



Università degli Studi di Ferrara

DOTTORATO DI RICERCA IN

"Scienze dell'Ingegneria"

CICLO XXIX

COORDINATORE Prof. Trillo Stefano

**DIAGNOSTICA VIBRAZIONALE DI RIDUTTORI
EPICICLOIDALI IN AMBIENTE INDUSTRIALE:
PROCEDURE, IMPLEMENTAZIONE E
VALIDAZIONE**

SETTORE SCIENTIFICO DISCIPLINARE ING-IND/13

DOTTORANDO:

FRANCESCO BERLATO

TUTORE:

PROF. GIORGIO DALPIAZ

Anno Accademico 2014 / 2016



Università degli Studi di Ferrara

DOTTORATO DI RICERCA IN
"Scienze dell'Ingegneria"

CICLO XXIX

COORDINATORE Prof. Trillo Stefano

**DIAGNOSTICA VIBRAZIONALE DI RIDUTTORI
EPICICLOIDALI IN AMBIENTE INDUSTRIALE:
PROCEDURE, IMPLEMENTAZIONE E
VALIDAZIONE**

SETTORE SCIENTIFICO DISCIPLINARE ING-IND/13

DOTTORANDO:
FRANCESCO BERLATO

Francesco Berlato
(Firma)

TUTORE:
PROF. GIORGIO DALPIAZ

Giorgio Dalpiaz
(Firma)

Anno Accademico 2014 / 2016



Sezioni

Dottorati di ricerca

Il tuo indirizzo e-mail

francesco.berlato@unife.it

Oggetto:

Dichiarazione di conformità della tesi di dottorato

Io sottoscritto Dott. (Cognome e Nome)

Berlato Francesco

Nato a:

Bologna

Provincia:

Bologna

Il giorno:

24/09/1986

Avendo frequentato il Dottorato di Ricerca in:

Scienze dell'Ingegneria

Ciclo di Dottorato

29

Titolo della tesi:

DIAGNOSTICA VIBRAZIONALE DI RIDUTTORI EPICICLOIDALI IN AMBIENTE INDUSTRIALE:
PROCEDURE, IMPLEMENTAZIONE E VALIDAZIONE

Titolo della tesi (traduzione):

VIBRATION DIAGNOSTICS OF PLANETARY GEARBOXES IN INDUSTRIAL ENVIRONMENT:
PROCEDURES, IMPLEMENTATION AND VALIDATION

Tutore: Prof. (Cognome e Nome)

Dalpiaz Giorgio

Settore Scientifico Disciplinare (S.S.D.)

ING-IND/13

Parole chiave della tesi (max 10):

DIAGNOSTICA VIBRAZIONALE RIDUTTORI EPICICLOIDALI VIBRATION DIAGNOSTICS
PLANETARY EPICYCLIC GEARBOX

Consapevole, dichiara

CONSAPEVOLE: (1) del fatto che in caso di dichiarazioni mendaci, oltre alle sanzioni previste dal codice penale e dalle Leggi speciali per l'ipotesi di falsità in atti ed uso di atti falsi, decade fin dall'inizio e senza necessità di alcuna formalità dai benefici conseguenti al provvedimento emanato sulla base di tali dichiarazioni; (2) dell'obbligo per l'Università di provvedere al deposito di legge delle tesi di dottorato al fine di assicurarne la conservazione e la consultabilità da parte di terzi; (3) della procedura adottata dall'Università di Ferrara ove si richiede che la tesi sia consegnata dal dottorando in 2 copie, di cui una in formato cartaceo e una in formato pdf non modificabile su idonei supporti (CD-ROM, DVD) secondo le istruzioni pubblicate sul sito : <http://www.unife.it/studenti/dottorato> alla voce ESAME FINALE – disposizioni e modulistica; (4) del fatto che l'Università, sulla base dei dati forniti, archiverà e renderà consultabile in rete il testo completo della tesi di dottorato di cui alla presente dichiarazione attraverso l'Archivio istituzionale ad accesso aperto "EPRINTS.unife.it" oltre che attraverso i Cataloghi delle Biblioteche Nazionali Centrali di Roma e Firenze. DICHIARO SOTTO LA MIA RESPONSABILITA': (1) che la copia

della tesi depositata presso l'Università di Ferrara in formato cartaceo è del tutto identica a quella presentata in formato elettronico (CD-ROM, DVD), a quelle da inviare ai Commissari di esame finale e alla copia che produrrà in seduta d'esame finale. Di conseguenza va esclusa qualsiasi responsabilità dell'Ateneo stesso per quanto riguarda eventuali errori, imprecisioni o omissioni nei contenuti della tesi; (2) di prendere atto che la tesi in formato cartaceo è l'unica alla quale farà riferimento l'Università per rilasciare, a mia richiesta, la dichiarazione di conformità di eventuali copie. PER ACCETTAZIONE DI QUANTO SOPRA RIPORTATO

Dichiarazione per embargo

36 mesi

Richiesta motivata embargo

5. Tutela della proprietà intellettuale

Liberatoria consultazione dati Eprints

Consapevole del fatto che attraverso l'Archivio istituzionale ad accesso aperto "EPRINTS.unife.it" saranno comunque accessibili i metadati relativi alla tesi (titolo, autore, abstract, ecc.)

Firma del dottorando

Ferrara, li 24/03/2017 (data) Firma del Dottorando Francesco Berletto

Firma del Tutore

Visto: Il Tutore Si approva Firma del Tutore [Firma]

A mia moglie Lara

Alla mia Famiglia

Ringraziamenti

Desidero innanzitutto ringraziare il Prof. Stefano Trillo e il consiglio dei docenti per avermi dato l'opportunità di approfondire le mie conoscenze attraverso il Dottorato di Ricerca in "Scienze dell'Ingegneria". Ringrazio poi il mio Tutore, il Prof. Ing. Giorgio Dalpaiz, per i preziosi insegnamenti. Vorrei esprimere la mia gratitudine all'Ing. Gianluca D'Elia per l'aiuto, il sostegno fornitomi e la disponibilità a dirimere i miei dubbi durante lo svolgimento del lavoro. Vorrei ringraziare anche l'azienda Bonfiglioli Riduttori S.p.A., in particolare nella persona dell'Ing. Paolo Cominetti, per avermi dato la possibilità di fare un'esperienza in una grande azienda, molto dinamica e con grandi ambizioni, al fine di effettuare le prove necessarie, oltre all'Ing. Rodolfo Arigoni e al personale della Sala Esperienze dell'azienda per il graditissimo sostegno ricevuto durante le mie ricerche. Inoltre ringrazio sentitamente mia moglie Lara che dopo 6 anni insieme ha accettato di sposarmi e per non aver mai smesso di essermi vicina. Infine, ho desiderio di ringraziare con affetto i miei genitori e la mia famiglia per il sostegno ed il supporto che mi hanno dato.

Sommario

Questa Tesi di Dottorato di ricerca concerne lo sviluppo, l'implementazione e la validazione sperimentale di metodologie per il monitoraggio, la diagnostica ed il controllo qualità di rotismi, basate su tecniche avanzate ed innovative di analisi sperimentale delle vibrazioni e di analisi del segnale, con particolare riferimento ai rotismi epicicloidali. L'analisi delle vibrazioni in questo tipo di rotismi è resa complessa dal movimento dei satelliti che fa variare continuamente la distanza – e conseguentemente le funzioni di trasferimento - tra le sorgenti di vibrazioni (ingranamenti e cuscinetti) ed il traduttore fisso all'esterno della corona. Ai fini diagnostici, è necessario estrarre dal segnale vibratorio complessivo il contributo di ciascuna ruota dentata mediante una procedura di media sincrona (Planetary TSA), che, nel caso dei rotismi epicicloidali, deve depurare l'effetto della variazione delle funzioni di trasferimento. Ciò è stato effettuato mediante un complesso algoritmo, già proposto in letteratura, che è stato necessario sviluppare ulteriormente ed implementare con accorgimenti specifici per renderlo applicabile ed efficiente in ambiente industriale. Come indicatori di condizione (CI) per il monitoraggio dei rotismi epicicloidali si sono studiati numerosi parametri statistici della TSA, sulla base dei risultati di campagne sperimentali condotte su un riduttore epicicloidale a 3 stadi di potenza nominale 3 kW che possono riassumersi in: a) prove su banco, al variare del carico, in presenza di difetti localizzati artificiali sulla dentatura dei satelliti; b) prova di usura accelerata su banco prova in configurazione back-to-back portata a fine vita (700 h); c) prova analoga alla b), interrotta a 250 h, quando il valore degli CI ha segnalato lo svilupparsi del pitting; d) prove su banco, al variare del carico, montando sia solari nuovi sia usurati nelle precedenti prove b) e c). Sulla base di tali prove sperimentali, è stata valutata l'efficacia delle metriche proposte in letteratura e ne sono state sviluppate di originali, maggiormente efficaci e rispondenti all'applicazione specifica in ambienti industriali. In particolare, tre metriche originali sono risultate efficaci nell'individuare l'insorgere del pitting ed il suo successivo sviluppo, anche al variare del carico e della velocità: la varianza del segnale residuo RV, la corrispondente varianza cumulativa CRV (media al tempo corrente della precedente) e una variazione migliorativa del già noto NA4, NA4mod, definito come rapporto tra il momento del quart'ordine del segnale residuo e la media corrente del quadrato della varianza del segnale regolare. Inoltre, è stato sviluppato un software dedicato all'analisi delle vibrazioni a fini diagnostici di rotismi epicicloidali, che implementa le tecniche sviluppate ed è atto ad essere impiegato in ambiente industriale; si rileva che non esistono prodotti commerciali con analoghe funzioni. Il software contiene moduli per acquisizione dei segnali vibratorii, filtraggio, ricampionamento in base tempo e in base angolo, TSA, individuazione della fase dei satelliti, media sincrona per gli

epicicloidali (Planetary TSA), estrazione dei segnali residui, differenza e regolari, trasformata di Fourier, PSD, Envelope, demodulazioni di ampiezza e fase, calcolo di parametri statistici e metriche specifiche per gli ingranaggi. Gli algoritmi, inizialmente implementati in Matlab, hanno richiesto accorgimenti particolari per incrementarne l'efficienza, a fronte della necessità di trattare grosse quantità di dati. Nella versione finale il software è stato implementato in linguaggio ANSI C con una riduzione dei tempi di calcolo di circa il 50%, maggiore stabilità, migliore gestione della memoria e una riduzione dei costi per l'utilizzatore finale. L'efficacia diagnostica degli algoritmi implementati è stata verificata mediante l'applicazione a numerosi dati sperimentali, ottenendo risultati complessivamente soddisfacenti.

Abstract

This PhD thesis concerns the development, implementation and experimental validation of methods for monitoring, diagnostics and quality control of gear systems, based on advanced and innovative techniques of experimental vibration analysis and signal processing, with particular focus on planetary gearboxes. The analysis of the vibrations in this type of gearboxes is complicated by the movement of the planets, that causes the continuous variation of the distance - and consequently of the transfer functions - between the sources of vibration (gear meshing and bearings) and the fixed transducer mounted outside the annulus. For diagnostic purposes, it is necessary to extract from the overall vibration signal the contribution of each gear by means of a synchronous averaging procedure (Planetary TSA), which, in the case of planetary gear trains, has to eliminate the effect of the variation of the transfer functions. This has been obtained by means of a complex algorithm, already proposed in the literature, but requiring further efforts for developing and implementing with specific measures to make it applicable and efficient in an industrial environment. As condition indicators (CI's) for monitoring of planetary gear trains, numerous TSA statistical parameters have been studied, based on the results of experimental campaigns conducted on a 3 stage planetary gear unit of nominal power of 3 kW; these tests may be summarized as follows: a) tests on bench, under varying load conditions, in the presence of artificial localized defects on planet teeth; b) accelerated wear test on back-to-back test bench, arriving at life end (700 h); c) testing analogous to b), interrupted at 250 h, when the value of the CI's has indicated the development of pitting; d) tests on bench with different loads, by mounting sun gears in good conditions or worn in the previous tests b) and c). On the basis of these tests, it has been evaluated the effectiveness of metrics proposed in literature; in addition, some original metrics have been developed, more effective and proper for the specific application in industrial environments. In particular, the results show that three original metrics are effective in identifying the onset of pitting and its subsequent development, even with varying load and speed: the variance of the residual signal RV, the corresponding cumulative variance, CRV (average of the previous one at the current time) and an improvement of the already known NA4, NA4mod, defined as the ratio between the forth statistical moment of the residual signal and the current run time average of the squared variance of the regular signal. In addition, a software dedicated to the vibration analysis for diagnostic purposes of planetary gearboxes has been developed; it implements the studied techniques and is suitable for use in industrial environments; it is worth noting that there are no commercial products with similar functions. This software includes modules for the acquisition of vibratory signals, filtering, time and angular resampling, TSA, identification of the phase of the planets, syn-

chronous average for planetary gear units (Planetary TSA), extraction of residual, difference and regular signals, Fourier transform, PSD, Envelope, amplitude and phase demodulation, calculation of statistical parameters and specific metrics for gear diagnostics. The algorithms, initially implemented in Matlab, have required special measures to increase efficiency in the case of large amounts of data. In the final version, the software has been implemented in the ANSI C language with a reduction of computation time by about 50%, greater stability, better memory management and a reduction of costs for the end user. The diagnostic efficiency of the implemented algorithms has been verified by the application to numerous experimental data, generally obtaining satisfactory results.

Indice

| | |
|---|-------------|
| Sommario | xi |
| Abstract | xiii |
| Prefazione | xxv |
| Lista dei simboli e delle abbreviazioni | xxix |
| 1 Introduzione | 1 |
| 1.1 Background: Industria 4.0 e sistemi avanzati di manutenzione | 1 |
| 1.2 I rotismi epicicloidali | 3 |
| 1.3 Diagnostica vibrazionale delle trasmissioni ad ingranaggi: stato dell'arte | 6 |
| 1.4 Diagnostica delle trasmissioni in ambiente industriale: norme e strumentazione sul mercato | 7 |
| 1.4.1 Norme sul monitoraggio delle condizioni e la diagnostica delle macchine | 7 |
| 1.4.2 Sistemi commerciali per la diagnostica vibrazionale | 8 |
| 1.4.3 Descrizione dei software commerciali e delle loro funzionalità | 11 |
| 1.5 Obiettivi e contenuti della tesi | 12 |
| 2 Tecniche di Analisi del Segnale | 15 |
| 2.1 Classificazione dei segnali e delle tecniche di analisi | 15 |
| 2.2 Dominio del Tempo: parametri statistici | 16 |
| 2.2.1 Metriche del segnale nel dominio del tempo | 16 |
| 2.2.2 Applicazione al monitoraggio: note | 19 |
| 2.3 Dominio della Frequenza: Analisi spettrale | 21 |
| 2.3.1 Conversione nel dominio delle frequenze e algoritmo FFT | 21 |
| 2.3.2 PSD | 24 |
| 2.3.3 Applicazione all'identificazione dei malfunzionamenti: note | 25 |
| 2.3.4 Applicazione alla diagnostica dei malfunzionamenti: note | 27 |
| 2.4 Trasformata di Hilbert, involuppo e modulazioni | 28 |
| 2.4.1 Applicazione alla diagnostica dei cuscinetti volventi | 29 |
| 2.5 Dominio dell'Angolo | 30 |
| 2.5.1 Media Sincrona | 30 |
| 2.5.2 Order Tracking | 33 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.5.3 | Figures of Merit | 34 |
| 2.5.4 | Nuove metriche proposte | 38 |
| 2.5.5 | Analisi delle modulazioni in banda stretta | 39 |
| 2.5.6 | Applicazione al monitoraggio e alla diagnostica dei malfunzionamenti | 39 |
| 2.6 | Analisi di Ciclostazionarietà | 40 |
| 2.7 | Dominio Tempo-Frequenza (Angolo-Ordini) | 41 |
| 2.7.1 | Trasformata Wavelet | 41 |
| 3 | Media sincrona per i rotismi epicicloidali | 43 |
| 3.1 | Proprietà cinematiche dei rotismi epicicloidali | 43 |
| 3.1.1 | Frequenza di ingranamento e frequenze di rotazione | 43 |
| 3.1.2 | Giri di reset e sequenza di ingranamento | 44 |
| 3.2 | Vibrazioni nei rotismi epicicloidali | 46 |
| 3.2.1 | Modulazione: modello di McFadden e Smith | 46 |
| 3.2.2 | Modulazione: modello di Inalpolat e Kahraman | 49 |
| 3.3 | Media sincrona negli epicicloidali: metodo di McFadden | 54 |
| 3.3.1 | Procedura | 54 |
| 3.3.2 | Scelta della finestra | 57 |
| 3.3.3 | Individuazione della posizione dei satelliti | 60 |
| 3.3.4 | Proprietà e limiti | 63 |
| 3.4 | Media sincrona negli epicicloidali: metodo di Forrester e Blunt | 64 |
| 3.4.1 | Estrazione della media sincrona dei singoli satelliti | 65 |
| 3.4.2 | Media sincrona del solare | 66 |
| 3.4.3 | Proprietà e limiti | 67 |
| 3.5 | Confronto fra i due metodi di estrazione della media sincrona | 67 |
| 4 | Codice per l'acquisizione e l'analisi vibrazionale | 69 |
| 4.1 | Caratteristiche del codice | 69 |
| 4.1.1 | Prestazioni richieste | 69 |
| 4.1.2 | Scelte relative allo sviluppo e all'implementazione | 70 |
| 4.2 | Struttura e funzioni implementate | 72 |
| 4.3 | Implementazione degli algoritmi per l'analisi vibrazionale dei rotismi epicicloidali | 73 |
| 4.3.1 | Angular resampling with tacho | 73 |
| 4.3.2 | Angular resampling with tau | 75 |
| 4.3.3 | Planet-Transducer relative position | 76 |
| 4.3.4 | Planetary TSA | 77 |
| 4.4 | Considerazioni conclusive sullo sviluppo del codice | 79 |
| 5 | Indagine sperimentale | 81 |
| 5.1 | La strumentazione | 81 |
| 5.2 | Il riduttore in prova | 81 |

| | | |
|-------|--|------------|
| 5.3 | Metodologia | 82 |
| 5.4 | Test 1: Difetti localizzati artificiali sui satelliti e sul solare | 84 |
| 5.4.1 | Scopo e setup | 84 |
| 5.4.2 | Conduzione ed esiti della prova | 84 |
| 5.4.3 | Analisi delle vibrazioni: risultati e discussione | 85 |
| 5.5 | Test 2: Usura accelerata portata a fine vita | 88 |
| 5.5.1 | Scopo e setup | 88 |
| 5.5.2 | Conduzione ed esiti della prova | 90 |
| 5.5.3 | Analisi delle vibrazioni: risultati e discussione | 91 |
| 5.6 | Test 3: Usura accelerata interrotta ad inizio pitting | 96 |
| 5.6.1 | Scopo e setup | 96 |
| 5.6.2 | Conduzione ed esiti della prova | 97 |
| 5.6.3 | Analisi delle vibrazioni: risultati e discussione | 98 |
| 5.7 | Test 4: Variazione di coppia resistente | 101 |
| 5.7.1 | Scopo e setup | 101 |
| 5.7.2 | Conduzione ed esiti della prova | 101 |
| 5.7.3 | Analisi delle vibrazioni: risultati e discussione | 102 |
| 5.8 | Considerazioni conclusive sui risultati delle prove | 103 |
| | Conclusioni | 105 |
| | Bibliografia | 115 |

Elenco delle figure

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | L'evoluzione industriale, dalla prima rivoluzione all'industria 4.0. | 2 |
| 1.2 | Schema di un rotismo epicicloidale ad un grado di libertà con corona a dentatura esterna fissa. | 4 |
| 1.3 | Riduttore epicicloidale ad uno stadio (a sinistra), a due stadi (in mezzo) e a tre stadi (a destra). | 4 |
| 1.4 | Confronto tra rotismo epicicloidale (sinistra) e rotismo ordinario (destra), a parità di numero di denti ($N_s = Z_1, N_a = Z_3$). | 5 |
| 1.5 | Strumenti per la misura della severità di vibrazione in accordo con la norma ISO 10816: a sinistra un accelerometro wireless SKF Indicator; sulla destra Fluke 805 Vibration Meter. | 9 |
| 1.6 | Strumenti per la diagnostica: a sinistra un dispositivo portatile di SKF; a destra un dispositivo fisso per il monitoraggio on-line, FAG Smartcheck. | 9 |
| 1.7 | Esempio di strumento per il monitoraggio con moduli hardware dedicati ai diversi tipi di segnale. | 10 |
| 2.1 | Andamento del trend v_{RMS} per un caso generico. | 18 |
| 2.2 | Segnale campionato nel tempo. | 23 |
| 2.3 | Fenomeno dell'aliasing. | 24 |
| 2.4 | Metodo di Welch. | 24 |
| 2.5 | Esempio di analisi in frequenza mediante confronto tra spettri. | 26 |
| 2.6 | Difetti tipici nei cuscinetti. | 29 |
| 2.7 | Esempio di applicazione dell'Inviluppo. | 29 |
| 2.8 | Schema di applicazione media sincrona ad un segnale. | 31 |
| 2.9 | Risoluzione in frequenza: (a) STFT e (b) WT. | 41 |
| 2.10 | Mother Wavelet con (a) scala larga e (b) scala stretta. | 42 |
| 3.1 | Schema di un riduttore epicicloidale. | 43 |
| 3.2 | Riduttore epicicloidale e sua configurazione ordinaria. | 44 |
| 3.3 | Schema della sequenza di ingranamento. | 45 |
| 3.4 | Tipico set-up di misura per un riduttore epicicloidale con un trasduttore montato sull'esterno della cassa in corrispondenza della corona. | 46 |
| 3.5 | Riduttore epicicloidale con un singolo satellite e trasduttore sull'esterno della cassa in corrispondenza della corona. | 47 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.6 | Modulazione della frequenza di ingranamento a causa della funzione di risposta. | 48 |
| 3.7 | Componenti dell'ingranamento. | 48 |
| 3.8 | PSD della banda in frequenza attorno alla seconda armonica dell'ingranamento. | 49 |
| 3.9 | Gruppo 1: Satelliti equispaziati e ingranamenti in fase per $N_a = 123$, $N_s = 72$, $N_{planet} = 3$. | 51 |
| 3.10 | Gruppo 2: Satelliti equispaziati e ingranamenti sequenzialmente fuori fase per $N_a = 125$, $N_s = 73$, $N_{planet} = 3$. | 51 |
| 3.11 | Gruppo 3: Satelliti non equispaziati e ingranamenti in fase per $N_a = 126$, $N_s =$ 72 , $N_{planet} = 3$. | 52 |
| 3.12 | Gruppo 4: Satelliti non equispaziati e ingranamenti sequenzialmente fuori fase per $N_a = 125$, $N_s = 73$, $N_{planet} = 3$. | 53 |
| 3.13 | Gruppo 5: Satelliti non equispaziati e ingranamenti arbitrariamente fasati per $N_a = 125$, $N_s = 73$, $N_{planet} = 3$. | 53 |
| 3.14 | Larghezza della finestra di passaggio dei satelliti in corrispondenza dell'acce- lerometro. | 54 |
| 3.15 | Diagramma a blocchi per il calcolo della media sincrona secondo la procedura di McFadden. | 55 |
| 3.16 | Definizione della finestra $v(t)$. | 58 |
| 3.17 | Segnale simulato di vibrazione idealmente rilevata da un accelerometro posto sulla corona esterna di un riduttore epicicloidale con $N_s = 27$, $N_p = 39$, $N_a =$ 108 , $N = 3$ e $f_c = 4$ [Hz]. | 59 |
| 3.18 | Ampiezza della componente relativa all'errore per l'estrazione del satellite al variare di k . | 59 |
| 3.19 | Ampiezza della componente relativa all'errore per l'estrazione del solare al variare di k . | 59 |
| 3.20 | Difetto localizzato sul satellite del primo stadio. | 62 |
| 3.21 | Confronto dei segnali di modulazione dei satelliti con le due tecniche descritte. | 63 |
| 3.22 | Segnali dei tre satelliti mediati utilizzando il parametro MCF. | 63 |
| 3.23 | Esempio di difetto fantasma presente sul Satellite 1, Satellite 2 e Satellite 3. | 64 |
| 3.24 | Sfasamento per il calcolo delle medie separate del solare attraverso ciascun satellite. | 66 |
| 4.1 | Esempio di visualizzazione di un file in formato HDF5. | 71 |
| 4.2 | Interfaccia grafica dell'ultima versione del software sviluppato | 72 |
| 4.3 | Schema a blocchi dell'algorithmo per il ricampionamento ad incrementi angolari costanti di un segnale temporale. | 75 |
| 4.4 | Schema a blocchi dell'algorithmo per il ricampionamento ad incrementi angolari costanti di un segnale temporale attraverso un rapporto di riduzione. | 76 |
| 4.5 | Schema a blocchi dell'algorithmo per l'individuazione della posizione dei satelliti. | 77 |
| 4.6 | Schema a blocchi dell'algorithmo per il calcolo della media sincrona delle ruote dentate di uno stadio di riduzione epicicloidale. | 78 |

| | | |
|------|--|----|
| 5.1 | Vista in sezione del riduttore TR 304 L3 220. | 82 |
| 5.2 | Metodologia seguita per il calcolo dei diversi parametri. | 83 |
| 5.3 | Test 1 - Configurazione della prova: a sinistra il riduttore montato sul banco freno; a destra un dettaglio del sensore tachimetrico. | 84 |
| 5.4 | Satellite del primo stadio con un difetto localizzato artificiale sul profilo di uno dei denti. | 85 |
| 5.5 | Solare del secondo stadio con un difetto localizzato artificiale sul profilo di uno dei denti. | 85 |
| 5.6 | Media sincrona del satellite del primo stadio con il difetto localizzato artificiale estratto dal segnale acquisito nella Prova 4. | 86 |
| 5.7 | Media sincrona del solare del secondo stadio con il difetto localizzato artificiale estratto dal segnale acquisito nella Prova 4. | 88 |
| 5.8 | Test 2 - Configurazione per la prova di usura accelerata portata a fine vita. . . . | 89 |
| 5.9 | Olio contenuto dei riduttori a fine della prova: a sinistra l'olio contenuto nel riduttore e a destra l'olio contenuto nel moltiplicatore. | 89 |
| 5.10 | Condizione del solare del primo e del secondo stadio per il Riduttore A alla fine del Test 2. | 90 |
| 5.11 | Test 2 - Dettaglio dell'usura sui denti del solare del secondo stadio del Riduttore A. | 90 |
| 5.12 | Segnali temporali relativi alla prima e all'ultima acquisizione: (a) Riduttore A, (b) Riduttore (b). | 91 |
| 5.13 | Trend delle statistiche calcolate sul segnale vibrazionale complessivo: (a) RMS, (b) RMS normalizzato con il valore del primo campione, (c) Kurtosis. | 92 |
| 5.14 | Statistiche calcolate sul segnale TSA del solare del primo stadio: (a) FM4, (b) NA4, (c) SI, (d) ER. | 93 |
| 5.15 | Statistiche calcolate sul segnale TSA del solare del secondo stadio: (a) FM4, (b) NA4, (c) SI, (d) ER. | 94 |
| 5.16 | Statistiche calcolate sul segnale TSA del solare del secondo stadio: (a) RV, (b) CRV. | 95 |
| 5.17 | Statistiche calcolate sul segnale TSA del solare del secondo stadio per il Riduttore A e il Riduttore B. <i>N.B. Si faccia attenzione alla diversa scala delle ordinate.</i> | 96 |
| 5.18 | Statistiche calcolate sul segnale TSA del solare del secondo stadio per il Riduttore A e il Riduttore B. | 97 |
| 5.19 | Test 3 - Configurazione per la prova di usura accelerata interrotta al primo manifestarsi del pitting rilevabile utilizzando il parametro RV. | 97 |
| 5.20 | Test 3 - Dettaglio dell'usura sui denti del solare del secondo stadio del Riduttore A. | 97 |
| 5.21 | Test 3 - Confronto tra le statistiche calcolate sul segnale TSA del solare del secondo stadio: NA4, NA4*, NA4mod | 98 |
| 5.22 | Test 3 - Trend RV calcolato sul segnale TSA del solare del secondo stadio. . . . | 99 |

| | | |
|------|--|-----|
| 5.23 | Test 3 - Confronto tra le statistiche calcolate sul segnale TSA del solare del secondo stadio: RV, CRV. | 99 |
| 5.24 | Test 2 - Confronto trend CRV calcolato sul segnale TSA del solare del secondo stadio per il Riduttore A e per il Riduttore B. | 100 |
| 5.25 | Test 2 - Dettaglio dell'usura sui denti del solare del secondo stadio del Riduttore B. | 100 |
| 5.26 | Test 2 - Trasformata Wavelet calcolata sul segnale TSA del solare del secondo stadio per il Riduttore A in tre condizioni diverse: (a) inizio prova, (b) innesco del pitting, (c) fine della prova. | 100 |
| 5.27 | Test 2 - Trasformata Wavelet calcolata sul segnale TSA del solare del secondo stadio per il Riduttore B in tre condizioni diverse: (a) inizio prova, (b) innesco del pitting sul Riduttore A, (c) fine della prova. | 100 |
| 5.28 | Test 4 - Configurazione della prova con il riduttore montato sul banco freno. . . | 101 |
| 5.29 | Test 4 - Confronto tra i solari del secondo stadio utilizzati: a sinistra un ingranaggio nuovo, al centro il solare estratto dal Riduttore A alla fine del Test 3, a destra il solare estratto dal Riduttore A alla fine del Test 2. | 102 |
| 5.30 | Test 4 - Confronto tra i trend di RV calcolate sul segnale TSA del solare del secondo stadio, in funzione della coppia ridotta al secondo stadio, per il solare sano, il solare del Test 3 (leggero) ed il solare del Test 2 (avanzato). | 103 |

Elenco delle tabelle

| | | |
|-----|---|-----|
| 1.1 | Confronto tra i principali software commerciali di diagnostica | 11 |
| 3.1 | Sequenza di ingranamento dei denti di un satellite con un dente della corona esterna dello stadio 1 sotto l'accelerometro del riduttore MP 105 IS | 46 |
| 3.2 | Componenti visibili (1) e non visibili (0) all'interno dello spettro del riduttore MP 105 IS | 49 |
| 3.3 | Dati segnale simulato | 58 |
| 4.1 | Confronto del tempo di elaborazione tra la versione 1 (Labview) e la versione 3 (ANSI C) per l'esecuzione della media sincrona del satellite del riduttore TR 304 L3 220. | 70 |
| 4.2 | Elenco delle tecniche implementate e dei relativi algoritmi utilizzati per la loro implementazione con riferimento ad articoli e paragrafi nei quali vengono richiamate | 74 |
| 5.1 | Dati riassuntivi della geometria del riduttore. | 82 |
| 5.2 | Test 1 - Tabella riassuntiva delle prove effettuate. | 85 |
| 5.3 | Test 1 - Riassunto dei valori di RMS e K calcolati sul segnale temporale delle diverse prove. | 86 |
| 5.4 | Test 1 - Riassunto dei valori di RMS e K calcolati sulle medie sincrone dei segnali delle ruote dentate del primo stadio. | 87 |
| 5.5 | Tets 1 - Riassunto dei valori di RMS e K calcolati sulle medie sincrone dei segnali delle ruote dentate del secondo stadio. | 87 |
| 5.6 | Test 4 - Tabella riassuntiva delle prove effettuate | 102 |

Prefazione

In questa prefazione si sintetizza l'attività che ho svolto durante il corso di dottorato nell'arco del triennio 2014-2016. La mia attività di formazione e ricerca ha affrontato diverse tematiche nell'ambito della Meccanica Applicata alle Macchine e si è focalizzata sulla diagnostica vibrazionale di trasmissioni ad ingranaggi. La maggior parte delle attività sono state condotte in stretta collaborazione con la società Bonfiglioli Riduttori, presso la cui sala prove sono stati svolti i test. Le attività di dottorato hanno riguardato:

- ATTIVITA' DI RICERCA
- FORMAZIONE SPECIFICA IN AMBITO INDUSTRIALE
- ATTIVITA' PROGETTUALI E DI LABORATORIO
- STAY TUNED (Rimanere aggiornati).

