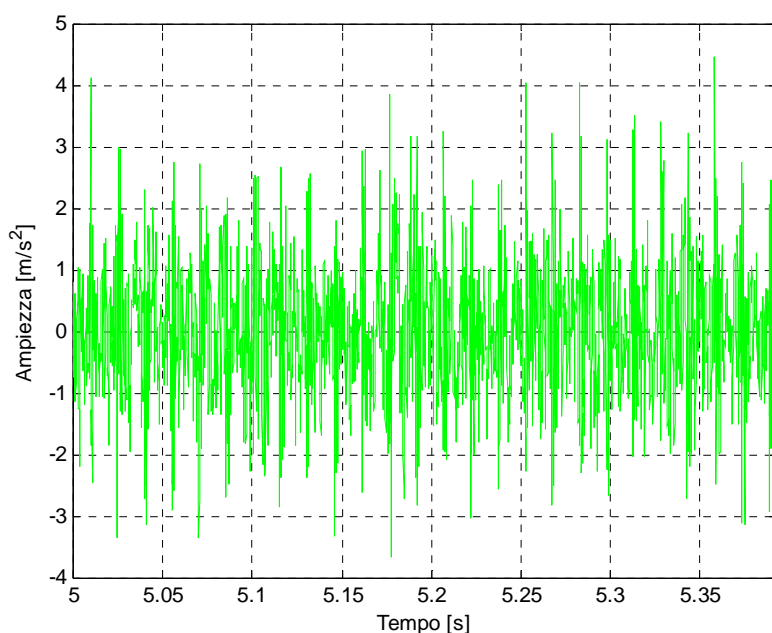


Figura 6.60: MED input del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1500 rpm e 4 Nm.

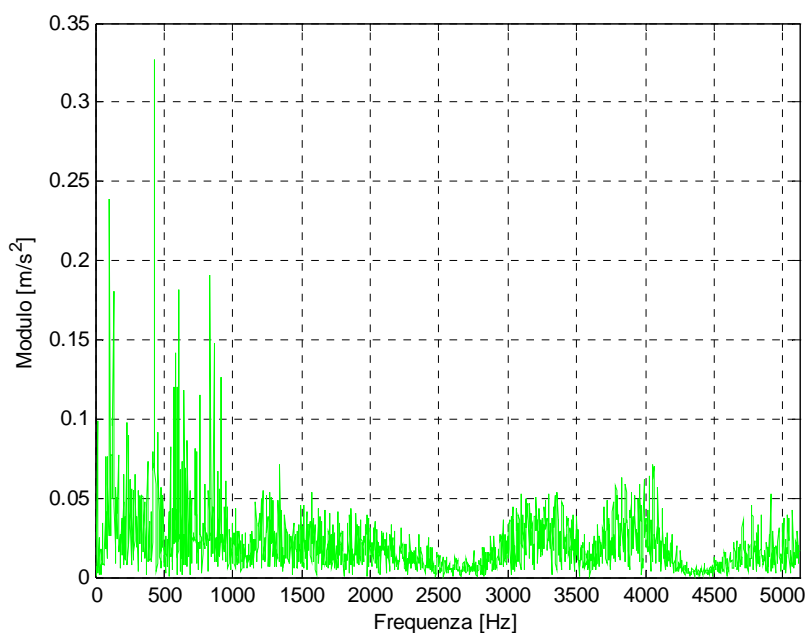


Figura 6.61: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1500 rpm e 4 Nm.

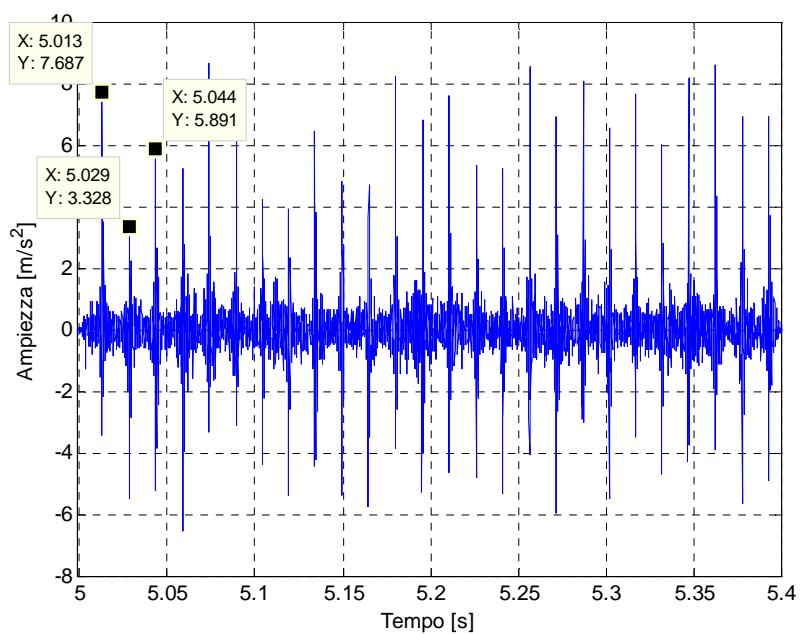


Figura 6.62: MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1500 rpm e 4 Nm.

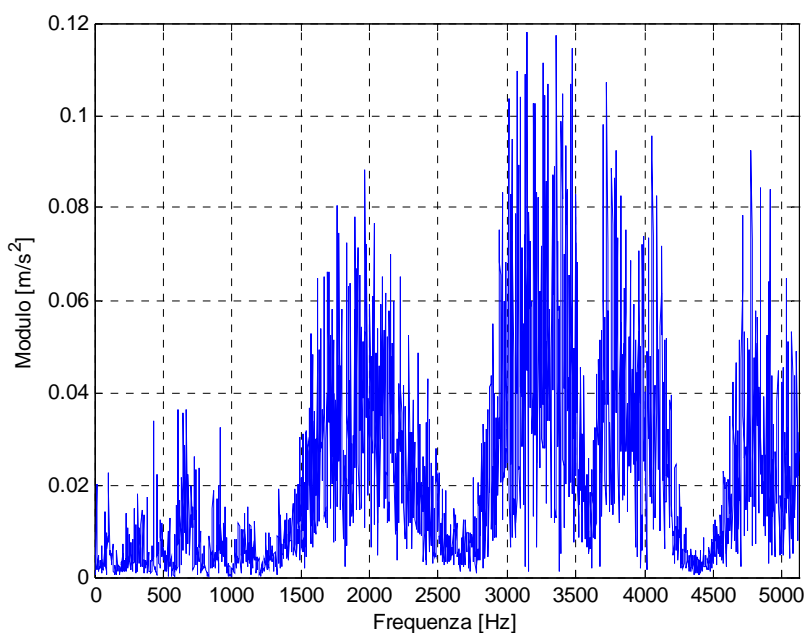


Figura 6.63: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1500 rpm e 4 Nm.

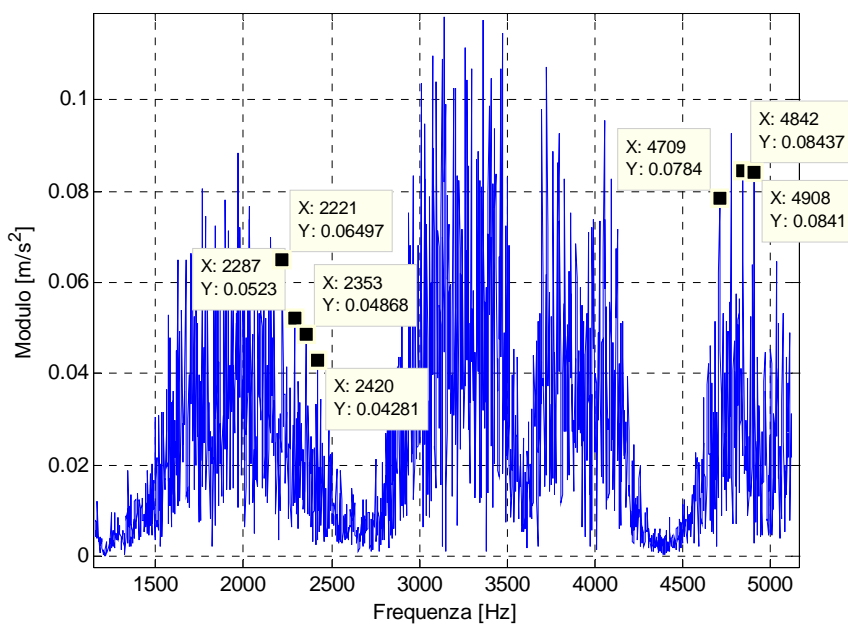


Figura 6.64: dettaglio del modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1500 rpm e 4 Nm.

Infine si applica la tecnica ad un segnale di lunghezza pari a 10 periodi di rotazione dell'albero, ottenuto alla velocità di 2500 rpm ed alla coppia di 4 Nm, attraverso il canale accelerometro verticale.

Il segnale di input alla tecnica permette di riconoscere, seppur non in modo chiaro a causa della presenza di una notevole quantità di componenti, i picchi del segnale indicatori della presenza del difetto (vedi figura 6.65). L'analisi condotta sullo spettro di questo segnale (vedi figura 6.66), permette di identificare la presenza del difetto anche nel dominio delle frequenze, in quanto si può notare una banda in cui le componenti, di ampiezza minore rispetto alle altre, sono poste ad una distanza pari a $BPFO = 110 \text{ Hz}$.

L'applicazione dell'algoritmo MED consente di ottenere un segnale privo di rumore (vedi figura 6.67) in cui sono enfatizzati i picchi connessi alla presenza del difetto sulla pista esterna, distanziati di $T_{outer} = 0.009 \text{ s}$. Lo spettro del segnale di output dalla tecnica, riportato in figura 6.68, mostra delle bande centrate alle alte frequenze, indicatrici della presenza del difetto sulla pista esterna, come avveniva nello spettro del segnale originale. Tuttavia, in questo caso, le componenti equispaziate di un valore pari alla frequenza caratteristica del danneggiamento preso in esame, risultano maggiormente evidenti perché sono state notevolmente amplificate.

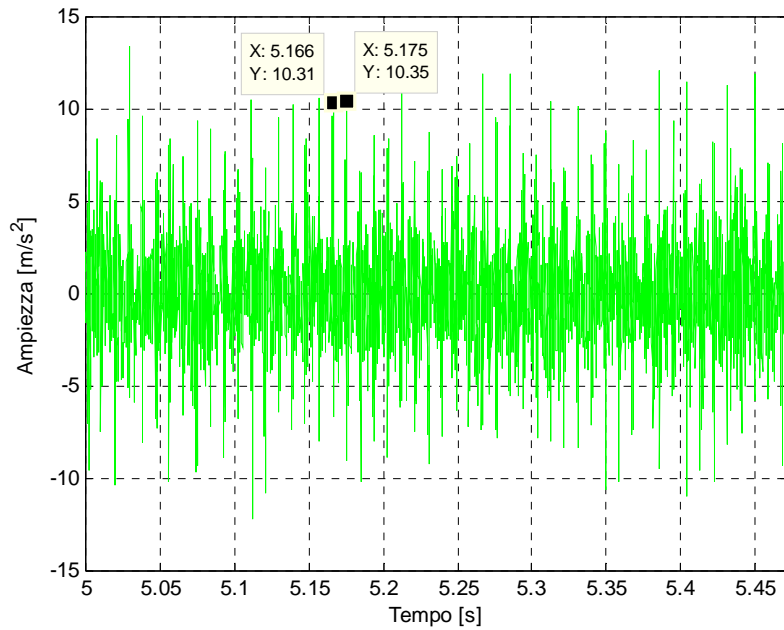


Figura 6.65: MED input del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 2500 rpm e 4 Nm.

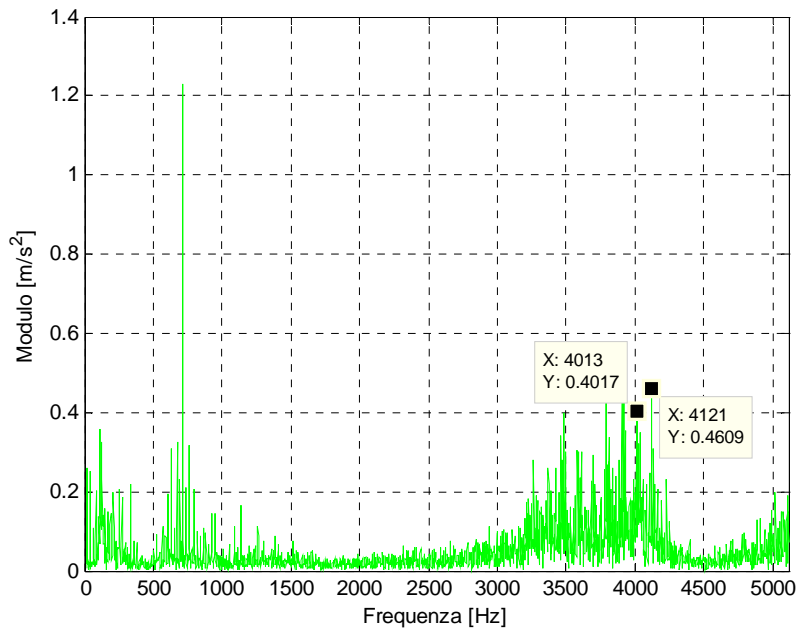


Figura 6.66: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 2500 rpm e 4 Nm.

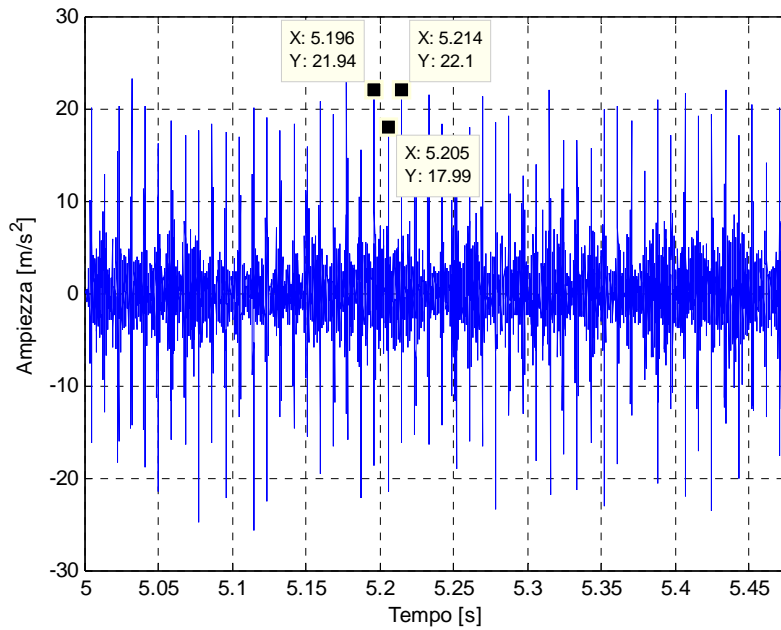


Figura 6.67: MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 2500 rpm e 4 Nm.

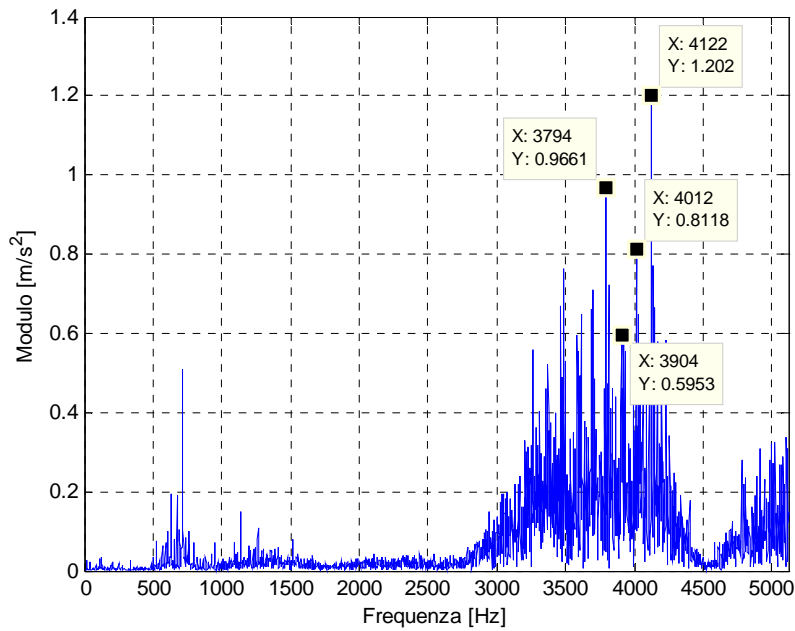


Figura 6.68: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 2500 rpm e 4 Nm.

6.2.7 Difetto sulla pista esterna con carico applicato

Si considera inizialmente il segnale dell'accelerometro orizzontale, di lunghezza pari a 10 periodi di rotazione dell'albero, acquisito alla velocità di rotazione di 500 rpm e con coppia di 4 Nm.

Analizzando il segnale acquisito (vedi figura 6.69), si nota come non sia possibile identificare in modo chiaro le componenti delle vibrazioni connesse al difetto presente sulla pista esterna, a causa della presenza di una notevole quantità di altre componenti, non direttamente legate alla presenza del difetto, e di rumore. Applicando la trasformata di Fourier a tale segnale, si ottiene lo spettro riportato in figura 6.70, nel quale non è possibile identificare delle componenti legate alla presenza del danneggiamento.

L'applicazione della MED, consente di ottenere un segnale completamente pulito, in cui risultano enfatizzati i picchi indicativi del difetto che risultano equispaziati di $T_{outer} = 0.043$ s, pari all'inverso della *BPFO* (vedi figura 6.71). Osservando lo spettro del segnale di output della MED (vedi figura 6.72 e figura 6.73), si possono riconoscere delle bande di frequenze in cui le componenti forniscono un'indicazione della presenza del difetto, in quanto sono distanziate di un valore circa pari alla frequenza caratteristica $BPFO = 23$ Hz.

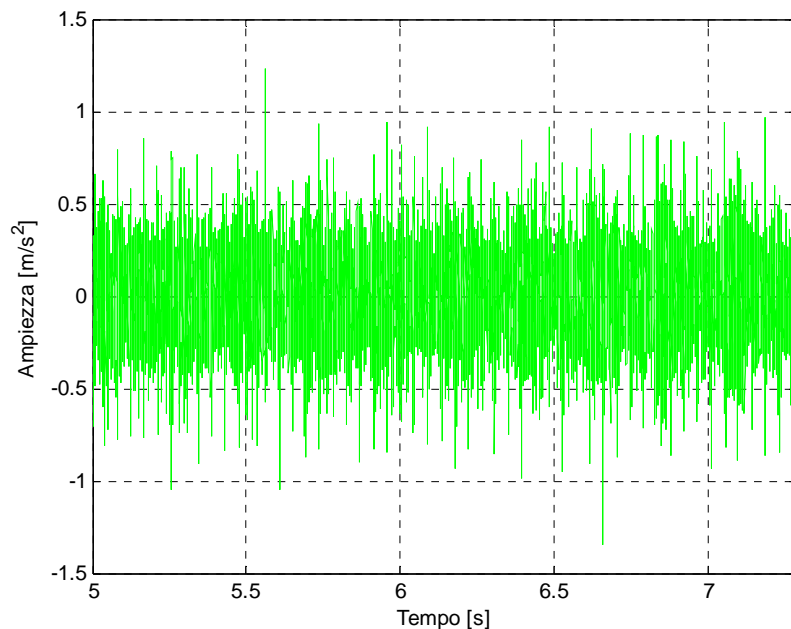


Figura 6.69: MED input del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

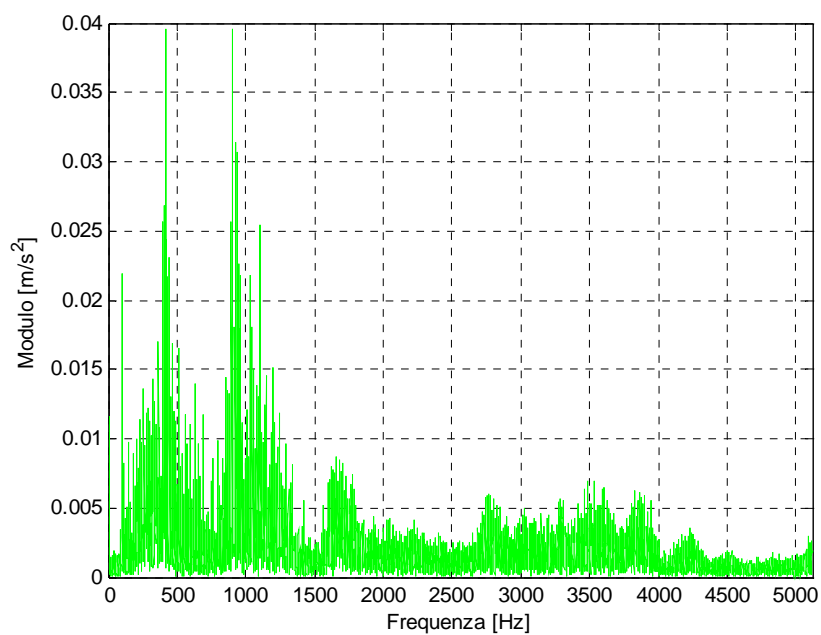


Figura 6.70: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

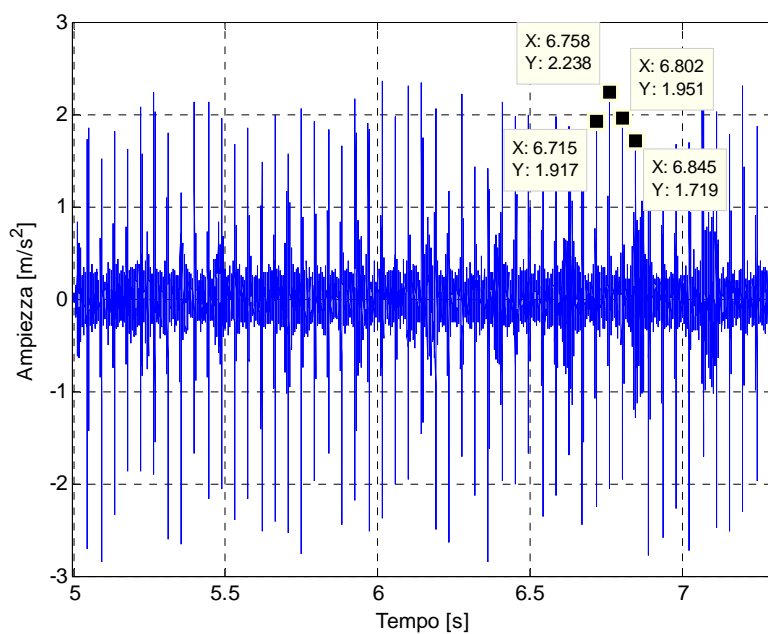


Figura 6.71: MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

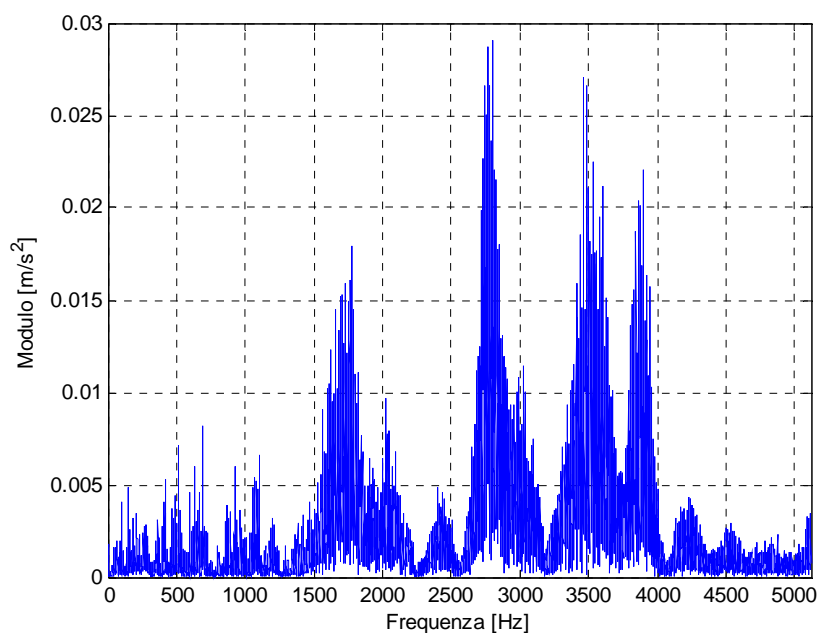


Figura 6.72: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

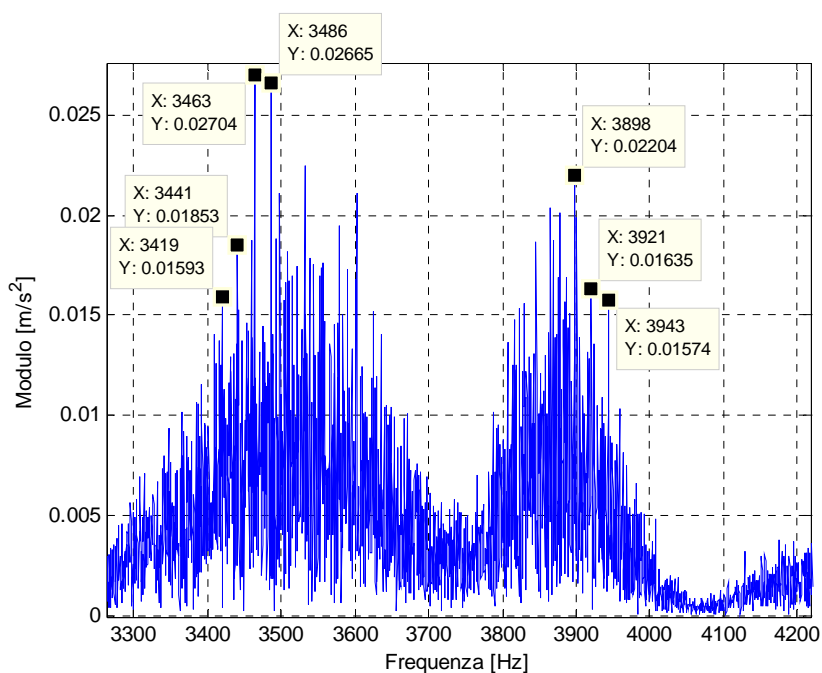


Figura 6.73: dettaglio del modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

Si ripete nuovamente l'analisi effettuata in precedenza, sul segnale di lunghezza pari a 15 periodi di rotazione dell'albero, relativo all'acquisizione realizzata a 1500 rpm ed a 4 Nm, ottenuto tramite il canale accelerometro orizzontale.

Il segnale d'ingresso alla tecnica risulta composto da una notevole quantità di componenti e di rumore, che impediscono l'identificazione delle componenti legate alla presenza del difetto, come riportato in figura 6.74. Dal segnale di output, invece, è possibile riconoscere una serie di picchi, distanziati tra loro di un intervallo ($T_{outer} = 0.015 s$) pari all'inverso della frequenza caratteristica del danneggiamento sulla pista esterna, che indicano la presenza dell'intaglio in esame sul cuscinetto (vedi figura 6.76).

Analizzando lo spettro del segnale in ingresso alla tecnica (vedi figura 6.75), non è possibile riconoscere le componenti legate alla presenza dell'intaglio considerato. Dall'esame dello spettro del segnale in uscita dalla MED, invece, si possono notare alcune bande centrate alle alte frequenze (vedi figura 6.77 e figura 6.78) le cui componenti confermano l'identificazione di un difetto presente sulla pista esterna del cuscinetto, in quanto appaiono distanziate della frequenza caratteristica $BPFO = 66 Hz$.

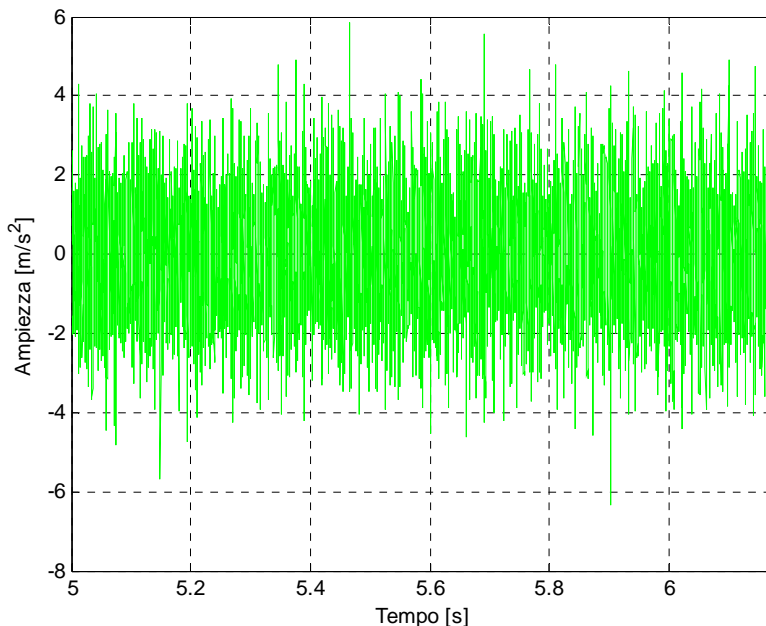


Figura 6.74: MED input del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

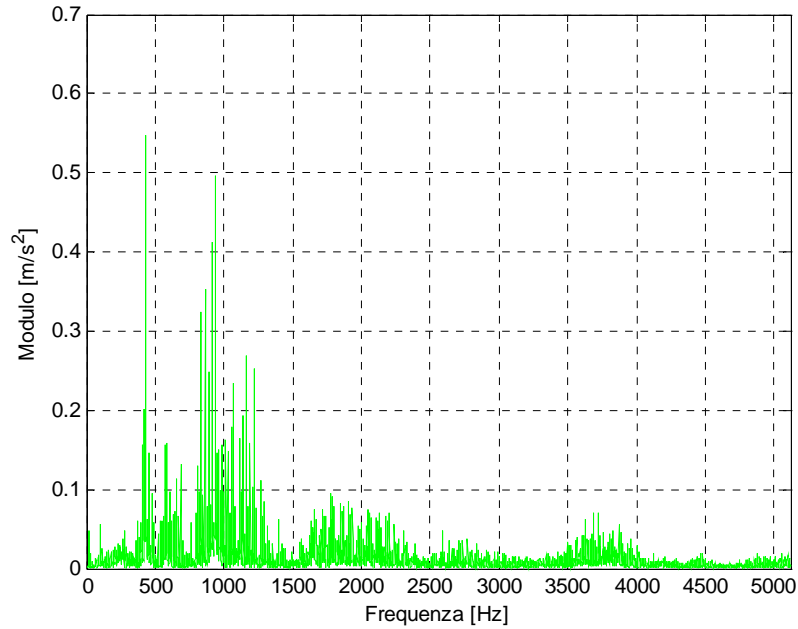


Figura 6.75: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

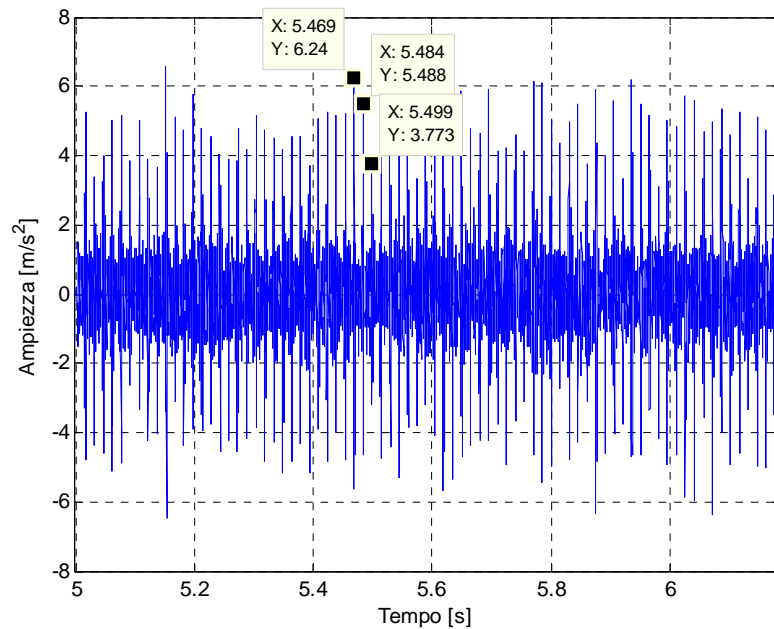


Figura 6.76: MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

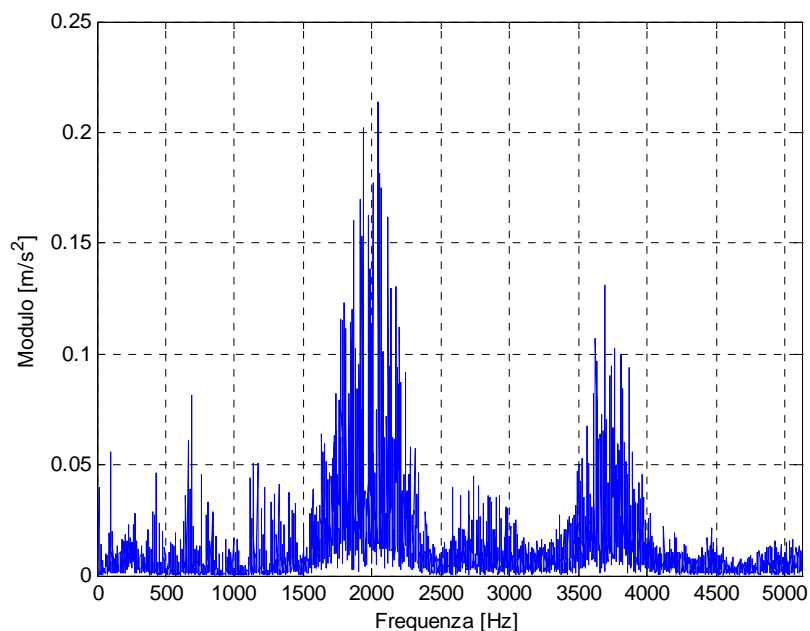


Figura 6.77: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

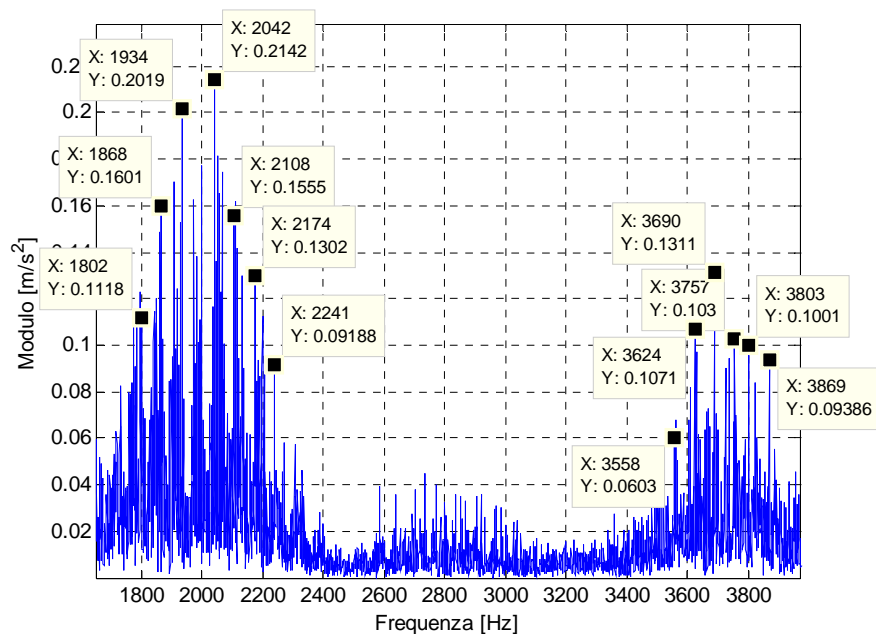


Figura 6.78: dettaglio del modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

Si considera infine il segnale dell'accelerometro orizzontale, per l'acquisizione realizzata a 2500 rpm ed a 4 Nm; di tale segnale si prende in esame una parte di lunghezza pari a 5 periodi di rotazione dell'albero.