ATTIVITA' DI RICERCA

- La principale attività di ricerca - oggetto della presente tesi di dottorato – ha riguardato lo sviluppo, l'implementazione e la validazione sperimentale di metodologie per il monitoraggio, la diagnostica ed il controllo qualità di rotismi, basate su tecniche avanzate ed innovative di analisi sperimentale delle vibrazioni e di analisi del segnale, con particolare riferimento ai rotismi epicicloidali.
- Si sono studiati algoritmi - già proposti in letteratura – per l'estrazione della media sincrona del solare e dei singoli satelliti di rotismi epicicloidali. Ai fini dell'implementazione in codici di analisi vibrazionale, è stato necessario sviluppare ulteriormente tali algoritmi e mettere a punto accorgimenti specifici per renderli applicabile ed efficienti in ambiente industriale.
- Come indicatori di condizione (CI) per il monitoraggio dei rotismi epicicloidali si sono studiati numerosi parametri statistici della media sincrona, sulla base dei risultati di campagne sperimentali condotte su un riduttore epicicloidale. E' stata valutata l'efficacia delle metriche proposte in letteratura e ne sono state sviluppate di originali, maggiormente efficaci e rispondenti all'applicazione specifica in ambienti industriali.
- Si è sviluppato un software dedicato all'analisi delle vibrazioni a fini diagnostici di rotismi epicicloidali, che implementa le tecniche sviluppate ed è atto ad essere impiegato

in ambiente industriale; si rileva che non esistono prodotti commerciali con analoghe funzioni.

FORMAZIONE SPECIFICA IN AMBITO INDUSTRIALE

- Si è condotta l'attività di formazione in ambito industriale riguardante i sistemi di monitoraggio vibrazionale dei prodotti a fine linea di montaggio e i sistemi di monitoraggio delle loro prestazioni in condizioni operative, al fine di migliorarne la qualità e prevenire i guasti in impianti che lavorano in condizioni critiche.
- Partecipazione del corso sulla sicurezza sul "Rischio Elettrico".
- Sono state studiate le normative relative alle vibrazioni meccaniche (ISO 10816- 1, ISO 10816-3) e al monitoraggio dello stato vibrazionale (UNI ISO 13372, UNI ISO 13373, UNI ISO 13374, UNI ISO 13379, UNI ISO 13381, UNI ISO 17359).
- Si sono apprese nuove metodologie sull'utilizzo delle tecniche basate sull'analisi vibrazionale, seguendo il COST Training School "Fundamentals of Experimental Modal Analysis: theory and practice".
- Dall'interazione con l'azienda 3M, attraverso test per applicazioni innovative su alcuni materiali, si è venuti a conoscenza di tecnologie avanzate di controllo delle emissioni vibro-acustiche.
- Si sono approfondite le conoscenze nel campo della mecatronica e dei sistemi automatizzati di monitoraggio seguendo un corso specifico sugli inverter.
- Si sono approfondite le conoscenze relative alle problematiche di acquisizione dati conducendo campagne di misure in ambienti industriali.

ATTIVITA'PROGETTUALI E DI LABORATORIO

- Si è messo a punto un kit per l'acquisizione on-site delle vibrazioni di riduttori, secondo le metodologie messe a punto in laboratorio.
- Si è progettato un sistema di sensori per installazioni fisse di monitoraggio in esercizio, in grado acquisire correttamente i dati e garantire la ripetibilità dei test sul campo. Lo si è applicato ad un riduttore per la movimentazione di una pala a tazze in una miniera a cielo aperto, seguendone la messa in opera.
- È stata svolta un'attività di studio del carico radiale sui cuscinetti in riduttori per l'azionamento di pale industriali. L'attività ha visto la taratura e la messa a punto del sistema di acquisizione ed elaborazione dei dati provenienti da due estensimetri applicati sulla cassa del riduttore in studio.
- Si è sviluppato e collaudato un banco a 20 postazioni per la misura della variazione del tempo di frenatura di freni di stazionamento per motori elettrici durante il funzionamento ripetuto.

STAY TUNED

Si sono inoltre seguiti gli sviluppi tecnici e l'evoluzione del mercato a livello industriale attraverso:

- Partecipazione a seminari (Controllo delle emissioni vibroacustiche nei prodotti industriali, NIDays2014).
- Approfondimenti sulle tematiche relative all'integrazione dei sistemi di diagnostica in ambienti industriali: partecipazione agli eventi SPS 2015 a Parma, Schaeffler Innovation Days a Padova.
- Partecipazione al seminario "Certificazione vibro-acustica dei prodotti industriali".
- Visita ad Hannover Messe 2016, per studiare il miglior connubio tra lo stato dell'arte presente in letteratura, quello contenuto e richiesto dalle normative e le tendenze del mercato dei riduttori.
- Partecipazione alla X Giornata Ettore Funaioli, dove si sono presentati alcuni risultati delle ricerche effettuate nel corso dei primi due anni.
- Attività disciplinari e trasversali, tra cui il corso di Tecnologie e sistemi di controllo.

Lista dei simboli e delle abbreviazioni

| | |
|-----------------|---|
| $a(t)$ | Funzione di modulazione data dal passaggio dei satelliti |
| $a_0(t)$ | Funzione di risposta tra il satellite e il trasduttore |
| $b(t)$ | Finestra temporale |
| b_0, b_1, b_2 | Coefficienti incogniti |
| c | costante |
| $c(n)$ | Funzione di separazione |
| d | Diametro dell'elemento volvente |
| d_i | Segnale Differenziale |
| $env \ x(t)$ | Inviluppo del segnale |
| f | Frequenza [Hz] |
| f_0 | Frequenza centrale |
| f_c | Frequenza di rotazione del porta-satelliti |
| f_e | Frequenza dell'errore |
| f_g | Frequenza di rotazione della ruota dentata di interesse (satellite/solare) |
| f_i | Frequenza istantanea |
| f_m | Frequenza d'ingranamento |
| f_p | Frequenza di rotazione dei satelliti |
| f_r | Frequenza di rotazione |
| f_s | Frequenza di campionamento |
| f_s | Frequenza di rotazione del solare |
| $g(t)$ | Funzione di campionamento |
| $h_0(t)$ | Funzione di trasferimento |
| j | Unità immaginaria |
| n_c | Numero di giri del porta-satelliti |
| n, m | Variabili discrete |
| r_i | Segnale Residuo |
| s | Fattore di scala |
| sr_i | Segnale Regolare |
| t | Tempo [s] |
| t_1, t_2, t_3 | Intervalli di tempo successivi |
| $v_p(t)$ | Vibrazione di ingranamento per il satellite P |
| v_{RMS} | Severità di vibrazione |

| | |
|-------------------------------------|---|
| $w(n)$ | Finestra |
| \bar{x} | Valore medio del segnale |
| \tilde{x} | Trasformata di Hilbert del segnale |
| $x(n)$ | Segnale discreto nel dominio del tempo |
| $x(t)$ | Segnale nel tempo |
| $x_0(t)$ | Segnale di vibrazione nel riferimento solidale con il portasatellite |
| $x_a(t)$ | Segnale analitico |
| x_{al} | Contributi aleatori del segnale |
| x_i | Segnale campionato |
| $x(k)$ | Segnale discreto nel dominio spettrale |
| x_n | Vettore di N componenti nel tempo |
| x_m | Vettore di N componenti in frequenza |
| $x_m(n)$ | Segmento numero m del segnale campionato |
| x_{per} | Contributi periodici del segnale |
| \bar{z}_p | Segnale vibratorio medio filtrato con periodo equivalente a quello della rotazione del satellite P |
| $A(i)$ | Ampiezza dell' i -esima armonica dell'ingranamento |
| $A(m)$ | Trasformata di Fourier di $a(t)$ |
| A_w | Fattore di correzione dell'ampiezza |
| B | Banda passante in frequenza |
| B_e | Rumore equivalente per la larghezza di banda |
| B_{en} | Rumore equivalente normalizzato per la larghezza di banda |
| C | Minimo comune multiplo tra N_a e N_g |
| $C_{nx}(t, \tau_1, \tau_2, \tau_3)$ | Cumulanti |
| D | Pitch diameter |
| $\hat{G}_{xx}^W(k)$ | Densità di energia spettrale calcolata con il metodo di Welch |
| ICS_{nx} | Indici di ciclostazionarietà |
| M | Numero di segmenti |
| N | Numero totale di elementi |
| N_a | Numero di denti della corona |
| N_e | Numero di campioni/medie |
| N_g | Numero di denti della ruota dentata di interesse |
| N_p | Numero di denti dei satelliti |
| N_{planet} | Numero di satelliti |
| $N_{reset,g}$ | Numero di giri di reset |
| N_s | Numero di denti del solare |
| N_V | Numero intero del periodo di ingranamento |
| P | Angolo tra il satellite e il trasduttore |
| $P_{n,p}$ | Sequenza di ingranamento dei denti di un satellite con il dente della corona posto sotto al trasduttore |
| P_x | Potenza media istantanea |

| | |
|---------------------|---|
| P_x^α | Potenza ciclica del segnale alle frequenze cicliche α |
| \overline{Q}_{mn} | Componenti presenti nello spettro |
| S_a | Fattore di scala per lo spettro di potenza |
| S_p | Fattore di scala della PSD |
| T | Periodo di osservazione |
| T_c | Periodo di rotazione del portasatellite |
| T_g | Periodo di rotazione della ruota dentata di interesse (satellite/solare) |
| T_m | Periodo di ingranamento |
| T_V | Larghezza della finestra |
| $X(f)$ | Trasformata di Fourier del segnale |
| $X(m)$ | Segnale discreto nel dominio spettrale |
| $X_{w,m}$ | DFT del segmento finestrato |
| W_{mn} | Matrice quadrata dei vettori unitari $e^{-j\frac{2\pi mn}{N}}$ con orientazione angolare dipendente da m e n |
| $\alpha_p(t)$ | Modulazione in ampiezza dovuta al satellite P |
| ϕ | Angolo di carico rispetto al piano radiale [<i>rad</i>] |
| τ | Parametro di traslazione |
| τ_{epic} | Rapporto di trasmissione per uno stadio epicicloidale |
| τ_{ord} | Rapporto di trasmissione per uno stadio ordinario |
| τ | Parametro di traslazione |
| $\theta(t)$ | Posizione angolare [<i>rad</i>] |
| $\Delta\theta$ | Incremento angolare [<i>rad</i>] |
| Δt | Intervallo di tempo |
| Δf | Risoluzione in frequenza |
| $\Delta\phi$ | Incrementi angolari noti |
| $\Psi_s(t)$ | Wavelet Madre |
| $\Theta(t)$ | Fase istantanea |
| BSF | Ball Spin Frequency |
| BPFI | Ball Pass Frequency Inner ring |
| BPFO | Ball Pass Frequency Outer ring |
| CF | Crest Factor |
| COT | Computational Order Tracking |
| CRV | Cumulative Residual Variance |
| CWT | Continuous Wavelet Transform |
| DFT | Discrete Fourier Transform |
| EO | Energy Operator |
| ER | Energy Ratio |
| FT | Fourier Transform |
| FTF | Fundamental Train Frequency |
| IDFT | Inverse Discrete Fourier Transform |

| | |
|------|------------------------------|
| IFT | Inverse Fourier Transform |
| K | Kurtosis |
| LSB | Lower SideBand |
| MCF | Modify Crest Factor |
| OT | Order Tracking |
| PSD | Power Spectral Density |
| RMS | Root Mean Square |
| RV | Residual Variance |
| SI | Sideband Index |
| STFT | Short Time Fourier Transform |
| TSA | Time Synchronous Averaging |
| USB | Upper SideBand |

Capitolo 1

Introduzione

In questo capitolo vengono presentate le considerazioni introduttive a questa tesi: il contesto industriale, con riferimento a sistemi avanzati di manutenzione, le caratteristiche applicative dei rotismi epicicloidali, lo stato dell'arte sulla diagnostica vibrazionale delle trasmissioni a ingranaggi, le relative norme e le strumentazioni disponibili sul mercato per le applicazioni industriali. Infine si presenta l'obiettivo della tesi e il valore aggiunto che si intende fornire.

1.1 Background: Industria 4.0 e sistemi avanzati di manutenzione

Con lo sviluppo delle tecnologie digitali e wireless, in particolare, si è notevolmente incrementato il grado di diffusione della tecnologia digitale nelle macchine e nei prodotti di uso comune. L'*Internet delle Cose* (*Internet of Things*, IoT) è una delle tecnologie abilitanti che sta rendendo possibile questo sviluppo; si tratta di una evoluzione dell'uso della Rete: gli oggetti (le "cose") si rendono riconoscibili e acquisiscono "intelligenza" grazie al fatto di poter comunicare dati su se stessi e accedere ad informazioni aggregate da parte di altri. Viene a realizzarsi ciò che è stato definito come *sistema ciber-fisico* (CPS, dall'inglese *Cyber-Physical System*): un sistema informatico in grado di interagire in modo continuo con il sistema fisico in cui opera, composto da elementi fisici dotati di capacità computazionale, di comunicazione e controllo.

I campi di applicabilità sono molteplici: domotica, automotive (logistica e infomobilità), applicazioni industriali (processi produttivi e logistica), efficienza energetica, assistenza remota e tutela ambientale. I settori precursori nell'applicazione di queste tecnologie sono stati i settori dell'aviazione e dell'automotive con il drive-by-wire e la diagnostica da remoto nei processi produttivi. Nello specifico, l'industria manifatturiera si sta organizzando con nuove modalità produttive passando alla fase chiamata Industria 4.0 (Figura 1.1), caratterizzata dall'integrazione di alcune nuove tecnologie - chiamate tecnologie abilitanti - al fine di migliorare le condizioni di lavoro, aumentare la produttività, la qualità produttiva e l'efficienza energetica degli impianti; tra queste tecnologie abilitanti vi sono sistemi avanzati ed automatizzati di manifattura, additive manufacturing, realtà aumentata, simulazione, integrazione orizzontale e verticale, industrial internet (inclusi CPS e IoT), cloud computing, sicurezza informatica, big data analytics. Il Governo italiano ha recentemente lanciato il Piano Nazionale Industria 4.0, che tra l'altro favorisce sinergie tra il mondo produttivo e quello della ricerca applicata per il

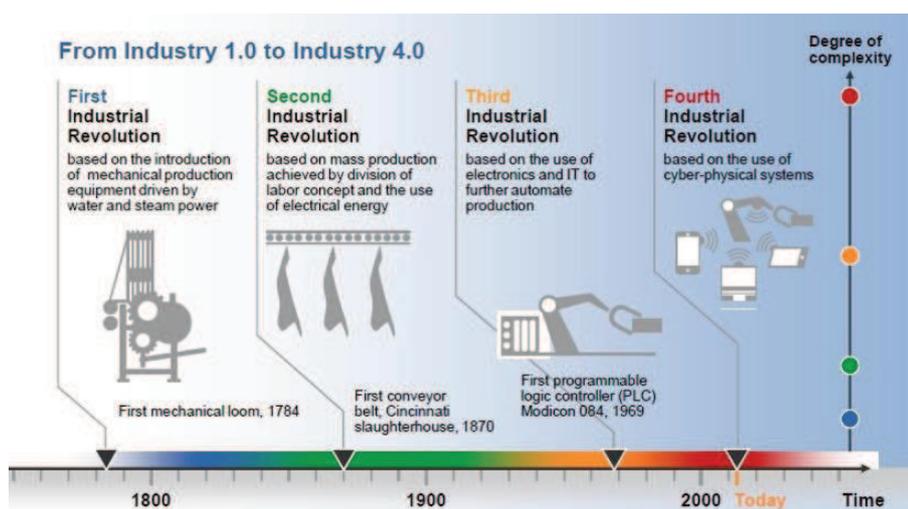


Figura 1.1: L'evoluzione industriale, dalla prima rivoluzione all'industria 4.0.

trasferimento tecnologico delle tecnologie abilitanti.

Gli aspetti della manutenzione dei sistemi produttivi e del controllo qualità del prodotto sono fondamentali: diventa sempre più importante conoscere in real-time la situazione dello stabilimento e della produzione per realizzare tempestivamente gli interventi correttivi e implementare strategie di manutenzione predittiva e di “e-maintenance” (termine che fa riferimento alla forte integrazione di metodologie e strumenti ICT, per la realizzazione di sistemi di manutenzione gestiti in remoto [1]). Vengono rimpiazzate le tradizionali strategie di manutenzione, basate su piani di interventi periodici e indipendenti dalle attuali condizioni delle macchine e su metodi di monitoraggio scarsamente automatizzati, con strategie predittive/proattive basate su indicatori dello stato di salute delle macchine effettivamente monitorati e processati in tempo quasi reale. Questo permette di creare un sistema diagnostico/prognostico integrato nel sistema informativo aziendale, capace di ridurre al minimo sia i costi di manutenzione che i tempi di fermo macchina, soddisfacendo così i criteri di affidabilità desiderati dal produttore e consentendo l'adozione di nuovi modelli di business come il pay per use e la servitizzazione [2].

Per ottenere indicatori dello stato di salute delle macchine o di controllo qualità dei processi produttivi l'analisi vibratoria rappresenta da sempre uno strumento di particolare efficacia poiché, in funzione del proprio stato di funzionamento, ogni macchinario/processo è caratterizzato da una specifica “firma vibratoria” che risulta sensibile ai diversi tipi di malfunzionamento o alterazione della qualità [3] [4] [5]. Sulla base di indicatori vibrazionali possono essere messi a punto algoritmi decisionali buono/scarto o sano/guasto e algoritmi diagnostici. L'utilizzo dei dati di vibrazione permette anche, mediante tecniche avanzate di post-elaborazione, la previsione della vita utile residua (RUL) del sistema meccanico. La stima della RUL avviene incorporando le informazioni diagnostiche con modelli fisici di propagazione del difetto o con modelli statistici.

Nello specifico, l'e-maintenance nasce per il monitoraggio e controllo di “large plant”, ad esempio, nella produzione di energia, ma i recenti sviluppi tecnologici in ambito ICT ne hanno permesso l'adozione su “larga scala”, ad esempio per la manutenzione di più impianti di dimen-

sioni contenute oppure di singole macchine distribuite su area geografica [6]. In particolare, alcune aree di ricerca in ambito Internet of Things (IoT) e Cloud Computing sono di particolare rilevanza per le funzioni di raccolta e stoccaggio dei dati in applicazioni di e-maintenance. IoT si concentra sulla progettazione e sullo sviluppo di architetture interoperabili che consentano la raccolta di dati provenienti da dispositivi estremamente eterogenei e geograficamente distribuiti, con soluzioni di comunicazione Machine-to-Machine (M2M). I dati raccolti vengono trasmessi a sistemi Cloud che ne effettuano lo stoccaggio, l'analisi, l'elaborazione e la visualizzazione. L'analisi dei dati viene realizzata con strategie di computazione "big data", appositamente create per l'analisi di quantità molto grandi di dati in ambiti applicativi come la business intelligence e il calcolo scientifico.

L'integrazione dei sistemi di diagnostica in ambienti industriali è una tematica importante in molte fiere ed eventi, organizzati negli ultimi anni: si citano SPS 2015 a Parma, "Schaeffler Innovation Days" a Padova, "Maintenance Day 2016" a Malpensa (dove le principali aziende nel settore della manutenzione di impianti hanno presentato i propri case study), Hannover Messe 2016. Anche alcuni progetti europei negli ultimi anni sono stati finalizzati allo sviluppo di strumenti e tecniche per il monitoraggio e la diagnostica di sistemi meccanici.

1.2 I rotismi epicicloidali

Come è ben noto, i rotismi epicicloidali (o planetari) sono quelli in cui alcune ruote dentate, dette satelliti, hanno il proprio asse mobile, in quanto sono accoppiate rotoidalmente ad un membro rotante attorno ad un asse fisso, detto portasatelliti; le ruote aventi asse fisso sono invece dette solari. I rotismi epicicloidali possono avere uno o due gradi di libertà (nel caso in cui nessuna delle ruote sia fissa).

Nella presente tesi si considera solo il tipo di rotismo epicicloidale maggiormente impiegato nelle applicazioni industriali, schematizzato in Figura 1.2: si tratta di un rotismo epicicloidale ad un grado di libertà con corona esterna fissa, in cui i satelliti sono generalmente (ma non necessariamente) in numero maggiore di uno e disposti equidistanziati angolarmente attorno al solare. Solare e portasatelliti sono coassiali e ruotano nello stesso verso. Il rotismo lavora come riduttore o moltiplicatore di velocità a seconda di quale sia, tra il solare ed il portasatelliti, il membro movente e quello cedente. Nei casi studiati in questa tesi i rotismi lavorano sempre come riduttori di velocità; quindi il solare è movente ed il portasatelliti è cedente. Nel proseguo i termini "rotismo epicicloidale" e "riduttore epicicloidale" si riferiranno sempre specificamente a questa tipologia di rotismo. La realizzazione di diversi rapporti per uno stadio di riduzione si esegue normalmente mantenendo la stessa corona e cambiando il solare ed i satelliti. Le caratteristiche di coassialità e modularità vengono sfruttate per ottenere rapporti di riduzione più spinti, assemblando in serie più stadi di riduzione (Figura 1.3). I casi studiati sperimentalmente in questa tesi riguardano riduttori a tre stadi.

I rotismi epicicloidali permettono rapporti di trasmissione spinti, mantenendo peso e dimensioni contenuti [7] e buon rendimento. Offrono quindi interessanti vantaggi applicativi, tali da proporsi come una valida alternativa ai riduttori ordinari in diverse applicazioni industriali:

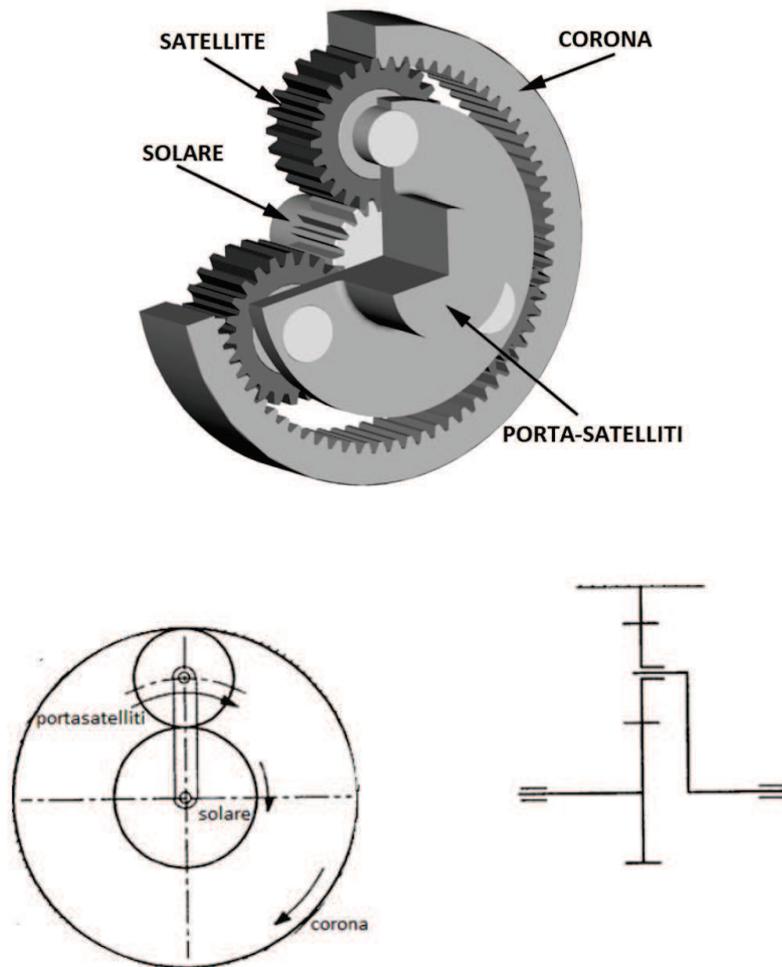


Figura 1.2: Schema di un rotismo epicicloidale ad un grado di libertà con corona a dentatura esterna fissa.

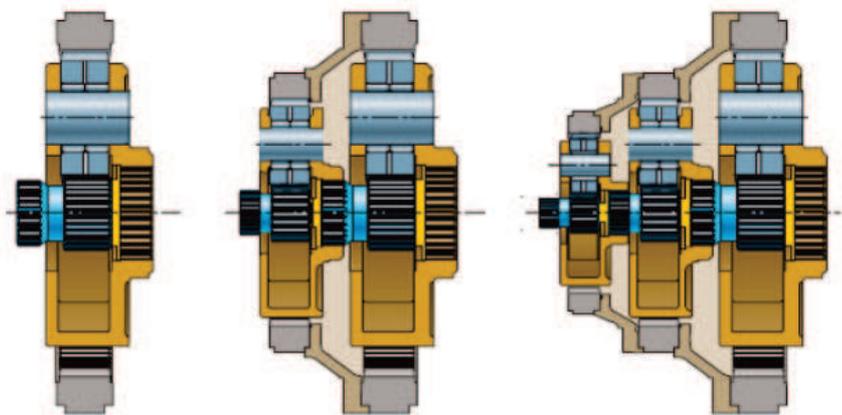


Figura 1.3: Riduttore epicicloidale ad uno stadio (a sinistra), a due stadi (in mezzo) e a tre stadi (a destra).

i vantaggi sono tanto più sensibili quanto più le applicazioni richiedono riduttori con elevati rapporti di riduzione, elevate coppie da trasmettere ed elevati carichi da sopportare sull'albero

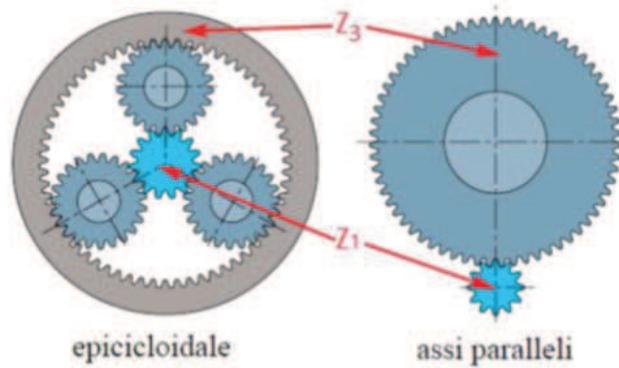


Figura 1.4: Confronto tra rotismo epicicloidale (sinistra) e rotismo ordinario (destra), a parità di numero di denti ($N_s = Z_1$, $N_a = Z_3$).

in uscita. A parità di numero di denti tra pignone e corona, indicati in Figura 1.4, è più spinto il rapporto di trasmissione (definito come rapporto tra le velocità angolari del cedente e del movente) dello stadio di riduzione epicicloidale, τ_{epic} , rispetto a quello di uno stadio ordinario, τ_{ord} :

$$\tau_{epic} = \frac{N_s}{N_s + N_a} \quad (1.1)$$

$$\tau_{ord} = \frac{N_s}{N_a} \quad (1.2)$$

Ciò comporta, per contro, a parità di rapporto di trasmissione, per un riduttore epicicloidale, un miglior proporzionamento degli ingranaggi, ingombri contenuti e costi minori. Un'altra caratteristica che avvantaggia i riduttori epicicloidali consiste nella possibilità di trasmettere un'elevata coppia con ingombri contenuti: nella riduzione epicicloidale le ruote hanno generalmente ingranamenti multipli, contrariamente a quanto avviene per un riduttore ordinario. A parità di coppia da trasmettere, questo si traduce in forze di ingranamento inferiori e dunque ruote con modulo e dimensioni ridotte. Minori dimensioni, a parità di velocità di rotazione, portano a velocità periferiche delle dentature più basse, per cui gli ingranaggi a dentatura dritta normalmente utilizzati nelle riduzioni epicicloidali sono in grado di competere a livello di rumorosità con gli ingranaggi a denti elicoidali delle riduzioni ordinarie. La possibilità di impiegare ingranaggi di modulo e dimensioni inferiori, comporta anche minori strisciamenti, tali da assicurare, pur con degli ingranamenti multipli, valori di rendimento totale paragonabili a quelli dei riduttori ordinari.

Un ulteriore punto a favore è costituito dai carichi sui cuscinetti: in una riduzione epicicloidale, le forze che si trasmettono al solare ed al portasatelliti attraverso i satelliti sono fra loro equilibrate e si riducono ad una coppia. In un riduttore ordinario invece le forze devono essere equilibrate da cuscinetti che supportano gli alberi. Ne risulta che in un rotismo epicicloidale i cuscinetti montati sugli alberi di ingresso e uscita servono esclusivamente per supportare carichi esterni al riduttore grazie all'equilibratura dei carichi sopra descritti.

Tali caratteristiche hanno permesso una larga diffusione dei riduttori epicicloidali in diversi settori, come ad esempio nella movimentazione dei macchinari industriali, nei cambi automatici

di autovetture, nelle turbine eoliche, nei differenziali automobilistici, nei rotori degli elicotteri e nelle grosse macchine per il movimento terra utilizzate in miniera.

L'aumento della diffusione di questi macchinari ha comportato un aumento dell'interesse nello studio di tali componenti, tra l'altro nello studio delle cause sorgenti di vibrazione e rumore e delle soluzioni per ridurle. Da tempo vi è quindi l'interesse di investigare i treni di ingranaggi epicicloidali, sia per quanto riguarda attività sperimentali per la misura del segnale vibratorio (Hidaka & et al., 1979, [8]), sia per quanto riguarda lo sviluppo di modelli in grado di fornire informazioni sul comportamento dinamico di tali riduttori. L'esistenza ed il miglioramento progressivo degli strumenti per poter modellare e simulare questa tipologia di trasmissioni (Ozguven & Houser, 1988, [9]), permette di poter raggiungere una progettazione più rapida e sicura, risparmiando i costi di prototipazione e potendo raggiungere la soluzione voluta in un tempo inferiore.

Come tutte le applicazioni meccaniche, anche questo tipo di trasmissioni ha delle criticità, più o meno gravi a seconda del tipo di applicazione. Possono esservi criticità per la sicurezza delle persone, come nel caso di elicotteri, o criticità economiche, come nel caso di generatori eolici. Nel primo caso si è constatato che approssimativamente un 15% degli incidenti di elicotteri è legato a problematiche relative alla trasmissione. Questo ha comportato l'implementazione di sistemi di monitoraggio vibrazionale al fine di diagnosticare per tempo l'insorgenza di difettosità, come ad esempio di cricche nei denti delle ruote (Blunt & Keller, 2006, [10]). Nel secondo caso il rotismo epicicloidale risulta essere responsabile del 25% del tempo di arresto per manutenzione nelle turbine eoliche (Ribrant & Bertling, 2007, [11]). Per via di situazioni come quelle appena citate, è cresciuta sempre di più la richiesta di studi sulla diagnostica di questa tipologia di componenti.

1.3 Diagnostica vibrazionale delle trasmissioni ad ingranaggi: stato dell'arte

Ogni macchinario in cui vi siano componenti in movimento da luogo a vibrazioni e quindi a rumore. In funzione del proprio stato di funzionamento, ogni macchinario è caratterizzato da una specifica "firma vibratoria". E' quindi possibile utilizzare i cambiamenti di questa firma, come indicatori dell'imminente presentarsi di un difetto. Molteplici procedure di analisi dei segnali sono state sviluppate per il monitoraggio e la diagnostica del macchinario industriale, a partire da circa una trentina di anni fa, quando si cominciò ad applicare un gran numero di tecniche di analisi del segnale con lo scopo di estrarre interessanti informazioni dalla firma vibratoria di un componente [12] [13] [14] [15] [7] [16] [17] [18][19][20][21][22][23][24][25] [26] [27]. Ci si limiterà qui a considerare i principali studi relativi alla diagnostica vibrazionale delle trasmissioni ad ingranaggi. Le tecniche di analisi dei segnali possono essere suddivise in base al loro dominio di appartenenza: si può quindi distinguere tecniche di analisi in base tempo, frequenza e tempo-frequenza.

Nell'ambito delle tecniche in base temporale, un efficace strumento d'indagine per molte tipologie di difetto è lo studio della media sincrona del segnale [28] [29] [30]. Il risultato della

media sincrona è un segnale mediato, sincronizzato con la rotazione di un organo rotante di riferimento, in cui le componenti aleatorie e non sincronizzate con il riferimento vengono attenuate dall'operazione di media. Inoltre si possono applicare alla media sincrona dei filtri passa-banda per filtrare le principali componenti dell'ingranamento e le relative armoniche; l'applicazione della trasformata di Hilbert permette poi di determinare le modulazioni di ampiezza e fase [30] [31] [32] [33] [34], che possono indicare la presenza di difetti locali. Per ottenere indici della presenza di malfunzionamenti e della loro severità si caratterizza il segnale nel dominio del tempo o la media sincrona tramite parametri statistici o metriche di vario tipo [35][36][37][38][39][40][41][42].