Anche questa analisi porta all'individuazione di picchi sul segnale di output dalla tecnica che nel segnale di input non sono facilmente riconoscibili, a causa della presenza di altre componenti (vedi figura 6.79 e figura 6.81). In particolare, nel secondo grafico si riconoscono i picchi distanziati di un intervallo temporale pari all'inverso della frequenza caratteristica del difetto sulla pista esterna ($T_{outer} = 0.009\text{ s}$), ad indicare la presenza dell'intaglio.

Confrontando gli spettri ottenuti dai segnali di input e di output alla tecnica, si nota che, mentre il primo non presenta delle componenti riconducibili alla presenza del difetto, nel secondo è possibile riconoscere una banda di frequenze, con componenti distanziate di $BPFO = 110\text{ Hz}$, che consente di rilevare la presenza del danneggiamento sulla pista esterna del cuscinetto preso in esame (vedi figura 6.80 e figura 6.82).

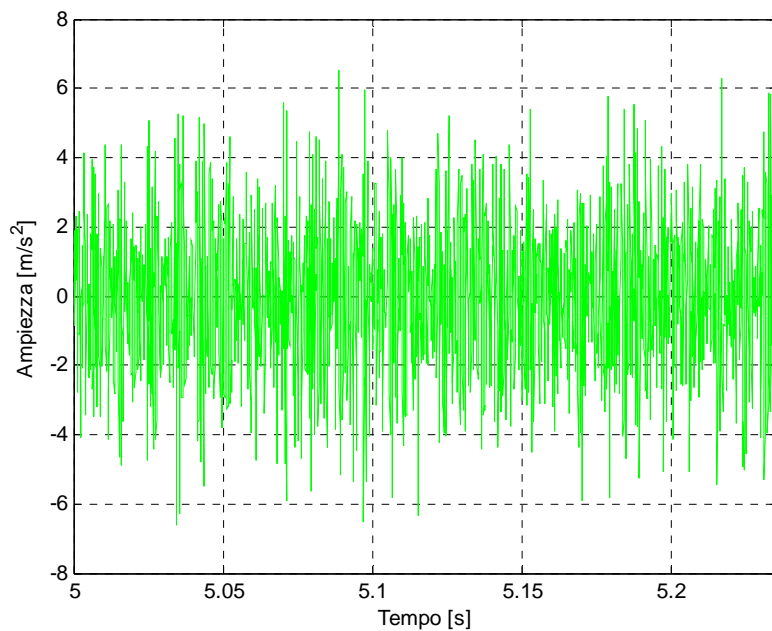


Figura 6.79: MED input del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

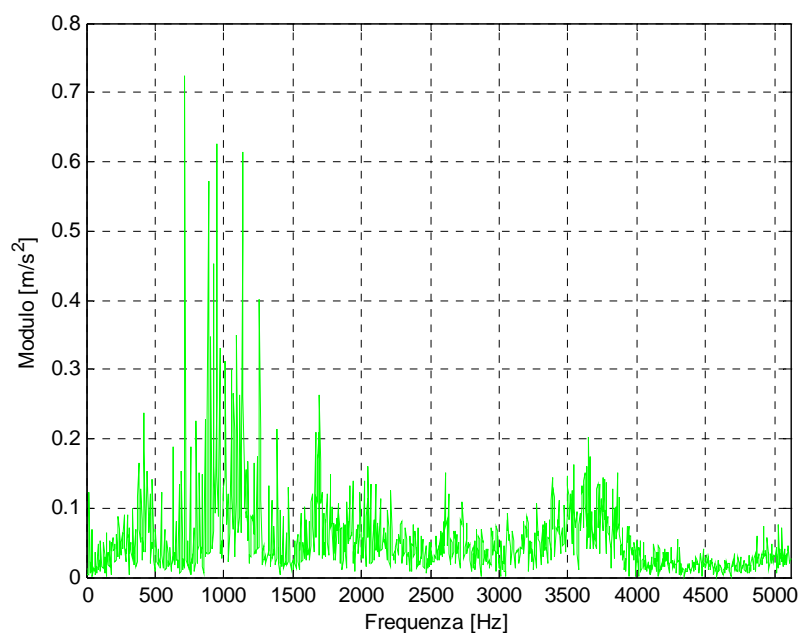


Figura 6.80: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

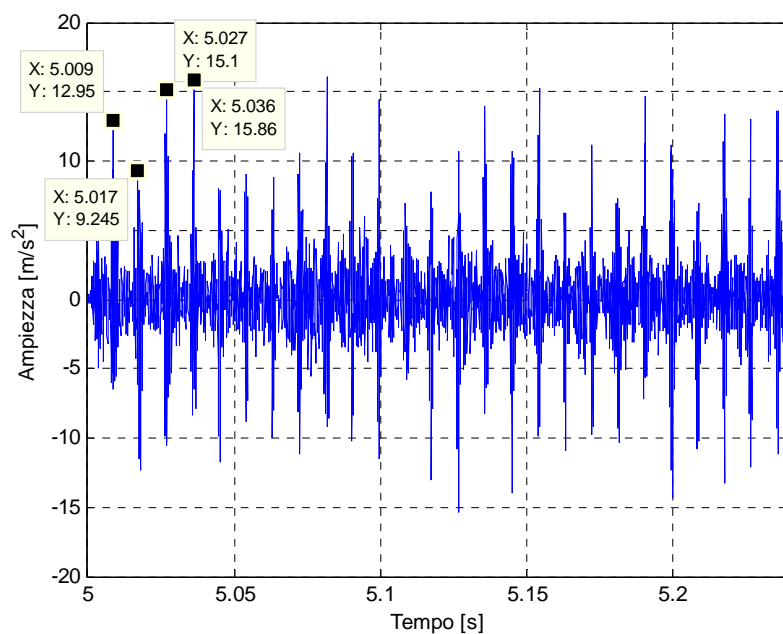


Figura 6.81: MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

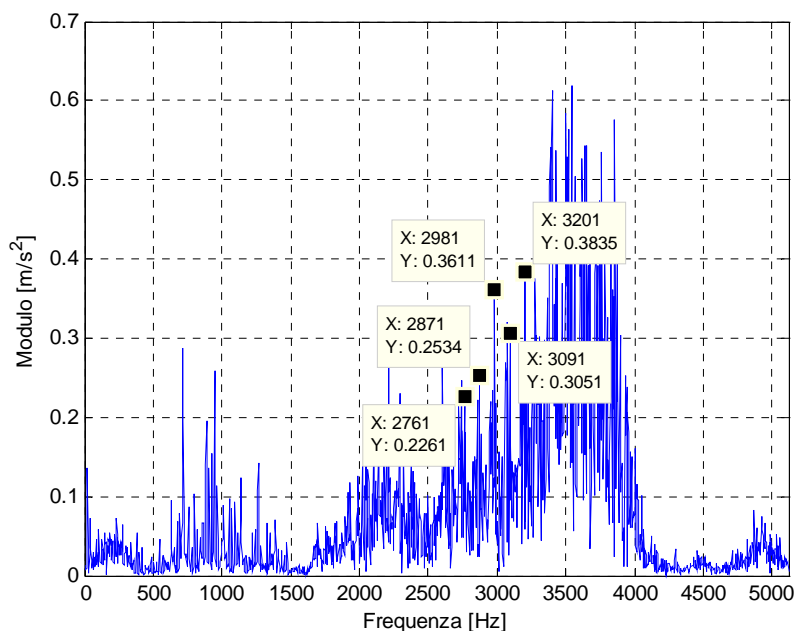


Figura 6.82: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

6.2.8 Difetto sulla pista esterna orientato in direzioni diverse rispetto alla zona di applicazione del carico

Si considerano, a titolo di esempio, due acquisizioni effettuate sul cuscinetto test in cui il difetto sulla pista esterna è orientato a 90° ed a 180° rispetto al punto di applicazione del carico.

Per il primo tipo di orientamento, si analizza il segnale dell'accelerometro verticale, di lunghezza pari a 5 periodi di rotazione dell'albero, per l'acquisizione condotta a 1500 rpm ed a 4 Nm ottenuta senza applicare alcun carico al cuscinetto test.

Osservando il segnale di output della MED per il canale in esame, si nota che la tecnica non è in grado di ripulire il segnale rendendo evidenti i picchi che permettono di identificare la presenza del difetto sulla pista esterna (vedi figura 6.83 e figura 6.85). Nemmeno passando al dominio delle frequenze è possibile ricavare delle componenti correlate alla presenza del danneggiamento (figura 6.84 e figura 6.86).

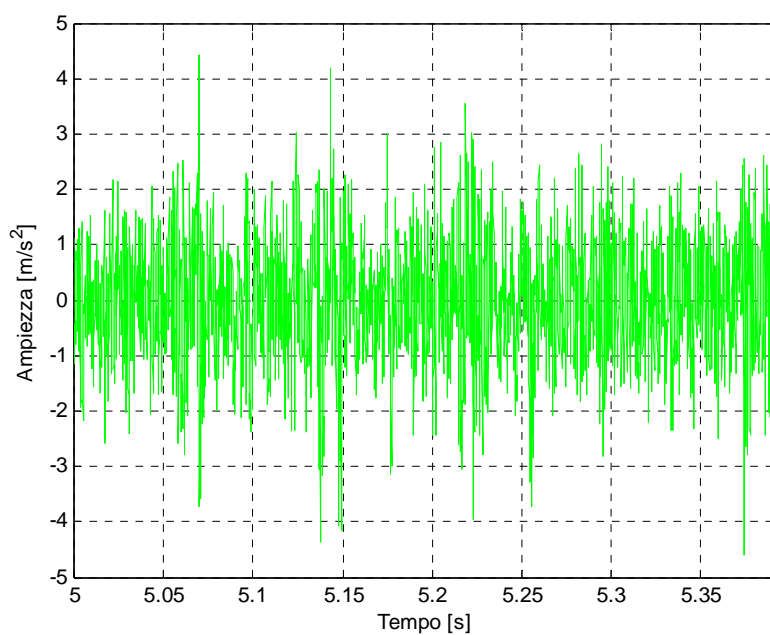


Figura 6.83: MED input del cuscinetto con difetto sulla pista esterna a 90° per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 4 Nm.

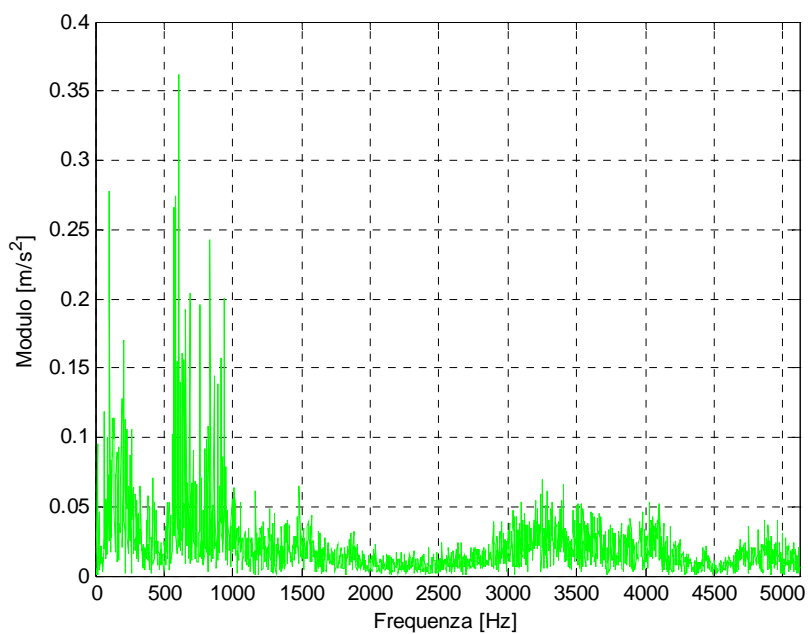


Figura 6.84: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sulla pista esterna a 90° per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 4 Nm.

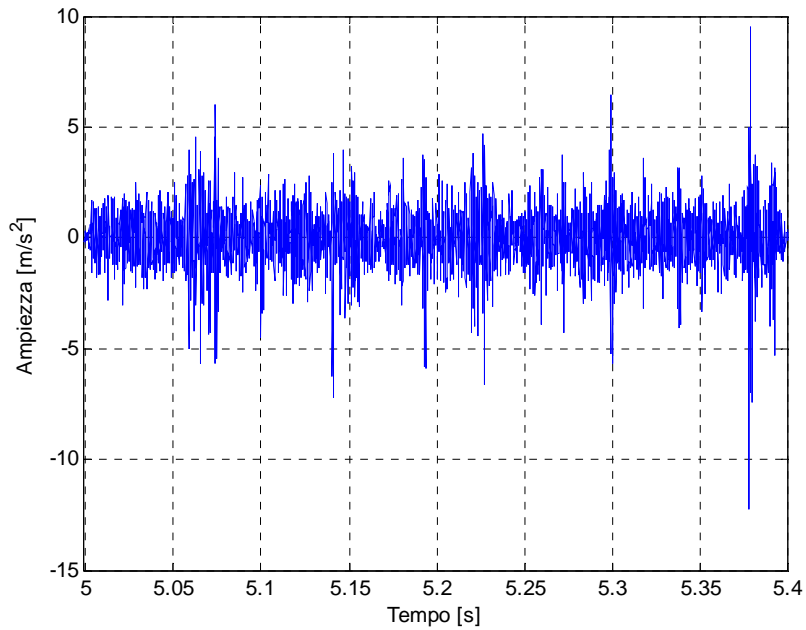


Figura 6.85: MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna a 90° per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 4 Nm.

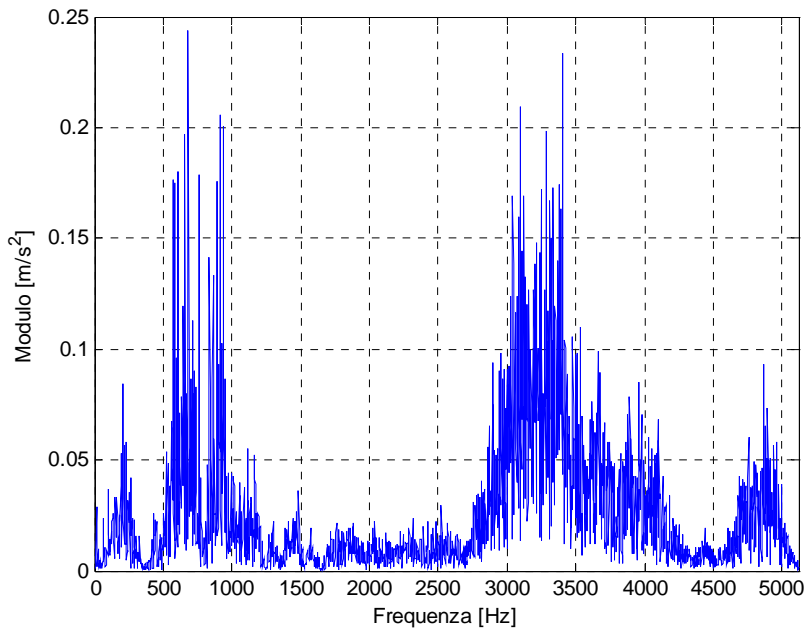


Figura 6.86: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna a 90° per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 4 Nm.

Applicando la tecnica a tutte le altre acquisizioni fornite dai due accelerometri, effettuate a qualsiasi valore di velocità e di coppia, si ottengono gli stessi risultati.

In seguito si considera il segnale, della stessa lunghezza del precedente, acquisito a 1500 rpm ed a 4 Nm con l'accelerometro verticale, senza l'applicazione del carico sul cuscinetto test, per un orientamento a 180° del difetto.

Anche per questa configurazione si nota che la tecnica elimina parte delle componenti che caratterizzano il segnale originale, ma non è in grado di mostrare in modo chiaro i picchi connessi alla presenza del difetto (vedi figura 6.87 e figura 6.89).

Confrontando tra loro i moduli degli spettri dei segnali prima e dopo l'applicazione della tecnica, si nota che, in entrambi, non è possibile riconoscere le componenti del segnale connesse alla presenza del difetto (vedi figura 6.88 e figura 6.90).

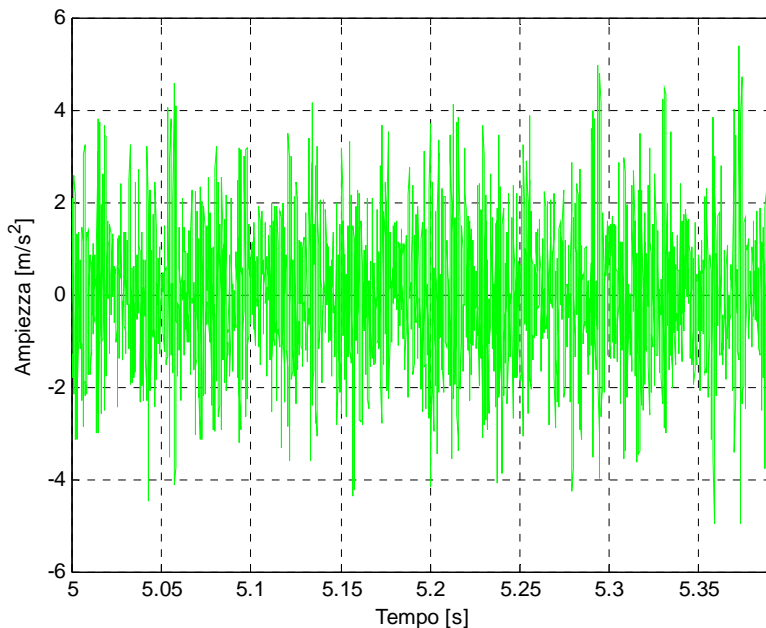


Figura 6.87: MED input del cuscinetto con difetto sulla pista esterna a 180° per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 4 Nm.

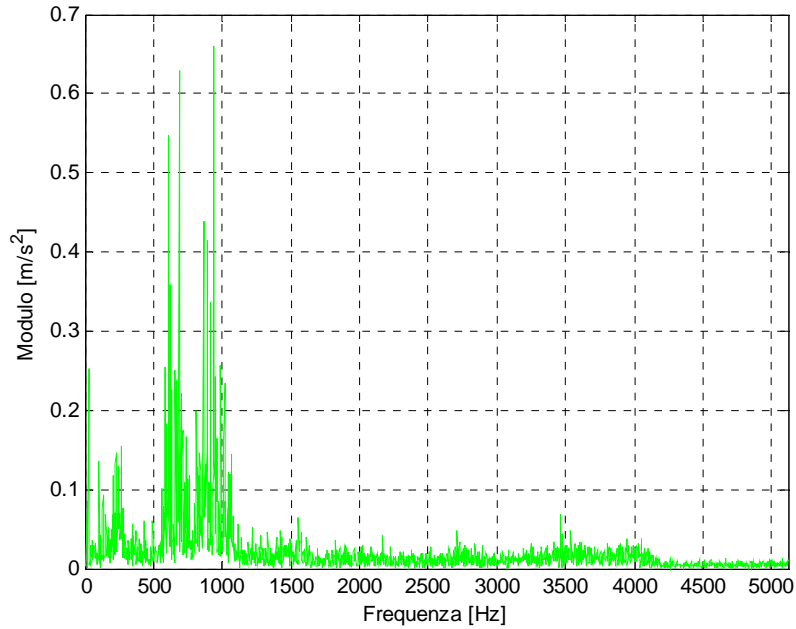


Figura 6.88: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sulla pista esterna a 180° per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 4 Nm.

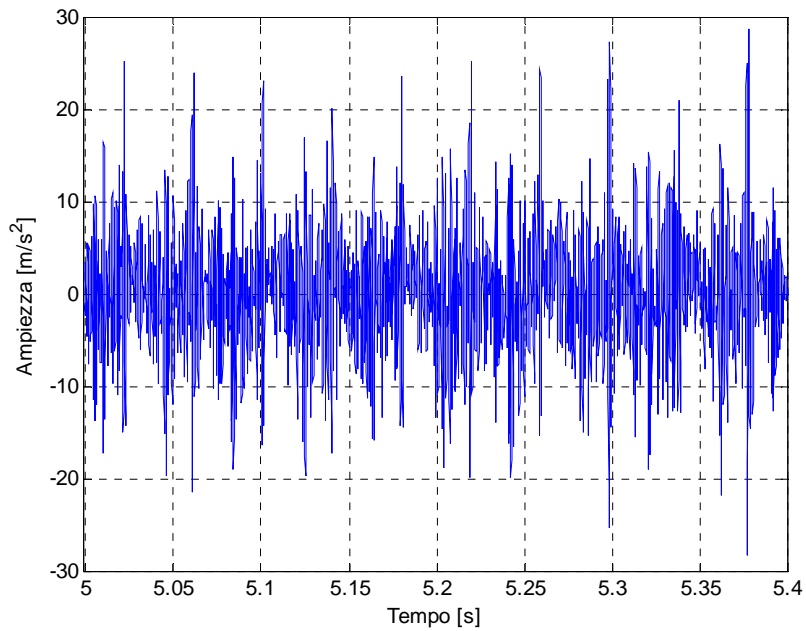


Figura 6.89: MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna a 180° per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 4 Nm.

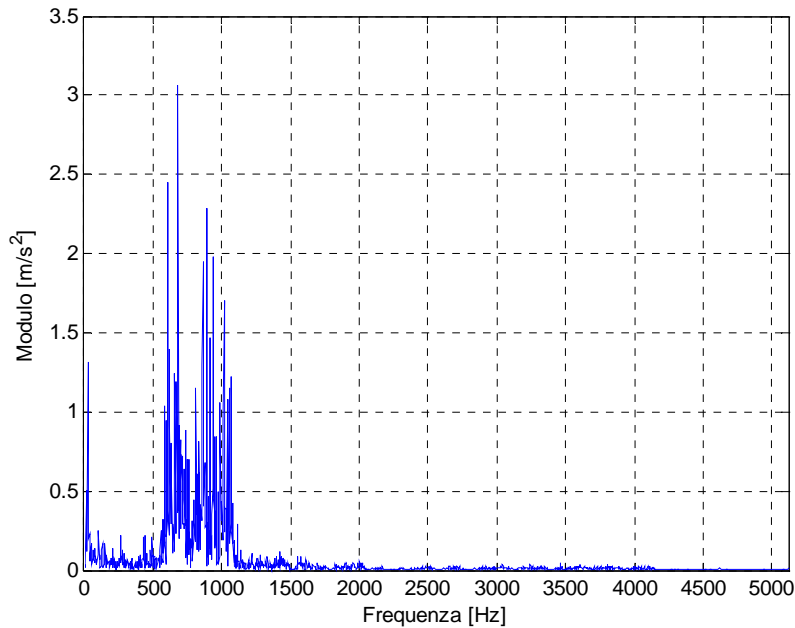


Figura 6.90: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla pista esterna a 180° per un'acquisizione dell'accelerometro verticale a 1500 rpm e 4 Nm.

Si giunge alle medesime conclusioni considerando tutte le altre acquisizioni realizzate a velocità e coppie differenti, anche nel caso di applicazione della forza sul cuscinetto test.

In questi casi l'inefficacia della tecnica può essere dovuta all'incapacità da parte del carico sul cuscinetto, a causa dell'orientamento di quest'ultimo, di sollecitare adeguatamente il difetto in modo da renderlo evidente.

6.2.9 Difetto sull'elemento volvente senza carico applicato

Nell'ottica di diagnosticare la presenza del difetto sull'elemento volvente, si considera inizialmente un segnale di lunghezza pari a 15 periodi di rotazione dell'albero, acquisito dall'accelerometro orizzontale alla velocità di 500 rpm ed a 4 Nm di coppia.

Il segnale di input alla tecnica (vedi figura 6.91) mostra dei picchi legati alla rotazione della gabbia poco chiari a causa di una notevole quantità di altre componenti, difficilmente riconducibili alla presenza di un danneggiamento collocato su un elemento volvente. In particolare si nota che sono presenti 6 picchi distanziati di $T_{cage} = 0.589$ s, poiché 15 periodi di rotazione dell'albero coincidono esattamente con 6 rotazioni della gabbia, corrispondenti al numero di rivoluzioni attorno all'asse dell'albero del rullo danneggiato. L'applicazione

dell'algorithmo permette invece di ottenere un grafico (vedi figura 6.93) in cui i picchi, posti ad una distanza l'uno dall'altro di circa $T_{roller} = 0.046 s$, pari all'inverso della frequenza caratteristica del difetto sull'elemento volvente, risultano molto evidenti, ad indicazione della presenza di questo tipo di danneggiamento sul cuscinetto in esame.

Esaminando lo spettro del segnale in ingresso alla tecnica, riportato in figura 6.92, non è possibile identificare delle componenti che siano riconducibili alla presenza di un intaglio sull'elemento volvente. Il modulo dello spettro del segnale di output, invece, presenta delle bande di frequenze nelle quali è possibile riconoscere delle componenti connesse alla presenza del danneggiamento in quanto distanziate tra loro di una frequenza pari circa alla $2xBSF = 21 Hz$ (vedi figura 6.94 e figura 6.95).

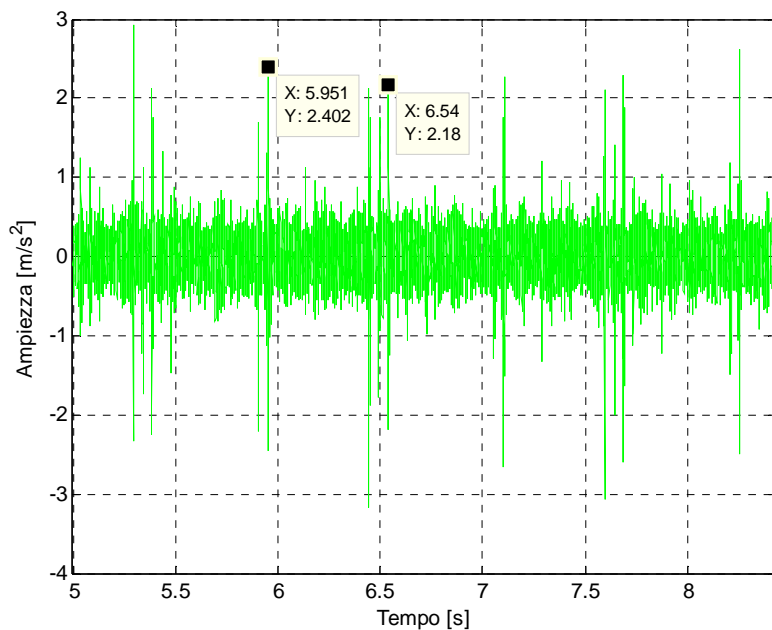


Figura 6.91: MED input del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm.

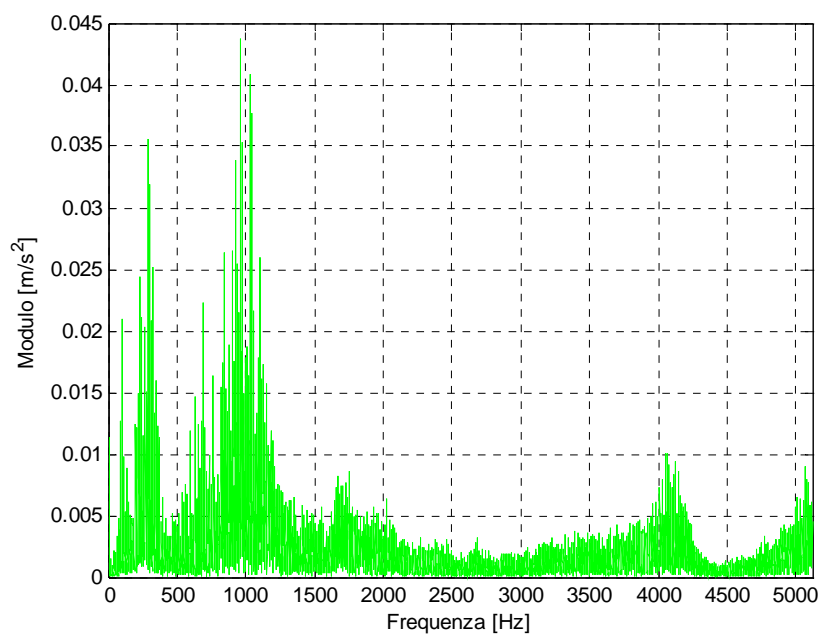


Figura 6.92: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm.

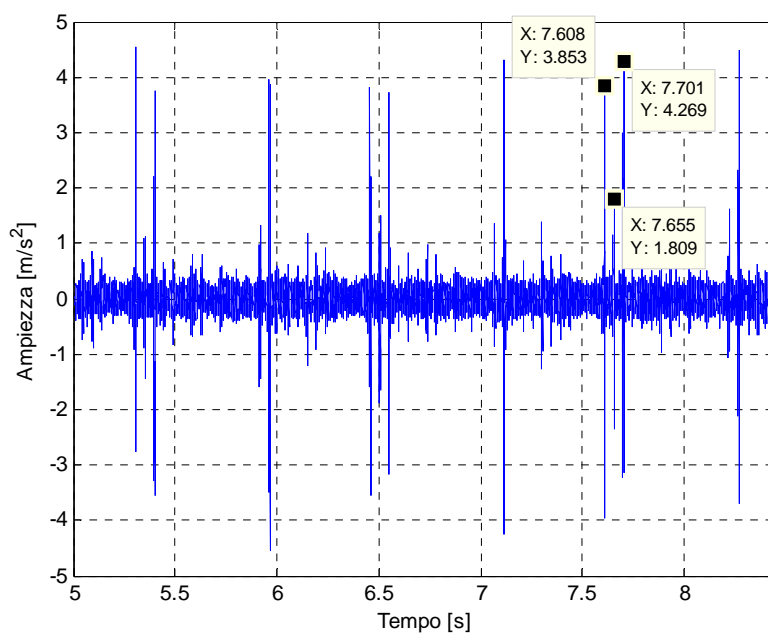


Figura 6.93: MED output del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm.

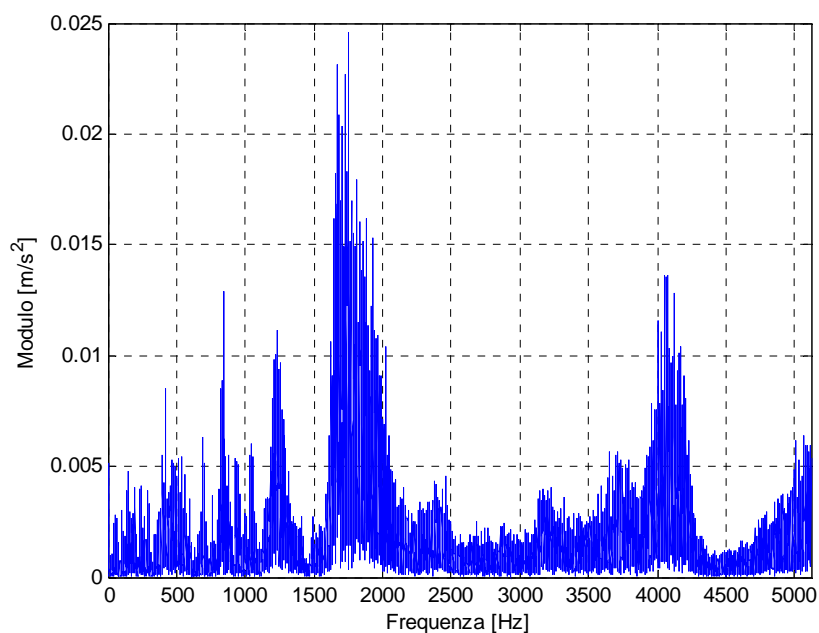


Figura 6.94: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm.

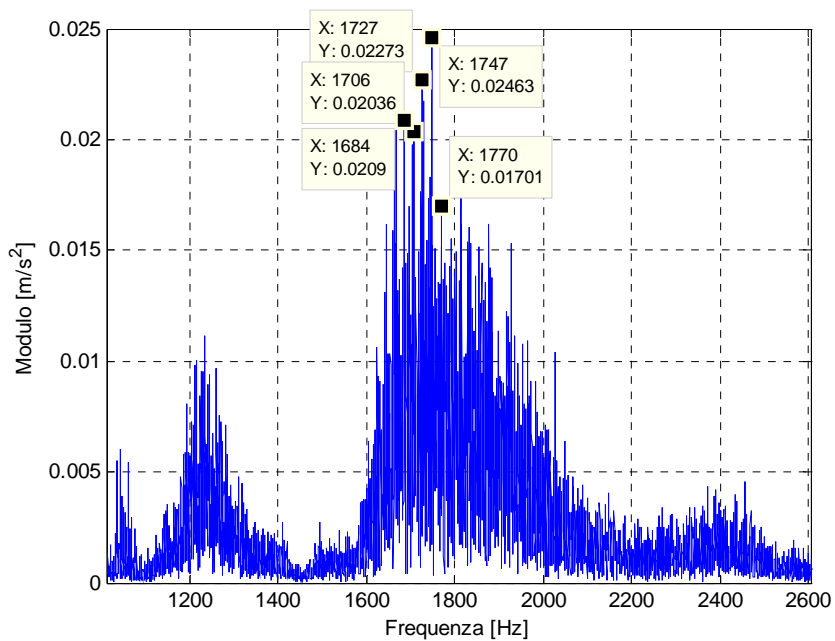


Figura 6.95: dettaglio del modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm.

Si ripete l'analisi per un segnale relativo all'acquisizione ottenuta a 2500 rpm ed a 4 Nm, tramite il canale accelerometro orizzontale.