Potenziali difetti possono essere individuati anche mediante lo studio dello spettro in frequenza del segnale [43]. È importante ricordare che tutti i metodi di calcolo della trasformata di Fourier discreta si applicano a segnali stazionari periodici nel dominio di riferimento o a singoli transitori. Tuttavia, i difetti localizzati di un ingranaggio in genere introducono componenti non-stazionarie nel segnale [29] [30] [44] [45], che non possono essere studiate mediante le tecniche di analisi convenzionali. Da qui emerge l'importanza di utilizzare tecniche di analisi tempo-frequenza come la trasformata Wavelet continua (CWT) [46][47][48][49] e la distribuzione di Wigner-Ville (WVD). Come descritto in [29] [30] [45], l'ingranamento di un dente difettoso può essere efficacemente individuato sia dalla distribuzione delle ampiezze che dalla distribuzione delle fasi della CWT. La WVD fornisce una rappresentazione in alta risoluzione nel dominio tempo-frequenza per un segnale non stazionario e possiede molte altre interessanti caratteristiche enunciate in [50] [51]. Purtroppo questa distribuzione di energia contiene anche fuorvianti termini incrociati, relativi a componenti in diverse regioni tempo-frequenza.

I segnali vibrazionali delle macchine rotanti possono essere classificati come appartenenti ad una particolare tipologia di segnali non-stazionari, chiamati poli-ciclostazionari, cioè segnali non-stazionari che presentano al loro interno forti componenti poli-periodiche [52] [53]. Questo richiede che il segnale aleatorio venga modellato come ciclostazionario. La maggior parte dei primi lavori sulla tecniche di analisi ciclostazionaria sono stati svolti da W.A. Gardner [54]. In particolare, in [55] e [56] si evidenziano le potenzialità dell'analisi ciclostazionaria nella diagnostica dei cuscinetti, mentre in [29] [30] [52] [57] [58] [59] vengono illustrate le capacità della funzione di densità spettrale ciclica nell'individuare difetti in ingranaggi.

1.4 Diagnostica delle trasmissioni in ambiente industriale: norme e strumentazione sul mercato

1.4.1 Norme sul monitoraggio delle condizioni e la diagnostica delle macchine

ISO ha emesso una serie di standard internazionali in materia di monitoraggio delle condizioni e diagnostica. La prima edizione di ISO 17359 è stata rilasciata nel 2003 ed è stata abbracciata dall'industria, migliorando la qualità e la capacità di implementazione del monitoraggio. Nella seconda edizione sono stati inclusi nove diversi tipi di macchina con esempi tipici di guasto e modalità di rottura con i loro sintomi associati e parametri di misurazione. La manutenzione su condizione (CBM) è riconosciuta come una strategia economicamente efficace per miglio-

rare l'efficacia dei programmi di manutenzione, permettendo piani di manutenzione proattivi, piuttosto che reattivi. Per evitare la non adeguata applicazione di CBM si devono considerare fattori come la causa e i modi di guasto, criticità e il suo rapporto costo-efficacia, e utilizzando la tecnica di manutenzione sbagliata si può perdere tempo, denaro e risorse, spesso senza alcun effetto sul miglioramento o mantenimento dell'affidabilità. Le principali normative oggi in vigore per l'ambito di analisi vibrazionale (oltre alla ISO 17359 citata prima) sono relative alla terminologia, come la ISO 7284 e la ISO 13372, o costituiscono linee guida per la diagnostica dei macchinari e l'implementazione di sistemi di monitoraggio delle condizioni, come ISO 10816 e ISO 13373. Un'altra norma molto importante è la ISO 18436-2 che certifica il personale addetto alle misure e analisi vibrazionali in funzione della complessità della mansione a loro richiesta.

1.4.2 Sistemi commerciali per la diagnostica vibrazionale

Molte aziende di Service (Fag, Pruftechnik, SKF, Aesse Misure ed altre) hanno sviluppato strumentazioni per la diagnostica vibrazionale, che nella maggior parte dei casi eseguono analisi indicate dalle normative. Di seguito saranno presentate le caratteristiche salienti dei sistemi presenti oggi sul mercato, evidenziandone anche i limiti nei riguardi delle esigenze del monitoraggio e della diagnostica in ambiente industriale. Le tecniche di analisi delle vibrazioni qui citate si trovano richiamate, tra le altre, nel Capitolo 2. I sistemi commerciali si possono classificare come segue, sulla base della complessità delle analisi effettuate:

- A) Misura della severità di vibrazione v_{RMS} secondo la normativa ISO 10816.
- B) Analisi in frequenza.
- C) Analisi avanzate e configurabili dall'utente.

In ciascuna delle tre classi si trovano in commercio sia strumenti portatili sia strumenti per installazione fissa.

A) Misura della severità di vibrazione v_{RMS} secondo la normativa ISO 10816.

Questa categoria comprende gli strumenti base che servono sostanzialmente per verificare la normativa ISO 10816, cioè misurare il valore della severità di vibrazione v_{RMS} . Il segnale di vibrazione viene rilevato tramite un accelerometro.

In genere questi strumenti utilizzano un accelerometro industriale con sensibilità di 100 mV/g e possono arrivare ad una frequenza di campionamento di 20 kHz. Solitamente la risoluzione non supera i 16-bit. La funzione principale resta quella di misurare la severità di vibrazione, quindi analizzano il segnale acquisito da 10 a 1000 Hz. Tuttavia, spesso, viene implementata anche qualche funzione proprietaria che stima la condizione dei cuscinetti sfruttando tutto il range in frequenza a disposizione. Questi strumenti sono impiegati principalmente per controllare se in fase di installazione o durante il funzionamento si verificano elevate vibrazioni imputabili in genere ad un disallineamento o ad un importante malfunzionamento della macchina. Gli strumenti portatili di questo tipo



Figura 1.5: Strumenti per la misura della severità di vibrazione in accordo con la norma ISO 10816: a sinistra un accelerometro wireless SKF Indicator; sulla destra Fluke 805 Vibration Meter.

sono chiamati "vibro-pen" e sono sostanzialmente l'evoluzione elettronica del cacciavite (con stetoscopio), usati per anni dai tecnici per effettuare la diagnosi dei macchinari. Esistono poi strumenti ad installazione permanente che misurano in real-time il valore di severità di vibrazione secondo la normativa, inviando il risultato con cadenza prestabilita all'unità di supervisione e controllo. In questo caso gli accelerometri possono essere cablati, mentre nelle ultime versioni possono essere completamente wireless alimentati a batteria. Il costo di questi strumenti si aggira attorno al migliaio di euro.

B) Analisi in frequenza.

Questi strumenti, oltre alla misura della severità di vibrazione, effettuano l'analisi in fre-



Figura 1.6: Strumenti per la diagnostica: a sinistra un dispositivo portatile di SKF; a destra un dispositivo fisso per il monitoraggio on-line, FAG Smartcheck.

quenza con possibilità di graficare lo spettro; se è presente un sensore giri, le frequenze vengono scalate per permettere all'operatore di individuare le frequenze multiple della

rotazione. Bisogna precisare comunque che non effettuano analisi in base angolo, quali la media sincrona (non vengono eliminate le componenti che non sono sincrone con la frequenza di rotazione). Vengono utilizzati per fini diagnostici in caso di malfunzionamenti specifici e/o per effettuare un'ispezione (periodica) più dettagliata. Per abbattere i costi, gli strumenti fissi multicanale più economici sono generalmente dei multiplexer, cioè i canali non sono acquisiti in maniera sincrona. Gli strumenti portatili possono essere multicanale - in genere 2 o raramente 4 canali, anche sincroni - ed hanno la possibilità di impostare il piano di sorveglianza delle macchine dell'impianto. Pertanto i prezzi partono da cifre di poco inferiori ai mille euro per strumenti con frequenze di campionamento di 20 kHz multiplexer e 16-bit di risoluzione, per arrivare attorno ai diecimila euro per strumenti che hanno 50 kHz di frequenza di campionamento, multicanale, tachimetrica acquisita in sincrono con gli accelerometri e 24-bit di risoluzione.

C) Analisi avanzate e configurabili dall'utente.

In questa categoria rientrano gli strumenti più complessi, completamente configurabili



Figura 1.7: Esempio di strumento per il monitoraggio con moduli hardware dedicati ai diversi tipi di segnale.

sia dal punto di vista dell'hardware che del software. Questi strumenti sono studiati per essere modulari, con moduli hardware dedicati ai diversi tipi di segnale (tensione, corrente, ...) e software personalizzabili che possono effettuare diverse analisi complesse, in funzione della macchina monitorata e dello scopo dell'analisi. In genere si tratta di installazioni fisse che quasi sempre richiedono un accesso ad internet per il controllo remoto e il download dei dati acquisiti. Tutti questi aspetti rendono queste strumentazioni estremamente costose, infatti il costo è prossimo ai ventimila euro, esclusi i costi di Service e gestione dati. Ed è proprio il tipo di Service scelto (affidato a terzi, interno con supporto esterno, oppure completamente interno) e il modo di gestire i dati (avvalendosi oppure no di una connessione ad internet) ad avere un notevole impatto sui costi. Un'azienda di riferimento nel settore per la gestione dei dati è ABODATA, alla quale si sono affidate aziende come Pirelli e Cimballi, che offre piani di datalogging da remoto a partire da 1 €/macchina, oltre a costi di licenza e gestione molto bassi rispetto alle aziende di Service specifiche per l'industria. Questi sistemi, in genere fissi, vengono usati in

impianti particolarmente critici che si allontanano dalle condizioni tipiche di una linea di produzione o per macchine poco accessibili, situazioni in cui i costi così elevati sono giustificati.

Alcuni degli strumenti commerciali sopra descritti sono stati utilizzati nel corso di prove sperimentali su riduttori epicicloidali, condotte presso la società Bonfiglioli Riduttori, al fine di verificarne l'efficacia per il monitoraggio e la diagnostica di questi componenti. I risultati hanno mostrato che le analisi condotte da tali strumentazioni non sono state in grado di individuare i difetti tipici. Uno dei motivi può essere la complessità dei segnali vibrazionali prodotti dai riduttori epicicloidali, anche a causa degli ingranamenti multipli e del moto delle zone di ingranamento rispetto all'accelerometro fisso alla scatola.

1.4.3 Descrizione dei software commerciali e delle loro funzionalità

Gli strumenti commerciali appena citati, nella loro versione più performante, per la rielaborazione avanzata dei dati acquisiti, sono dotati di un software per l'analisi dei dati (le cui prestazioni sono riportate in Tabella 1.1).

Tabella 1.1: Confronto tra i principali software commerciali di diagnostica

| | PRUFTECHNIK OMNITREND | FAG PROcheck SW | SKF @ptitude | Bastra VMgear RD |
|---------------------|--------------------------|--------------------|-----------------|---------------------|
| Database | Si | Si | Si | Si |
| Alarms | Si | Si | Si | Si |
| Modello cinematico | Si | N/A | N/A | Si |
| TSA | Si | Si | Si | Si |
| Order Analysis | Si | Si | Si | No |
| Forma d'onda | Si | Si | Si | No |
| Cepstrum | Si | Si | Si | No |
| Inviluppo | Si | Si | Si | Si |
| Database cuscinetti | Si | Si | Si | Si |

Di base questi SW (nella versione esaminata durante la ricerca iniziale) permettono di visualizzare i trend dei principali indici energetici calcolati sul segnale globale ed effettuano l'analisi dei cuscinetti. Alcuni permettono/richiedono l'implementazione del modello cinematico del riduttore per effettuare un'analisi più accurata degli ingranaggi attraverso un'analisi in ordini. Tuttavia quest'ultima analisi, spesso semplificata dividendo l'asse delle frequenze per la velocità di rotazione misurata (senza quindi fare il ricampionamento in base angolo), si ferma all'analisi dei riduttori ordinari ad assi paralleli. Infatti non forniscono algoritmi specifici per i rotismi epicicloidali, che permettano di estrarre la media sincrona del solare e dei singoli satelliti tenendo conto del movimento relativo dei primi rispetto la posizione dell'accelerometro. Inoltre, ulteriori difficoltà nell'impiego degli strumenti commerciali sono generalmente le seguenti:

- non vengono forniti gli algoritmi impiegati nelle tecniche di analisi, per permettere di adattare i parametri ai casi specifici;
- raramente vengono resi disponibili ed esportabili i segnali temporali originali per post-processing da parte dell'utente con altri software;
- in ogni caso, la durata dei segnali temporali è inadeguata a permettere l'esecuzione di analisi con standard elevati (ad esempio, con un elevato numero di medie);
- il costo è elevato.

1.5 Obiettivi e contenuti della tesi

Il presente lavoro di ricerca si colloca nell'ambito della diagnostica delle trasmissioni ad ingranaggi, in particolare dei rotismi epicicloidali, e si propone di mettere a punto procedure specifiche ed efficienti di analisi delle vibrazioni, implementarle in un codice atto all'impiego in ambiente industriale e validarne sperimentalmente l'efficacia.

L'attività prende le mosse dalla constatazione dei limiti delle strumentazioni di analisi attualmente offerte sul mercato, soprattutto in relazione alla diagnostica delle trasmissioni epicicloidali complesse, come evidenziato al paragrafo precedente. Il prodotto di questa tesi intende colmare quei limiti.

Il sistema di diagnostica che si intende realizzare deve essere impiegabile in ambiente industriale per il monitoraggio delle condizioni e la diagnostica dei malfunzionamenti, finalizzato sia alla manutenzione predittiva sia alla raccolta di dati per l'ottimizzazione delle prestazioni. In base all'esperienza pregressa condotta con strumentazioni commerciali, si è valutato che il sistema di diagnostica debba basarsi su un hardware di acquisizione avente almeno 4 canali sincroni con risoluzione di 24 bit e frequenza di campionamento fino a 50 kHz. Gli obiettivi specifici della tesi sono i seguenti.

- **Verificare ed implementare un algoritmo per estrarre la media sincrona del solare e dei singoli satelliti di un rotismo epicicloidale (Planetary TSA).** Infatti, l'analisi delle vibrazioni in questo tipo di rotismo è resa complessa dal movimento dei satelliti che fa variare continuamente la distanza – e conseguentemente le funzioni di trasferimento – tra le sorgenti di vibrazioni (ingranamenti e cuscinetti) ed il trasduttore fisso all'esterno della corona. A fini diagnostici, è necessario estrarre dal segnale vibratorio complessivo il contributo di ciascuna ruota dentata mediante una particolare procedura di media sincrona (Planetary TSA), che, nel caso dei rotismi epicicloidali, deve depurare l'effetto della variazione delle funzioni di trasferimento. In letteratura sono proposti algoritmi per effettuare tale media sincrona, ma nessun sistema commerciale implementa alcuna di queste tecniche. E' risultato quindi necessario scegliere l'algoritmo più efficiente, implementarlo nel sistema di diagnostica e verificarlo, risolvendo le criticità applicative.
- **Sviluppare un codice software dedicato all'analisi delle vibrazioni a fini diagnostici di rotismi epicicloidali,** atto ad essere impiegato in ambiente industriale. Il software deve contenere moduli per acquisizione dei segnali vibratorii, filtraggio, ricampionamento

in base tempo e in base angolo (anche considerando il rapporto di trasmissione), media sincrona (TSA), individuazione della fase dei satelliti, media sincrona per gli epicicloidali (Planetary TSA), estrazione dei segnali residui, differenza e regolari, trasformata di Fourier, Power Spectral Density, Envelope, demodulazioni di ampiezza e fase, calcolo di parametri statistici e metriche specifiche per gli ingranaggi. L'assemblaggio dei vari moduli deve permettere di costruire procedure specifiche di analisi dei dati. E' risultato necessario scegliere linguaggio e strategie di implementazione particolari per incrementare l'efficienza del codice, a fronte della necessità di trattare grosse quantità di dati e garantire la stabilità del programma. Si rileva che non esistono prodotti commerciali con analoghe funzioni.

- **Individuare indicatori di condizione per il monitoraggio dei rotismi epicicloidali, valutandone sperimentalmente l'efficacia.** In letteratura sono stati proposti a fini diagnostici numerosi parametri statistici della media sincrona; la tesi presenta tre ulteriori metriche originali. I risultati di campagne sperimentali condotte su un riduttore epicicloidale a 3 stadi di potenza nominale 3 kW hanno permesso di valutare l'efficacia delle metriche proposte in letteratura e di quelle originali, risultate efficaci nell'individuare l'insorgere del pitting ed il suo successivo sviluppo. Più in generale, sulla base dei risultati sperimentali è stata verificata l'efficacia degli algoritmi implementati nel codice di analisi diagnostica.

La tesi è articolata come segue.

In questo primo capitolo sono state presentate le considerazioni introduttive a questa tesi: il contesto industriale, con riferimento a sistemi avanzati di manutenzione, le caratteristiche applicative dei rotismi epicicloidali, lo stato dell'arte sulla diagnostica vibrazionale delle trasmissioni a ingranaggi, le relative norme e le strumentazioni disponibili sul mercato per le applicazioni industriali. Infine si sono presentati gli obiettivi della tesi e il valore aggiunto che si intende fornire.

Nel Capitolo 2 si richiamano alcune delle tecniche di analisi delle vibrazioni maggiormente impiegate nella diagnostica delle trasmissioni ad ingranaggi, mettendone in evidenza gli aspetti applicativi.

Nel Capitolo 3 si richiamano le proprietà cinematiche dei rotismi epicicloidali e se ne descrivono le caratteristiche dei segnali vibratorii, con particolare riferimento alle modulazioni conseguenti alla funzione di trasferimento variabile tra le sorgenti ed il trasduttore sulla cassa. Si presentano poi i due algoritmi proposti in letteratura per effettuare la media sincrona negli epicicloidali, confrontandoli dal punto di vista applicativo.

Nel Capitolo 4 si presenta il codice software che è stato sviluppato per l'analisi delle vibrazioni a fini diagnostici di rotismi epicicloidali, atto ad essere impiegato in ambiente industriale, e se ne evidenziano le caratteristiche peculiari e le strategie di implementazione.

Nel Capitolo 5 si presentano le prove sperimentali condotte e se ne discutono i risultati. Viene così validato il codice software sviluppato e viene valutata e confrontata l'efficacia di alcune metriche nell'individuare l'insorgere di difetti – localizzati o distribuiti – ed il loro sviluppo.

Infine vengono presentate le Conclusioni complessive della tesi.

Capitolo 2

Tecniche di Analisi del Segnale

In questo capitolo si richiamano alcune delle tecniche di analisi delle vibrazioni impiegate nella diagnostica delle trasmissioni ad ingranaggi, mettendone in evidenza gli aspetti applicativi. All'interno di questo capitolo verranno presentate anche tre nuove metriche sviluppate nel corso delle prove sperimentali.

2.1 Classificazione dei segnali e delle tecniche di analisi

In questo capitolo è raccolta una serie di concetti fondamentali concernenti l'analisi del segnale. Le tecniche per l'analisi del segnale sono numerose e consentono di ricavare numerose informazioni utili riguardanti i difetti a partire dal segnale di vibrazione misurato. Tuttavia, la maggior sfida del monitoraggio su condizione consiste nel trovare il metodo più adatto alla singola applicazione.

In conseguenza di ciò, la tipologia di segnale da analizzare ricopre un ruolo chiave sull'analisi da svolgere, così come sulla scelta dei parametri di processamento dei dati. Da qui, la necessità di avere ben presenti le differenti tipologie di segnali che possono incontrarsi nella pratica.

Più nel dettaglio, esistono segnali random che sono descritti matematicamente per mezzo della teoria della probabilità, le variabili random, e processi stocastici, i quali non rientrano negli scopi di questa tesi, ma per un'analisi più approfondita dei segnali stocastici si rimanda a [60] e [61]. La tipica classificazione dei segnali distingue tra:

- Segnali stazionari;
- Segnali non stazionari.

I segnali **stazionari** sono caratterizzati da proprietà medie che non variano nel tempo, risultando perciò indipendenti dal particolare campione di dati impiegato per la loro determinazione. Tale concetto può applicarsi sia a segnali *deterministici* che *random*. Nella fattispecie, un segnale *random* si definisce stazionario in senso largo se le statistiche del primo ordine (i.e. media) e quelle del secondo (i.e. covarianza) della Funzione Densità di Probabilità non variano nel tempo. Se tutti i momenti (o cumulanti) della Funzione Densità di Probabilità sono tempo-indipendenti allora il segnale random è stazionario in senso stretto.

Poiché un segnale **non-stazionario** *random* si contraddistingue per la variazione dei parametri

statistici in funzione del tempo, esso può definirsi come un segnale che soddisfa la proprietà di non-stazionarietà. A loro volta, i segnali non-stazionari possono dividersi in segnali non-stazionari continui e segnali transienti, che possono essere definiti come quelli che iniziano e finiscono a zero.

L'analisi dei segnali stazionari è basata in gran parte su tecniche nel Dominio del Tempo e della Frequenza, sviluppate a partire dalla Trasformata di Fourier, che consente di identificare le componenti in frequenza costituenti il segnale. Sebbene la Trasformata di Fourier possa essere usata per l'analisi dei segnali con impulsi periodici (essendo lo spettro risultante composto di armoniche e bande laterali uniformemente spaziate), la tecnica di media temporale adottata in essa non è adatta per la valutazione del comportamento dipendente dal tempo delle componenti in frequenza.

Al contrario, le tecniche Tempo-Frequenza, decompongono il segnale monodimensionale dipendente dal tempo in un piano bidimensionale evidenziando le variazioni temporali delle frequenze caratteristiche all'interno del segnale, rappresentando così una valida ed efficace alternativa alla Trasformata di Fourier per l'analisi di segnali non-stazionari. In aggiunta alla classica Short Time Fourier Transform (STFT), che presenta una risoluzione unica sia per il Dominio del Tempo che per quello della Frequenza, un'altra tecnica di analisi Tempo-Frequenza è la Continuous Wavelet Transform (CWT).

E' interessante considerare anche un'altra particolare classe di segnali non-stazionari, i cosiddetti segnali **ciclostazionari**, ovvero segnali che presentano periodiche variazioni di energia, sincrone con il ciclo di lavoro della macchina. La teoria della ciclostazionarietà fu sviluppata da Gardner nel campo delle telecomunicazioni [54] e da Antoni nel campo della meccanica per la diagnostica delle macchine rotanti [53].

2.2 Dominio del Tempo: parametri statistici

2.2.1 Metriche del segnale nel dominio del tempo

Un segnale temporale contiene una grande quantità di informazioni. L'indagine visiva di porzioni della forma d'onda temporale possono rivelare la natura del segnale (i.e. stazionario o non stazionario) e la presenza di eventuali periodicità intrinseche.

Applicando al segnale misurato nel dominio del tempo alcune semplici metriche è possibile ricavare alcune utili informazioni che non possono essere estrapolate attraverso analisi in altri domini. Inoltre, le metriche relative al dominio del tempo sono semplici e di facile implementazione e sono pertanto particolarmente adatte al monitoraggio continuo in ambiente industriale. Le metriche maggiormente implementate nei sistemi commerciali, come quelli descritti nel capitolo precedente, sono il valore di picco e il valore RMS che forniscono valutazioni complessive del livello di vibrazione. Nel seguito si riportano i parametri statistici maggiormente utili nell'analisi delle vibrazioni:

A) Picco

L'ampiezza di picco di un segnale $x(t)$ è definita come il massimo del valore assoluto del

segnale:

$$peak = \max|x(t)| \quad (2.1)$$

B) RMS

La radice quadrata della media quadratica – root mean square (RMS)- di un segnale è definita come:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (x(t))^2 dt} \quad (2.2)$$

dove T è la lunghezza del segnale temporale utilizzato per il calcolo del valore RMS. Il valore RMS per i segnali discreti (campionati) è la radice quadrata della media dei quadrati di un finito numero di campioni del segnale:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (x(n))^2} \quad (2.3)$$

Il valore RMS del segnale esprime il valor medio efficace in termini energetici. Nel caso del segnale di vibrazione misurato sulla scatola di riduttori ad ingranaggi, il valore RMS cambia con il carico e la velocità di funzionamento; in condizioni operative costanti, generalmente è un ottimo descrittore della condizione generale dei riduttori e può essere sensibile a difetti distribuiti, mentre è poco sensibile a difetti localizzati, che provocano picchi isolati nel segnale.

C) Severità di vibrazione v_{RMS} (ISO 10816)

La norma ISO 10816 prevede l'impiego della severità di vibrazione, definita come il valore RMS della velocità di vibrazione nel campo di frequenza da 10 a 1000 Hz:

$$v_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (v(t))^2 dt} \quad (2.4)$$

dove:

- T è il tempo di osservazione;
- v è la velocità di vibrazione.

Si tratta di un parametro che in modo semplice, ma globale, descrive lo stato vibratorio di una macchina. Monitorando il parametro di severità di vibrazione durante la vita utile di una macchina, si assiste tipicamente ad una prima diminuzione del valore, dovuto all'assestamento delle coppie cinematiche, seguito da una fase in cui il suo livello rimane quasi costante per un certo tempo, per aumentare, poi, man mano che le usure progrediscono e si sviluppano i primi danneggiamenti (Figura 2.1) [35]. Predisponendo una serie di misure successive, ad intervalli fissi di tempo, è possibile, in base a queste, costruire una curva di tendenza, dalla quale, mediante estrapolazione, si può prevedere il momento in cui v_{RMS} raggiungerà un valore di soglia, in corrispondenza del quale occorrerà adottare le opportune misure manutentive.

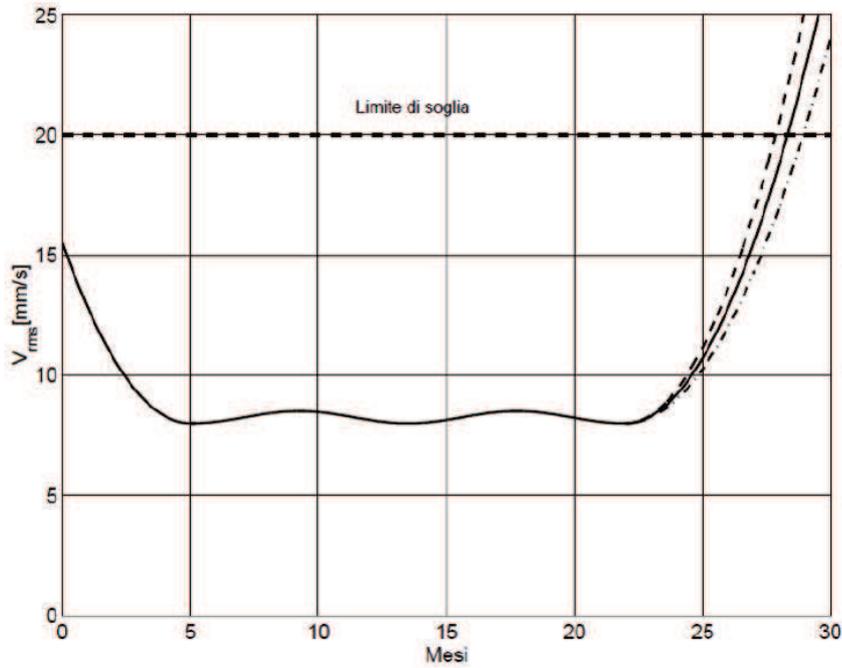


Figura 2.1: Andamento del trend v_{RMS} per un caso generico.

D) Crest Factor

Il Crest Factor (CF) è definito come il rapporto tra il valore di picco e il valore RMS.

$$CF = \frac{peak}{RMS} \quad (2.5)$$

Questo parametro indica il danno al suo stadio iniziale. Tale metrica fornisce quindi una valutazione normalizzata di valore elevato in presenza di pochi picchi di ampiezza nettamente maggiore del valore efficace. Ad esempio, nel caso degli ingranaggi, è generalmente un parametro sensibile alla presenza di uno o pochi difetti localizzati.

E) Kurtosis (K)

Il Kurtosis è un parametro adimensionale ottenuto dalla normalizzazione del quarto momento centrale del segnale; è definito come il rapporto tra il quarto momento statistico centrale ed il quadrato della varianza:

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

dove:

- x_i è il segnale campionato in N punti;
- \bar{x} è il valore medio del segnale.

Il Kurtosis descrive quanto la funzione densità di probabilità dell'ampiezza del segnale è appuntita o piatta. Un segnale con pochi picchi di elevata ampiezza avrà un Kurtosis di valore elevato. La distribuzione Gaussiana ha un valore di Kurtosis di tre; per questo alcuni algoritmi sottraggono 3 al valore della formula sopra indicata.

F) Energy Operator (EO)

Per ottenere l'Operatore Energetico (EO), per prima cosa, bisogna effettuare la sottrazione tra i punti del segnale elevati al quadrato e il prodotto tra il suo punto precedente per quello successivo. In particolare, quando si calcola il primo punto si utilizza l'ultimo e viceversa. L'operatore energetico (EO) è poi calcolato come il kurtosis normalizzato del segnale appena ottenuto (Δx).

$$EO = \frac{N^2 \sum_{i=1}^N (\Delta x_i - \Delta \bar{x})^4}{(\sum_{i=1}^N (\Delta x_i - \Delta \bar{x})^2)^2} \quad (2.7)$$

dove

- $\Delta \bar{x}$ è il valore medio del segnale Δx ,
- $\Delta x_i = x_i^2 - (x_{i-1} \times x_{i+1})$,
- N è il numero di punti nel dataset x .

G) Energy Ratio (ER)

Nel caso del segnale di vibrazione di una trasmissione ad ingranaggi, partendo dal segnale acquisito, si calcolino il segnale *differenza* - ottenuto eliminando la componente di ingranamento, le sue armoniche, le prime bande laterali e la componente di rotazione ed il segnale *regolare* - ottenuto come il segnale contenente soltanto la componente di ingranamento e le sue armoniche. L'Energy Ratio (ER) è definito come il rapporto tra i valori RMS del segnale "differenza" e del segnale "regolare". L'ER, pertanto, confronta l'energia contenuta nel segnale "differenza" con l'energia contenuta nel segnale "regolare". Generalmente risulta che, con il progredire dell'usura, l'energia si muove dal segnale "regolare" verso il segnale "differenza". Una pesante usura uniforme può quindi essere individuata attraverso l'ER.

$$ER = \frac{RMS_d}{RMS_r} \quad (2.8)$$

2.2.2 Applicazione al monitoraggio: note

La tecnica di monitoraggio più semplice prevede di analizzare la tendenza di indicatori dell'ampiezza delle vibrazioni, valutati su un'ampia banda di frequenze. Gli indicatori sono tipicamente l'ampiezza di picco o il valore della severità di vibrazione v_{RMS} , facilmente ottenuto utilizzando un trasduttore di velocità (o integrando il segnale di un accelerometro), e il livello RMS. Poiché l'ampiezza di picco non ha un valore statistico, spesso non è un indicatore affidabile del danno; i dati spuri causati da rumore statisticamente insignificante possono avere effetto sull'ampiezza di picco. A causa di questo, il livello v_{RMS} è generalmente preferito in applicazioni di monitoraggio delle condizioni della macchina. La tendenza di v_{RMS} può indicare condizioni di deterioramento in una macchina semplice, tuttavia non rileva guasti allo stadio iniziale e non fornisce informazioni diagnostiche. In particolare, difetti localizzati in macchinari complessi possono passare inosservati fino a quando si verifica un danno secondario significativo o un guasto catastrofico.

Il livello complessivo di vibrazione non fornisce informazioni sulla forma d'onda del segnale di vibrazione. Con diversi tipi di guasto, la forma del segnale è un indicatore di danni migliore del livello generale delle vibrazioni. Ad esempio, i guasti che producono impulsi di breve durata, come le anomalie del cuscinetto e i difetti localizzati sulla dentatura, non possono alterare in modo significativo il livello complessivo di vibrazione, ma possono causare una variazione statisticamente significativa della forma d'onda. Il fattore di cresta o il Kurtosis sono spesso utilizzati come misure non dimensionali della forma d'onda del segnale. Entrambe le metriche del segnale aumentano il valore con l'aumentare dell'impulsività del segnale (cioè la presenza di picchi isolati). Il Kurtosis, essendo un parametro statistico, di solito è preferibile al fattore di cresta. Tuttavia è più diffuso l'utilizzo del CF poiché sono al presente più comuni e affidabili gli strumenti che implementano questa funzione rispetto a quelli che usano il Kurtosis. A causa della natura non dimensionale dei valori del fattore di cresta e del Kurtosis, alcune valutazioni sulla natura di un segnale possono essere fatte senza le informazioni sulla tendenza. La tendenza delle metriche della forma d'onda può essere impiegata per il monitoraggio. Tuttavia, il loro valore può non essere correlato con la severità del danno; difetti che producono un piccolo numero di picchi isolati (come nelle fasi iniziali dei danni nei cuscinetti volventi) possono causare un aumento del fattore di cresta e di Kurtosis ma, come il danno diventa più diffuso, un gran numero di impulsi possono verificarsi causandone la diminuzione. Infatti, sia il fattore di cresta che il Kurtosis diminuiscono se il numero di impulsi aumenta (aumentando il valore RMS del segnale), senza un aumento dell'ampiezza degli impulsi. Come con il livello complessivo di vibrazione, le metriche della forma d'onda non sono in grado di localizzare i guasti.