Anche per questo caso si osserva che il segnale d'ingresso alla tecnica presenta dei picchi associati alla rotazione della gabbia, che tuttavia sono resi poco evidenti dalla presenza di altre componenti (vedi figura 6.96). L'applicazione della MED permette di ripulire il segnale e di rendere immediata l'identificazione dei picchi distanziati dell'inverso della frequenza caratteristica del difetto sull'elemento volvente ($T_{roller} = 0.01 s$), ad indicazione della presenza del danneggiamento sul cuscinetto analizzato (vedi figura 6.98).

Osservando lo spettro del segnale originale in figura 6.97, si nota come non sia possibile determinare la presenza del difetto, in quanto le componenti ad esso correlate non risultano evidenti. Lo spettro del segnale di output, invece, presenta delle bande di frequenze in cui le componenti sono poste ad una distanza tra loro pari a $2xBSF = 99 Hz$, ad indicazione della presenza del danneggiamento sull'elemento volvente del cuscinetto (vedi figura 6.99).

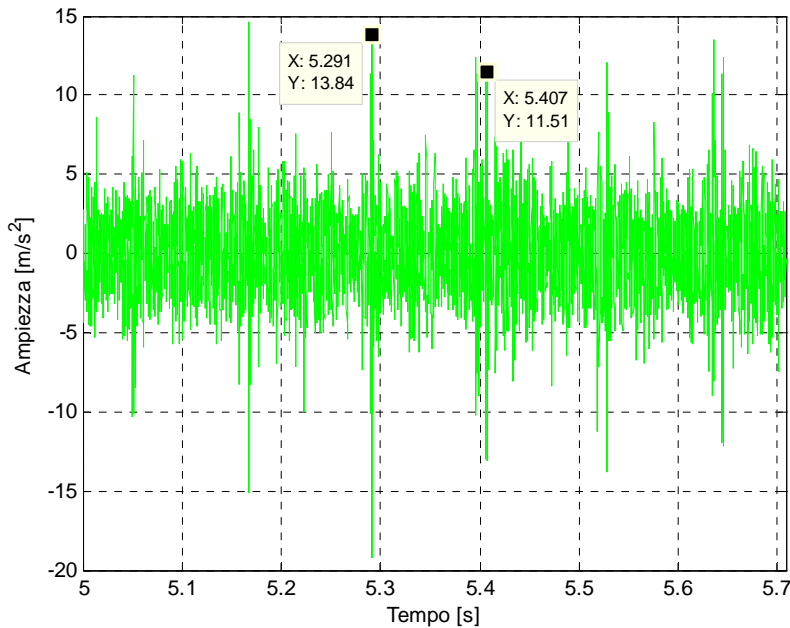


Figura 6.96: MED input del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm.

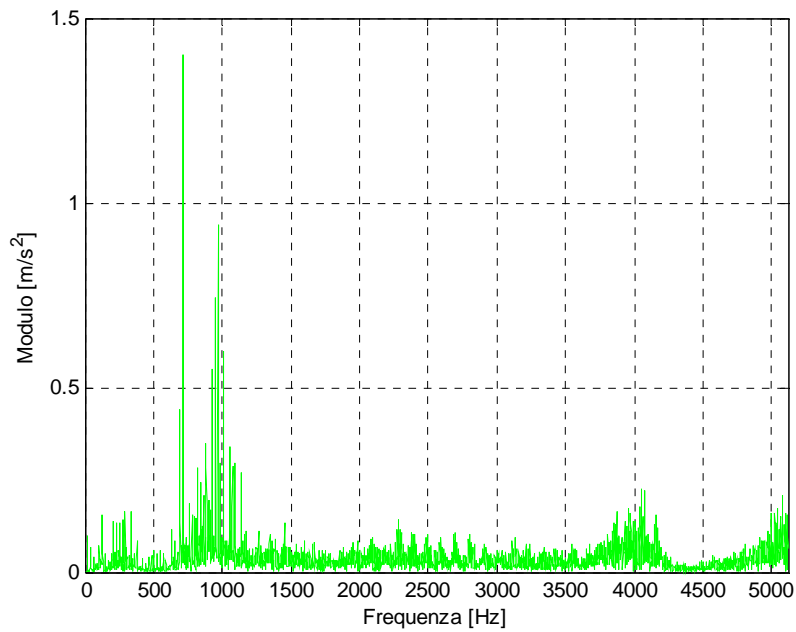


Figura 6.97: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm.

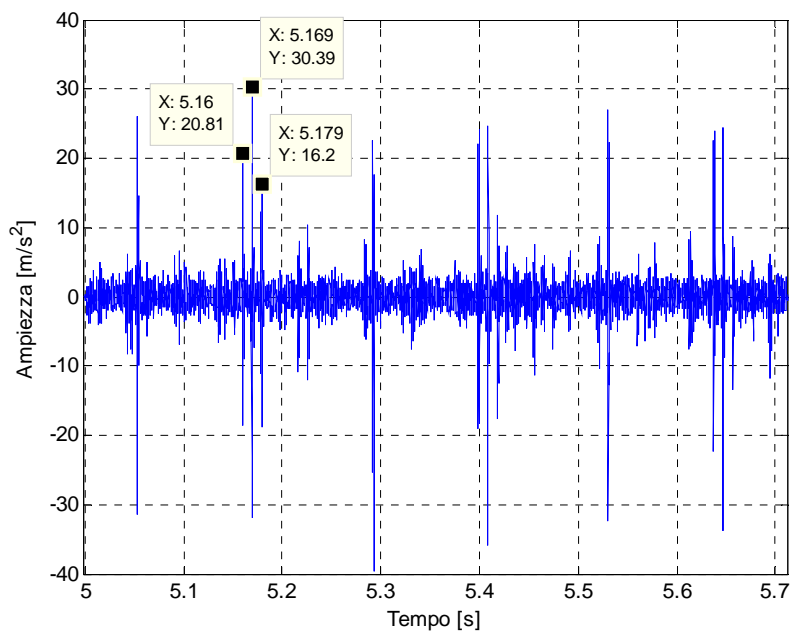


Figura 6.98: MED output del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm.

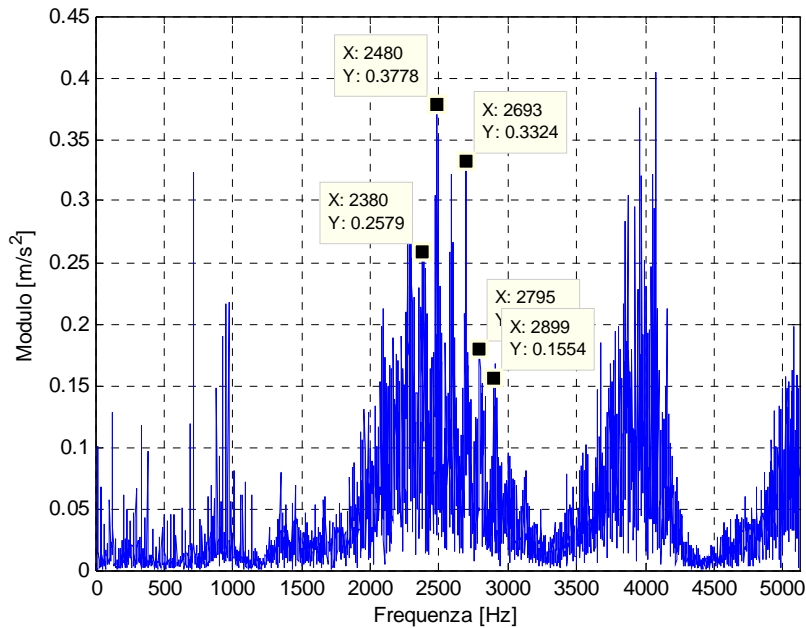


Figura 6.99: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm.

6.2.10 Difetto sull'elemento volvente con carico applicato

Si prende in esame il cuscinetto, avente lo stesso difetto presentato nel paragrafo precedente, al quale però è applicato un carico.

Il segnale, ottenuto dall'acquisizione a 500 rpm ed a 4 Nm tramite l'accelerometro orizzontale, di lunghezza pari a 15 periodi di rotazione dell'albero, risulta caratterizzato dalla presenza di componenti che tendono a nascondere quelle legate alla presenza del difetto, mentre quelle associate alla rotazione della gabbia, distanziate di $T_{cage} = 0.588$ s, sono ben visibili (vedi figura 6.100). Il segnale di output (vedi figura 6.102), invece, appare molto pulito, per cui risultano evidenti i picchi riconducibili al danneggiamento ed equispaziati di un intervallo temporale pari all'inverso della sua frequenza caratteristica ($T_{roller} = 0.044$ s).

Analizzando lo spettro del segnale originale, riportato in figura 6.101, si nota come non sia possibile identificare delle componenti correlabili alla presenza del difetto su un elemento volvente. Al contrario, il modulo dello spettro del segnale in uscita dalla tecnica evidenzia delle componenti distanziate tra loro della frequenza caratteristica del danneggiamento $2xBSF = 21$ Hz, ad indicazione della sua presenza (vedi figura 6.103 e figura 6.104).

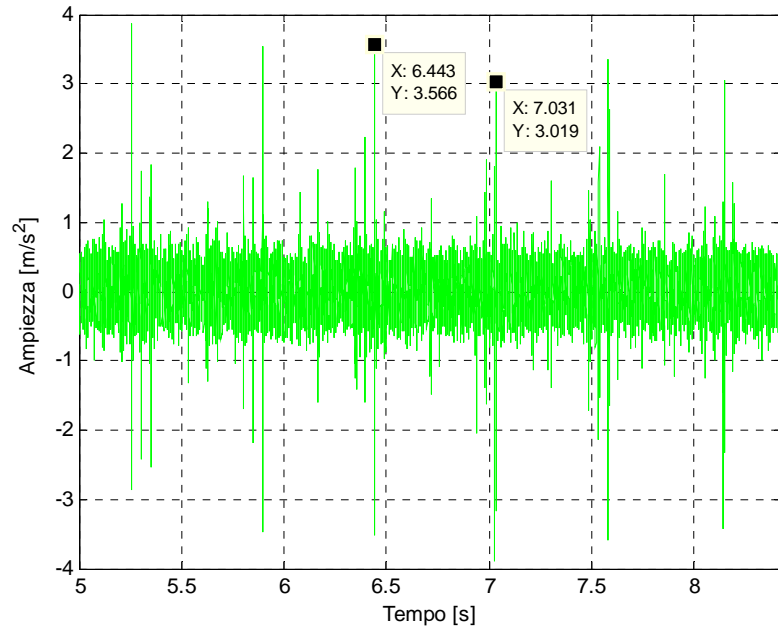


Figura 6.100: MED input del cuscinetto con difetto sull'elemento volante per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

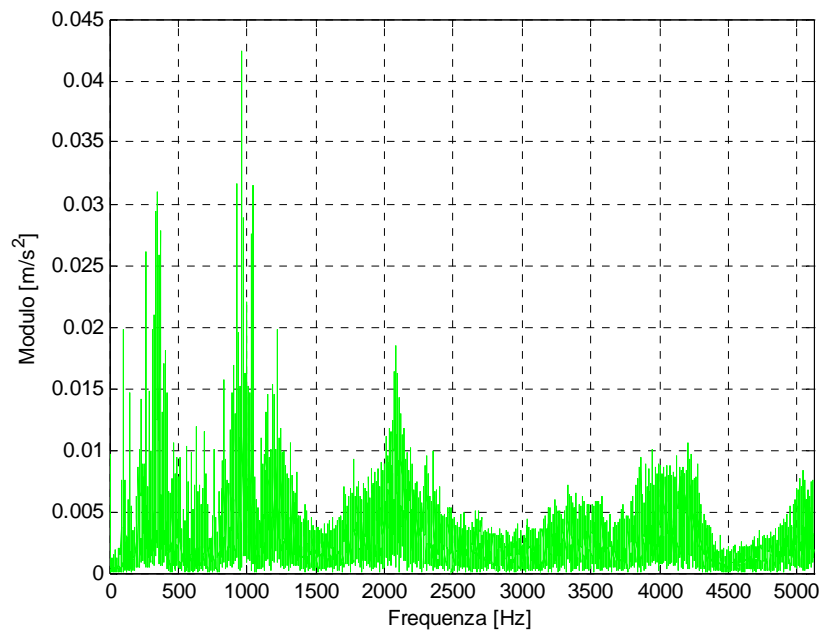


Figura 6.101: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sull'elemento volante per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

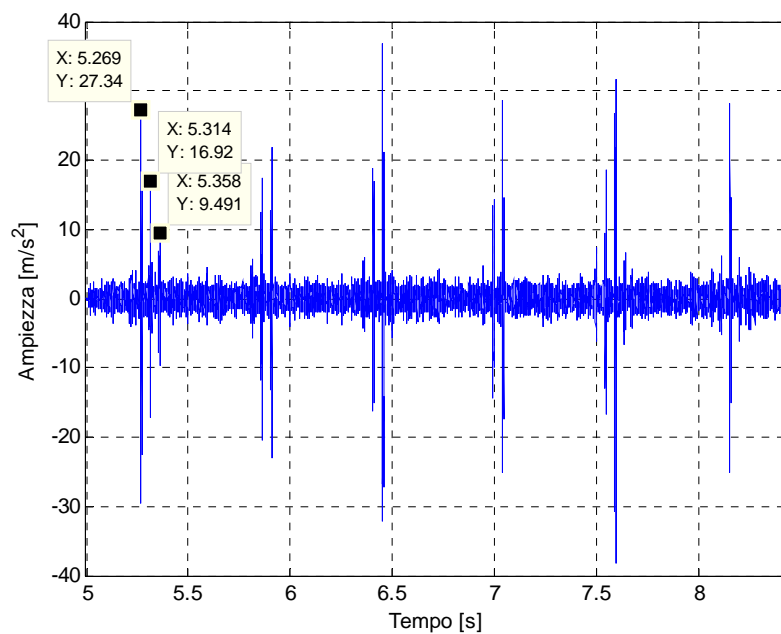


Figura 6.102: MED output del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

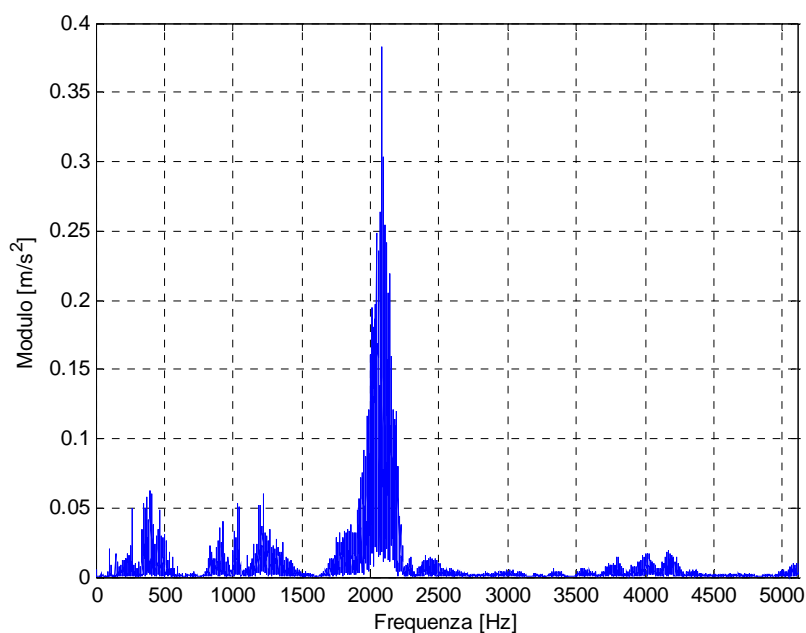


Figura 6.103: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

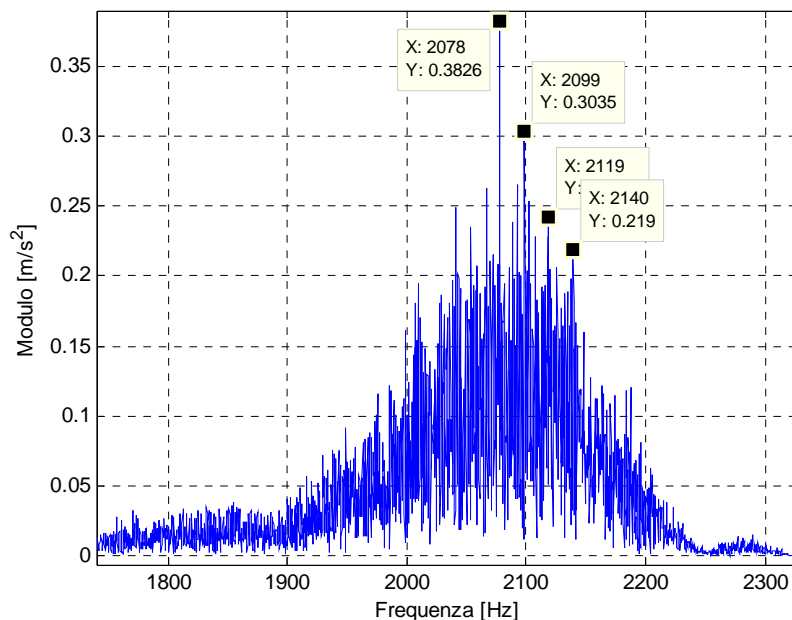


Figura 6.104: dettaglio del modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

Infine, si applica l'analisi sul segnale ottenuto dall'accelerometro orizzontale, per l'acquisizione realizzata a 2500 rpm ed a 4 Nm.

Il segnale originale, riportato in figura 6.105, presenta già dei picchi evidenti legati sia alla rotazione della gabbia sia al difetto sul rullo, in quanto è affetto da una modesta quantità di rumore. L'applicazione della tecnica consente comunque di ottenere un segnale ancora più pulito (vedi figura 6.107), in cui i picchi risultano amplificati. In particolare si riconoscono le componenti legate al danneggiamento, distanziate di $T_{roller} = 0.01$ s, pari all'inverso della frequenza caratteristica del difetto.

Dall'analisi degli spettri dei due segnali in ingresso ed uscita della tecnica, si nota che in entrambi sono riconoscibili delle componenti, distanziate di un intervallo pari a $2xBSF = 101$ Hz, che evidenziano la presenza del danneggiamento sul cuscinetto in esame. Si osserva, tuttavia, che queste componenti dominano lo spettro dell'output della tecnica (vedi figura 6.108), in quanto risultano essere le più importanti, mentre nello spettro del segnale di input erano meno evidenti e non rappresentavano le componenti principali (vedi figura 6.106).

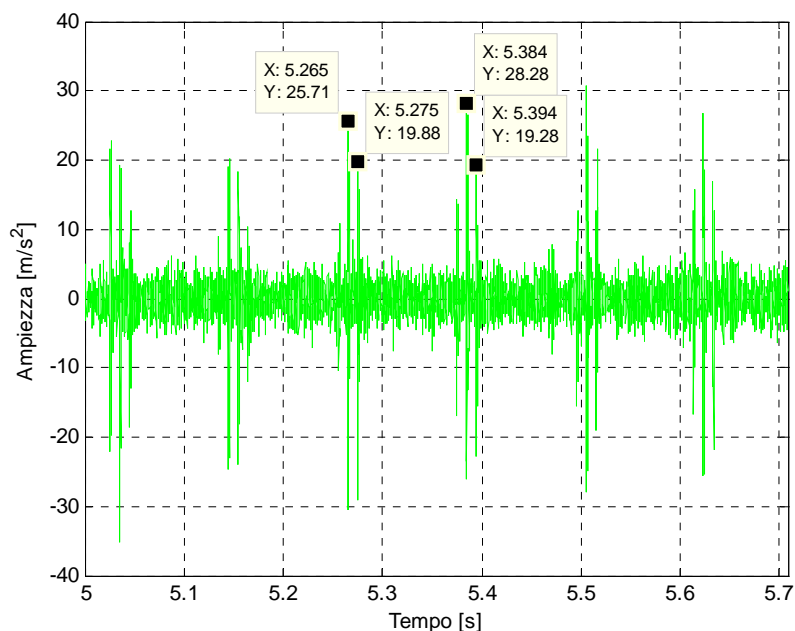


Figura 6.105: MED input del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

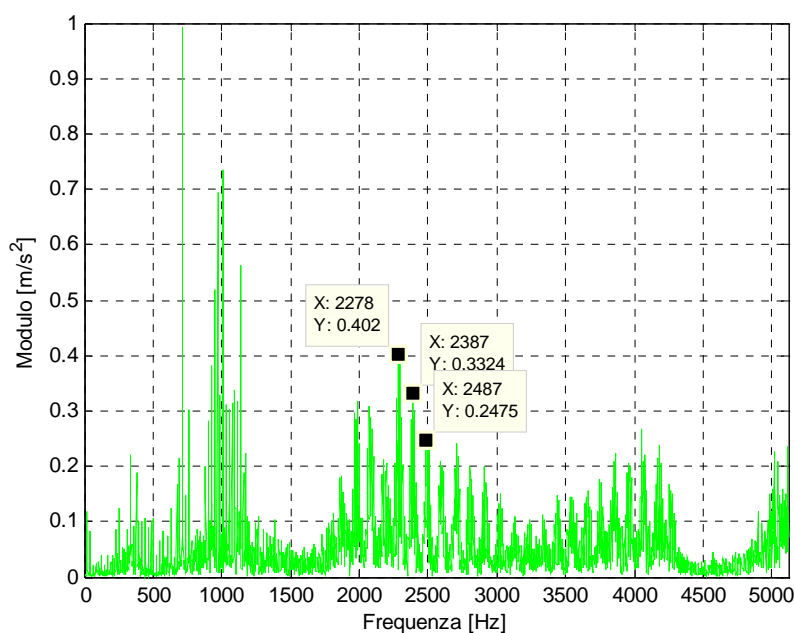


Figura 6.106: modulo dello spettro del MED input del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

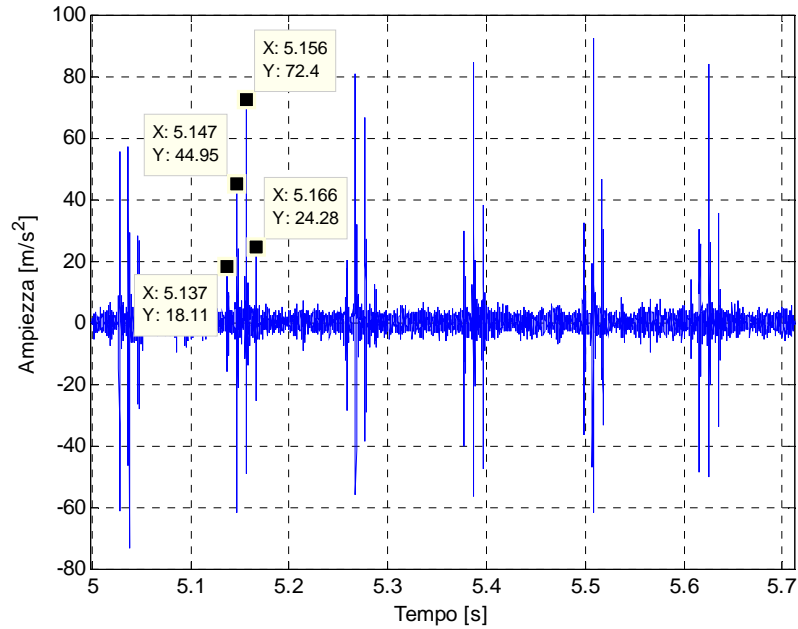


Figura 6.107: MED output del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

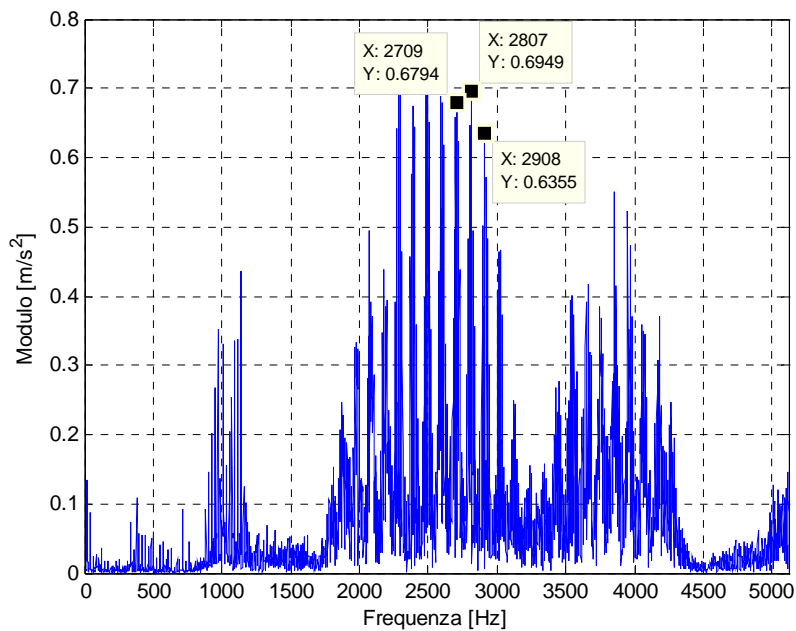


Figura 6.108: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sull'elemento volvente per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

6.2.11 Difetto sulla gabbia senza carico applicato

Come già si deduce dall'assenza in letteratura scientifica di una completa trattazione del difetto sulla gabbia, si osserva che esso risulta difficilmente identificabile rispetto agli altri visti in precedenza, in modo particolare per quanto riguarda le acquisizioni ottenute senza l'applicazione del carico al cuscinetto test.

L'accelerometro verticale, meno sensibile, in generale, alla presenza dei danneggiamenti, in questo particolare caso non è in grado di identificare alcun impulso correlabile al difetto sulla gabbia (vedi figura 4.1).

Per quanto riguarda l'accelerometro orizzontale, la maggior parte dei segnali acquisiti, processati mediante la MED, non permettono l'identificazione di picchi riconducibili alla presenza dei due intagli realizzati sugli anelli esterni della gabbia.

L'efficacia della MED aumenta sensibilmente se si analizzano i segnali dell'accelerometro orizzontale acquisiti nelle condizioni più gravose, ossia quelli che presentano una velocità del motore pari a 2500 rpm ed una coppia dell'utilizzatore pari a 6 Nm ed a 8 Nm. Si considera, in particolare, il segnale ottenuto dall'acquisizione a 2500 rpm ed a 6 Nm, di lunghezza pari a 20 periodi di rotazione dell'albero.

Nel grafico che mostra l'output della MED (vedi figura 6.110), si possono identificare due famiglie di picchi. La prima è composta da 20 impulsi, evidenziati anche nell'analisi dei cuscinetti sani, distanziati di una quantità pari all'inverso della frequenza di rotazione dell'albero ($f_s = 20.83 \text{ Hz}$). Per comprendere correttamente cosa rappresenta il secondo gruppo di picchi, si effettua un'analogia con l'andamento degli output della MED quando si analizza un cuscinetto che presenta un difetto sulla pista interna: in questo caso si ha una serie di picchi distanziati di un intervallo temporale pari all'inverso della frequenza di rotazione dell'albero, affiancati da degli impulsi, di entità minore, separati di una quantità pari all'inverso della frequenza del difetto ($BPFI$). Anche nel caso della gabbia si hanno i vari picchi, associati alla rotazione dell'albero, affiancati da quelli legati al difetto sulla gabbia. Siccome quest'ultimo danneggiamento presenta un periodo 2.5 volte superiore a quello della rotazione dell'albero, i picchi sono distanziati dai loro riferimenti di una quantità superiore al singolo periodo di rotazione. Per questo motivo, un picco associato alla rotazione deve essere messo a confronto non con l'impulso

immediatamente vicino, ma con quello che dista una quantità pari all'inverso della frequenza del difetto sulla gabbia.

In figura 6.110 è messo in evidenza un picco di riferimento (indicato con **a** nel grafico), il relativo picco distanziato del periodo della rotazione $T_s = 0.048 s$ (indicato con **b**) e quello distanziato di $T_{cage} = 0.122 s$ (indicato con **c**). In figura 6.111 sono evidenziati i picchi distanziati di un intervallo temporale pari all'inverso della frequenza caratteristica del difetto sulla gabbia.

L'individuazione del difetto nel caso in cui sia applicato solamente il precarico, è fortemente legata alle condizioni di funzionamento del banco prova.

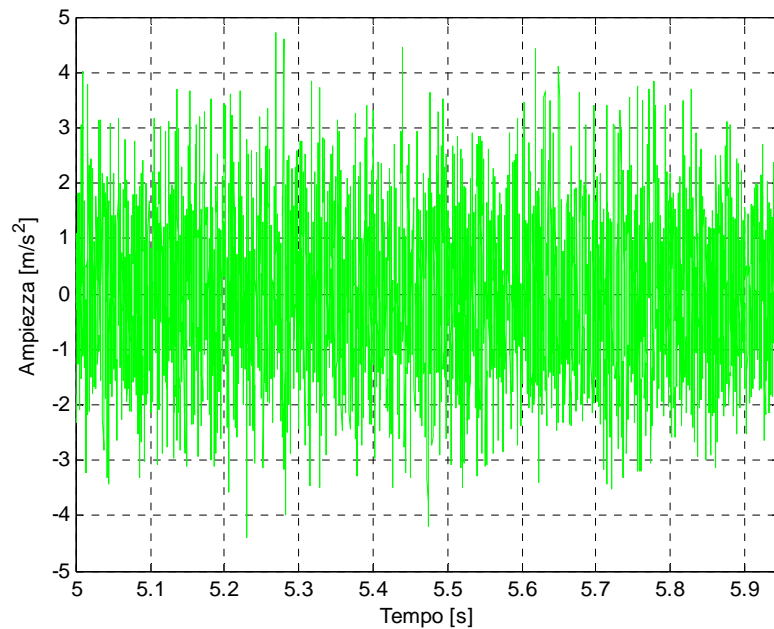


Figura 6.109: MED input del cuscinetto con difetto sulla gabbia per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 6 Nm.

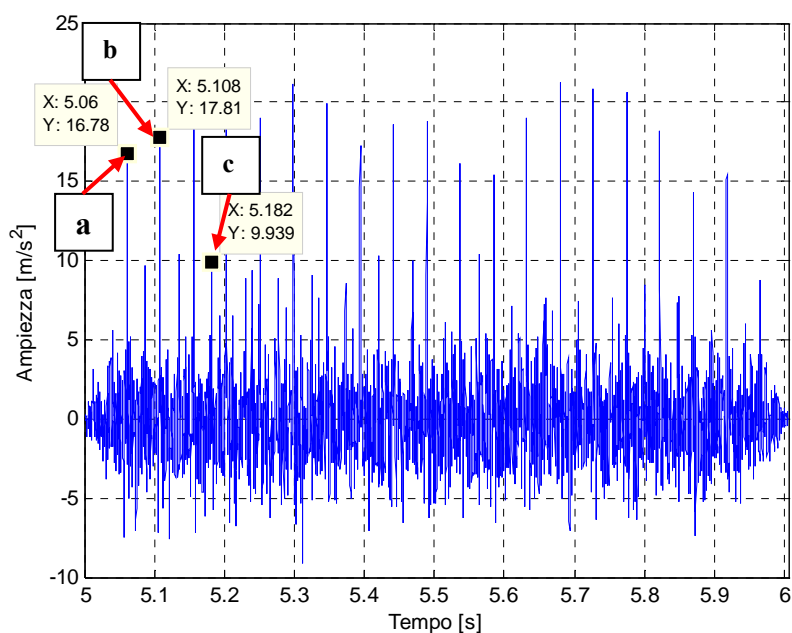


Figura 6.110: MED output del cuscinetto con difetto sulla gabbia per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 6 Nm.

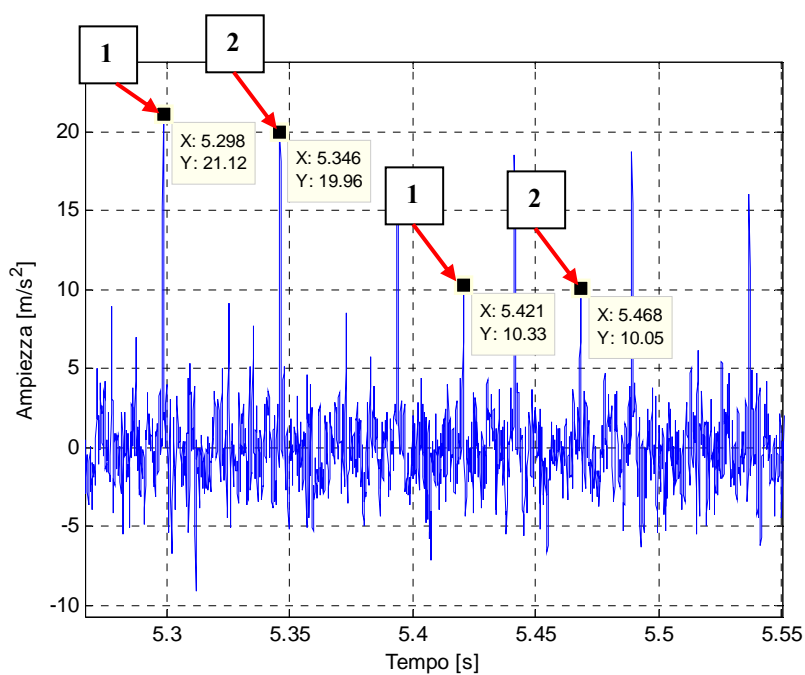


Figura 6.111: dettaglio del MED output del cuscinetto con difetto sulla gabbia per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 6 Nm.

6.2.12 Difetto sulla gabbia con carico applicato

Per trovare conferma all'efficienza della MED, si analizzano i segnali ottenuti con l'applicazione del carico sul cuscinetto test che presenta il difetto sulla gabbia.

L'accelerometro verticale non è sensibile alla presenza degli intagli, quindi l'output della MED non evidenzia i picchi distanziati di una quantità pari al periodo del difetto sulla gabbia.

L'analisi dei segnali dell'accelerometro orizzontale, invece, permette di diagnosticare il difetto qualsiasi siano le condizioni di funzionamento del sistema. I picchi non sono evidenti come quelli che si ottengono esaminando le altre tre tipologie di difetto, per cui si riportano i grafici più significativi, ottenuti con diverse acquisizioni in modo da mostrare l'efficacia della MED. In particolare si considerano due acquisizioni: quella a 1000 rpm ed a 6 Nm e quella a 2500 rpm ed a 4 Nm.

Come si può notare dai grafici riportati (vedi figura 6.112, figura 6.113, figura 6.114 e figura 6.115), i risultati ottenuti sono analoghi a quelli mostrati nel paragrafo precedente. L'output della MED evidenzia un numero di picchi (indicati con **b**) pari al numero di periodi di rotazione scelto (20), equispaziati del periodo di rotazione, e degli impulsi (indicati con **c**) che, confrontati con il picco di riferimento (indicato con **a**), danno un intervallo temporale pari all'inverso della frequenza del difetto sulla gabbia. In particolare per il primo segnale si ha $T_{cage} = 0.294$ s e per la seconda $T_{cage} = 0.127$ s.