Spesso, la capacità di rilevazione del guasto utilizzando il livello di vibrazione complessiva e/o le metriche della forma d'onda si può migliorare significativamente dividendo il segnale di vibrazione in una serie di bande di frequenza prima dell'analisi. Questo può essere fatto anche con un semplice filtro passa banda analogico tra il sensore di vibrazione e la strumentazione di analisi. Il potenziale vantaggio è che, anche se un guasto non può causare un cambiamento significativo nel segnale di vibrazione complessivo (a causa della mascheratura della più alta energia legata a vibrazioni non correlate al guasto), si può produrre un cambiamento significativo in una banda di frequenze in cui le vibrazioni non legate al guasto siano sufficientemente piccole. Nel caso di un riduttore semplice, in una certa banda di frequenza possono essere dominanti le componenti di rotazione dell'albero, in un'altra quelle di ingranamento, e in un'altra quelle di risonanze strutturali eccitate.

Strumenti per la registrazione di livelli di vibrazione globale, fattore di cresta e/o Kurtosis sono facilmente disponibili, relativamente a buon mercato e semplici da usare. A causa di questo, possono essere un metodo molto conveniente di controllo semplice di componenti della macchina che sono relativamente economici e facilmente sostituibili, ma che svolgono un ruolo critico (ad esempio piccole pompe e generatori). Le metriche del segnale nel dominio del tempo possono rilevare il guasto imminente di questi componenti in modo da consentirne la sostituzione prima della rottura completa; anche se il componente danneggiato può essere fuori dal periodo di manutenzione programmata, il costo di sostituzione dei componenti è ge-

neralmente trascurabile rispetto al costo potenziale di un guasto catastrofico (danni secondari, fermo macchina, ecc.). Per sistemi semplici e critici per la sicurezza, il livello di vibrazione complessiva e/o il livello di Kurtosis può essere pertanto parte di un sistema di monitoraggio efficace, in combinazione con l'analisi del particolato nel lubrificante e/o monitoraggio della temperatura.

Per le macchine più complesse o costose, è generalmente preferibile rilevare i danni in una fase iniziale per consentire alla macchina di essere riparata anziché sostituita. Questo richiede tecniche che siano sensibili ai differenti guasti dei singoli componenti e che possano fornire indicazioni diagnostiche, mentre le semplici metriche del segnale nel dominio del tempo, anche con l'utilizzo di un filtro passa-banda, non forniscono alcuna informazione diagnostica.

2.3 Dominio della Frequenza: Analisi spettrale

Più significativa risulta invece, in termini di rilevazione mirata di difetti e fenomeni interni al sistema, l'analisi in frequenza [43]. In effetti lo spettro delle vibrazioni di una macchina contiene il contributo di tutti gli organi costituenti il sistema; caratterizzando in modo corretto la dinamica della macchina, è possibile associare le varie componenti nello spettro ai vari elementi in gioco. L'analisi spettrale (o in frequenza) è un termine utilizzato per descrivere l'analisi della rappresentazione nel dominio delle frequenze di un segnale [62]. L'analisi spettrale è la tecnica di analisi delle vibrazioni più comunemente usata per il monitoraggio delle condizioni nei sistemi di trasmissione ad ingranaggi e si è rivelata uno strumento prezioso per l'individuazione e la diagnosi di base dei guasti in semplici macchine rotanti ([63], [64]), in quanto separa i contributi delle diverse componenti in frequenza. Per le macchine operanti a velocità costante nota, le frequenze delle vibrazioni prodotte dai vari componenti della macchina possono essere stimate. Pertanto, una variazione del livello di vibrazione in una determinata banda di frequenza può di solito essere associato ad un particolare componente della macchina. Analisi dei livelli di vibrazione relativi a differenti bande di frequenza possono spesso dare un'indicazione della natura di un guasto, fornendo alcune capacità diagnostiche.

Il processo fondamentale comune a tutte le tecniche di analisi spettrale è la conversione di una rappresentazione nel dominio del tempo del segnale di vibrazione in una rappresentazione nel dominio delle frequenze. Ciò può essere ottenuto mediante l'uso di filtri a banda stretta o, più comunemente, utilizzando la trasformata di Fourier discreta (DFT) applicata ai dati digitalizzati.

2.3.1 Conversione nel dominio delle frequenze e algoritmo FFT

La rappresentazione nel dominio delle frequenze di un segnale può essere descritta dalla Trasformata di Fourier [64]:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt. \quad (2.9)$$

Il processo inverso (Trasformata Inversa di Fourier [63] [64]) può essere utilizzato per convertire lo stesso da una rappresentazione nel dominio della frequenza al dominio del tempo:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f)e^{j2\pi ft} df. \quad (2.10)$$

I segnali campionati nel tempo sono generalmente infinitamente lunghi, ma quando la lunghezza del segnale registrato è finita, questo porta alla stessa situazione che si ha per la serie di Fourier, cioè uno spettro discreto relativo ad una registrazione temporale è considerato implicitamente periodico. L'integrale continuo infinito della trasformata di Fourier diventa una serie di somme finite. La Trasformata Discreta di Fourier (DFT) ([65],[63]) dei dati campionati discreti è definita come [65]:

$$X(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp(-j2\pi mn/N) \quad (2.11)$$

e la Inverse Discrete Fourier Transform [65] è:

$$x(n) = \sum_{m=0}^{N-1} X(m) \exp(j2\pi mn/N) \quad (2.12)$$

Questa versione, nota come la Trasformata Discreta di Fourier (DFT), corrisponde molto strettamente alla serie di Fourier in quanto la futura trasformata è divisa per la lunghezza N del segnale acquisito per dare correttamente le componenti scalate della Serie di Fourier. Se la DFT viene utilizzata con altri tipi di segnale, ad esempio transitori o segnali stazionari random, il fattore di scala deve essere adattato. L'operazione DFT può anche essere espressa in forma matriciale:

$$X_m = \frac{1}{N} W_{mn} x_n \quad (2.13)$$

dove

- X_m rappresenta il vettore di N componenti in frequenza
- x_n rappresenta gli N campioni temporali $x(n)$
- W_{mn} rappresenta la matrice quadrata dei vettori unitari $\exp(-j2\pi mn/N)$ con orientazione angolare dipendente dall'indice di frequenza m (le righe) e dall'indice del campione temporale n (le colonne).

La maggior parte degli analizzatori di spettro moderni usa il Fast Fourier Transform (FFT)[65], che è un algoritmo efficiente per eseguire la trasformata discreta di Fourier (DFT). Il processo di campionamento utilizzato per convertire il segnale a tempo continuo in un segnale a tempo discreto può causare alcuni effetti indesiderati. Ci sono un certo numero di limitazioni intrinseche nel processo di conversione dei dati di vibrazione dal dominio del tempo al dominio della frequenza.

A) Limitazione della banda temporale

Il campionamento dei segnali analogici è di solito eseguito ad uguali intervalli di tempo Δt (Figura 2.2). Definendo:

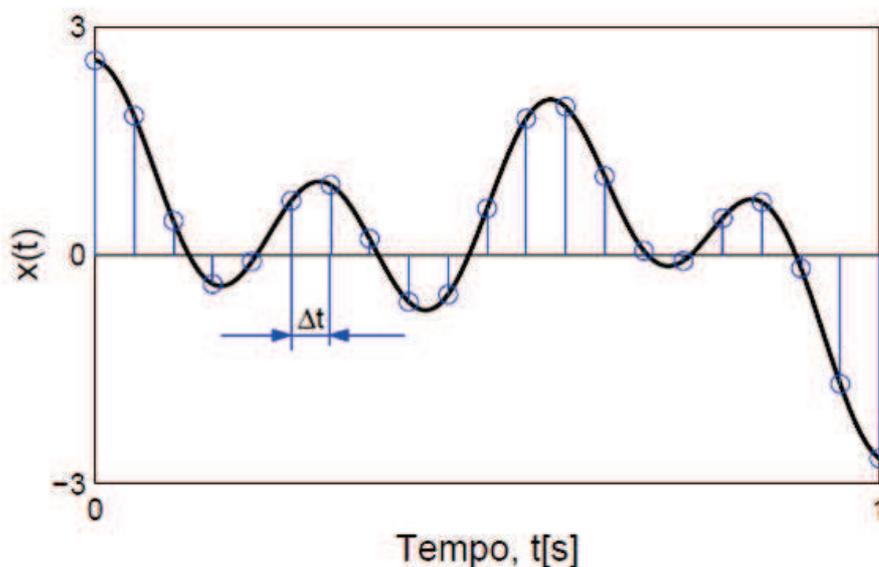


Figura 2.2: Segnale campionato nel tempo.

- campionamento nel dominio del tempo:

$$N = \frac{T}{1/2B} = 2BT \quad (2.14)$$

- campionamento nel dominio delle frequenze:

$$N = \frac{2B}{1/T} = 2BT \quad (2.15)$$

risulta che il numero di campioni discreti necessari per descrivere una registrazione temporale di lunghezza T e di banda passante B è $N = 2BT$. Ne consegue che il massimo intervallo di campionamento è $\delta t = T/N = 1/2B$. Se si utilizzano punti di campionamento distanti meno di $1/2B$ si ottengono campioni ridondanti con un inutile aggravio del calcolo ([66],[63]).

B) Aliasing

Un importante aspetto del processo di digitalizzazione è quello indicato con il termine di aliasing. Esso costituisce una sorgente potenziale di errore che non si presenta nell'analisi diretta dei dati analogici, ma è inerente a tutti i processi digitali preceduti da una conversione analogico digitale. Il fenomeno può alterare la forma reale degli autospettri, quando questi si estendono a frequenze superiori a metà della frequenza di campionamento. Un esempio è riportato nella Figura 2.3 dove in a) è riportato lo spettro effettivo, mentre in b) è rappresentato quello modificato dall'aliasing. Il solo modo pratico per evitare l'errore di aliasing è quello di eliminare dai dati analogici tutte le informazioni a frequenze superiori a $fs/2$ (fs è la frequenza di campionamento e $fs/2$ prende il nome di frequenza di Nyquist) e questo si fa utilizzando filtri analogici passa basso, detti anche filtri anti-aliasing, che eliminano il contenuto in frequenza superiore a quella di Nyquist.

C) Leakage

Quando si applica la FFT, si presume che i dati campionati siano periodici con il tempo

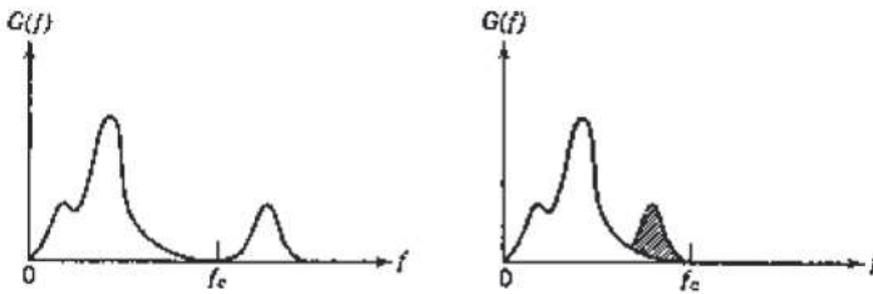


Figura 2.3: Fenomeno dell'aliasing.

di registrazione. Se non è questo il caso, i risultati spuri possono derivare da discontinuità tra i punti di inizio e fine del tempo di registrazione. Questo 'leakage' è normalmente compensato applicando una funzione finestra che ha valori zero all'inizio e alla fine della registrazione temporale. Ciò comporta una risoluzione compromessa in quanto riduce sensibilmente la durata temporale del segnale. Per una macchina semplice, l'acquisizione può essere sincronizzata con la rotazione della macchina, assicurando che le principali componenti di vibrazione siano periodiche all'interno del periodo di acquisizione; questo è difficile da ottenere con macchine complesse a causa del gran numero di frequenze non armonicamente correlate.

2.3.2 PSD

Il metodo più comune per il calcolo della PSD è quello chiamato "Metodo di Welch" che è basato sulla media di periodogrammi finestrati [35]. Questo metodo è virtualmente l'unico disponibile nei sistemi di analisi delle vibrazioni commerciali. Il metodo di Welch si basa sul dividere il segnale $x(n)$ in M segmenti, ognuno lungo N come è mostrato in Figura 2.4. Ogni segmento è finestrato prima di calcolare la DFT, e il periodogramma modificato (ampiezza al quadrato della DFT finestrata) viene mediato per ogni linea di frequenza. Di solito i blocchi temporali sono sovrapposti, in modo da diminuire l'errore random nella stima della PSD. As-

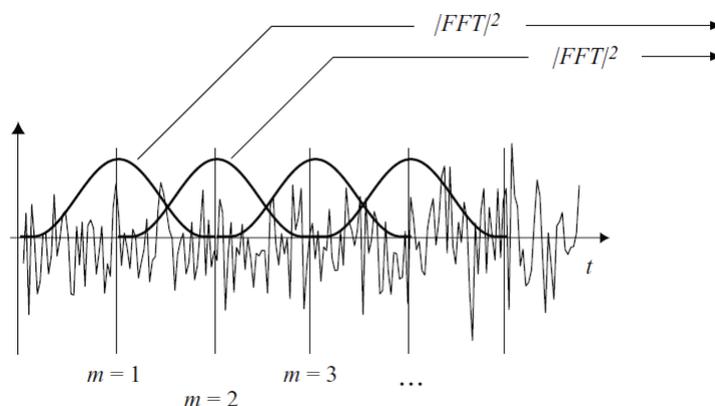


Figura 2.4: Metodo di Welch.

sumiamo di mediare M spettri DFT finestrati definiti come $X_{w,m}$, la densità di energia spettrale

utilizzando il metodo di Welch, $\hat{G}_{xx}^W(k)$, è calcolato come:

$$\hat{G}_{xx}^W(k) = \frac{S_p}{M} \sum_{m=1}^M X_{w,m}^* X_{w,m} = \frac{S_p}{M} \sum_{m=1}^M |X_{w,m}(k)|^2, \quad k = 1, 2, \dots, N/2 \quad (2.16)$$

dove bisogna determinare il fattore di scala S_p . Esso è tale che l'area sottesa alla PSD possa interpretarsi come il quadrato del valore RMS del segnale $x(n)$ (definizione alternativa della PSD rispetto alla relazione di Wiener-Khinchine). Nell'equazione sopra $X_{w,m}(n)$ è la DFT del segmento finestrato per il numero di medie m . Così, se $x_m(n)$ è il segmento numero m del segnale misurato e $w(n)$ è la finestra utilizzata, di solito la finestra di Hanning, allora:

$$X_{w,m}(k) = DFT[x_m(n) \cdot w(n)] = \sum_{n=0}^{N-1} x_m(n) w(n) e^{-j2\pi kn/N} \quad (2.17)$$

Resta da definire il fattore di scala S_p dell'equazione che la cui area sotto la PSD è stata definita come il quadrato del valore RMS del segnale $x(n)$. La prima correzione consiste nello scalare la funzione dividendo per la risoluzione in frequenza, Δf , in modo da rendere la PSD una funzione densità. Tuttavia, questo non sarà sufficiente, perché il fattore con cui si deve correggere la stima dello spettro è il rumore equivalente normalizzato nella larghezza di banda, B_{en} . Questo effettivamente significa che dobbiamo dividere il fattore di scala S_a definito per lo spettro di potenza per il rumore equivalente alla larghezza di banda, $B_e = B_{en} \Delta f$ per ottenere il fattore di scala S_p della PSD. Così facendo si ricava il fattore di scala per la PSD calcolata con il metodo di Welch che viene calcolato come:

$$S_p = \frac{2A_w^2}{N^2 B_e}, \quad (2.18)$$

per $k \neq 0$ e per $k = 0$

$$S_p = \frac{A_w^2}{N^2 B_e}. \quad (2.19)$$

Dove A_w è il fattore di correzione dell'ampiezza.

2.3.3 Applicazione all'identificazione dei malfunzionamenti: note

La misura del modo di vibrare del sistema e un suo puntuale monitoraggio permettono, dunque, di operare un efficiente ed ottimizzata politica di manutenzione predittiva; risulta inoltre di fondamentale importanza nella progettazione, quando sia necessario, di sistemi attivi di isolamento delle vibrazioni.

Di seguito verranno spiegati tre modi per analizzare gli spettri per i fini del monitoraggio su condizione.

A) Comparazione degli spettri

La tecnica di analisi spettrale più comunemente utilizzata per il monitoraggio su condizione della macchina è il confronto spettrale, in presenza di un autospettro di base (magnitudo quadrato) definito con la macchina in buono stato e in condizioni operative normali note (preferibilmente subito dopo la messa in servizio). Questo spettro 'basale' viene utilizzato come riferimento per i successivi spettri di potenza acquisiti ad intervalli regolari per tutta la vita della macchina in condizioni operative analoghe [67]. Il

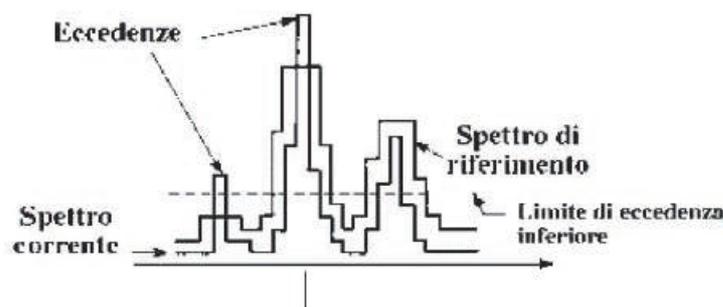


Figura 2.5: Esempio di analisi in frequenza mediante confronto tra spettri.

confronto di solito è fatto su una scala logaritmica, si ritiene che ci siano modifiche significative nella macchina quando si presentano aumenti di $6 - 8dB$ e si considerano cambiamenti maggiori di $20dB$ rispetto allo spettro di riferimento per una macchina in gravi condizioni (Randall [68]).

B) Analisi di tendenza degli spettri

Oltre al confronto spettrale, le varie forme di trend spettrale ([67],[69],[68]) possono essere utilizzate per dare qualche indicazione del tasso di progressione del guasto. Nella sua forma più semplice, il trend spettrale comporta la tendenza delle variazioni di ampiezza di tutte le linee spettrali (o di un numero selezionato) nel tempo. Per macchine complesse, questo spesso può comportare una grande quantità di dati, con conseguente sovraccarico di informazioni a causa del gran numero di righe spettrali significative [67]. Nel tentativo di semplificare il processo di rilevamento, sono stati proposti una serie di parametri basati sullo spettro che forniscono misurazioni statistiche di differenze spettrali. Mechefske e Mathew [69] forniscono una panoramica dei parametri spettrali e un confronto tra la loro individuazione e le prestazioni diagnostiche per una serie di malfunzionamenti dei cuscinetti. Essi hanno scoperto che un certo numero di questi parametri si comporta bene nella rilevazione dei difetti, ma che nessuno dei parametri disponibili fornisce significative informazioni diagnostiche.

C) Maschere spettrali

Le maschere spettrali sono un metodo di confronto spettrale a volte impiegato per identificare e valutare i cambiamenti nella firma spettrale ([67],[68]), con compensazioni effettuate per le variazioni nelle condizioni di funzionamento. La maschera spettrale viene derivata dallo spettro basale aggiungendo un limite di tolleranza ammissibile all'ampiezza logaritmica. Per tener conto delle variazioni di velocità, lo spettro di banda costante è talvolta convertito in uno spettro a banda percentuale costante [68], con la larghezza di banda percentuale determinata dalle differenze stimate della velocità che possono verificarsi tra le acquisizioni. Una volta che una maschera spettrale è definita, il confronto delle singole registrazioni è fatta riferendosi alla maschera per identificare un eventuale superamento.

2.3.4 Applicazione alla diagnostica dei malfunzionamenti: note

Anche per macchine relativamente semplici, lo spettro di vibrazione può essere molto complesso a causa dei molteplici contributi armonici della vibrazione dovuti ai vari componenti in combinazione con gli effetti dovuti al percorso di trasmissione. Questo rende l'analisi diagnostica dettagliata di un singolo spettro molto difficile. Il processo diagnostico è semplificato quando eseguito in collaborazione con il confronto e / o trend spettrale; tipicamente, solo le frequenze identificate come aventi cambiamenti significativi vengono analizzate in dettaglio per scopi diagnostici.

Randall [62] fornisce i dettagli delle differenze spettrali attese associate a vari difetti degli ingranaggi, e Su e Lin [70] forniscono informazioni simili per i guasti nei cuscinetti.

I difetti distribuiti che provocano notevole variazione dell'ampiezza media delle vibrazioni a frequenze discrete, quali forte usura e squilibrio, dovrebbero essere relativamente semplici da diagnosticare utilizzando l'analisi spettrale, in quanto si tradurrebbero in cambiamenti in poche linee di frequenza ad esse associate nello spettro. Difetti che causano modulazioni sinusoidali a bassa frequenza, come eccentricità o disallineamenti, possono anche essere diagnosticati attraverso l'insorgere delle bande laterali che circondano la frequenza di ingranamento e le sue armoniche. I difetti molto localizzati, come la rottura di un dente o lo sfaldamento, non sono facilmente diagnosticabili (e potrebbero anche non essere rilevati) essendo vibrazioni impulsive di breve durata che si manifestano nello spettro come un gran numero di linee di piccola ampiezza (McFadden [71] e Randall [62]).

Un esempio in cui le informazioni diagnostiche disponibili tramite l'analisi spettrale non erano sufficienti per rilevare una cricca di fatica in una ruota dentata (risultante in un incidente di elicottero fatale) è fornito da McFadden [72]. Per macchine relativamente semplici e quelle in cui le prime armoniche della frequenza di vibrazione dell'albero possono essere chiaramente identificate (cioè, possono essere ben separate dalle altre frequenze di vibrazione entro i limiti di banda e / o variazioni di velocità), la diagnosi dei guasti associati all'albero (frattura, squilibrio, disallineamento e dell'albero piegata) dovrebbe essere abbastanza semplice con l'analisi spettrale, dalla tendenza delle ampiezze delle vibrazioni o attraverso l'utilizzo di maschere spettrali relative all'albero. Gli altri difetti critici per la sicurezza producono tutti segnali impulsivi e, come è stato dimostrato da McFadden [72], questi difetti non possono essere diagnosticati in modo affidabile (o, in alcuni casi, addirittura rilevati) utilizzando l'analisi spettrale.

Riguardo alla strumentazione, un certo numero di aziende producono e / o forniscono analizzatori FFT di alta qualità ad un prezzo ragionevole. Oltre agli analizzatori commerciali, queste società forniscono anche una completa assistenza post-vendita al passo con la letteratura e corsi di formazione sui metodi diagnostici che utilizzano le loro attrezzature. Il principale svantaggio dell'analisi spettrale risiede nella sua complessità. A causa dell'uso abbastanza diffuso dell'analisi spettrale nel corso degli anni, vi è una raccolta abbastanza completa di letteratura sul suo utilizzo per la diagnosi dei guasti di ogni macchina (ad esempio, Randall [63] e Braun [73]). Nonostante ciò, le competenze specialistiche sono ancora necessarie per sfruttare a pieno le capacità diagnostiche dell'analisi spettrale. Quando si tratta di macchine complesse o con difetti localizzati, come i difetti sui denti degli ingranaggi, anche gli analisti esperti trovano

difficile la diagnosi.

2.4 Trasformata di Hilbert, inviluppo e modulazioni

Uno strumento operante nel dominio del tempo e particolarmente utile nell'analisi dell'inviluppo è la trasformata di Hilbert. Detta $x(t)$ una generica funzione nel tempo, la sua trasformata di Hilbert, $\tilde{x}(t)$, è definita come:

$$\tilde{x}(t) = \frac{1}{\pi} x(t) * \frac{1}{t} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (2.20)$$

Come si vede, l'equazione equivale, a meno di $1/\pi$, alla convoluzione di $x(t)$ e $\frac{1}{t}$. Vale anche la trasformazione inversa così definita:

$$x(t) = -\frac{1}{\pi} \tilde{x}(t) * \frac{1}{t} = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\tilde{x}(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (2.21)$$

Le trasformate di Hilbert godono di alcune importanti proprietà, verificabili per sostituzione. Indicando con $X(f)$ la trasformata di Fourier di $x(t)$

$$\begin{aligned} F[\tilde{x}(t)] &= -jX(f) & f > 0 \\ F[\tilde{x}(t)] &= 0 & f = 0 \\ F[\tilde{x}(t)] &= +jX(f) & f < 0 \end{aligned} \quad (2.22)$$

ossia $F[\tilde{x}(t)] = -jX(f) \operatorname{sgn}(f)$. Utilizzando la trasformata di Hilbert si può definire il segnale analitico $x_a(t)$ come:

$$x_a(t) = x(t) + j\tilde{x}(t) \quad (2.23)$$

La trasformata di Hilbert è un utile mezzo per ricavare l'inviluppo di una forma d'onda. L'inviluppo è il modulo del segnale analitico:

$$\operatorname{env} x(t) = |x_a(t)| = \sqrt{x^2(t) + \tilde{x}^2(t)} \quad (2.24)$$

La fase istantanea $\Theta(t)$ è data da

$$\Theta(t) = \tan^{-1} \left(\frac{\tilde{x}(t)}{x(t)} \right) \quad (2.25)$$

Mentre la sua derivata rispetto al tempo rappresenta la frequenza istantanea f_i :

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Theta(t)}{dt} \quad (2.26)$$

La modulazione avviene quando un segnale non necessariamente sinusoidale, anche detto segnale portante, ha la sua ampiezza o la sua frequenza che variano nel tempo. Nel primo caso si parla di modulazione di ampiezza, e il secondo è da considerarsi come una modulazione di frequenza o fase. La modulazione di fase è la deviazione di fase (spostamento angolare) dall'incremento lineare della fase del segnale portante, mentre la modulazione in frequenza è la differenza della frequenza istantanea (velocità angolare) dalla frequenza costante della portante. Così, la modulazione in frequenza è la derivata della modulazione di fase. Un utilizzo di questa tecnica a fini diagnostici è fornita da McFadden ([31],[71]).

2.4.1 Applicazione alla diagnostica dei cuscinetti volventi

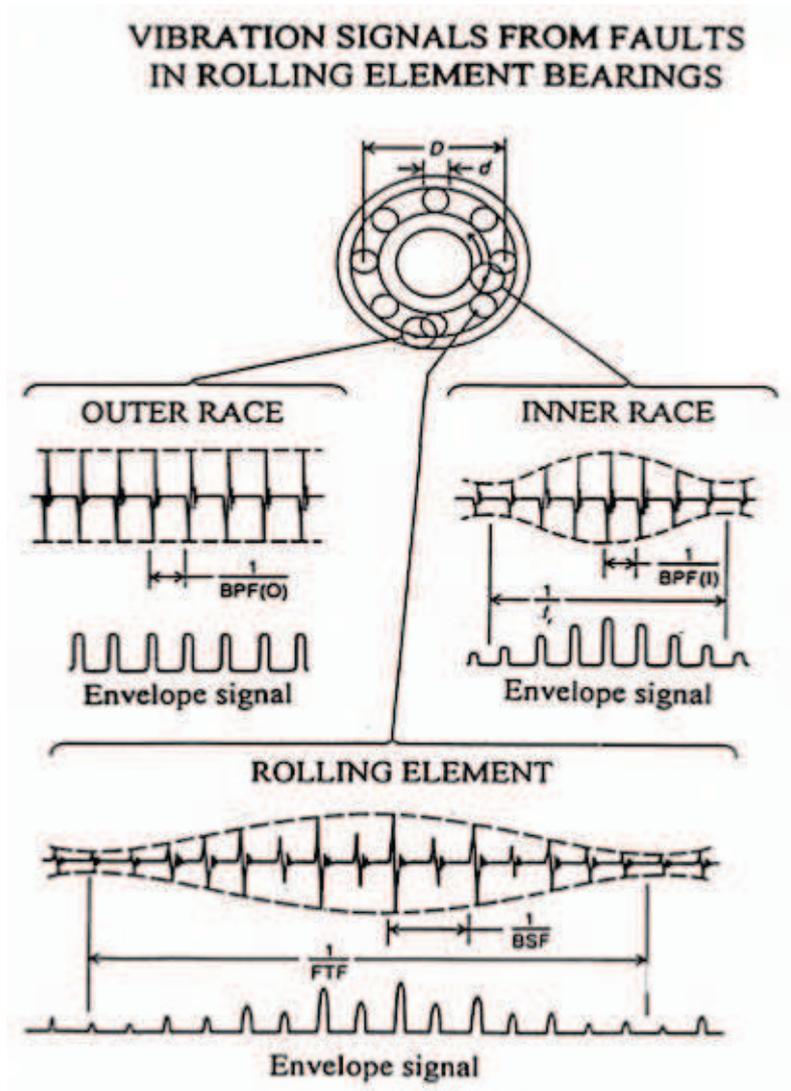


Figura 2.6: Difetti tipici nei cuscinetti.

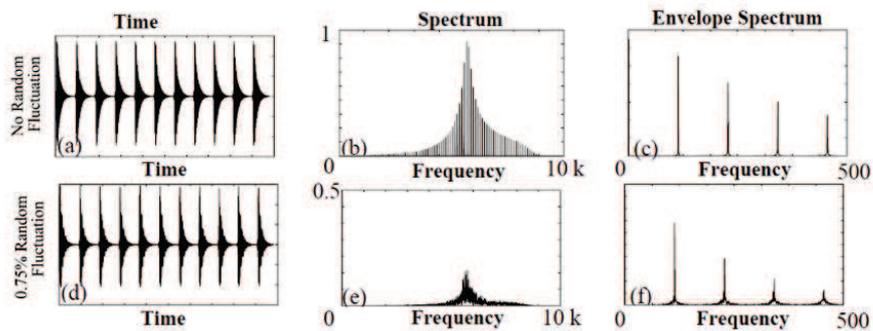


Figura 2.7: Esempio di applicazione dell'Involuppo.

Negli strumenti commerciali per la diagnostica dei cuscinetti volventi è generalmente presente un database con le caratteristiche della maggior parte dei cuscinetti presenti in commercio. Il sistema, noti il tipo di cuscinetto e la velocità di rotazione, siano esse quella nominale inserita dall'utente o quella rilevata dal sensore giri se è presente, calcola le frequenze ca-

ratteristiche dei possibili difetti presenti nei cuscinetti. In questi sistemi si ritrova il metodo dell'involuppo della forma d'onda (vedi Figura 2.7). In Figura 2.6 si possono vedere i tipici segnali accelerometrici prodotti da difetti localizzati nei diversi componenti di un cuscinetto ad elementi volventi e il corrispettivo segnale di involuppo prodotto dalla demodulazione in ampiezza [24]. Nel caso comune di carico unidirezionale, i difetti sulla pista esterna (BPFO) tendono a manifestarsi nella zona di carico e gli impatti non sono modulati come si può vedere dalla Figura 2.6. Dall'altro lato, i difetti sulla pista interna (BPFI) passano attraverso la zona di carico alla frequenza di rotazione dell'albero, e gli elementi volventi passano attraverso la zona di carico alla frequenza fondamentale del treno di sfere (FTF). Bisogna considerare che la frequenza di rotazione della sfera (BSF) è la frequenza con la quale i difetti impattano con la stessa pista (interna o esterna), quindi in genere ci sono due impulsi per ogni periodo base. Se questi impulsi (o almeno i loro involuppi) sono identici, le armoniche dispari potrebbero sparire e la frequenza fondamentale sarebbe il doppio del BSF. Le formule per calcolare le frequenze dei vari difetti del cuscinetto sono le seguenti

$$BPFO = \frac{nf_r}{2} \left\{ 1 - \frac{d}{D} \cos\phi \right\} \quad (2.27)$$

$$BPFI = \frac{nf_r}{2} \left\{ 1 + \frac{d}{D} \cos\phi \right\} \quad (2.28)$$

$$FTF = \frac{f_r}{2} \left\{ 1 - \frac{d}{D} \cos\phi \right\} \quad (2.29)$$

$$BSF = \frac{D}{2d} \left\{ 1 - \left(\frac{d}{D} \cos\phi \right)^2 \right\} \quad (2.30)$$

dove

- f_r è la velocità dell'albero
- n è il numero di elementi volventi
- ϕ è l'angolo del carico rispetto al piano radiale.