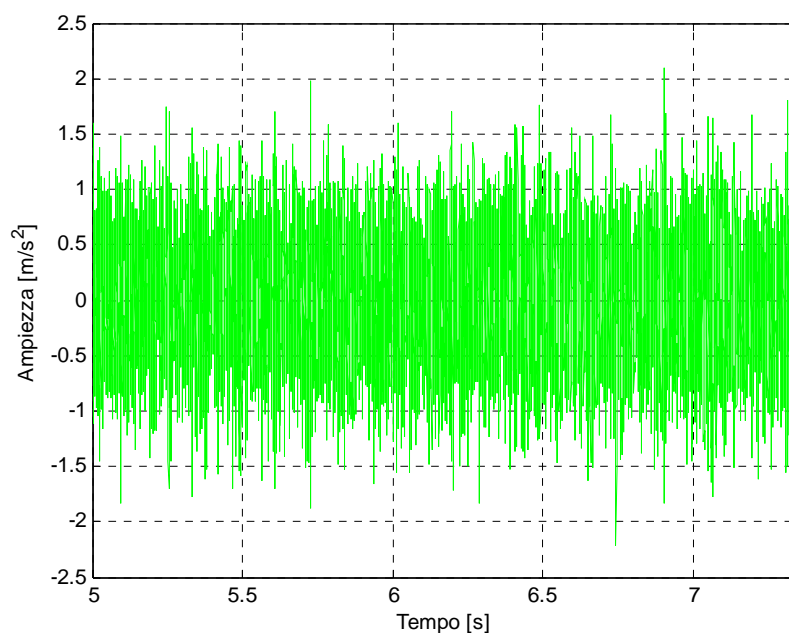


Figura 6.112: MED input del cuscinetto con difetto sulla gabbia per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1000 rpm e 6 Nm con carico applicato.

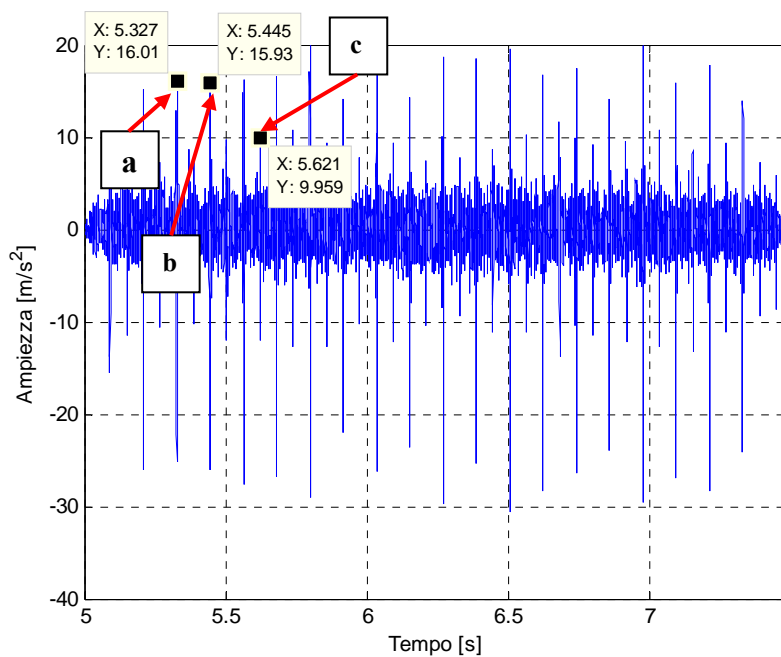


Figura 6.113: MED output del cuscinetto con difetto sulla gabbia per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 1000 rpm e 6 Nm con carico applicato.

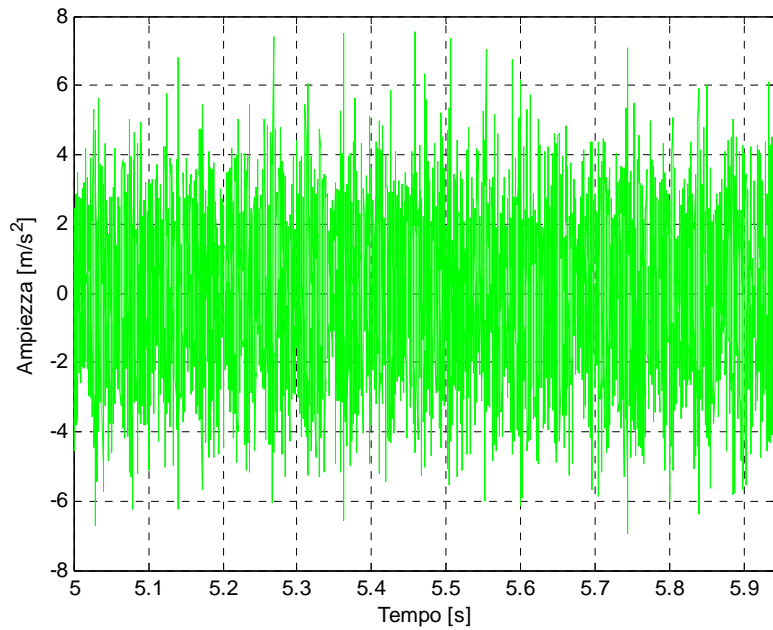


Figura 6.114: MED input del cuscinetto con difetto sulla gabbia per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

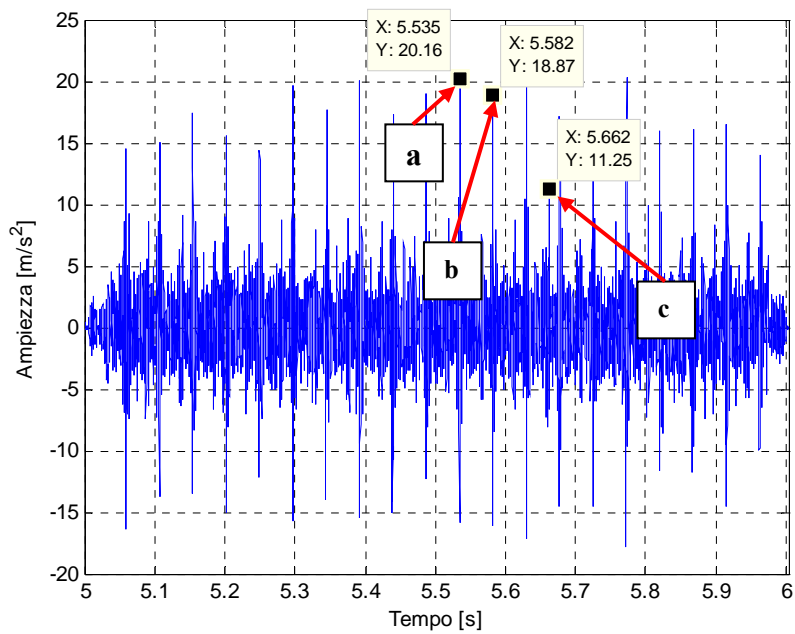


Figura 6.115: MED output del cuscinetto con difetto sulla gabbia per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

Contrariamente a quanto avviene nell'analisi degli altri tre difetti, l'applicazione della trasformata di Fourier all'output fornito dalla tecnica non permette di visualizzare dei picchi caratteristici del difetto in esame.

Come esempio, si considera l'acquisizione a 2500 rpm ed a 4 Nm, di lunghezza pari a 20 periodi di rotazione dell'albero.

Il modulo dello spettro calcolato dalla FFT, mostra dei picchi distanziati di una quantità pari alla frequenza di rotazione dell'albero $f_s = 20.7 \text{ Hz}$ (vedi figura 6.116). Effettivamente le componenti principali presenti nell'output della MED sono distanziate di questa quantità, per cui la trasformata mette in risalto la ripetitività di questi picchi, ma non è in grado di individuare i picchi distanziati di una quantità pari alla FTF , poiché non è in grado di correlare un picco non al suo successivo ma a quello distaccato di tale quantità.

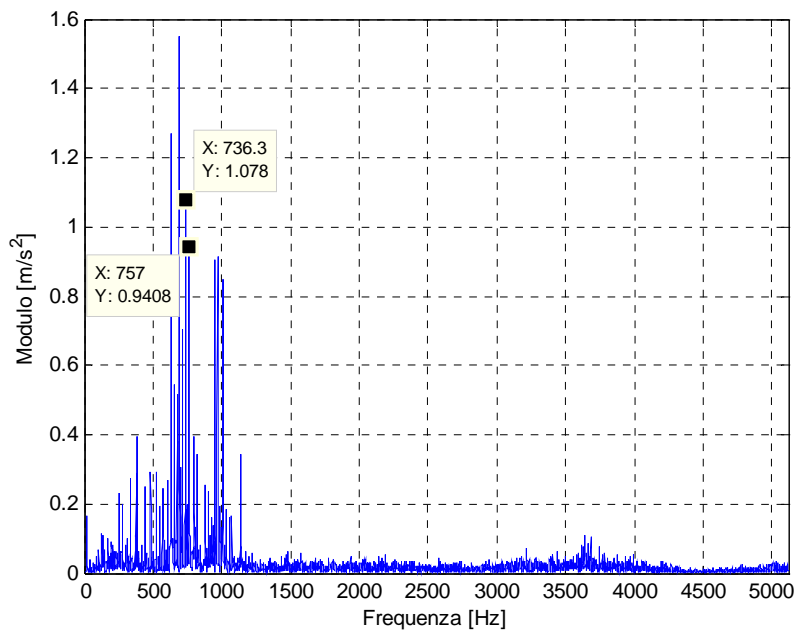


Figura 6.116: modulo dello spettro del MED output del cuscinetto con difetto sulla gabbia per un'acquisizione dell'accelerometro orizzontale a 2500 rpm e 4 Nm con carico applicato.

6.2.13 Riassunto risultati

In tabella 6.7 si riporta il confronto tra le frequenze caratteristiche delle quattro tipologie di difetti realizzati ed i relativi periodi, calcolati analiticamente ed individuati a seguito dell'applicazione della tecnica. Le frequenze sono valutate dall'analisi grafica degli spettri dei segnali di output della MED, mentre i

periodi caratteristici sono calcolati come distanza tra due picchi successivi nel segnale fornito dalla tecnica nel dominio del tempo.

Tabella 6.7: confronto tra le frequenze ed i periodi teorici e quelli individuati dalla MED.

Difetto	Acquisizione	Accelerometro	Carico	$f_{teorica}$ [Hz]	f_{MED} [Hz]	$T_{teorico}$ [s]	T_{MED} [s]
Pista interna	500 rpm 4 Nm	verticale	off	32.38	29	0.031	0.027
		orizzontale	on		33		0.030
	1500 rpm 4 Nm	orizzontale	off	97.15	99	0.010	0.010
		verticale	on		98		0.010
	2500 rpm 4 Nm	verticale	off	161.91	165	0.006	0.006
		orizzontale	on		163		0.006
Pista esterna	500 rpm 4 Nm	orizzontale	off	21.78	23	0.046	0.044
		orizzontale	on		23		0.043
	1500 rpm 4 Nm	orizzontale	off	65.35	66	0.015	0.015
		orizzontale	on		66		0.015
	2500 rpm 4 Nm	verticale	off	108.92	110	0.009	0.009
		orizzontale	on		110		0.009
Elemento volvente	500 rpm 4 Nm	orizzontale	off	20.48	22	0.049	0.046
		orizzontale	on		21		0.044
	2500 rpm 4 Nm	orizzontale	off	102.41	100	0.010	0.010
		orizzontale	on		101		0.010
Gabbia	2500 rpm 6 Nm	orizzontale	off	-	8.13	0.119	0.122
	1000 rpm 6 Nm	orizzontale	on	-	3.4	0.298	0.294
	2500 rpm 4 Nm	orizzontale	on	-	7.87	0.119	0.127

Osservando i risultati ottenuti dall'applicazione della MED ai segnali sperimentali, si conclude che le frequenze ed i rispettivi periodi sono prossimi ai valori ottenuti tramite le formule teoriche, a dimostrazione dell'efficacia della tecnica.

Capitolo 7

Conclusioni e sviluppi futuri

L'analisi dei risultati presentati nella capitolo 6.1 permette di affermare che le tecniche tradizionali, solitamente applicate ai segnali di vibrazione dei cuscinetti, non consentono di diagnosticare in modo preciso ed affidabile la presenza di un eventuale danneggiamento.

Gli indicatori statistici subiscono un aumento significativo passando dall'analisi del cuscinetto sano a quella del cuscinetto danneggiato, ma non permettono di identificare la tipologia del difetto.

I risultati riportati nella capitolo 6.2, dimostrano che l'algoritmo MED è in grado di diagnosticare in modo preciso ed accurato, nel dominio del tempo, la presenza di qualsiasi tipologia di difetto sul cuscinetto in esame.

Innanzitutto, dalle analisi effettuate sui segnali dei due accelerometri, si conclude che il sensore orizzontale consente di ottenere dati con un migliore contenuto informativo, permettendo di individuare la presenza del difetto anche in condizioni di funzionamento del sistema in cui l'accelerometro verticale risulta insufficiente. In particolare, questo trova conferma nel caso di danneggiamento sulla pista esterna con carico applicato ed in tutte le acquisizioni realizzate sul cuscinetto presentante il difetto sulla gabbia, per valori di velocità del motore e coppia dell'utilizzatore maggiori rispettivamente di 500 rpm e 6 Nm. L'efficacia di questo canale è dovuta essenzialmente alla propria disposizione: infatti esso è posizionato nella stessa direzione di applicazione del carico. Ciò permette di cogliere meglio la vibrazione dovuta all'eccitazione del difetto: il segnale che ne deriva risulta maggiormente utile ai fini dell'analisi effettuata.

Inoltre, si nota che all'aumentare della velocità di rotazione dell'albero, la MED permette di ottenere picchi più evidenti a causa della maggiore energia associata al difetto, mentre la variazione della coppia non influisce significativamente sui risultati ottenuti.

In tabella 7.1 sono riportati i casi presi in esame, mettendo in evidenza quelli in cui la tecnica è in grado di diagnosticare i difetti (indicati in tabella con la spunta verde) e quelli in cui non risulta efficace (indicati in tabella con la x rossa).

Osservando i risultati ottenuti dall'applicazione della MED ai segnali sperimentali, si conclude che la tecnica permette in modo efficace di identificare e caratterizzare il difetto nel dominio del tempo per quanto concerne il danno sulla pista interna, sulla pista esterna e sull'elemento volvente.

In particolare, per quanto riguarda il difetto sulla pista esterna, l'algoritmo è in grado di diagnosticare la presenza del danneggiamento soltanto nel caso in cui quest'ultimo sia collocato in corrispondenza del punto di applicazione della forza. Ciò è dovuto all'incapacità da parte del sistema di eccitare in modo adeguato, e quindi rendere visibile, il difetto quando non è orientato a 0° rispetto al carico e non ad un'inefficienza diagnostica della MED.

L'individuazione del difetto sulla gabbia risulta più difficoltosa rispetto agli altri tipi di danneggiamenti, in quanto è possibile solo nel caso in cui il sistema sia fortemente eccitato da un'elevata velocità del motore o dalla presenza del carico.

Nel dominio delle frequenze, per ciascuno dei casi analizzati nel capitolo precedente, ad eccezione del danneggiamento provocato sulla gabbia, è possibile diagnosticare la presenza del difetto. Nei moduli degli spettri ottenuti trasformando il segnale in uscita dalla tecnica, si osservano innanzitutto delle bande ad elevata energia, centrate alle alte frequenze, che nello spettro del segnale originale sono collocate a frequenze minori. Questo fenomeno può essere essenzialmente ricondotto a due motivazioni. La prima consiste nella capacità della MED di mettere in risalto fenomeni transitori, che si contraddistinguono per essere caratterizzati da frequenze elevate. La seconda riguarda la presenza dello *slippage*, rappresentato nel modulo dello spettro di un segnale, relativo a vibrazioni di cuscinetti volventi danneggiati, da bande collocate alle alte frequenze. Inoltre le componenti principali di queste bande in frequenza sono equispaziate di una quantità pari alla frequenza caratteristica del danneggiamento preso in esame.

Per quanto riguarda il difetto sulla gabbia, la trasformata di Fourier non risulta efficace poiché identifica una distanza tra due componenti nel dominio delle frequenze pari all'inverso di un intervallo temporale diverso da quello di interesse.

Tabella 7.1: riassunto dei risultati ottenuti dall'applicazione della tecnica.

Difetto	Acquisizione	Accelerometro	Carico	Dominio delle frequenze	Dominio del tempo
Pista interna	500 rpm 4 Nm	verticale	off	✓	✓
		orizzontale	on	✓	✓
	1500 rpm 4 Nm	orizzontale	off	✓	✓
		verticale	on	✓	✓
	2500 rpm 4 Nm	verticale	off	✓	✓
		orizzontale	on	✓	✓
1500 rpm 6 Nm	verticale	on	✓	✓	
Pista esterna 0°	500 rpm 4 Nm	orizzontale	off	✓	✓
		orizzontale	on	✓	✓
	1500 rpm 4 Nm	orizzontale	off	✓	✓
		orizzontale	on	✓	✓
	2500 rpm 4 Nm	verticale	off	✓	✓
		orizzontale	on	✓	✓
Pista esterna 90°	1500 rpm 4 Nm	orizzontale	off	✗	✗
Pista esterna 180°	1500 rpm 4 Nm	orizzontale	off	✗	✗
Elemento volante	500 rpm 4 Nm	orizzontale	off	✓	✓
		orizzontale	on	✓	✓
	2500 rpm 4 Nm	orizzontale	off	✓	✓
		orizzontale	on	✓	✓
Gabbia	2500 rpm 6 Nm	orizzontale	off	✗	✓
	1000 rpm 6 Nm	orizzontale	on	✗	✓
	2500 rpm 4 Nm	orizzontale	on	✗	✓

Si osserva infine che, in alcuni casi esaminati, l'identificazione del difetto nel dominio delle frequenze non risulta agevole, in quanto, in primo luogo, negli spettri appaiono molte componenti legate a fenomeni diversi dal danneggiamento ed, in secondo luogo, la risoluzione dello spettro è notevolmente influenzata dalla scelta della lunghezza del segnale che si utilizza come ingresso per la MED. Per questo motivo, sarebbe opportuno sviluppare modifiche od ottimizzazioni volte al miglioramento dello studio del segnale in uscita dalla tecnica nel dominio delle frequenze.