2.5 Dominio dell'Angolo

Stewart [74] ha dimostrato che con la 'media sincrona temporale' il complesso segnale di vibrazione nel dominio del tempo di una macchina, come la trasmissione di un elicottero, potrebbe essere ridotto a delle stime della vibrazione per i singoli alberi e le ruote su di essi calettate. La media sincrona per un albero viene quindi trattata come se fosse un segnale di vibrazione nel dominio del tempo per una rivoluzione di un componente (albero isolato con ruote solidali).

2.5.1 Media Sincrona

Il principio fondamentale alla base della media sincrona del segnale è che tutte le vibrazioni legate ad un albero, e le ruote su di esso calettate, si ripeteranno periodicamente con la rotazione dell'albero. Dividendo il segnale di vibrazione in segmenti contigui, ciascuno dei quali ha una

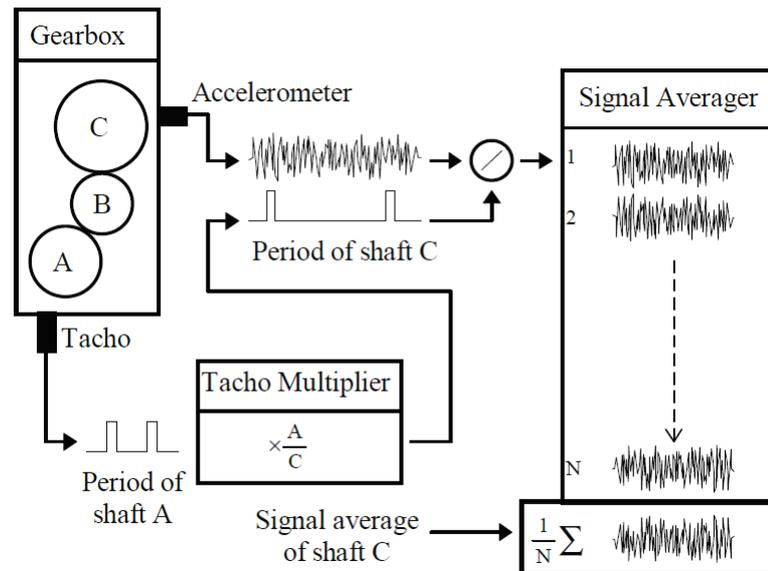


Figura 2.8: Schema di applicazione media sincrona ad un segnale.

lunghezza esattamente pari ad un periodo dell'albero, e mediando insieme un numero sufficientemente elevato di segmenti, le vibrazioni che sono periodiche con la rotazione dell'albero saranno rafforzate mentre le vibrazioni che non sono periodiche con la rotazione dell'albero tenderanno ad annullarsi; il risultato sarà un segnale che rappresenta la vibrazione media per un giro dell'albero. La Figura 2.8 mostra come questo processo potrebbe essere eseguito su un segnale continuo di un riduttore, utilizzando un moltiplicatore tachimetrico per calcolare ciascun periodo di rotazione dell'albero.

Il segnale rilevato sperimentalmente, si presenta comunemente come somma di contributi periodici x_{per} e di contributi aleatori, con valore medio nullo, x_{al} :

$$x(t) = x_{per} + x_{al} \quad (2.31)$$

Di solito, interessa il contributo periodico, mentre quello casuale rappresenta il rumore, cioè è un disturbo: il procedimento delle medie sincrone permette allora di eliminare (o almeno ridurre fortemente) tale rumore. Il ragionamento che si effettua è il seguente: se si considera un segnale puramente aleatorio con valore medio nullo, lo si rileva per N successivi intervalli di tempo T^* tutti uguali tra loro e si sommano i vari rilievi, all'aumentare di N la somma tende a zero, qualunque sia la durata T^* . Si osserva che anche se si rileva per diverse volte un segnale periodico, per intervalli di tempo uguali tra loro ma diversi dal periodo del segnale o da un suo multiplo intero, e si esegue la somma di diversi rilievi, tale somma tende a zero all'aumentare di N : questo è, infatti, ciò che accade se si sommano dei tratti di sinusoidi sfasati tra loro. Se, invece, si rileva più volte un segnale periodico, ogni volta per un intervallo di tempo pari ad un periodo o ad un suo multiplo intero, e poi si sommano i diversi rilievi (dividendo per il numero di acquisizioni), il risultato che si ottiene è il segnale periodico stesso. In conclusione, se si dispone di un segnale $x = x_{per} + x_{al}$, nel procedimento delle medie sincrone si procede ad acquisirlo per intervalli di tempo pari ad un periodo (o a multipli interi del periodo) della componente periodica, poi si esegue la somma dei diversi rilievi, eliminando con ciò la compo-

nente aleatoria: rimane così solo il segnale periodico depurato sia dalle componenti aleatorie, sia da eventuali componenti periodiche con periodo diverso.

Il processo illustrato in Figura 2.8 assume che il segnale di vibrazione che deve essere mediato sia un segnale continuo. In pratica, il processo di media del segnale avviene solitamente applicato ad un segnale discreto campionato (ad esempio, tramite un convertitore analogico-digitale in un PC) e, oltre a definire i punti di inizio e di fine della rotazione dell'albero, è necessario [75] garantire che i punti campione siano ad incrementi angolari equidistanti dell'albero e che questi sono nella stessa posizione angolare per ogni giro dell'albero. Cioè, il campionamento deve essere coerente con la rotazione dell'albero. In origine, Stewart [74] ha utilizzato un moltiplicatore di frequenza a fase fissa, tuttavia, McFadden [76] ha dimostrato che si può ottenere un risultato di più elevata precisione e flessibilità, utilizzando il ricampionamento digitale di vibrazioni campionate nel tempo, sulla base di un riferimento derivato da un segnale tachimetrico campionato contemporaneamente nel tempo. Questo metodo verrà esteso nei capitoli successivi. Va notato che la terminologia relativa a questo processo è un po' confusa. Lo stesso processo è stato indicato come 'media nel dominio temporale' (McFadden [77] e Braun [78]), 'media sincrona temporale' (Stewart [74]), 'media del segnale di rotazione coerente' (Swansson, et al [79]) e 'media sincrona' (Succi [80]). Il principio di sincronizzare la media con qualche altro processo (in questo caso con la frequenza di rotazione di un albero) è fondamentale per la tecnica se è eseguito su segnali continui o discreti. Come si è visto sopra, quando il processo viene eseguito su segnali campionati discreti deve essere coerente con la rotazione dell'albero (da qui il termine 'media del segnale di rotazione coerente' utilizzato da Swansson, et al). Si noti che il processo può essere eseguito nel dominio del tempo o della frequenza (purché la media nel dominio della frequenza venga eseguita sulla rappresentazione nel dominio della frequenza complessa). Il termine 'media nel dominio temporale' ([77] e [78]) è stato utilizzato per distinguere la tecnica da quella della media delle ampiezze o degli spettri di potenza per ridurre la varianza nell'analisi spettrale (Randall [63]). Per descrivere adeguatamente il processo quando applicato ai segnali discreti, probabilmente dovrebbe essere indicato come 'media del segnale sincrono rotazione coerente'. Tuttavia, questo è abbastanza goffo e quindi la tecnica sarà normalmente indicata come 'media sincrona del segnale' nel resto di questa tesi (essendo la coerenza rotazionale implicita quando la tecnica viene applicata ai dati discreti) adeguandosi al lavoro di Forrester [81].

Poiché la media sincrona del segnale è basata sulla rotazione dell'albero piuttosto che sul tempo, non è più corretto riferirsi ad esso come un segnale nel dominio del 'tempo' (anche se questo è spesso fatto). Pertanto nel seguito, un segnale risultante da un processo di media sincrona del segnale (o qualsiasi altro processo basato sull'angolo) sarà definito nel 'dominio dell'angolo'. Il dominio dell'angolo è espresso in radianti (o gradi) di rotazione dell'albero ($2\pi \text{ radianti} = 360 \text{ gradi} = 1 \text{ giro}$). Nello spettro (trasformata di Fourier) di un segnale nel dominio dell'angolo, la frequenza è espressa in ordini dell'albero anziché Hertz [Hz] (o RPM), dove $1 \text{ ordine dell'albero} = 1 \text{ ciclo per ogni giro dell'albero}$.

2.5.2 Order Tracking

L'order tracking (OT) negli strumenti in commercio viene effettuato solo su riduttori ordinari e spesso in modo errato in quanto è pratica comune limitarsi a dividere lo spettro per la frequenza di rotazione ottenendo solamente un riscaldamento delle frequenze senza eliminare le componenti non sincrone con la frequenza di rotazione di interesse. L'OT è uno dei metodi più conosciuti per l'analisi delle vibrazioni; è un metodo di analisi in frequenza che utilizza i multipli della velocità operativa (ordini), invece delle frequenze assolute (Hz), come base delle frequenze nel dominio spettrale. L'OT è utile per il monitoraggio delle condizioni dei macchinari perché può facilmente identificare le vibrazioni legate alla velocità operativa, come i difetti sugli alberi o l'usura dei cuscinetti. Per effettuare un'analisi OT il segnale della vibrazione deve essere campionato a incrementi costanti dell'angolo di rotazione dell'albero. In genere ciò si ottiene utilizzando una strumentazione analogica per variare la velocità di campionamento proporzionalmente ad un segnale tachimetrico, di solito un impulso tachimetrico. Per questa procedura sono necessarie due attrezzature specifiche: un sintetizzatore e un filtro anti-aliasing. Il metodo di Order Tracking Computazionale (COT), invece, acquisisce a frequenza costante (Δt costante) e poi utilizza un software per ricampionare i dati ad incrementi angolari costanti. Per effettuare quest'ultimo passaggio sono stati introdotti dei metodi digitali che ricampionano un segnale a Δt costante per fornire i dati desiderati a $\Delta \theta$ costante, basandosi sugli impulsi tachimetrici. Tale metodo deriva il proprio nome dall'utilizzo di tecniche numeriche per estrarre dati di velocità normalizzati dal segnale di vibrazione, ottenuti attraverso i tradizionali metodi di misura. Una descrizione dettagliata dei due metodi di campionamento del segnale direttamente in base angolo o indirettamente attraverso il ricampionamento digitale la si può trovare in Fyfe & Munck [82]. Il metodo di interpolazione utilizzato ha un impatto importante sulla qualità dell'analisi, diverse modalità di ricampionamento vengono definite in [83]; le migliori tecniche ricorrono a filtri di ricostruzione digitale per evitare l'aliasing. Ora verrà descritto il processo di interpolazione utilizzato all'interno della tesi [82]. Per determinare i punti in base tempo, verrà assunto che l'albero giri ad **accelerazione angolare costante**. Sotto questa assunzione, la posizione angolare dell'albero, θ , può essere descritta da una funzione quadratica dipendente dal tempo:

$$\theta(t) = b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot t^2 \quad (2.32)$$

I coefficienti incogniti b_0 , b_1 e b_2 sono ricavabili utilizzando tre successivi istanti di tempo t_1 , t_2 e t_3 ottenuti dal segnale tachimetrico, che si verificano a incrementi angolari dell'albero noti, $\Delta \Phi$. Per esempio, se si ha un impulso per giro dell'albero dato dal segnale tachimetrico, questi incrementi occorreranno ad intervalli di $\Delta \Phi = 2\pi$ radianti. Le tre condizioni da imporre saranno le seguenti:

$$\begin{aligned} \theta(t_1) &= 0, \\ \theta(t_2) &= \Delta \Phi, \\ \theta(t_3) &= 2\Delta \Phi. \end{aligned} \quad (2.33)$$

Sostituendo queste condizioni nell'equazione precedente si ottiene la seguente matrice:

$$\begin{pmatrix} 0 \\ \Delta\Phi \\ 2\Delta\Phi \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 \\ 1 & t_2 & t_2^2 \\ 1 & t_3 & t_3^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} \quad (2.34)$$

Una volta ottenuti i coefficienti incogniti b_i , l'equazione è risolta per t :

$$t = \frac{1}{2b_2} \left[\sqrt{4b_2(\theta - b_0) + b_1^2} - b_1 \right] \quad (2.35)$$

Da questa equazione ogni valore di θ tra 0 e $2\Delta\Phi$ può essere sostituito ottenendo il corrispondente istante di tempo t . questa è la forma base dell'algoritmo di ricampionamento. Per evitare sovrapposizioni nel campionamento, i tempi di ricampionamento sono calcolati solo su metà dell'intervallo ($t_1 \dots t_3$). Questa condizione pone un limite su θ ovvero:

$$\frac{\Delta\Phi}{2} \leq \theta < \frac{3\Delta\Phi}{2} \quad (2.36)$$

Una volta che i nuovi istanti di tempo sono stati calcolati, le corrispondenti ampiezze del segnale verranno calcolate attraverso un'interpolazione. I dati ricampionati sono stati convertiti dal dominio del tempo al dominio degli ordini. Per un approfondimento delle altre tecniche si faccia riferimento a [84] [85] [86] [87]. Sulla base di questi fondamentali principi si veda l'articolo [88], in cui sono stati compiuti miglioramenti che si traducono in metodi di maggiore precisione e un tempo di risposta più rapido.

2.5.3 Figures of Merit

Oltre a trattare la media sincrona del segnale come un qualsiasi segnale di vibrazione (cioè l'analisi nel dominio del tempo e l'analisi spettrale possono ancora essere applicati), la sua natura periodica consente di dare maggiore spazio alla manipolazione del segnale rispetto ad un segnale di vibrazione convenzionale. La trasformata di Fourier di un segnale periodico è una linea spettrale pura e senza leakage (2.3.1), e per il quale il filtraggio ideale può essere utilizzato; cioè, una o più linee di frequenza (che qui rappresentano ordini dell'albero) possono essere completamente rimosse dallo spettro senza causare discontinuità quando il segnale è tradotto nuovamente al dominio dell'angolo. Questo permette l'applicazione di varie tecniche di analisi del segnale, specificamente progettate per il trattamento delle medie dei segnali sincroni, e una serie di relative metriche del segnale da utilizzare come ausilio al rilevamento dei guasti e per la diagnosi. Si premette la definizione dei segnali regolare, differenza e residuo, ottenuti dalla media sincrona e impiegati nelle metriche.

- Segnale regolare: segnale contenente soltanto la frequenza di ingranamento e le sue armoniche.
- Segnale differenza : segnale ottenuto dalla media sincrona eliminando le componenti dell'ingranamento (fondamentale ed armoniche), la prima banda laterale associata alle componenti dell'ingranamento e la $1x$ e la $2x$ della frequenza di rotazione.

- Segnale residuo: segnale ottenuto dalla media sincrona eliminando le componenti dell'ingranamento (fondamentale ed armoniche) e la $1x$ e la $2x$ della frequenza di rotazione.

Stewart ha sviluppato un certo numero di parametri adimensionali basati sulla media sincrona del segnale, che ha definito 'figure di merito' [74]. Queste sono state originariamente definite come un gruppo gerarchico con cui Stewart descriveva una procedura per l'individuazione e la diagnosi parziale dei guasti.

A) **FM0**

Il parametro FM0 fu sviluppato da Stewart nel 1977 come un indicatore robusto dei difetti maggiori in un ingranamento. La figura di merito di ordine zero, FM0, è stata proposta come un rivelatore generico di guasto da applicare a tutte le medie del segnale. Più semplicemente FM0 è una misura relativa del picco di deviazione del segnale da quella definita dalla vibrazione pura dell'ingranamento. Stewart ha affermato che questo indice ha buone capacità di rilevamento per:

- difetti localizzati (come rottura del dente, pitting e spalling), instabilità del cuscinetto e di allineamento che aumentano il livello di picco-picco con pochi cambiamenti nel livello di ingranamento;
- una forte usura, in quanto produce pochi cambiamenti nel livello picco-picco con una riduzione del livello di ingranamento.

Il parametro della metrica dell'ordine zero (FM0) è definito come il quoziente tra il valore picco-picco del segnale e l'energia della frequenza di ingranamento e delle sue armoniche (segnale regolare). Risulta ovvio che questo parametro è simile al CF. FM0 confronta il valore di picco del segnale sincrono mediato con l'energia del segnale regolare, e il CF confronta il valore di picco del segnale sincrono mediato con l'ampiezza del segnale sincrono mediato. Perciò il parametro FM0 è molto più focalizzato sul danneggiamento delle ruote dentate [36].

$$FM0 = \frac{peak}{\sum_{i=1}^N A(i)} \quad (2.37)$$

dove

- *peak* è il valore di picco del segnale di vibrazione nel dominio dell'angolo
- $A(i)$ è l'ampiezza dell' i -esima armonica dell'ingranamento

B) **FM4**

Sviluppato da Stewart nel 1977, il parametro FM4 fu progettato come complemento al parametro FM0 per l'individuazione di difetti isolati su un numero limitato di denti[42]. Se la variazione della media del segnale non poteva essere attribuita ad uno qualsiasi degli errori specifici di ingranamento predefiniti, FM4 fu definito per rilevare difetti legati all'ingranamento. Stewart [74] ha motivato che se si potesse definire il contenuto in frequenza previsto per la vibrazione di un albero particolare (il segnale normale), allora tutte le altre vibrazioni rappresenterebbero la deviazione (il segnale residuo) dal segnale

atteso. Egli ha proposto che il segnale regolare normalmente include tutte le frequenze di ingranamento e le loro armoniche, più le loro bande laterali immediatamente adiacenti. Il segnale differenza viene semplicemente calcolato convertendo al dominio delle frequenze, eliminando tutte le componenti definite per il segnale regolare e riconvertendo nel dominio angolare. L'indagine sperimentale di Stewart [74] ha mostrato che FM0 non era un rilevatore molto sensibile di guasti localizzati sul dente, come le fratture dei denti, e ha suggerito che FM4 poteva essere usato come rilevatore generale più sensibile. In virtù della sensibilità di FM4 in qualità di rilevatore del guasto generale, e della sua facilità di implementazione rispetto ai rilevatori di guasto più specifici (FM1, FM2 e FM3), una serie di indagini sperimentali basate sul lavoro di Stewart si è concentrata su tecniche di miglioramento collegate alla metrica FM4 (ad esempio, McFadden [72] e Zakrajšek [89]). La metrica di diagnostica vibrazionale FM4 è una delle più utilizzate; essa individua le variazioni nelle vibrazioni risultanti dai difetti localizzati su pochi denti. L'indice FM4 è adimensionale ed è ottenuto dividendo il quarto momento statistico attorno alla media per il quadrato della varianza del segnale differenza (segnale privato delle componenti dell'ingranamento, della prima banda laterale associata alle armoniche dell'ingranamento e $1x$ e $2x$ della frequenza di rotazione dell'albero). Fintanto che il difetto si propaga localmente, la metrica FM4 aumenta. Quando il difetto inizia a diventare generalizzato, il valore cala.

$$FM4 = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^4}{\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^2 \right]^2} \quad (2.38)$$

C) NA4

Il parametro NA4 fu ideato nel 1993 da Zakrajšek, Townsend, e Decker al Centro di Ricerca Lewis della NASA come un indicatore generale di guasto sensibile non solo all'inizio del difetto, come il parametro FM4, ma anche al suo progredire[42]. Infatti, con il progredire del difetto nel numero e nella gravità, la metrica FM4 diventa meno sensibile ai nuovi difetti. Sono pertanto state apportate due modifiche alla metrica FM4 per sviluppare la metrica NA4 che è una di quelle maggiormente sensibili ai difetti evoluti: la prima consiste nel calcolo della metrica a partire dal segnale residuo e non, come nel caso di FM4, a partire dal segnale differenza; la seconda è la capacità dell'analisi della tendenza che venne incorporata nella metrica NA4. Queste due modifiche fanno la metrica NA4 una metrica maggiormente sensibile e robusta. Quindi NA4 è definito come il rapporto tra il momento statistico del quart'ordine del segnale residuo e la media corrente del quadrato della varianza del segnale residuo stesso; tale media è calcolata su tutti i record precedenti alla misura corrente.

$$NA4 = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (r_i - \bar{r})^4}{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \left[\frac{1}{N} \sum_i (r_{ij} - \bar{r}_j)^2 \right]^2} \quad (2.39)$$

dove

- r_i è l' i -esimo punto nella registrazione temporale del segnale residuo

- \bar{r} è il valore medio del segnale residuo
- r_{ij} è l' i -esimo punto nella j -esima registrazione temporale del segnale residuo
- j è la registrazione attuale
- i è l'indice del dato in lettura
- M è la registrazione corrente nel run ensemble
- N è il numero di punti nella registrazione temporale

D) NA4*

Il parametro NA4* fu sviluppato nel 1994 da Decker, Handschuh e Zakrajsek [37] come un miglioramento dell'indice NA4. In questo caso, il denominatore di NA4 è stato modificato statisticamente. Questa modifica venne effettuata sulla base dell'osservazione che, con il progredire del difetto sulla ruota dentata da localizzato a distribuito, il valore medio della varianza aumenta rapidamente, con la conseguenza che il parametro NA4 cala. Per ovviare a questo problema è stata introdotta la normalizzazione del quarto momento sul quadrato della varianza di segnali di riferimento acquisiti all'inizio in condizioni operative nominali, ottenendo un miglioramento nella tendenza. Quindi, il quarto momento centrale del segnale residuo è normalizzato con il quadrato della varianza media per un riduttore in buone condizioni, questo consente al parametro NA4* di crescere con il progredire del difetto.

$$NA4* = \frac{N \sum_{i=1}^N (r_i - \bar{r})^4}{(\text{var}(r_{OK}))^2} \quad (2.40)$$

dove

- $\text{var}(r_{OK})$ è la varianza per un riduttore in buone condizioni

E) SI

L'Indicatore di bande laterali (SI) è una misura del difetto localizzato su una ruota dentata ed è definito come la media delle bande laterali attorno alla frequenza di ingranamento fondamentale f_m [42].

$$SI = \frac{f_m^{LSB} + f_m^{USB}}{2} \quad (2.41)$$

dove LSB sta per Lower Side Band e USB invece sta per Upper Side Band.

F) Analisi della tendenza

Steward [74] ha anche proposto un metodo per la tendenza del segnale mediato calcolando e tracciando il kurtosis e il valore RMS della differenza tra un segnale mediato di partenza e le medie del segnale successive (dai dati ottenuti dallo stesso sensore, nella stessa posizione e sotto le stesse condizioni operative). Le medie del segnale a differenti istanti di tempo richiedono di essere allineate nel dominio dell'angolo prima di calcolare il segnale differenza. Nel caso in cui non sia disponibile un segnale di posizione assoluto, l'allineamento angolare può essere ottenuto utilizzando la correlazione incrociata tra i due segnali; la posizione di massima correlazione definisce l'angolo di sfasamento tra i due segnali.

2.5.4 Nuove metriche proposte

Si presentano tre nuove metriche proposte recentemente ([42],[90]) dal gruppo di ricerca dell'Università di Ferrara, di cui il dottorando fa parte.

I) RV

La Varianza del Residuo (RV) è la prima delle nuove metriche proposte ([42],[90]). In particolare il parametro RV viene calcolato sul segnale residuo della media sincrona della ruota dentata di interesse.

$$RV = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (r_i - \bar{r})^2 \quad (2.42)$$

II) CRV

La Varianza Cumulativa del Residuo (CRV) è definita come la media del parametro RV calcolata su tutte le misure effettuate fino al tempo corrente ([42],[90]). CRV è la seconda metrica originale proposta in questo lavoro. Confrontato con la metrica RV, il CRV è meno sensibile ad una brusca fluttuazione del valore nella misura corrente. Questa caratteristica può essere di interesse per applicazioni di apprendimento automatico a fini diagnostici.

$$CRV = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (r_i - \bar{r})^2 \quad (2.43)$$

II) NA4Mod

Il terzo parametro originale presentato in questo lavoro è una modifica della metrica NA4 [90]. Analogamente a NA*, si è pensato di modificare in modo diverso il parametro NA4 per ottenere un'indicazione correlata alla severità di un difetto su una ruota dentata, anche quando nel suo progredire questo passa da localizzato a distribuito. Invece di utilizzare a denominatore la varianza del segnale residuo, si è deciso di normalizzare il quarto momento statistico del residuo con la media corrente del quadrato della varianza del segnale regolare. Lo scopo, oltre ad una maggiore stabilità, è quello di legare l'indice alla condizione dell'ingranamento utilizzando il segnale regolare ad esso associato.

$$NA4mod = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (r_{iM} - \bar{r}_M)^4}{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (sr_{ij} - \bar{sr}_j)^2 \right]^2} \quad (2.44)$$

dove

- r è il segnale residuo
- \bar{r} è valore medio del segnale residuo
- sr è il segnale regolare
- \bar{sr} il valore medio del segnale regolare
- j è la registrazione attuale
- i è l'indice del dato in lettura
- M è la registrazione corrente nel run ensemble
- N è il numero di punti nella registrazione temporale

2.5.5 Analisi delle modulazioni in banda stretta

Durante il monitoraggio in condizioni operative di una rottura per fatica di una ruota dentata, McFadden [72] ha rilevato l'importanza della modulazione di fase nella diagnosi delle rotture e, basandosi su questo, ha sviluppato un metodo che include l'informazione sulla fase nelle tecniche di indagine del segnale.

Assumendo che la struttura delle bande laterali che sottostanno ad una forte armonica dell'ingranamento fosse predominante rispetto alla modulazione dell'armonica, McFadden [72] propose di filtrare in banda stretta attorno alle armoniche dell'ingranamento, rimuovere pertanto l'armonica di ingranamento, e calcolare l'involuppo nel dominio dell'angolo, ottenendo così i contributi contenuti sia dalla modulazione di ampiezza che di fase. Il kurtosis di questo segnale (in pratica il residuo del segnale della media sincrona) può essere utilizzato come misura di difetti localizzati. McFadden [71] sviluppò ulteriormente la tecnica basata sul filtraggio in banda stretta utilizzando la demodulazione per estrarre una stima dei segnali modulati in ampiezza e fase. Egli mostrò che la rottura di un dente si manifesta come una caduta di ampiezza in simultanea con un cambiamento nella fase nel momento in cui il dente ingrana. Graficando la modulazione di ampiezza e fase simultaneamente in un grafico polare, queste modulazioni caratteristiche possono essere viste in circolo.

Questo sviluppo particolare è rilevante, in quanto consente di distinguere la rottura di un dente da altri difetti localizzati come il pitting e la sfaldatura.

2.5.6 Applicazione al monitoraggio e alla diagnostica dei malfunzionamenti

I principali vantaggi nel calcolo della media sincrona del segnale possono essere così riassunti:

- partendo da un segnale di vibrazione complesso si può ottenere una serie di segnali molto più semplici, ciascuno dei quali è una stima della vibrazione di un unico albero con le ruote su di esso calettate;
- i segnali risultanti sono puramente periodici e possono essere migliorati utilizzando un filtro ideale;
- le metriche del segnale sviluppate da Stewart [74] e McFadden ([72],[71]) semplificano ulteriormente il compito di analisi;
- la media sincrona del segnale risulta applicabile nella rilevazione di tutte le modalità di guasto tranne per quelle dei cuscinetti.

Pochissimi strumenti attualmente disponibili sono in grado di effettuare con precisione la media sincrona del segnale, e quelli in commercio sono molto costosi. Alcuni analizzatori hanno la capacità di calcolare la 'media sincrona nel tempo', tuttavia, questi generalmente sono in grado di sincronizzare l'inizio di ciascuna acquisizione multicanale, ma nessun metodo garantisce che il campionamento sia coerente con la rotazione dell'albero. Sono necessari anche segnali tachimetrici accurati e moltiplicatori di frequenza a rapporto costante o tecniche di interpolazione digitali.

Molti strumenti di ricerca che implementano il calcolo della media sincrona del segnale, come quello utilizzato in questo progetto di ricerca, sono costruiti e programmati dai ricercatori utilizzando i propri PC. Ulteriore lavoro deve essere fatto sulle metodologie per la determinazione dei parametri che definiscono il processo di media sincrona del segnale, come il numero delle medie e la precisione di campionamento desiderata.

2.6 Analisi di Ciclostazionarietà

Come definito nell'articolo di Antoni [59], un processo ciclostazionario è un processo stocastico che mostra alcune periodicità nascoste nella sua struttura statistica. Più formalmente, un processo stocastico si dice ciclostazionario dell' n -esimo ordine se il suo n -esimo cumulante statistico contiene alcune componenti periodiche.

In genere, nelle macchine rotanti, le statistiche dei segnali di vibrazione sono periodiche a causa dei diversi fenomeni ciclici di tipo meccanico. Per esempio, le modifiche cicliche nella geometria delle macchine, le variazioni cicliche di coppia, le rotazioni di componenti anisotropi, etc., tutto questo produce modulazioni periodiche dei segnali vibrazionali. In funzione della struttura delle macchine e dei fenomeni fisici che hanno luogo, i segnali risultanti possono mostrare diversi tipi di ciclostazionarietà.

Gli indicatori di ciclostazionarietà (ICS) vengono definiti in base a due approcci, che fanno uso, rispettivamente, dei momenti o dei cumulanti. Nell'ambito di questa tesi si è scelto di ricorrere al metodo dei cumulanti in quanto più vantaggioso per la seguente ragione: accade spesso che il momento di ordine n -esimo sia "contaminato", cioè sia composto in parte o interamente dal prodotto di momenti di ordine inferiore cosicché può risultare non chiaro se l'ordine n -esimo fornisca maggiori informazioni dell'ordine $n-1$. Al fine di assicurarsi che il momento di ordine n -esimo contenga informazioni che sono assenti nei momenti di ordine inferiore, è necessario depurarlo da tutti i termini contaminati introdotti dagli ordini $1, \dots, n-1$. Ciò è esattamente quanto viene realizzato applicando la tecnica dei cumulanti rispetto a quella dei momenti. Occorre sempre tenere ben presente che nel contesto ciclostazionario, la media di un segnale coincide con la media sincrona (TSA) (e non con la media temporale), calcolata come descritto nel paragrafo precedente, da cui si estrae un segnale sincrono mediato.

I cumulanti di un processo ciclostazionario sono espressi in serie di Fourier:

$$C_{1x}(t) = \sum_{\alpha \in \bar{\omega}} C_{1x}^{\alpha} e^{j2\pi\alpha t} \quad (2.45)$$

$$C_{2x}(t, \tau) = \sum_{\alpha \in \bar{\omega}} C_{2x}^{\alpha}(\tau) e^{j2\pi\alpha t} \quad (2.46)$$

$$C_{3x}(t, \tau_1, \tau_2) = \sum_{\alpha \in \bar{\omega}} C_{3x}^{\alpha}(\tau_1, \tau_2) e^{j2\pi\alpha t} \quad (2.47)$$

$$C_{4x}(t, \tau_1, \tau_2, \tau_3) = \sum_{\alpha \in \bar{\omega}} C_{4x}^{\alpha}(\tau_1, \tau_2, \tau_3) e^{j2\pi\alpha t} \quad (2.48)$$

dove $C_{1x}(t)$, $C_{2x}(t, \tau)$, $C_{3x}(t, \tau_1, \tau_2)$, $C_{4x}(t, \tau_1, \tau_2, \tau_3)$ rappresentano i cumulanti del primo, secondo, terzo e quarto ordine ciclico.

Una volta calcolati i cumulanti si possono calcolare gli indicatori di ciclostazionarietà come segue:

$$ICS_{nx} = \sum_{\alpha \in \bar{\omega}, \alpha \neq 0} ICS_{nx}^{\alpha} = \sum_{\alpha \in \bar{\omega}, \alpha \neq 0} \frac{|C_{nx}^{\alpha}(0)|^2}{|C_{2x}^0(0)|^n}, n = 1, 2, 3, 4 \quad (2.49)$$

dove $C_{nx}^{\alpha}(0)$ sta per $C_{2x}^{\alpha}(0)$ $C_{3x}^{\alpha}(0,0)$ $C_{4x}^{\alpha}(0,0,0)$ per $n = 2, 3, 4$ rispettivamente.

2.7 Dominio Tempo-Frequenza (Angolo-Ordini)

2.7.1 Trasformata Wavelet

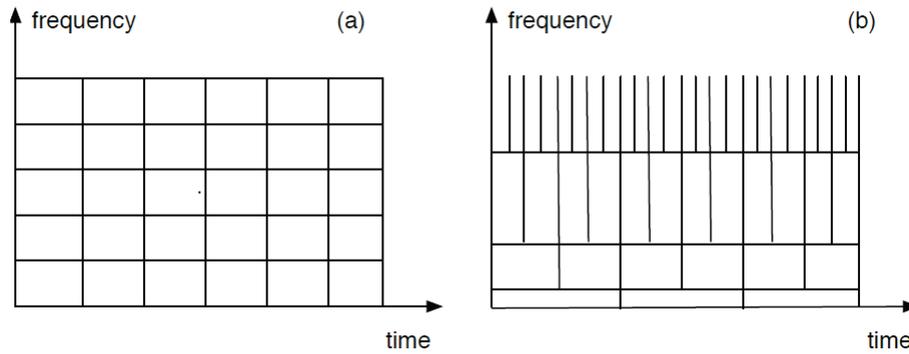


Figura 2.9: Risoluzione in frequenza: (a) STFT e (b) WT.

Per superare il limite di risoluzione della STFT, si può pensare ad un banco di filtri in cui la risoluzione temporale aumenta con la frequenza centrale del filtro di analisi [30]. Pertanto, la risoluzione di frequenza (Δf) è imposta proporzionale alla frequenza f :

$$\frac{\Delta f}{f} = c \quad (2.50)$$

dove c è una costante. In altre parole, la risposta in frequenza del filtro di analisi è regolarmente distanziata su una scala logaritmica. In questo modo, la disuguaglianza di Heisenberg è ancora soddisfatta, ma la risoluzione nel tempo diventa buona sia alle alte frequenze come pure alle basse, Figura 2.9 (b). Il concetto di cui sopra dell'analisi multi-risoluzione è implementato attraverso la Trasformata Wavelet Continua (CWT) che è una tecnica di elaborazione del segnale che supera la limitazione in risoluzione della STFT ed è definita come segue:

$$CWT(s, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi_s^* \left(\frac{t - \tau}{s} \right) dt \quad (2.51)$$

dove s e τ sono il fattore di scala e il parametro di traslazione, rispettivamente, mentre $\psi_s(t)$ è chiamata la Wavelet madre:

$$\psi_s(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi \left(\frac{t}{s} \right) \quad (2.52)$$

Il termine $1/\sqrt{s}$ del lato destro dell'equazione è usato per la normalizzazione dell'energia. Alcune considerazioni sulla risoluzione tempo-frequenza della CWT possono essere ottenute analizzando la trasformata di Fourier della Wavelet madre $\psi(t)$:

$$F \left\{ \frac{1}{\sqrt{s}} \psi \left(\frac{t}{s} \right) \right\} = \Psi(sf) \quad (2.53)$$

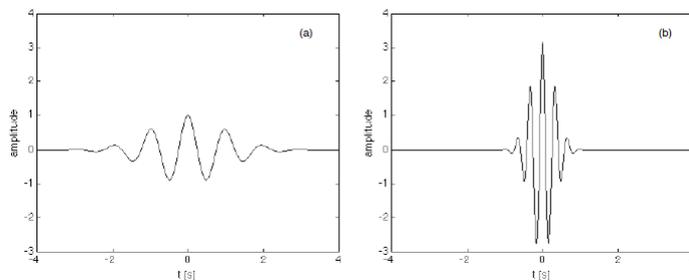


Figura 2.10: Mother Wavelet con (a) scala larga e (b) scala stretta.

Pertanto, se $\psi(t)$ ha "banda passante" Δf con f_0 frequenza centrale, $\psi(st)$ presenta una "Larghezza di banda" $\Delta f/s$ con una frequenza centrale f_0/s . In buona sostanza, il legame tra l'ampiezza e la frequenza è semplice: in pratica con l'aumentare della scala, la Wavelet diviene più distesa nel tempo e soltanto le caratteristiche del segnale che si presentano con una periodicità più lenta vengono prese in considerazione. D'altra parte se la scala diminuisce la Wavelet diventa più corta nel tempo e solo gli eventi di breve durata del segnale vengono presi in considerazione. In altre parole, grandi scale significano vista globale, mentre scale molto piccole significano viste dettagliate. La Figura 2.10 mostra una Wavelet Madre per due diversi valori del parametro di scala s .

Ci sono un certo numero di funzioni di base che possono essere utilizzate come Wavelet Madre per la Trasformata Wavelet. Dal momento che la Wavelet madre produce tutte le funzioni Wavelet utilizzate nella trasformazione attraverso la traslazione e la scalatura, questo determina le caratteristiche della conseguente Trasformata Wavelet. Pertanto, si devono prendere in considerazione i dettagli della particolare applicazione e si deve scegliere la Wavelet madre appropriata in modo da utilizzarla in maniera efficace.

In questo lavoro è stata utilizzata la Morlet Wavelet. Una caratteristica notevole della Morlet Wavelet è che il suo spettro di Fourier è gaussiano. La Morlet Wavelet madre è definiti come segue:

$$\psi(t)_{morlet} = e^{-t^2/2} \cos(2\pi f_0 t) \quad (2.54)$$

dove f_0 è la frequenza centrale delle Wavelet madre. In questo lavoro f_0 è pari a $0,8125\text{Hz}$ per la Morlet Wavelet Madre.

Capitolo 3

Media sincrona per i rotismi epicycloidali

In questo capitolo si richiamano le proprietà cinematiche dei rotismi epicycloidali e se ne descrivono le caratteristiche dei segnali vibratori, con particolare riferimento alle modulazioni conseguenti alla funzione di trasferimento variabile tra le sorgenti ed il trasduttore sulla cassa. Si presentano poi i due algoritmi proposti in letteratura per effettuare la media sincrona negli epicycloidali, confrontandoli dal punto di vista applicativo.

3.1 Proprietà cinematiche dei rotismi epicycloidali

3.1.1 Frequenza di ingranamento e frequenze di rotazione

Il meccanismo del riduttore epicycloidale (Figura 3.1), geometricamente coassiale, è costituito da una ruota solare (1), un porta-satelliti (5) ed una corona a dentatura interna (3); questi elementi trasmettono il moto grazie alle ruote satelliti (2), rotanti con interasse fisso, accoppiate al porta-satelliti attraverso il perno (4).

Si ricorda che i riduttori epicycloidali sono tipicamente utilizzati in applicazioni che richie-

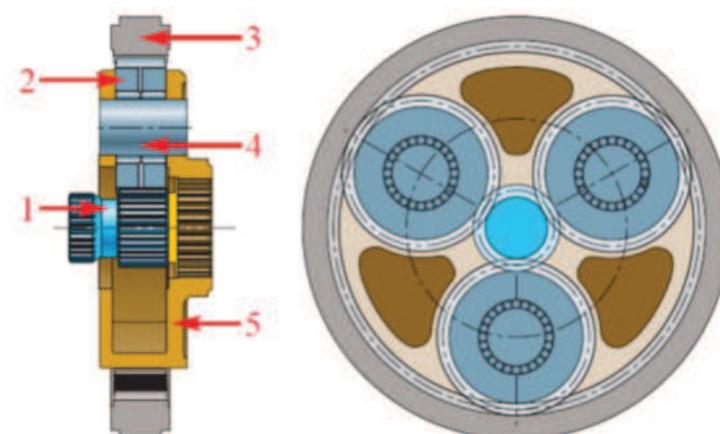


Figura 3.1: Schema di un riduttore epicycloidale.

dono una elevata riduzione in velocità (maggiore di tre a uno) a carichi elevati, come accade,

ad esempio, nello stadio di riduzione finale del riduttore del rotore principale di un elicottero o nella movimentazione di una pala a tazze. Il tipico rotismo epicicloidale ha tre o più ruote satelliti, ognuna delle quali ingrana con una ruota solare e una corona, come mostrato in Figura 3.1. Il moto è fornito dal solare, la corona è fissa e gli assi dei satelliti sono collegati ad un portasatelliti che si muove di moto relativo rispetto al solare e alla corona. Il porta satelliti fornisce l'uscita del rotismo epicicloidale.

Per poter calcolare le frequenze di rotazione e, di conseguenza, la frequenza di ingranamen-

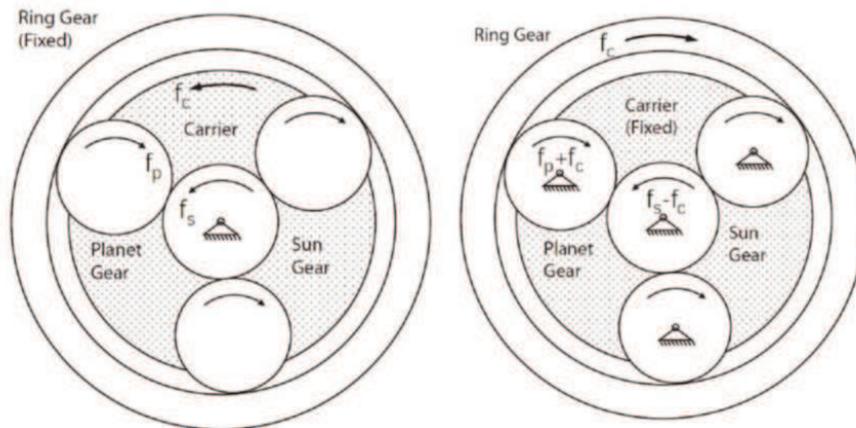


Figura 3.2: Riduttore epicicloidale e sua configurazione ordinaria.

to di un riduttore epicicloidale è necessario riferirsi al metodo di Willis (Figura 3.2). Si deve quindi considerare il rotismo ordinario ottenuto mediante l'applicazione di una rotazione attorno all'asse del portasatelliti, con frequenza di rotazione f_c , uguale in valore assoluto ma di verso opposto a quella del portasatelliti. In questo modo il portasatelliti resta fermo e il rotismo epicicloidale diviene un rotismo ordinario.

Siano f_c , f_p , f_s , rispettivamente, le frequenze di rotazione del portasatelliti, del satellite e del solare e N_a , N_p , N_s , rispettivamente, il numero di denti della corona, del satellite e del solare. La frequenza di ingranamento di un rotismo epicicloidale f_m è la medesima del rotismo ordinario corrispondente, nel quale essa si esprime, per ogni coppia di ruote dentate che ingranano, come il prodotto fra il numero di denti di ciascuna ruota e la sua frequenza di rotazione. La loro relazione è espressa dalla seguente uguaglianza:

$$f_m = N_a f_c = N_p (f_p + f_c) = N_s (f_s - f_c) \quad (3.1)$$

dove, le frequenze relative del satellite rispetto al portasatelliti ($f_p + f_c$) e del solare rispetto al portasatelliti ($f_s - f_c$) si possono pertanto così ricavare:

$$\begin{aligned} f_p + f_c &= f_m / N_p = f_c (N_a / N_p) \\ f_s - f_c &= f_m / N_s = f_c (N_a / N_s) \end{aligned} \quad (3.2)$$

3.1.2 Giri di reset e sequenza di ingranamento

Per lo studio in oggetto è importante definire il numero di giri del portasatelliti necessari affinché un satellite ritorni nella medesima posizione (giri di reset), ossia il numero di giri necessari

affinché l' i -esimo dente di un satellite ritorni ad ingranare con lo stesso j -esimo dente della corona esterna (Figura 3.3). Si può dimostrare che tale numero di giri vale [18] [91]:

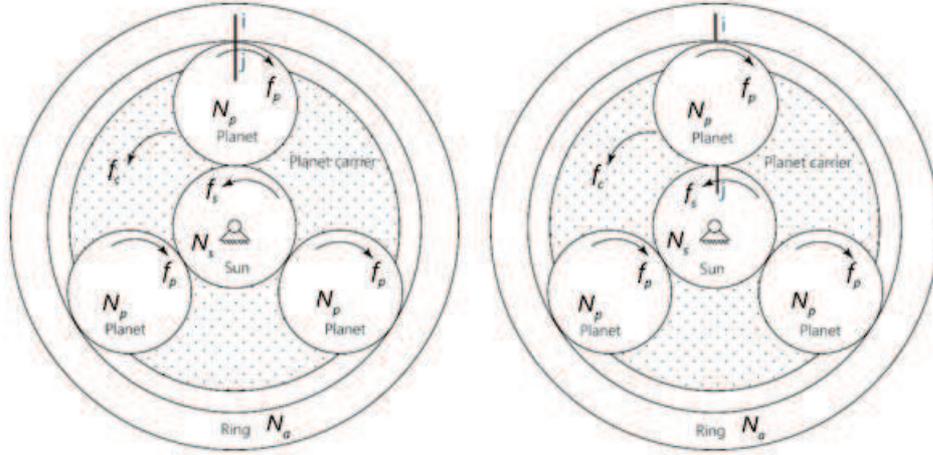


Figura 3.3: Schema della sequenza di ingranamento.

$$N_{reset,g} = \frac{mcm(N_a, N_g)}{N_a} \quad (3.3)$$

Dove mcm è il *minimo comune multiplo* tra il numero di denti della corona N_a e il numero di denti della ruota dentata di interesse (solare, satellite) N_g .

In buona sostanza, un dato dente della ruota sarà allineato (i.e. starà ingranando) con un dato dente della corona per un dato senso di rotazione del portasatelliti solo una volta ogni $N_{reset,g}$ rotazioni. Per il riduttore MP 105 IS, riduttore epicicloidale monostadio con $N_s = 27$ $N_p = 39$ $N_a = 108$, risulta $N_{reset,p} = 13$ per il satellite e $N_{reset,s} = 1$ per il solare. Si vedrà successivamente che la condizione $N_{reset,p} = 13$ per i satelliti avrà una grossa influenza nell'esecuzione della diagnosi del riduttore. Se $N_{reset,g} = 1$ allora per questa ruota si presenterà lo stesso dente una volta per ogni giro del portasatelliti per un dato senso di rotazione. Tuttavia, se $N_{reset,g} \geq 1$ allora la ruota avrà una sequenza lunga $N_{reset,g}$ di ingranamenti diversi (una per ogni rotazione del portasatelliti) per un dato senso di rotazione del portasatelliti prima che un ingranamento si ripeta.

Per ognuna delle suddette condizioni un diverso dente della ruota sarà allineato con un determinato dente della corona: pertanto, l'avvicinarsi di queste condizioni comporta una corrispondenza successiva di denti allineati.

La sequenza di denti di un satellite che ingranano con il dente j -esimo della corona esterna posizionato sotto l'accelerometro può essere stabilita tramite la seguente relazione [18]:

$$P_{n,p} = mod(ncN_a, N_p) + 1 \quad (3.4)$$

dove mod è il *modulus after division* (resto della divisione tra zeri) ed n_c è il numero di giri del portasatelliti. Se $N_{reset,p} = N_p$ ogni dente del satellite ingranerà con il dato dente j -esimo della corona prima che il dente iniziale del satellite ingrani una seconda volta con il dente j -esimo della corona. La Tabella 3.1 mostra la sequenza di ingranamento dei denti di un satellite per il riduttore MP 105 IS utilizzato per questo studio.

Tabella 3.1: Sequenza di ingranamento dei denti di un satellite con un dente della corona esterna dello stadio 1 sotto l'accelerometro del riduttore MP 105 IS

| # giri portasatelliti n_c | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|-----------------------------|---|----|----|----|---|----|----|----|---|----|----|-----|
| Dente in presa | 1 | 31 | 22 | 13 | 4 | 34 | 25 | 16 | 7 | 37 | 28 | ... |

L'equazione [3.4] consente quindi di verificare se tutti i denti dei satelliti ingranano con un dato dente della corona esterna sotto l'accelerometro, in posizione fissa.

3.2 Vibrazioni nei rotismi epicicloidali

L'unica posizione nella quale è normalmente possibile posizionare un trasduttore per monitorare le vibrazioni di un treno di ingranaggi epicicloidali è sulla parte esterna della corona dentata. Questo enfatizza la modulazione di passaggio dei satelliti dovuta al loro movimento relativo rispetto alla posizione del sensore. Ogni volta che il satellite si avvicina al sensore, si registra un

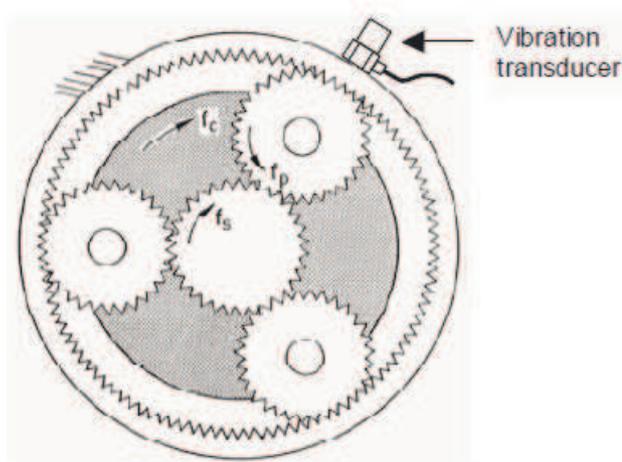


Figura 3.4: Tipico set-up di misura per un riduttore epicicloidale con un trasduttore montato sull'esterno della cassa in corrispondenza della corona.

aumento nell'ampiezza del segnale vibrazionale, raggiungendo il massimo quando il satellite è in corrispondenza dell'accelerometro per poi ridursi all'aumentare della distanza dal sensore. Per un treno di ingranaggi epicicloidale con N_{planet} satelliti, questo accadrà N_{planet} volte per rivoluzione del porta satelliti, con il risultato di una apparente modulazione in ampiezza del segnale alla frequenza $N_{planet} f_c$.

3.2.1 Modulazione: modello di McFadden e Smith

Si consideri un riduttore epicicloidale con un solo satellite [92], avente un trasduttore di vibrazione montato sull'esterno della cassa in corrispondenza della corona. Si supponga che al tempo $t = 0$ il satellite si trovi sull'asse del trasduttore, e che dopo un certo tempo t la posizione

del satellite sia descritta dall'angolo P , compreso tra l'asse del satellite e il trasduttore (Figura 3.5). A causa delle imperfezioni del profilo e della deflessione dei denti sotto carico, la vibrazione generata dal riduttore comprenderà la frequenza di ingranamento e le sue armoniche. Un osservatore che ruota solidalmente con il portasatelliti vede quindi un segnale di vibrazione $x_0(t)$ del tipo rappresentato in Figura 3.6(a). Il percorso di trasmissione della vibrazione varia durante la rotazione del portasatelliti; il percorso minore si avrà quando il satellite si trova sotto l'accelerometro, cioè per angoli $P = 0, 2\pi, 4\pi, \dots [rad]$, mentre il percorso maggiore si avrà per angoli $P = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots [rad]$. Di conseguenza la funzione di risposta tra il satellite ed il trasduttore denominata $a_0(t)$ assumerà una forma simile a quella in Figura 3.6(b). Si precisa che la funzione di risposta è una funzione filtro adimensionale che tiene conto solo della posizione relativa del satellite rispetto al trasduttore. La vibrazione percepita dal trasduttore sarà quindi il prodotto $x_0(t)a_0(t)$ e risulterà modulata; per le proprietà della Trasformata di Fourier, lo spettro di tale vibrazione sarà la convoluzione dei relativi spettri. Come si può osservare in Figura 3.6(c) all'interno dello spettro si ha la comparsa di bande laterali alla frequenza del portasatelliti. In particolare, la frequenza della n -esima banda laterale attorno alla m -esima armonica di ingranamento sarà:

$$f_{mn} = mf_{ing} + nf_c = (mz_a + n)f_c \quad (3.5)$$

dove $m = 1, 2, \dots$ e $n = \dots, -2, -1, 0 + 1, +2, \dots$. Considerando il caso generale in cui al tempo

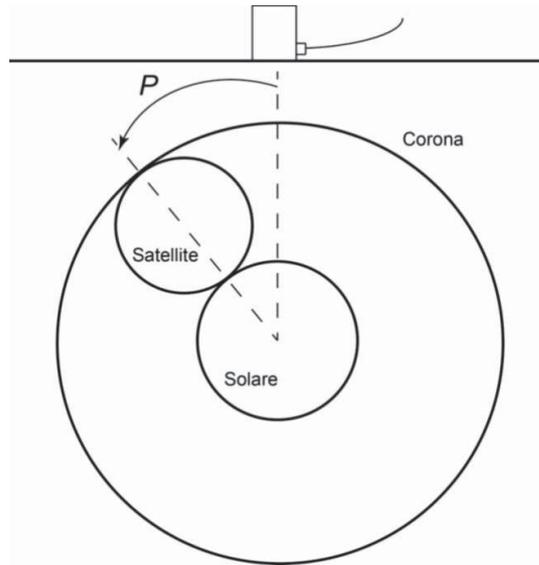


Figura 3.5: Riduttore epicicloidale con un singolo satellite e trasduttore sull'esterno della cassa in corrispondenza della corona.

$t = 0$ il satellite è posizionato all'angolo $P = P_i$, la vibrazione percepita dall'accelerometro è sfasata di un tempo:

$$t_i = -\frac{P_i}{2\pi f_c} \quad (3.6)$$

Per le proprietà della Trasformata di Fourier si ottiene quindi:

$$\begin{aligned} x_i &= x_0(t - t_i) \\ a_i &= a_0(t - t_i) \end{aligned} \quad \rightarrow \quad \begin{aligned} X_i(f) &= X_0(f)e^{-j2\pi f t_i} \\ A_i(f) &= A_0(f)e^{-j2\pi f t_i} \end{aligned} \quad (3.7)$$

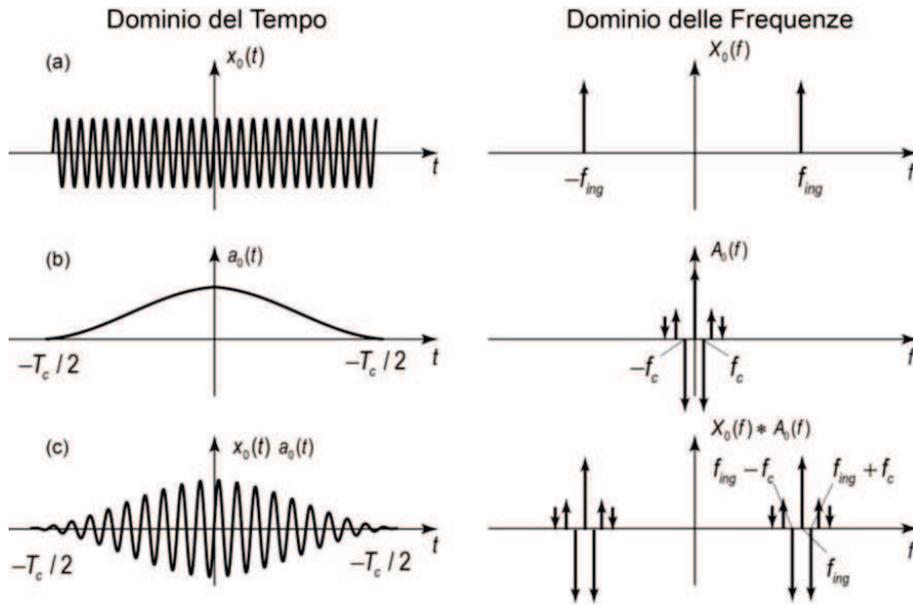


Figura 3.6: Modulazione della frequenza di ingranamento a causa della funzione di risposta.

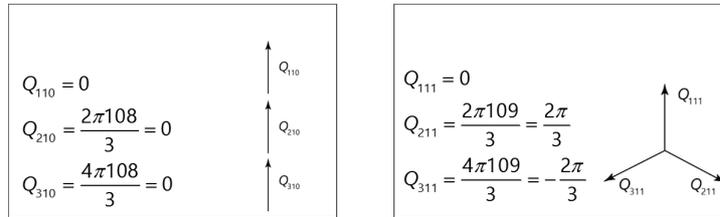


Figura 3.7: Componenti dell'ingranamento.

La fase della convoluzione degli spettri è data da:

$$Q_i = \frac{P_i f}{f_c} \quad (3.8)$$

Sostituendo l'Equazione (3.5) in (3.8) si ha:

$$Q_{mn} = P_i(mN_a + n) \quad (3.9)$$

Si può notare come la fase di ogni componente dello spettro dipende solamente dalla posizione iniziale P_i fra il satellite e l'accelerometro, dal numero di denti della corona e dall'ordine dell'armonica di ingranamento (m) e della sua banda laterale (n). Considerando un riduttore epicicloidale con N_{planet} satelliti, ed assumendo che tutti i satelliti siano identici, le componenti presenti nello spettro combinato dipenderanno solamente dalla somma delle fasi dei singoli spettri (Figura 3.7):

$$\overline{Q_{mn}} = \sum_{i=1}^{N_{planet}} \overline{Q_{imn}} \quad (3.10)$$

Per il riduttore MP 105 IS si ha: $N_{planet} = 3$, $P_1 = 0$, $P_2 = 2\pi/3$ e $P_3 = 4\pi/3$; inserendo questi dati all'interno dell'equazione (3.10) si possono ottenere le componenti visibili nello spettro (3.7). Il risultato di tale operazione se si pone $m = 1, \dots, 5$ e $n = -5, \dots, 5$ è rappresentato in Tabella 3.2, dove "1" indica la presenza di tale componente nello spettro, e "0" la sua assenza. Da quanto riportato in Tabella 3.2 si può osservare come, in base alla teoria delle modulazioni

Tabella 3.2: Componenti visibili (1) e non visibili (0) all'interno dello spettro del riduttore MP 105 IS

| | $-5f_c$ | $-4f_c$ | $-3f_c$ | $-2f_c$ | $-1f_c$ | $0f_c$ | $1f_c$ | $2f_c$ | $3f_c$ | $4f_c$ | $5f_c$ |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| f_{ing} | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| $2f_{ing}$ | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| $3f_{ing}$ | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| $4f_{ing}$ | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| $5f_{ing}$ | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |

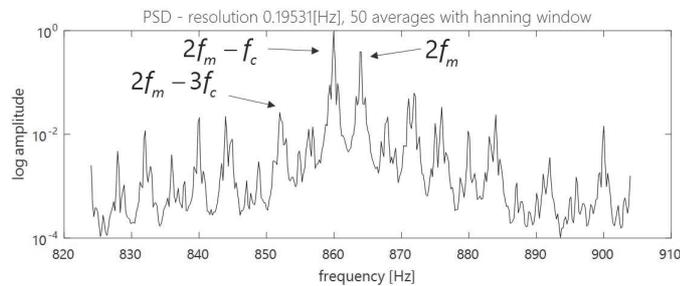


Figura 3.8: PSD della banda in frequenza attorno alla seconda armonica dell'ingranamento.

di McFadden e Smith, il riduttore in esame presenti bande laterali simmetriche. Il riscontro alla teoria delle modulazioni di McFadden e Smith si è ottenuto attraverso test effettuati a banco sul riduttore monostadio MP 105 IS avente $N_a = 108$, $N_p = 39$, $N_s = 27$ e $N_{planet} = 3$. La prova è stata condotta portando in trascinamento il riduttore ad una velocità dell'albero in ingresso pari a $1200rpm(20Hz)$. Lo spettro risultante è quello di Figura 3.8, essendo la frequenza di ingranamento $f_m = 431.95Hz$, la seconda armonica risulta pertanto essere $2f_m = 863.9Hz$ e la frequenza di rotazione del portasatelliti $f_c = 3.99$. Sùò notare come le componenti presenti nello spettro siano più numerose di quelle indicate dalla Tabella 3.2.

3.2.2 Modulazione: modello di Inalpolat e Kahraman

McFadden e Smith (1985) furono i primi a descrivere la vibrazione percepita da un trasduttore montato in posizione fissa sull'anello dentato di un semplice treno di ingranaggi epicicloidale, tuttavia il loro modello non era capace di prevedere l'ampiezza relativa contenuta nella bande laterali. Le bande laterali furono investigate da Inalpolat e Kahraman (2009) [93], i quali presentarono un modello di segnale acquisito dal trasduttore più completo, nel quale si assume che la vibrazione prodotta da ogni satellite influenzi il segnale del trasduttore per un periodo pari a T_c/N_{planet} centrato quando quel satellite si trova sotto il trasduttore (la finestra di Hanning rappresenta l'effetto del percorso di trasmissione). In realtà, gli effetti del percorso di trasmissione

(estensione angolare e forma) dipendono dallo specifico stadio epicicloidale e possono essere determinati attraverso un'analisi dinamica corpo deformabile. Inalpolat e Kahraman classificano gli stadi epicicloidali in cinque gruppi basandosi sulle loro caratteristiche di modulazione, relativamente alle seguenti tre condizioni:

1. La prima condizione indica se i satelliti sono, oppure no, equispaziati con angoli di sfasamento pari a

$$\Psi_i = \frac{2\pi(i-1)}{N_{planet}} \quad i = 1, 2, \dots, N_{planet} \quad (3.11)$$

dove N_{planet} è il numero di satelliti, i è un numero intero e

$$\Psi_i = m \frac{2\pi}{N_a + N_s} \quad (3.12)$$

dove, N_a è il numero dei denti della corona, N_s è il numero di denti del solare e m è un numero intero.

2. La seconda condizione determina se gli ingranamenti del satellite sono, oppure no, in fase:

$$\frac{\Psi_i N_a}{2\pi} = n \quad (3.13)$$

dove N_a è il numero di denti della corona e n è un numero intero.

3. La terza condizione definisce se gli ingranamenti del satellite sono sequenzialmente, o arbitrariamente, fuori fase:

$$\sum_{i=1}^{N_{planet}} N_a \Psi_i = m\pi \quad (3.14)$$

dove m è un numero intero. Gli ingranamenti sequenzialmente fuori fase si presentano quando la somma degli angoli di fase degli ingranamenti è un multiplo intero di π . Questa è una condizione comunemente utilizzata in progettazione in quanto si ottengono livelli vibrazionali più bassi.

Sulla base di queste tre condizioni Inalpolat e Kahraman hanno poi individuato i seguenti cinque gruppi:

- Gruppo 1) **Satelliti equispaziati e ingranamenti in fase** Qui le bande laterali sono simmetriche, come si vede in Figura 3.9. Questa situazione si verifica quando le seguenti condizioni sono verificate:

$$\Psi_i = \frac{2\pi(i-1)}{N_{planet}} \quad \frac{\Psi_i N_a}{2\pi} = n$$

- Gruppo 2) **Satelliti equispaziati e ingranamenti sequenzialmente fuori fase** Le bande laterali sono qui asimmetriche e non si rileva la frequenza di ingranamento (si veda la Figura 3.10). Questo gruppo è rappresentato dalla seguente condizione:

$$\Psi_i = \frac{2\pi(i-1)}{N_{planet}} \quad \frac{\Psi_i N_a}{2\pi} \neq n \quad \sum_{i=1}^{N_{planet}} N_a \Psi_i = m\pi$$

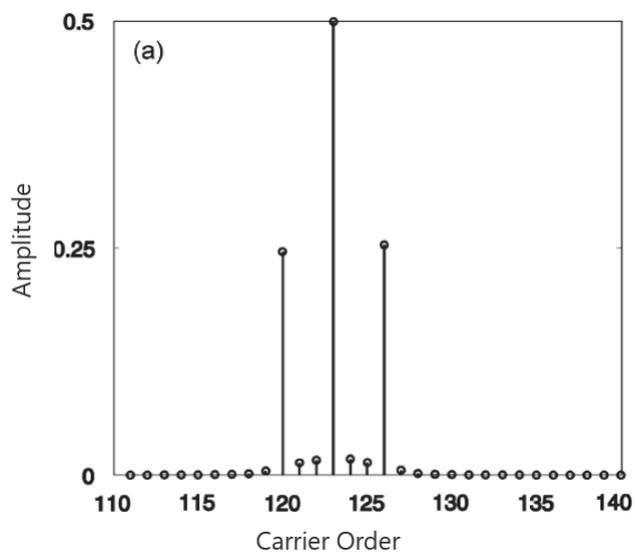


Figura 3.9: Gruppo 1: Satelliti equispaziati e ingranamenti in fase per $N_a = 123$, $N_s = 72$, $N_{planet} = 3$.

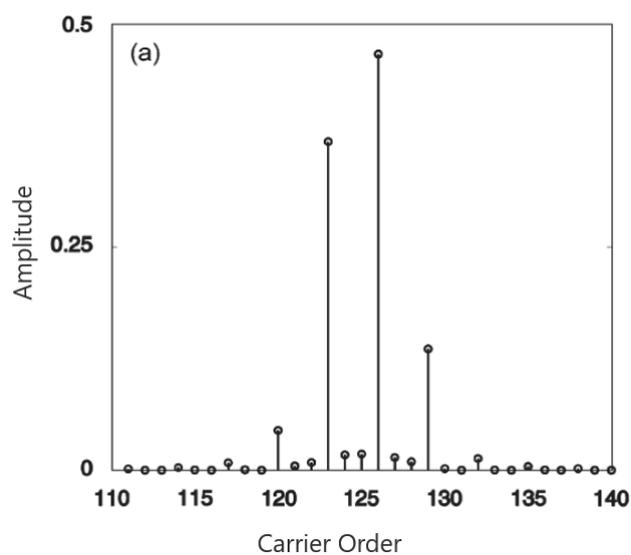


Figura 3.10: Gruppo 2: Satelliti equispaziati e ingranamenti sequenzialmente fuori fase per $N_a = 125$, $N_s = 73$, $N_{planet} = 3$.