Inoltre, poiché questo lavoro di tesi è stato concentrato sullo sviluppo dell'algoritmo MED e sulla sua applicazione per l'identificazione e la caratterizzazione del difetto, sarebbe interessante impiegare questa tecnica anche per la valutazione dell'entità di danneggiamenti progressivi sui cuscinetti volventi.

Un ulteriore studio potrebbe essere mirato alla diagnostica del difetto sulla gabbia che risulta di difficile identificazione, se non in casi particolari di funzionamento. Poiché la letteratura non presenta dei risultati riguardo a questo guasto, sarebbe opportuno realizzare delle prove sperimentali su diverse tipologie di danneggiamento sulla gabbia. Oltre a quella proposta in questo lavoro, ad esempio, si potrebbe analizzare il caso in cui la sede di un elemento volvente sia lasca oppure addirittura inesistente.

Allegato A

~ Calibration Certificate ~

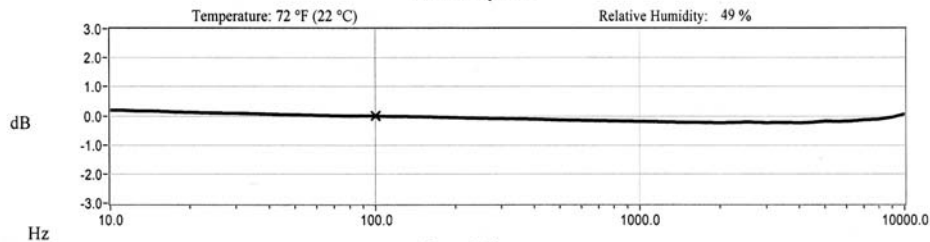
Per ISO 18063-21

Model Number: 352C33
 Serial Number: 112026
 Description: ICP® Accelerometer Method: Back-to-Back Comparison (AT401-3)
 Manufacturer: PCB

Calibration Data

Sensitivity @ 100.0 Hz **100.5 mV/g** Output Bias 11.2 VDC
(10.25 mV/m/s²) Transverse Sensitivity 1.9 %
 Discharge Time Constant 2.2 seconds Resonant Frequency 58.0 kHz

Sensitivity Plot



Data Points

Frequency (Hz)	Dev. (%)	Frequency (Hz)	Dev. (%)	Frequency (Hz)	Dev. (%)
10.0	2.2	300.0	-1.1	7000.0	-1.6
15.0	1.7	500.0	-1.7	10000.0	0.7
30.0	0.9	1000.0	-2.3		
50.0	0.4	3000.0	-2.7		
REF. FREQ:	0.0	5000.0	-2.1		

Mounting Surface: Stainless Steel w/Silicone Grease Coating Fastener: Stud Mount Fixture Orientation: Vertical

Accelerometer Level (rms): 10.0 g (98.1 m/s²)

*The acceleration level may be limited by shaker displacement at low frequencies. If the listed level cannot be obtained, the calibration system uses the following formula to set the vibration amplitude: Acceleration Level (g) = 0.010 x (freq)².

†The gravitational constant used for calculations by the calibration system is: 1 g = 9.80665 m/s².

Condition of Unit

As Found: n/a
 As Left: New Unit, In Tolerance

Notes

1. Calibration is NIST Traceable thru Project 822/277342 and PTB Traceable thru Project 1254.
2. This certificate shall not be reproduced, except in full, without written approval from PCB Piezotronics, Inc.
3. Calibration is performed in compliance with ISO 9001, ISO 10012-1, ANSI/NCSL Z540-1-1994 and ISO 17025.
4. See Manufacturer's Specification Sheet for a detailed listing of performance specifications.
5. Measurement uncertainty (95% confidence level with coverage factor of 2) for frequency ranges tested during calibration are as follows: 5-9 Hz; +/- 2.0%, 10-99 Hz; +/- 1.5%, 100-1999 Hz; +/- 1.0%, 2-10 kHz; +/- 2.5%.

Technician: Tammy Haskins Date: 03/19/10



ACCREDITED
 CALIBRATION CERT #1862.02

PCB PIEZOTRONICS™
 VIBRATION DIVISION

Headquarters: 3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043
 Calibration Performed at: 10869 Highway 903, Halifax, NC 27839
 TEL: 888-684-0013 · FAX: 716-685-3886 · www.pcb.com

PAGE 1 of 1

cal48 - 3351864967.47



~ Calibration Certificate ~

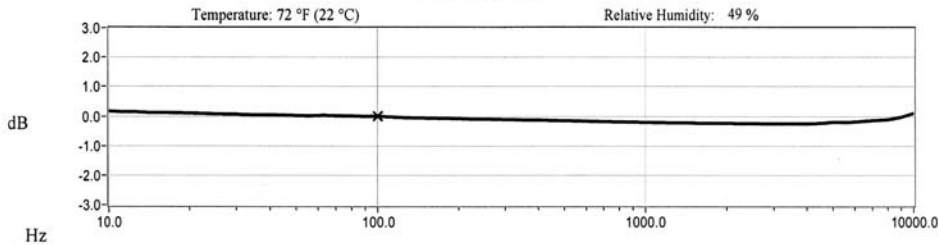
Per ISO 16063-21

Model Number: 352C33
Serial Number: 112027
Description: ICP® Accelerometer **Method:** Back-to-Back Comparison (AT401-3)
Manufacturer: PCB

Calibration Data

Sensitivity @ 100.0 Hz	100.1 mV/g	Output Bias	11.0 VDC
	(10.20 mV/m/s²)	Transverse Sensitivity	2.4 %
Discharge Time Constant	1.7 seconds	Resonant Frequency	57.0 kHz

Sensitivity Plot



Data Points

Frequency (Hz)	Dev. (%)	Frequency (Hz)	Dev. (%)	Frequency (Hz)	Dev. (%)
10.0	1.9	300.0	-1.3	7000.0	-1.7
15.0	1.3	500.0	-1.8	10000.0	1.1
30.0	0.7	1000.0	-2.4		
50.0	0.2	3000.0	-3.0		
REF. FREQ.	0.0	5000.0	-2.3		

Mounting Surface: Stainless Steel w/Silicone Grease Coating Fastener: Stud Mount Fixture Orientation: Vertical
 Acceleration Level (rms): 10.0 g (98.1 m/s²)
 *The acceleration level may be limited by shaker displacement at low frequencies. If the listed level cannot be obtained, the calibration system uses the following formula to set the vibration amplitude: Acceleration Level (g) = 0.010 x (freq)².
 *The gravitational constant used for calculations by the calibration system is: 1 g = 9.80665 m/s².

Condition of Unit

As Found: n/a
As Left: New Unit, In Tolerance

Notes

1. Calibration is NIST Traceable thru Project 822/277342 and PTB Traceable thru Project 1254.
2. This certificate shall not be reproduced, except in full, without written approval from PCB Piezotronics, Inc.
3. Calibration is performed in compliance with ISO 9001, ISO 10012-1, ANSI/NCSL Z540-1-1994 and ISO 17025.
4. See Manufacturer's Specification Sheet for a detailed listing of performance specifications.
5. Measurement uncertainty (95% confidence level with coverage factor of 2) for frequency ranges tested during calibration are as follows: 5-9 Hz; +/- 2.0%, 10-99 Hz; +/- 1.5%, 100-1999 Hz; +/- 1.0%, 2-10 kHz; +/- 2.5%.

Technician: Tammy Haskins **Date:** 03/19/10



Headquarters: 3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043
 Calibration Performed at: 10869 Highway 903, Halifax, NC 27839
 TEL: 888-684-0013 FAX: 716-685-3886 www.pcb.com

cal48 - 3351865241.52



Nomenclatura e lista degli acronimi

$BPFI$	frequenza caratteristica del difetto sulla pista interna
f_s	frequenza di rotazione dell'albero
z	numero di elementi volventi
d	diametro elementi volventi
D	diametro di pitch o diametro medio del cuscinetto
α	angolo di contatto tra elementi volventi e piste
$BPFO$	frequenza caratteristica del difetto sulla pista esterna
BSF	frequenza di rotazione dell'elemento volvente
FTF	frequenza di rotazione della gabbia
RMS	momento statistico non centrale del secondo ordine
K	momento statistico centrale del quarto ordine adimensionale
CF	rapporto tra il livello di picco ed il valore efficace del segnale
PP	differenza tra valore massimo e valore minimo del segnale
N_p	lunghezza in numero di punti del segnale della FFT
t_p	risoluzione temporale del segnale della FFT
T_p	durata del segnale della FFT e della STFT
$f_{Nyquist}$	frequenza di Nyquist
x_n	n-esimo punto del segnale della FFT nel tempo
X_k	k-esima componente dello spettro del segnale della FFT
$s(t)$	segnale filtrato dell'envelope analysis
$s_h(t)$	parte immaginaria di $s(t)$
$s_a(t)$	segnale analitico dell'envelope analysis e della trasformata di Hilbert
$f(t)$	segnale ideale continuo nel tempo della STFT e della EMD
f_c	frequenza di campionamento
n	numero di finestre della STFT
T_i	durata della i-esima finestra della STFT
$w(t-\tau)$	finestra della STFT
τ	shift temporale tra le finestre della STFT
$x(t)$	segnale monocomponente della trasformata di Hilbert
t'	sfasamento temporale
P	valore principale di Cauchy
$Y(t)$	parte immaginaria del segnale monocomponente della trasformata di Hilbert

$a(t)$	modulo del segnale analitico della trasformata di Hilbert
$\theta(t)$	fase del segnale analitico della trasformata di Hilbert
f_{is}	frequenza istantanea del segnale analitico della trasformata di Hilbert
$H(f_{is}, t)$	spettro di Hilbert Huang
$x(n)$	segnale di input della MED
$z(n)$	reflectivity, componente del segnale legata al comportamento della struttura
$w(n)$	componente del segnale legata alla sorgente che eccita il sistema
$\eta(n)$	componente del segnale casuale legata al rumore
$f(n)$	filtro della MED
$y(n)$	segnale di output della MED
M	lunghezza del filtro della MED
T	lunghezza del segnale di input della MED
N	lunghezza del segnale di output della MED
$V(y)$	norma Varimax
R_{xx}	matrice di Toeplitz dell'autocorrelazione di $x(n)$
g	cross correlazione tra $x(n)$ e $y(n)$ ³
f_0	filtro iniziale della MED
W	potenza dei motori elettrici
R	resistenza elettrica dei motori elettrici
i	corrente elettrica
C'	coppia dei motori elettrici
ω	velocità angolare
τ	rapporto di trasmissione
ω_m	velocità angolare del motore
ω_u	velocità angolare dell'utilizzatore
D_i	diametro i-esimo dell'albero ($i=1, 2, 3$)
D_b	diametro esterno delle boccole e diametro interno dei paraoli
D_i	diametro interno cuscinetti
D_e	diametro esterno cuscinetti
b	larghezza cuscinetti
C	coefficiente di carico dinamico dei cuscinetti
C_0	coefficiente di carico statico dei cuscinetti
P_u	carico limite di fatica dei cuscinetti
v_{rif}	velocità di riferimento dei cuscinetti
v_{lim}	velocità limite dei cuscinetti

m	massa
D_a	diametro esterno della sede dei supporti
C_a	larghezza della sede dei supporti
A	larghezza dei supporti
L	lunghezza dei supporti
H	altezza dei supporti
Δl	allungamento della molla
R^2	coefficiente di correlazione
Δl_{pr}	allungamento della molla sottoposta al precarico
F_{pr}	forza di precarico applicata al cuscinetto test
Δl_{carico}	allungamento della molla sottoposta al carico
F	forza applicata al cuscinetto test
Δt	durata dell'acquisizione
$f_{c,err}$	frequenza di campionamento errata
T_s	periodo di rotazione dell'albero
n_1	primo cuscinetto sano
n_{1bis}	secondo cuscinetto sano
n_6	cuscinetto danneggiato sulla gabbia
T_{cage}	periodo del difetto sulla gabbia
n_2	cuscinetto danneggiato sulla pista interna
T_{inner}	periodo del difetto sulla pista interna
n_5	cuscinetto danneggiato sulla pista esterna
T_{outer}	periodo del difetto sulla pista esterna
n_4	cuscinetto danneggiato sull'elemento volvente
T_{roller}	periodo del difetto sull'elemento volvente
T_0	istante temporale iniziale dei periodi esaminati nella MED
$f_{teorica}$	frequenze calcolate con le formule teoriche
f_{MED}	frequenze ricavate dal modulo dello spettro dell'output della MED
$T_{teorico}$	periodi calcolati con le formule teoriche
T_{MED}	periodi ricavati dall'output della MED
MED	Minimum Entropy Deconvolution
SANC	Self Adaptive Noise Cancellation
BPFI	Ball Pass Frequency Inner race
BPFO	Ball Pass Frequency Outer race
BSF	Ball Spin Frequency

<i>FTF</i>	Fundamental Train Frequency
<i>STFT</i>	Short Time Fourier Transform
<i>RMS</i>	Root Mean Square
<i>K</i>	Kurtosis
<i>CF</i>	Crest Factor
<i>PP</i>	Peak-Peak
<i>DFT</i>	Discrete Fourier Transform
<i>FFT</i>	Fast Fourier Transform
<i>EMD</i>	Empirical Mode Decomposition
<i>IMF</i>	Intrinsic Mode Function
<i>RTD</i>	Resistance Temperature Detectors

Bibliografia

- [1] R. B. Randall, J. Antoni, and S. Chobsaard, "The relationship between spectral correlation and envelope analysis in the diagnostics of bearing faults and other cyclostationary machine signals," *Mechanical Systems and Signal Processing*, no. 15, 2001.
- [2] F. K. Choy, J. Zhou, M. J. Braun, and L. Wang, "Vibration monitoring and damage quantification of faulty ball bearings," *Journal of Tribology*, no. 127, 2005.
- [3] T. J. Harvey, R. J. K. Wood, and H. E. G. Powrie, "Electrostatic wear monitoring of rolling element bearings," *Wear*, no. 263, 2007.
- [4] D. E. Bently, P. Goldman, K. P. Dayton, B. G. Van Slyke, and J. J. Yu, "Rolling element bearing defect detection and diagnostics using displacement transducers," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, no. 124, 2002.
- [5] B. Trajin, J. Regnier, and J. Faucher, "Bearing fault indicator in induction machine using stator current spectral analysis," 2007.
- [6] R. Hao and F. Chu, "Morphological undecimated wavelet decomposition for fault diagnostics of rolling element bearings," *Journal of Sound and Vibration*, no. 320, 2009.
- [7] R. B. Randall and N. Sawalhi, "Simulating gear and bearing interactions in the presence of faults. Part I. The combined gear bearing dynamic model and the simulation of localised bearing faults," *Mechanical Systems and Signal Processing*, no. 22, 2008.
- [8] B. Zhang et al., "Rolling element bearing feature extraction and anomaly detection based in vibration monitoring," *16th Mediterranean Conference on Control and Automation*, 2008.
- [9] R. B. Randall, "Detection and diagnosis of incipient bearing failure in helicopter gearboxes," *Engineering Failure Analysis*, no. 11, 2004.
- [10] T. G. Habetler, J. R. Stack, and R. G. Harley, "Fault-signature modeling and detection of inner-race bearing faults," *IEEE Transactions on Industry Applications*, no. 42, 2006.
- [11] S. A. Tobias and R. N. Arnold, "The influence of dynamic imperfections on the vibration of rotating disks," 1957.

- [12] M. Portnoff, *Acoustic, speech and signal processing.*: IEEE transaction on, 1980.
- [13] G.M. Jenkins and D. G. Watts, "Spectral analysis and its application," 1969.
- [14] J. Schoukens, R. Pintelon, E. Van der Ouderaa, and J. Renneboog, "Survey of excitation for FFT signal analyzers," 2002.
- [15] M. Bedrosian, *A product theorem for Hilbert transform.*: Poceedings IEEE, 1963.
- [16] L. Cohen, *Time-frequency analysis*, Prentice Hall ed., 1995.
- [17] B. Boashash, *Estimating and interpreting the istantaneous frequency of a signal.*: Proceeding IEEE, 1992.
- [18] G. Gonzàlez, R. E. Badra, R. Medina, and J. Regidor, "Period estimation using minimum entropy deconvolution (MED)," *Signal Processing*, no. 41, 1995.
- [19] M. D. Sacchi, D. R. Velis, and A. H. Cominguez, "Minimun entropy deconvolution with frequency-domain constraints," *Geophysucs*, no. 59, 1994.
- [20] C. A. Cabrelli, "Minimum entropy deconvolution and simplicity: a noniterative algorithm," *Geophysics*, no. 50, 1984.
- [21] L. A. Pflug, R. L. Field M. K. Broadhead, "Minimum entropy filtering for improving nonstationary sonar signal classification," *IEEE*, 1996.
- [22] L. R. Higgins, R. K. Mobley, and R. Smith, *Maintenance Engineering Handbook*, 6th ed.: Mc Graw-Hill, 2002.

Siti internet

- www.skf.com
- www.pcb.com