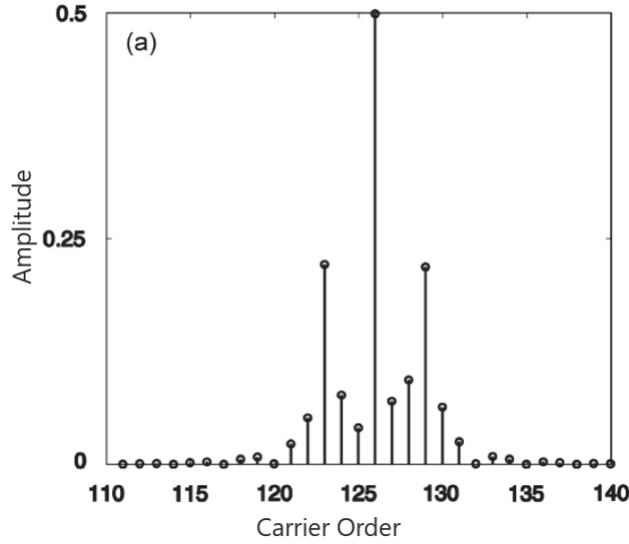


Figura 3.11: Gruppo 3: Satelliti non equispaziati e ingranamenti in fase per $N_a = 126$, $N_s = 72$, $N_{planet} = 3$.

Gruppo 3) **Satelliti non equispaziati e ingranamenti in fase** In questo caso le bande laterali sono quasi simmetriche (Figura 3.11). L'appartenenza a questo gruppo è identificata dalla seguente condizione:

$$\Psi_i \neq \frac{2\pi(i-1)}{N_{planet}} \quad \frac{\Psi_i N_a}{2\pi} = n$$

Gruppo 4) **Satelliti non equispaziati e ingranamenti sequenzialmente fuori fase** Le bande laterali sono asimmetriche (Figura 3.12). La condizione che caratterizza tale gruppo è:

$$\Psi_i \neq \frac{2\pi(i-1)}{N_{planet}} \quad \frac{\Psi_i N_a}{2\pi} \neq n \quad \sum_{i=1}^{N_{planet}} N_a \Psi_i = m\pi$$

Gruppo 5) **Satelliti non equispaziati e ingranamenti arbitrariamente fasati** In questo gruppo le bande laterali sono numerose e asimmetriche. Si evidenzia la presenza della frequenza di ingranamento (Figura 3.13). La condizione dei riduttori appartenenti a quest'ultimo gruppo è:

$$\Psi_i = \frac{2\pi(i-1)}{N_{planet}} \quad \frac{\Psi_i N_a}{2\pi} \neq n \quad \sum_{i=1}^{N_{planet}} N_a \Psi_i = m\pi$$

Anche la teoria delle modulazioni di Inalpolat e Kahraman è stata verificata mediante il test descritto per la teoria di McFadden e Smith: si è portato in trascinamento il riduttore MP 105 IS ad una velocità dell'albero in ingresso pari a $1200rpm(20Hz)$. La frequenza di ingranamento risulta essere $f_m = 431.95Hz$, la seconda armonica $2f_m = 863.9Hz$ e la frequenza di rotazione del portasatelliti $f_c = 3.99Hz$. Dal grafico della PSD di Figura 3.8 si nota la presenza della frequenza di ingranamento con bande laterali asimmetriche: stando alla classificazione precedente il riduttore rientra nel "gruppo 4" (satelliti non equispaziati e ingranamenti sequenzialmente fuori fase).

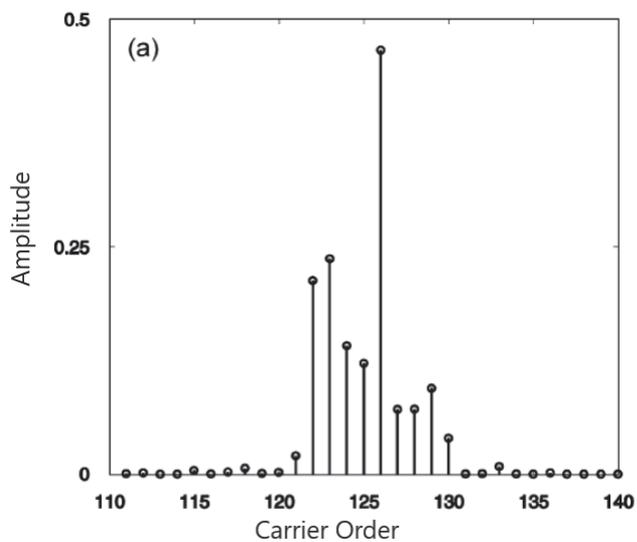


Figura 3.12: Gruppo 4: Satelliti non equispaziati e ingranamenti sequenzialmente fuori fase per $N_a = 125$, $N_s = 73$, $N_{planet} = 3$.

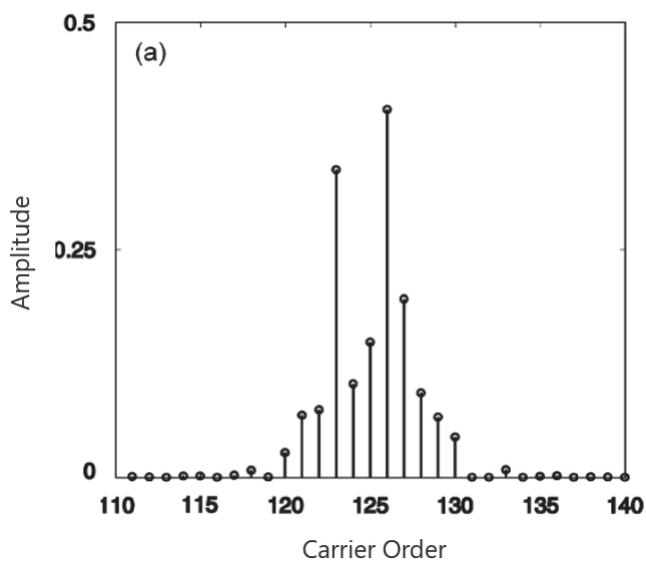


Figura 3.13: Gruppo 5: Satelliti non equispaziati e ingranamenti arbitrariamente fasati per $N_a = 125$, $N_s = 73$, $N_{planet} = 3$.

3.3 Media sincrona negli epicicloidali: metodo di McFadden

3.3.1 Procedura

Per poter estrarre dal segnale di vibrazione totale il segnale dei singoli satelliti (o del solare), bisogna applicare un'opportuna tecnica di analisi del segnale, sviluppata da McFadden [94], chiamata media sincrona (TSA: Time Synchronous Average). La TSA è una tecnica di analisi del segnale molto potente che permette di estrarre forme d'onda periodiche da segnali rumorosi. I problemi insorgono quando la TSA viene applicata alla vibrazione prodotta dai riduttori epicicloidali, a causa del movimento dei satelliti e delle molteplici regioni di contatto tra i satelliti e la corona e tra i satelliti ed il solare. McFadden e Smith ([92], [94]) hanno dimostrato che

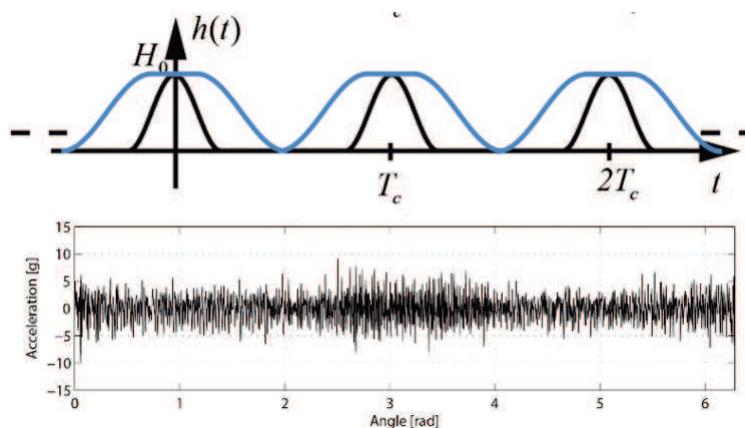


Figura 3.14: Larghezza della finestra di passaggio dei satelliti in corrispondenza dell'accelerometro.

per un dato satellite che si avvicina al trasduttore, il livello di vibrazione aumenta, mentre per un dato satellite che si allontana dal trasduttore il livello di vibrazione diminuisce. Si definisce $h(t)$ la funzione di trasferimento tra il trasduttore e il satellite, con un periodo pari alla rotazione del portasatelliti, T_c , (vedi Figura 3.14). Quindi, il segnale del satellite $x(t)$ visto dal trasduttore j è dato da $h_j(t)x(t)$.

Per estrarre il segnale del satellite McFadden affermò che [92]: *Quando un determinato satellite è in prossimità dell'accelerometro la vibrazione misurata è imputabile solamente all'ingranamento di quello specifico satellite con il solare e la corona.* Pertanto, durante ogni passaggio di un determinato satellite, una piccola finestra temporale di dati può essere raccolta [91]. Si può assumere che per tutta la larghezza di questa finestra, la funzione di trasferimento tra l'accelerometro e la regione di contatto del dente rimarrà costante. I denti in presa del satellite possono essere determinati per ogni giro del portasatelliti e la finestra dei dati può essere inserita in un buffer in accordo con la sequenza di ingranamento. Questo processo è quindi ripetuto diverse volte in modo da ottenere il segnale completo per un satellite. Il suddetto blocco di dati include il segnale di vibrazione per una rivoluzione completa del satellite. Questo procedimento può essere ripetuto diverse volte per effettuare il numero di medie desiderato (Figura 3.15). Per poter applicare la media sincrona bisogna innanzitutto svincolarsi dalla variazione di velocità, passando cioè dal dominio del tempo al dominio dell'angolo; il segnale viene quindi campionato con un numero finito di punti per giro del portasatelliti. Per una maggiore comprensione della tecnica, nel seguito si continuerà a parlare di istanti temporali, intendendo-

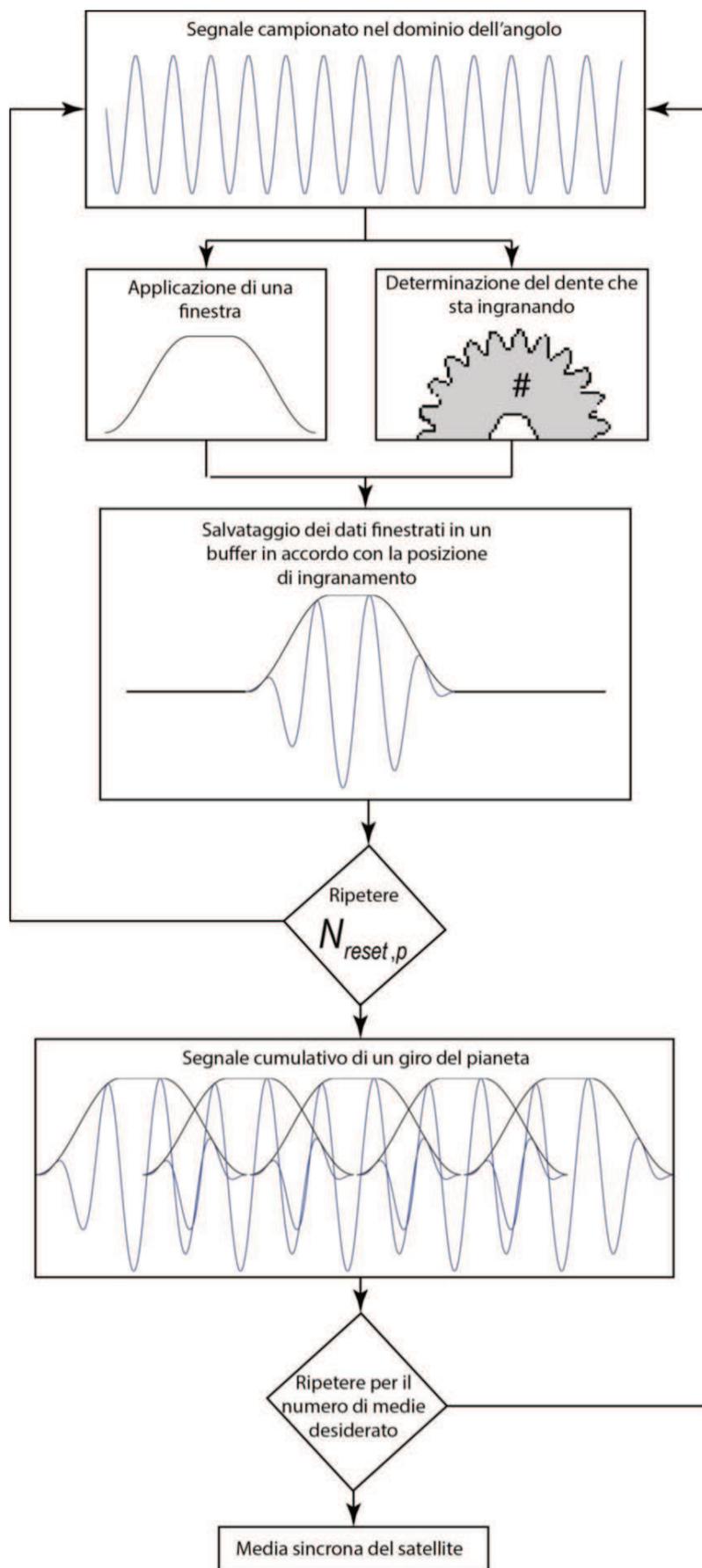


Figura 3.15: Diagramma a blocchi per il calcolo della media sincrona secondo la procedura di McFadden.

si, tuttavia, istanti angolari. Affinché sia possibile calcolare il valore TSA dell'ingranamento satellite/solare è necessario che il segnale sia dapprima ricampionato nel dominio angolare in accordo con il periodo di rotazione della ruota di interesse (T_g). Per fare ciò la frequenza di rotazione del portasatelliti deve essere nota; il periodo di rotazione della ruota di interesse si ottiene moltiplicando il periodo di rotazione del portasatelliti per il rapporto di trasmissione di Willis tra la corona e la ruota di interesse. Il numero di rotazioni del portasatelliti necessarie, tali che la ruota di interesse ritorni nel suo stato iniziale rispetto alla corona, è definito dall'equazione 3.3. La sequenza di ingranamento dei denti è determinata invece dall'equazione 3.18. Il segnale dei singoli satelliti (o del solare) può essere estratto dal segnale di vibrazione totale con il seguente metodo (Figura 3.15):

1. Si definisca una funzione finestra centrata al tempo $t = n_c T_c$ dove n_c è un numero intero. L'istante al quale $h_j(t)$ raggiunge il suo massimo è definito da $v(t - n_c T_c)$. Il conseguente segnale di vibrazione così finestrato è dato dall'espressione $h_j(t)x(t)v(t - n_c T_c)$. Ad ogni rotazione del portasatelliti di periodo $n_c T_c$, il satellite in esame passerà sotto l'accelerometro; ciò avverrà quindi agli istanti $n_c T_c$, dove n_c sono i giri del portasatelliti. In base all'ipotesi iniziale è possibile estrarre dal segnale $x(t)$ una porzione di segnale relativa all'ingranamento di un singolo dente del satellite in esame. Si scelga la larghezza della finestra temporale pari ad un numero intero del periodo di ingranamento, T_m , espresso da [94]:

$$T_v = N_v T_m \quad (3.15)$$

Se si sceglie N_v sufficientemente piccolo l'ampiezza di $h_j(t)$ può essere assunta costante ($H_{j,0}$) sull'intera finestra, e il segnale di vibrazione diventa:

$$h_j(t)x(t)v(t - n_c T_c) = H_{j,0}x(t)v(t - n_c T_c) \quad (3.16)$$

2. Una volta che una finestra di dati vibrazionali è stata raccolta, questa può essere allocata in una appropriata posizione nella memoria per sintetizzare il segnale di vibrazione satellite/solare. La determinazione di questa posizione passa attraverso la definizione di una funzione di campionamento $g(t) = g(t - n_c T_g)$ dove T_g è il periodo di rotazione della ruota di interesse (satellite/solare). Grazie all'equazione (3.4) si conosce la sequenza di ingranamento dei denti del satellite con la corona esterna per ogni rotazione del portasatelliti (ad esempio, come riportato in Tabella 3.1, per $n_c = 0$ ingranerà il dente 1 e per $n_c = 1$ ingranerà il dente 31). Il segnale appena estratto viene posizionato in un buffer contenente esclusivamente il segnale prodotto dagli ingranamenti di tutti i denti del satellite in esame.
3. L'operazione di convoluzione espressa da $[H_{j,0}x(t)v(t - n_c T_c)] * g(t)$, consente di allocare le finestre nella posizione corretta. Se il numero di denti della ruota di interesse è N_g , una volta che N_g finestre sono state allocate, tutti i denti della ruota in esame saranno stati acquisiti. Dopo $N_{reset,p}$ giri del portasatellite, il buffer conterrà il segnale vibratorio generato da tutti i denti del portasatellite che hanno ingranato con la corona sotto l'accelerometro.

4. Per estrarre il segnale di vibrazione TSA a partire da quello misurato, un elevato numero di segnali sintetizzati N_e deve essere raccolto. Ripetendo questa operazione si avrà una serie di segnali sintetizzati della stessa ruota di interesse che potranno essere mediati ricavando così il segnale relativo al singolo satellite/solare in studio. Il valore TSA della ruota di interesse è quindi definito come:

$$x_g(t) = \frac{1}{N_e N_v} \sum_{n=0}^{N_e N_{reset}} [H_{j,o} x(t) v(t - n_c T_c)] * g(t) \quad (3.17)$$

Risulta subito chiaro che la bontà del segnale estratto dipende da:

- forma e larghezza (T_v) della finestra utilizzata (si veda il paragrafo 3.3.2);
- corretta identificazione dell'istante in cui il satellite ingrana sotto l'accelerometro (3.3.3);

Il tempo di acquisizione richiesto per avere un numero appropriato di medie è in generale abbastanza grande, essendo funzione del numero di rotazioni del portasatellite N_{reset} necessario per estrarre tutti gli ingranamenti della ruota satellite/solare. Dato un riduttore epicicloidale a tre stadi (cfr. Capitolo 5) avente il primo stadio composto da $N_s = 10, N_p = 25, N_a = 62$ e una frequenza di rotazione del portasatellite del primo stadio pari a $f_{c,sg1} = 3,47Hz$, per calcolare un segnale sintetizzato con $N_e = 18$, è richiesto un tempo di acquisizione pari a:

$$T = \frac{N_{reset,p} N_e}{f_{c,sg1}} = 130s \quad (3.18)$$

Volendosi avere lo stesso numero di medie N_e per il secondo stadio, geometricamente identico al primo ma con $f_{c,sg2} = 0.48Hz$, il tempo di acquisizione diventa:

$$T = \frac{N_{reset,p} N_e}{f_{c,sg1}} = 933s (= 15,5min) \quad (3.19)$$

3.3.2 Scelta della finestra

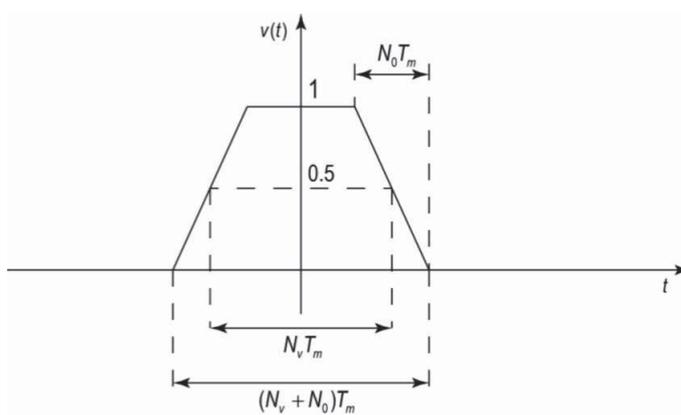
McFadden [95] ha dimostrato che la finestra di *Hanning* è quella che meglio estrae dal segnale totale il segnale dei singoli satelliti (o del solare). Inoltre, ha anche dimostrato che la larghezza della finestra $v(t)$ deve essere (Figura 3.16):

$$t_v = (N_v + N_0) T_m \quad (3.20)$$

dove:

$$N_v = kc \quad k \in N \quad (3.21)$$

con c pari al massimo comune divisore tra N_a e N_g ed $N_0 = N_v$. Una volta scelto k , mediante le equazioni (3.20) e (3.21), è quindi possibile determinare la lunghezza ottimale della finestra da utilizzare nella procedura di estrazione dei segnali relativi ai singoli satelliti, o al solare. La larghezza della finestra dipende dalle caratteristiche dinamiche della scatola del riduttore e dalla sua geometria. In particolare si ricorre ad una finestra larga e piatta in quei casi in cui non tutti i denti del satellite ingrano sotto l'accelerometro; pertanto per poter estrarre correttamente il segnale relativo a tutti i denti è necessaria una finestra che consideri anche


Figura 3.16: Definizione della finestra $v(t)$.

l'ingranamento precedente e successivo a quello posizionato sotto l'accelerometro. La procedura di media sincrona appena descritta, introduce all'interno del segnale estratto un errore (dovuto alle discontinuità del segnale ai margini della finestra) alla frequenza:

$$f = \frac{N_g}{c} f_g \quad (3.22)$$

La scelta del parametro k , si basa sulla minimizzazione di tale errore. Per ottimizzare il valore

Tabella 3.3: Dati segnale simulato

| | | |
|---|-------|-------|
| Numero di stadi | | 1 |
| Numero di denti del solare | N_s | 27 |
| Numero di denti del satellite | N_p | 39 |
| Numero di denti corona | N_a | 108 |
| Numero di satelliti | N | 3 |
| Frequenza di rotazione del portasatelliti | f_c | 4[Hz] |

di k , e per testare la procedura di media sincrona è stato impiegato un segnale simulato. Tale segnale, Figura 3.17, rappresenta idealmente la vibrazione rilevata da un accelerometro posto sulla corona esterna di un riduttore epicicloidale dalle caratteristiche riportate in Tabella 3.3. Si hanno quindi i seguenti parametri

- SATELLITE:

$$\begin{aligned} N_{reset,p} &= 13 \\ c &= 3 \end{aligned} \quad (3.23)$$

- SOLARE:

$$\begin{aligned} N_{reset,s} &= 1 \\ c &= 27 \end{aligned} \quad (3.24)$$

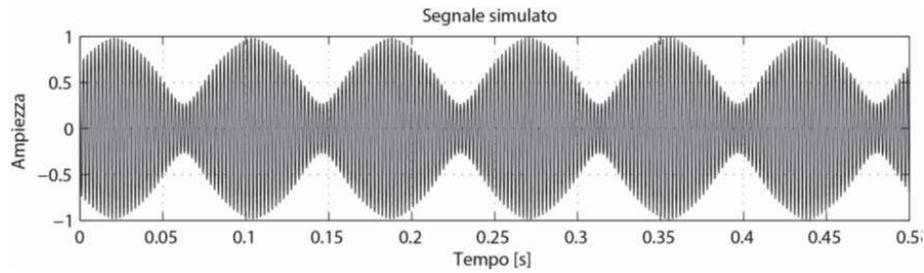


Figura 3.17: Segnale simulato di vibrazione idealmente rilevata da un accelerometro posto sulla corona esterna di un riduttore epicicloidale con $N_s = 27$, $N_p = 39$, $N_a = 108$, $N = 3$ e $f_c = 4$ [Hz].

La Figura 3.18 e la Figura 3.19 mostrano l'ampiezza della componente relativa all'errore per diversi valori del parametro k . Si può notare che per l'estrazione del segnale dei satelliti la minimizzazione dell'errore si ottiene per $k = 3$ (Figura 3.18); mentre per $k = 4$ si ha la minimizzazione dell'errore durante l'estrazione del segnale del solare (Figura 3.19). Alla luce di

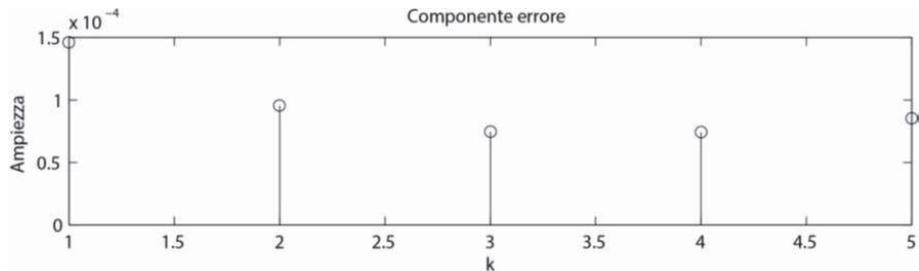


Figura 3.18: Ampiezza della componente relativa all'errore per l'estrazione del satellite al variare di k .

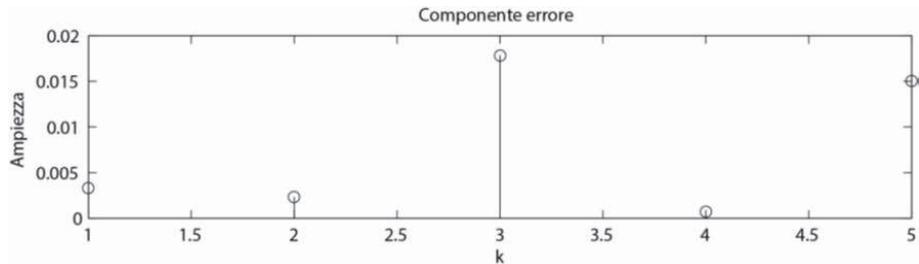


Figura 3.19: Ampiezza della componente relativa all'errore per l'estrazione del solare al variare di k .

cio, l'ampiezza della finestra che meglio estrae i segnali dei satelliti e del solare, dal segnale totale è:

- Segnale satellite: $T_v = (3 * 3 + 3 * 3)T_m = 18 * T_m$
- Segnale solare: $T_v = (4 * 27 + 4 * 27)T_m = 216 * T_m$

Si può notare che per l'estrazione del segnale del solare sarebbe richiesta una finestra che estragga dal segnale totale porzioni di segnale lunghe 216 denti, equivalenti cioè a due giri del portasatelliti (la corona fissa ha 108 denti). Per poter rimanere dentro il singolo giro del portasatelliti, pur ottenendo un'ampiezza della componente relativa all'errore bassa, si è deciso di utilizzare per l'estrazione del segnale del solare $k = 2$. I segnali sperimentali saranno perciò analizzati considerando:

- $T_v = 18 * T_m$ per l'estrazione del segnale dei singoli satelliti;

- $T_v = 108 * T_m$ per l'estrazione del segnale relativo al solare.

3.3.3 Individuazione della posizione dei satelliti

Fino ad ora è stato assunto che la velocità del riduttore epicicloidale fosse costante: nella pratica, fatta eccezione per la velocità nominale costante della macchina, tale condizione non è sempre soddisfatta. Per poter effettuare un'analisi che tenga conto delle fluttuazioni di velocità si rende necessario passare dal "dominio del tempo" a quello "dell'angolo": ciò comporta la sostituzione della variabile t sull'asse dei tempi con i riferimenti angolari (gradi [°]). In pratica la conversione dal dominio nel tempo a quello nell'angolo viene eseguita sincronizzando il campionamento del segnale di vibrazione con un riferimento angolare su uno degli alberi del riduttore. La sincronizzazione può essere eseguita, o acquisendo direttamente a frequenza proporzionale alla velocità o con un ricampionamento digitale [96] [97] [81]. La funzione $h(t)$, precedentemente definita, è direttamente correlata alle proprietà di massa, smorzamento e rigidità del riduttore. In alcuni casi la combinazione di queste proprietà fa sì che la funzione $h(t)$ sia particolarmente piatta. Ciò comporta che non vi siano effetti di modulazione in ampiezza visibili nel segnale mediato sincrono con la ruota dentata e questa condizione permane anche dopo l'applicazione di tecniche di demodulazione in ampiezza, e.g. la demodulazione con la Trasformata di Hilbert [31] oppure con il metodo di separazione di McFadden [95]. La posizione relativa del satellite rispetto al trasduttore non può essere determinata correttamente, portando ad una scarsa qualità della corrispondente media sincrona del satellite. Per fare fronte a ciò si possono utilizzare due metodi che identificano la posizione angolare del satellite rispetto al trasduttore. Il primo è basato sulla potenza media istantanea della TSA della corona, mentre il secondo è basato su un fattore di cresta modificato (MCF) [98].

1. Flusso di potenza

La posizione relativa di ciascuno dei satelliti rispetto al trasduttore può essere stimata studiando come la potenza varia nel segnale di vibrazione. Nella fattispecie, la posizione del satellite si può definire dal flusso di potenza del segnale mediato della corona. In conseguenza di ciò ogni volta che un satellite passa sotto il trasduttore all'interno del segnale si ha un incremento della potenza rilasciata. L'operatore matematico che descrive come la potenza fluisce all'interno del segnale fu introdotto da Antoni alcuni anni fa [52]. Sia $x(t)$ un segnale continuo nel tempo, la potenza media istantanea è definita come:

$$P_x(t) = \sum_{\alpha \in A} P_x^\alpha e^{j2\pi\alpha t} \quad (3.25)$$

dove P_x^α è la potenza ciclica del segnale alle frequenze cicliche α espresso come:

$$P_x^\alpha = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_T |x(t)|^2 e^{j2\pi\alpha t} dt \quad (3.26)$$

Sia A nell'equazione 3.25 l'insieme delle frequenze cicliche all'interno di $x(t)$. Per ottenere la posizione del satellite rispetto al trasduttore la potenza ciclica è filtrata attorno alla frequenza ciclica corrispondente al numero di denti della ruota con una larghezza di banda sufficientemente larga da coinvolgere un numero di bande laterali corrispondenti

al numero dei satelliti del riduttore epicicloidale. In particolare l'intera procedura si può sintetizzare come segue:

- Valutazione della media sincrona della corona.
- Valutazione della funzione P_x^α relativa alla media sincrona della corona (i.e. stima della Trasformata di Fourier del valore assoluto al quadrato della media sincrona della corona).
- Inserimento nell'insieme A degli ordini ciclici pari al numero di denti della corona, unitamente alle bande laterali di modulazione destre e sinistre corrispondenti al numero di satelliti (i.e. filtrare la funzione P_x^α tenendo in considerazione solamente l'ordine ciclico uguale al numero di denti della corona così come per le bande laterali destre e sinistre relative al numero di satelliti).
- Ricostruzione di P_x basandosi sull'insieme A (i.e. ovvero stima della Trasformata Inversa di Fourier della funzione filtrata P_x^α).
- Valutazione della funzione involuppo di P_x .
- Ogni massimo nell'involuppo di P_x darà l'istante temporale corrispondente ad un valore di sfasamento costante dei satelliti rispetto alla posizione del trasduttore.

Una volta che la fase di un satellite è stata valutata, le fasi degli altri satelliti possono essere ottenute considerando l'angolo tra due satelliti consecutivi definito attraverso le relazioni cinematiche oppure tenendo conto degli altri massimi.

2. Parametro statistico MCF

La posizione di un particolare satellite rispetto al trasduttore può anche essere valutata con un semplice parametro statistico. Un analogo della funzione P_x si può ricavare con un indice che coinvolge la larghezza del dente mediante un Fattore di Cresta Mobile (MCF):

$$MCF = \frac{x(\tau)_{peak-peak}}{RMS(x(\tau))} \quad (3.27)$$

dove $x(\tau)_{peak-peak}$ è il valore picco-picco e $RMS(x(\tau))$ indica il valore RMS . Il parametro τ è usato per enfatizzare la natura mobile della finestra: $x(\tau) = w(t - \tau_w)x(t)$, dove w è la funzione di finestrazione e τ_w è il ritardo utilizzato in accordo con la seguente procedura. In genere il Fattore di Cresta è una misura di quanto siano alti i picchi rispetto ad un valore medio in una forma d'onda. Il valore picco-picco è utilizzato nell'Equazione 3.27 per incrementare la sensibilità del puro Fattore di Cresta. L'MCF valutato attraverso l'Equazione 3.27 non è una funzione del tempo ma un valore numerico singolo. Per ottenere una funzione che possa essere correlata al flusso di potenza del segnale, l'Equazione 3.27 è calcolata su una porzione di segnale che coinvolge un singolo dente della corona. In definitiva, il valore MCF del dente è filtrato attorno all'ordine della rotazione del portasatelliti che corrisponde al numero dei satelliti. Pertanto la valutazione del valore di MCF sulla finestra di larghezza pari ad un dente pone la frequenza di campionamento pari al numero di denti della corona. Poiché l'intervallo di frequenze di interesse è legato

al numero di satelliti, la frequenza di campionamento di MCF è sempre grande abbastanza per ricostruire correttamente la forma d'onda del passaggio dei satelliti. Il massimo valore del parametro MCF così processato fornisce la posizione di un satellite rispetto al trasduttore. L'intera procedura si può riassumere come segue:

- Valutazione della media sincrona della corona.
- Valutazione del valore MCF per ogni dente della corona.
- Filtraggio della funzione MCF calcolata per ogni dente attorno all'ordine di rotazione del portasatelliti che corrisponde al numero dei satelliti.
- Ciascun massimo nella funzione MCF calcolata per ogni dente filtrata darà l'istante di tempo corrispondente ad un valore di sfasamento tra il satellite e la posizione del trasduttore.

Come precedentemente affermato, una volta che la fase di un satellite è stata quantificata, le fasi degli altri satelliti possono essere ottenute considerando l'angolo tra due satelliti consecutivi definito attraverso le relazioni cinematiche oppure tenendo conto degli altri massimi. Inoltre la distorsione di fase potrà essere evitata durante il filtraggio. Nel presente lavoro si è utilizzato un filtro ideale FIR, che non influenza la fase del segnale filtrato.

Anche in questo caso si è utilizzato il riduttore MP 105 IS per verificare le due procedure appena descritte. In questa prova si è però introdotto un difetto su un satellite (Figura 3.20). In



Figura 3.20: Difetto localizzato sul satellite del primo stadio.

Figura 3.21 si può vedere il risultato ottenuto applicando le due procedure. In particolare, il valore MCF è meno sensibile al difetto consentendo una stima più accurata della posizione dei satelliti rispetto all'accelerometro. Anche se la media sincrona della corona non appare sempre fortemente modulata, la posizione relativa dei satelliti rispetto al trasduttore è fondamentale per una chiara individuazione del difetto. Utilizzando il valore MCF per individuare lo sfasamento dei satelliti rispetto al trasduttore montato sulla corona è possibile estrarre il segnale del satellite corrispondente considerando lo sfasamento dei tre massimi rispetto allo zero. In Figura 3.22 si possono vedere i segnali dei tre satelliti mediati utilizzando il parametro MCF per individuarne la fase. A seconda delle proprietà dinamiche della scatola del riduttore, anche se un solo satellite ha un difetto localizzato, questo potrebbe essere visualizzato anche sugli altri satelliti erroneamente. Se il j -esimo dente del satellite 1 sta ingranando, allo stesso istante gli altri satelliti stanno ingranando con il dente $j + 5$ e $j + 10$ come si può vedere dalla Figura

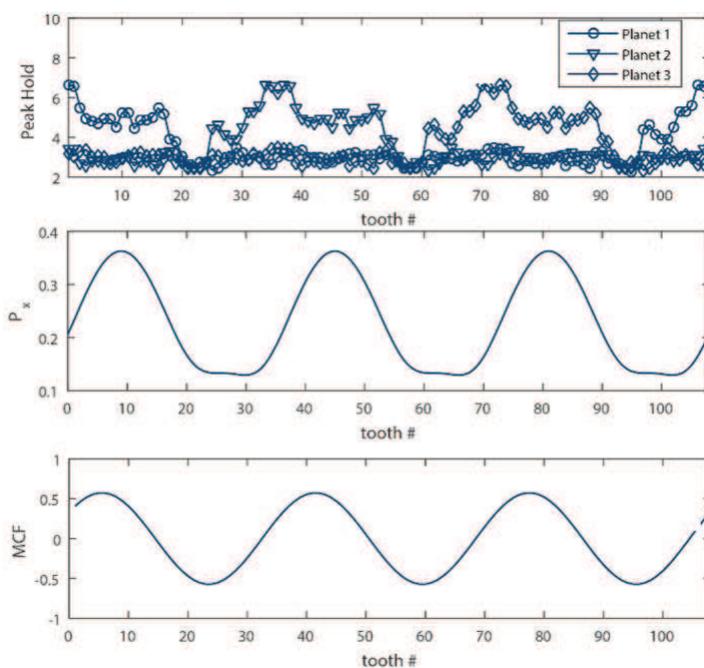


Figura 3.21: Confronto dei segnali di modulazione dei satelliti con le due tecniche descritte.

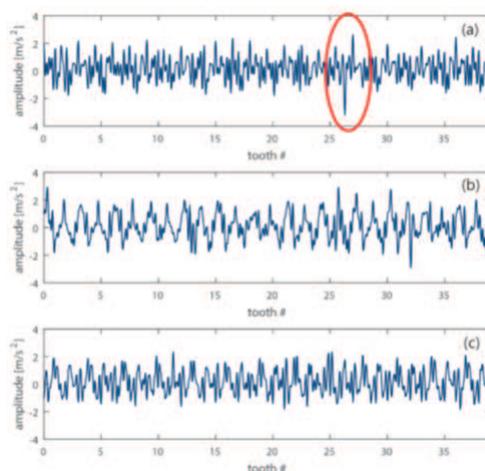


Figura 3.22: Segnali dei tre satelliti mediati utilizzando il parametro MCF.

3.23. In questo caso solamente uno dei denti è realmente ammaccato, tuttavia il difetto sembra presentarsi anche sugli altri due satelliti.

3.3.4 Proprietà e limiti

PRO

- Si riescono ad estrarre i segnali relativi al solare e ai satelliti dal segnale vibrazionale grezzo
- Si possono applicare tutte le tecniche standard di analisi del segnale per la diagnostica ai segnali estratti.

CONTRO

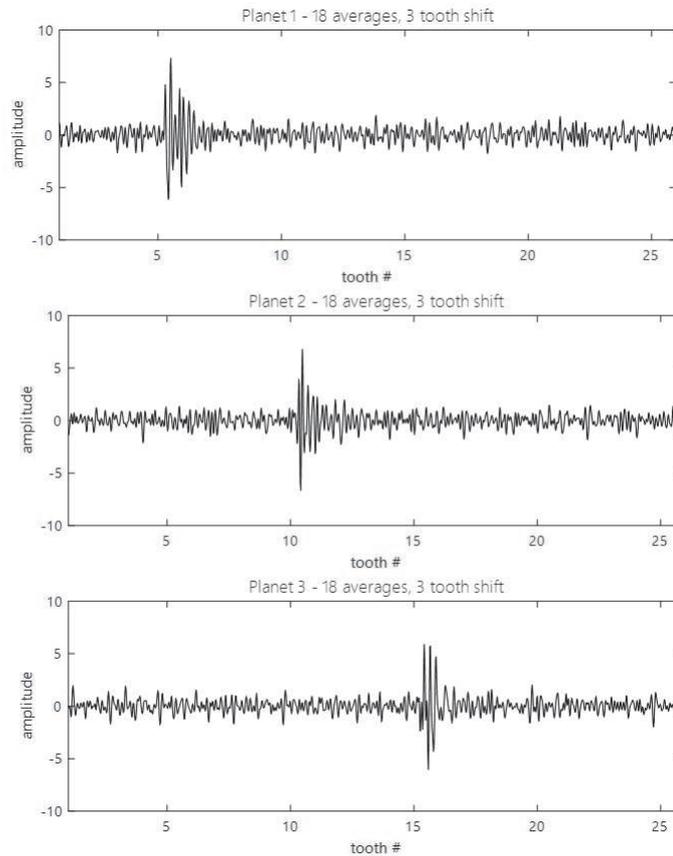


Figura 3.23: Esempio di difetto fantasma presente sul Satellite 1, Satellite 2 e Satellite 3.

- Alcune scelte critiche possono influenzare la qualità della TSA estratta e la sua capacità di individuazione dei difetti come la corretta identificazione della posizione dei satelliti o la scelta del tipo e della forma della finestra temporale.
- Sono richiesti lunghi tempi di acquisizione per effettuare un numero corretto di medie.
- Ne consegue che il segnale deve avere un carico stazionario per un lungo periodo di tempo.

3.4 Media sincrona negli epicicloidali: metodo di Forrester e Blunt

Il segnale vibratorio atteso per il satellite acquisito dal sensore montato sulla parte esterna della corona di uno stadio epicicloidale sarà la somma delle vibrazioni di ciascun satellite moltiplicate per la modulazione dovuta al passaggio dei satelliti [99],

$$x(t) = \sum_{p=1}^P \alpha_p(t) v_p(t) \quad (3.28)$$

dove $\alpha_p(t)$ è la modulazione di ampiezza dovuta al satellite p , e $v_p(t)$, è la vibrazione di ingranamento per il satellite p .

La funzione di modulazione di ampiezza $\alpha_p(t)$ (modulazione dovuta al passaggio dei satelliti) sarà la stessa per ogni satellite, differendo solamente per lo sfasamento, e sarà ripetuta con il

periodo di rotazione del porta satelliti $1/f_c$.

$$\alpha_p(t) = a\left(t + \frac{p}{f_c P}\right) = \sum_{m=0}^{\infty} A(m) \cos\left(2\pi m f_c t + \frac{2\pi m p}{P}\right) \quad (3.29)$$

dove $a(t)$ è la funzione di modulazione data dal passaggio dei satelliti e $A(m)$ è la sua Trasformata di Fourier. L'equazione 3.28 può essere riscritta in termini della funzione di modulazione data dal passaggio dei satelliti dando:

$$x(t) = \sum_{p=1}^P a\left(t + \frac{p}{f_c P}\right) v_p(t) \quad (3.30)$$

3.4.1 Estrazione della media sincrona dei singoli satelliti

Un metodo alternativo di estrazione del segnale rappresentativo medio per ciascun satellite è quello di incorporare un filtro temporale selettivo (continuo) nel processo di media del segnale. Il filtro temporale divide proporzionalmente l'intero segnale di vibrazione nel contributo stimato per ciascun satellite.

Per ciascun segnale del satellite mediato, la finestra temporale, $b(t)$, è centrata nel punto in cui il satellite è adiacente al sensore. La media del segnale vibratorio così filtrato viene eseguita con un periodo equivalente a quello della rotazione relativa del satellite, $1/(f_p + f_c)$, dando:

$$\bar{z}_p(t) = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} b\left(t + \frac{p}{f_c P} + \frac{l}{f_p + f_c}\right) x\left(t + \frac{l}{f_p + f_c}\right) \quad (3.31)$$

dove N è il numero di medie. Con una selezione accurata delle caratteristiche della finestra temporale e dei parametri della media del segnale, la separazione può essere eseguita con un 'leakage' minimo della vibrazione dagli altri satelliti, con nessuna perdita di dati vibrazionali, e nessuna distorsione del segnale mediato. La media temporale del segnale così filtrato per il satellite p si riduce a

$$\bar{z}_p(t) = \sum_{k=1}^P \bar{v}_k(t) c(p-k). \quad (3.32)$$

La funzione di separazione, $c(n)$, è definita dall'applicazione sia della finestra temporale, $b(t)$, sia della funzione di modulazione di passaggio dei satelliti, $a(t)$,

$$c(n) = \frac{1}{2} \left(B(0)A(0) + \sum_{m=0}^{P-1} B(m)A(m) \cos\left(\frac{2\pi n m}{P}\right) \right) \quad (3.33)$$

dove la finestra temporale applicata è

$$b(t) = \sum_{m=0}^{P-1} B(m) \cos(2\pi n f_c t). \quad (3.34)$$

Da notare che la somma delle medie dei segnali temporali filtrati è uguale alla somma della media dei segnali vibrazionali del satellite moltiplicati per una costante

$$\sum_{p=1}^P \bar{z}_p(t) = \sum_{k=1}^P \bar{v}_k(t) \sum_{p=1}^P c(p-k) = P B(0)A(0) \sum_{k=1}^P \bar{v}_k(t). \quad (3.35)$$

Perciò, il processo di separazione viene effettuato utilizzando tutti i dati vibrazionali disponibili. Se la modulazione di passaggio dei satelliti è esattamente nota, si può effettuare la completa separazione settando i coefficienti della finestra temporale come segue:

- $B(0) = 1/A(0) \Rightarrow c(0) = P$
- $B(m \neq 0) = 2/A(m) \Rightarrow c(n \neq 0) = 0$

La finestra che è stata utilizzata, che ottimizza la separazione, è una finestra coseno elevata alla potenza di $P - 1$ [100].

$$b(t) = (1 + \cos(2\pi f_c t))^{P-1}, \quad (3.36)$$

si tratta di una funzione affusolata con valore massimo quando il satellite è adiacente ad trasduttore e a valore zero quando il satellite è lontano dal sensore.

3.4.2 Media sincrona del solare

La tecnica per il solare calcola le medie "separate" della vibrazione del solare "vista" attraverso ciascun satellite, i quali sono poi sfasati in maniera che ogni media cominci con lo stesso dente del solare che ingrana con ciascun satellite, e ricombinato (mediato) per produrre una media modificata del solare.

Idealmente, con la completa separazione della vibrazione proveniente da ciascun satellite,

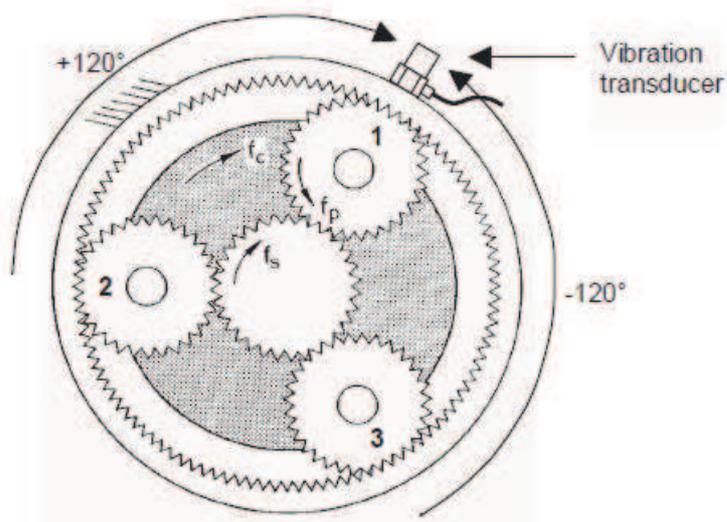


Figura 3.24: Sfasamento per il calcolo delle medie separate del solare attraverso ciascun satellite.

la tecnica produce una media modificata che rappresenta le caratteristiche dell'ingranamento medio del solare visto attraverso un singolo satellite tipico, o mediato. In contrasto, la media convenzionale per un solare rappresenta la media delle caratteristiche di ingranamento del solare visto attraverso tutti i satelliti contemporaneamente (con l'accompagnamento della somma e cancellazione di certe componenti della vibrazione).

La procedura per il calcolo della media del solare modificata si basa sui seguenti passaggi:

- a) Calcolo separato delle medie del solare: ciò coincide con il calcolo della media separata dei satelliti, ad eccezione del periodo mediato che è quello del solare anziché del satellite. La funzione della finestra di separazione è la stessa.
- b) Poiché le medie del solare calcolate attraverso ciascun satellite sono sfasate, occorre il riallineamento degli ingranamenti. Ad esempio, in un stadio epicicloidale con tre

satelliti, il Satellite 2 deve essere sfasato di $+120^\circ$, e il Satellite 3 deve essere sfasato di -120° (o $+240^\circ$) per allinearli con il Satellite 1, come mostrato in Figura 3.24. Da notare che il solare ingrana in ordine inverso con i satelliti che passano sotto al sensore sulla corona;

- c) Si effettua la media degli ingranamenti allineati.

3.4.3 Proprietà e limiti

- a) La finestra temporale di separazione è a valori reali, multipla e periodica con la rotazione del portasatelliti, $1/f_c$.
- b) La media del segnale viene eseguita sul periodo di rotazione relativo del satellite, $1/(f_p + f_c)$, e il numero di medie è un multiplo intero del numero di denti sulla corona dentata, N_a , e
- c) La finestra temporale, $b(t)$, è una serie di Fourier con meno di P termini.

3.5 Confronto fra i due metodi di estrazione della media sincrona

Si è mostrato che nei rotismi epicicloidali la vibrazione misurata sulla cassa presenta modulazioni dovute al movimento dei satelliti rispetto al trasduttore, oltre agli effetti di possibili guasti. Le caratteristiche della modulazione dipendono dal numero di denti delle ruote e dagli altri parametri costruttivi del rotismo. Si deve utilizzare una specifica procedura per l'estrazione della media sincrona di ciascun satellite e del solare, alla quale si possono poi applicare le tecniche standard di analisi e di valutazione delle metriche per la diagnostica dei difetti. Dal confronto tra i due metodi presentati per l'estrazione della media sincrona negli epicicloidali, si può evidenziare quanto segue.

Metodo di McFadden

- Per effettuare un numero di medie N_e sono richiesti tempi di acquisizione relativamente lunghi, pari a $N_e N_{reset}/f_c$. Ne consegue che le condizioni di prova – in particolare la coppia – devono rimanere costanti per un lungo periodo di tempo.
- La corretta identificazione della posizione dei satelliti e la scelta del tipo e della forma della finestra temporale sono scelte critiche che influenzano la qualità della media sincrona estratta; compare infatti nello spettro della media sincrona una componente all'ordine N_g/c che è legata all'errore introdotto dalla finestra stessa.

Metodo di Forrester e Blunt

- La media del segnale viene eseguita sul periodo di rotazione relativo del satellite, $1/(f_p + f_c)$.
- La finestra temporale di separazione, $b(t)$, è a valori reali, multipla e periodica con la rotazione del portasatelliti, $1/f_c$; è una serie di Fourier con meno di P termini. Utilizzando

L'algoritmo di Forrester e Blunt, previa una selezione accurata delle caratteristiche della finestra temporale, nel caso che il portasatelliti compia un numero intero di rivoluzioni nel tempo di media, è possibile effettuare l'estrazione con un 'leakage' minimo della vibrazione dagli altri satelliti, nessuna perdita di dati vibrazionali e nessuna distorsione del segnale mediato.

- Il numero di medie ottimali con questo metodo deve essere un multiplo intero del numero di denti della corona N_a , od un multiplo intero di N_a/c . Ne consegue quindi che i tempi di acquisizione richiesti sono notevolmente minori rispetto al metodo di McFadden.

Dal punto di vista applicativo, le differenze principali tra la procedura di McFadden e quella di Forrester e Blunt risiedono: 1) nel tempo necessario per effettuare lo stesso numero di medie; 2) nell'errore dovuto all'applicazione della finestatura per l'estrazione di porzioni di segnale di vibrazione della ruota di interesse, presente nella procedura di McFadden ed assente in quella di Forrester e Blunt. Si rileva, infine, che P.D. Samuel e D.J. Pines (2000) [91] presentarono un metodo per l'estrazione della media sincrona con sensori multipli che può ridurre il tempo di acquisizione, rispetto al metodo di McFadden, ma può dare errori dovuti alle posizioni relative dei trasduttori e alle diverse funzioni di trasferimento tra i diversi traduttori.

Capitolo 4

Codice per l'acquisizione e l'analisi vibrazionale

In questo capitolo si presenta il codice software che è stato sviluppato per l'analisi delle vibrazioni a fini diagnostici di rotismi epicicloidali, atto ad essere impiegato in ambiente industriale, e se ne evidenziano le caratteristiche peculiari e le strategie di implementazione.

4.1 Caratteristiche del codice

4.1.1 Prestazioni richieste

Tra gli obiettivi del lavoro vi era lo sviluppo di un software dedicato all'analisi delle vibrazioni a fini diagnostici di rotismi epicicloidali, atto all'impiego in ambiente industriale. Era richiesto di implementare nel codice tecniche avanzate di analisi del segnale, con particolare riferimento a tecniche efficaci nella diagnostica delle trasmissioni epicicloidali, a partire dall'estrazione della media sincrona (Planetary TSA). In particolare la richiesta era di poter effettuare la diagnostica vibrazionale acquisendo segnali vibrazionali da accelerometri ICP industriali, da completare con un segnale in tensione derivante dal sensore tachimetrico necessario per l'esecuzione delle tecniche implementate descritte nel seguito. Dal momento che la finalità era di utilizzare il programma sia su macchine in ambienti controllati che in condizioni operative, sia per controllo qualità in linea di montaggio, è stato necessario ottimizzare gli algoritmi di calcolo. Si è giunti alla versione finale del codice, scritto in ambiente ANSI C, attraverso lo sviluppo di due precedenti versioni, rispettivamente in ambiente Labview e Octave. Questa ottimizzazione ha portato ad avere un tempo di esecuzione degli algoritmi contenuto e la possibilità di acquisire storie temporali più brevi a parità di analisi. Si sono ottenuti questi risultati, dimezzando i tempi di analisi dei dati, anche grazie all'implementazione del metodo di Forrester e Blunt, rispetto a quello di McFadden implementato nelle precedenti versioni. Come si può vedere in Tabella 4.1, la terza versione del software riduce i tempi di estrazione della media sincrona di oltre il 50%, a parità di durata del segnale, rispetto alla prima versione (tale riduzione è legata da un lato al cambiamento di algoritmo, dall'altro alla scrittura dell'algoritmo in ambiente ANSI C). Inoltre, considerando il caso del secondo stadio, per poter effettuare 10 me-

Tabella 4.1: Confronto del tempo di elaborazione tra la versione 1 (Labview) e la versione 3 (ANSI C) per l'esecuzione della media sincrona del satellite del riduttore TR 304 L3 220.

| SW | Lunghezza segnale | Tempo di analisi |
|----------|-------------------|------------------|
| Stadio 1 | | |
| v2 | 260s | 2min |
| v3 | 260s | 20s |
| Stadio 2 | | |
| v2 | 15min | 10min |
| v3 | 10s | 10s |

die con la prima versione del programma occorre analizzare un segnale di 15 minuti, mentre la procedura di Forrester e Blunt permette l'estrazione della media sincrona da un segnale di 10 secondi. Tuttavia era comunque necessaria la capacità di poter acquisire ed elaborare segnali di diversi minuti richiesta dai rapporti più lunghi e il software è in grado di acquisire ed elaborare storie temporali con elevato numero di punti (dell'ordine di 10^6 campioni), il limite è dovuto solamente al computer sul quale è installato il programma.

4.1.2 Scelte relative allo sviluppo e all'implementazione

La versione definitiva è stata sviluppata dopo aver definito gli indici necessari per un'analisi efficace dei riduttori epicicloidali volta ad individuare difetti sia localizzati che distribuiti sulle dentature. E' stata qui rivista la modalità di compilazione del software per superare le problematiche connesse alle versioni precedenti legate, nella fattispecie, alla gestione della memoria. Per avere il massimo controllo delle operazioni in memoria si è deciso di creare delle librerie in ANSI C. Le librerie create sono due: una per la gestione dei file di dati e una con le funzioni necessarie all'analisi dei segnali. Le librerie così create consentono di richiamare una singola funzione tra quelle contenute all'interno, con il blocchetto grafico "Call Library Function". Il vantaggio di avere le DLL scritte in ANSI C è che queste possono essere compilate anche per sistemi operativi diversi da Windows. L'interfaccia grafica può essere definita con un software diverso da Labview; tuttavia per rispettare le tempistiche e per una maggiore facilità nella programmazione si è fatto uso del software di National Instruments. In questa versione non vi sono limiti alla lunghezza dei segnali acquisibili se non la capacità della memoria del computer utilizzato per acquisire i dati stessi. Si è poi scelto il formato HDF5 sia per la sua maggiore compattezza che consente di strutturare i dati e di visualizzarli facilmente, sia per la velocità di caricamento nei principali software di analisi dei dati. Altri vantaggi sono:

PRO:

- compatto, a parità di dati è uno dei formati che occupa meno spazio in memoria;
- facilmente apribile con il visualizzatore disponibile in rete (HDF5view 4.1);
- i file di grandi dimensioni conseguenti a lunghe acquisizioni, non sono limitati;

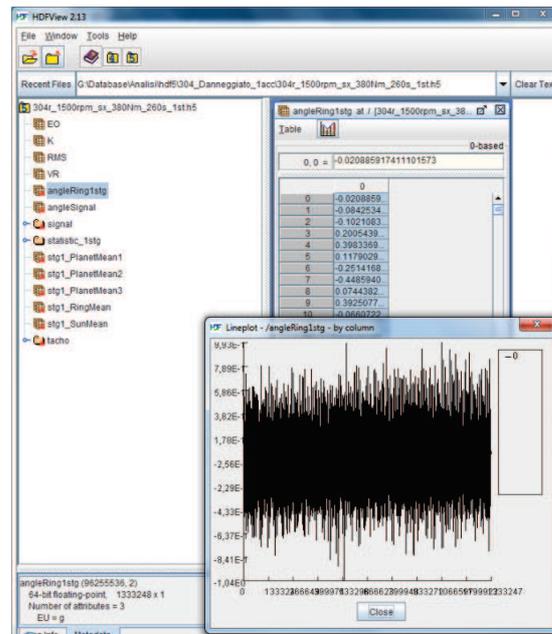


Figura 4.1: Esempio di visualizzazione di un file in formato HDF5.

- consente di avere file strutturati complessi;
- veloce da caricare in programmi per l'elaborazione di big-data come Matlab/Octave/Scilab;
- si avvale di librerie open-source per la gestione di file in ambienti di programmazione.

CONTRO:

- i software commerciali non gestiscono questo tipo di dato.

In questa versione si decide non solo la cartella del file di destinazione e il nome, ma si possono creare gruppi all'interno del medesimo file. L'interfaccia di caricamento dati è stata modificata di conseguenza per consentire all'utente di caricare l'elemento desiderato all'interno del file di interesse e questa interfaccia è presente in tutti i tools che permettono di graficare o elaborare un segnale. I parametri geometrici e di setup si inseriscono di volta in volta manualmente, così da averne il controllo e vedere subito le variazioni dovute alla loro modifica. In aggiunta il file Excel per la creazione della distinta base semplificata del riduttore (distinta base dei componenti in cui rimangono solamente ruote dentate e cuscinetti) è stato modificato in modo tale che, a partire dalla geometria e dalla velocità di funzionamento del riduttore, si riescono a ricavare i parametri richiesti dalle funzioni per l'analisi del riduttore, velocizzandone il processo di configurazione in fase di calcolo. Un'altra novità rispetto alle versioni precedenti è la presenza di una serie di tools con i quali graficare i segnali acquisiti ed elaborati (Figura 4.2), ovvero:

- plot
- stem
- logplot

Gli indici statistici e le metriche calcolati si possono graficare per valutare lo stato di salute delle ruote dentate in base al relativo trend. Le analisi di tipo tempo-frequenza invece sono state effettuate mediante opportuni listati di codice per plottare la Trasformata Wavelet dei segnali analizzati.

4.2 Struttura e funzioni implementate

La struttura sw è organizzata come Macchina a stati per accedere agli strumenti presentati nella lista strumenti, come si può vedere dall'Interfaccia in Figura 4.2. Trattandosi di Macchina

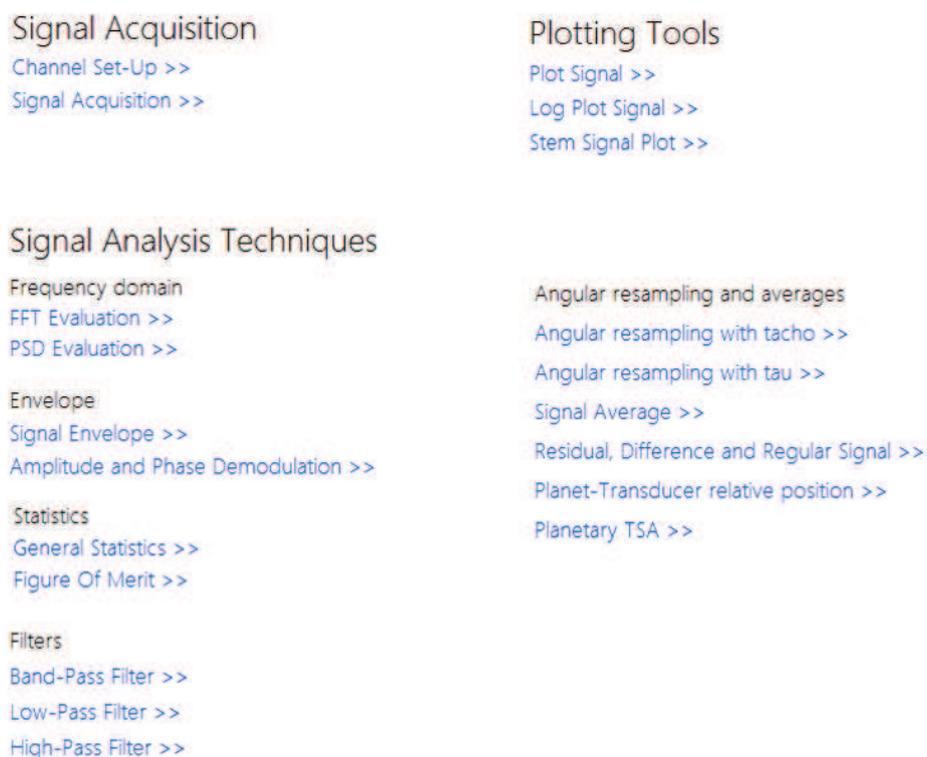


Figura 4.2: Interfaccia grafica dell'ultima versione del software sviluppato

degli Stati un ulteriore aspetto positivo di questa versione software consiste nella sua capacità di eseguire separatamente le diverse fasi di analisi del segnale definite per mezzo di tools che eseguono analisi in frequenza, involuppo e demodulazioni di ampiezza e fase, calcolo di parametri statistici e metriche, filtraggio e analisi dei residui. Ciò comporta una maggiore capacità di individuazione di eventuali errori di setup o nel segnale. Le funzioni sono così suddivise:

1. Acquisizione dei dati

- channel setup
- data acquisition

2. Analisi

- filtering (low pass, high pass, band pass)
- angular resampling

- angular resampling with tau
- Planet Transducer Relative position (MCF)
- planetaryTSA
- General statistics
- Figure of Merit
- Residual, difference, regular signal
- Envelope
- Amplitude and phase demodulation

3. Diagrammazione

- plot signal
- log plot signal
- stem signal plot

Nella Tabella 4.2 che segue vengono riassunte le funzioni implementate con l'algoritmo impiegato e i riferimenti bibliografici e alla teoria citata in questa tesi.

4.3 Implementazione degli algoritmi per l'analisi vibrazionale dei rotismi epicicloidali

4.3.1 Angular resampling with tacho

1. *Input*:

- Nome del file
- Nome del record
- Segnale temporale vibrazionale
- Segnale temporale tachimetrico
- Lunghezza del segnale
- Frequenza di campionamento
- Soglia del trigger
- Impulsi per rotazione
- Numero di punti per rotazione

2. *Procedura* (Schema in Figura 4.3):

(a) Caricamento dei segnali

Si caricano il segnale accelerometrico e il segnale tachimetrico acquisiti in maniera sincrona

Tabella 4.2: Elenco delle tecniche implementate e dei relativi algoritmi utilizzati per la loro implementazione con riferimento ad articoli e paragrafi nei quali vengono richiamate

| Analisi | Algoritmo impiegato / Formulazione analitica | Riferimento bibliografico | Paragrafo |
|--|---|------------------------------------|-----------|
| FFT Evaluation | FFTW3 | [43], [62], [63], [64], [65], [66] | 2.3.1 |
| PSD Evaluation | Metodo di Welch | [35] | 2.3.2 |
| Signal Envelope | Trasformata di Hilbert | [24] | 2.4.1 |
| Amplitude and Phase Demodulation | Trasformata di Hilbert | [30], [31], [32], [33], [34] | 2.4 |
| General Statistics | RMS , varianza, Kurtosis, EO | [35] [38] | 2.2.1 |
| Figure of Merit | FM0, FM4 | [74] | 2.5.3 |
| Filters (low pass, high pass, band pass) | Metodo della convoluzione | | |
| Angular resampling with tachometer | Spline cubica | [62] | 2.5.2 |
| Angular resampling with tau | Spline cubica | | |
| Signal average | | [77], [78], [74], [79], [80] | 2.5.1 |
| Residual, Difference and Regular Signal | | [38] | 2.5.3 |
| Planet-Transducer relative position | MCF | [98] | 3.3.3 |
| Planetary TSA | Metodo di Forrester | [99] | 3.4 |

- (b) Estrazione dei tempi in cui viene superata la soglia del trigger

Si determina l'istante temporale in cui il segnale tachimetrico supera la soglia di riferimento

- (c) Estrazione della relazione tra tempo e angolo

Si calcolano gli istanti temporali ad incrementi angolari costanti secondo la relazione 2.35

$$t = \frac{1}{2b_2} [\sqrt{4b_2(\theta - b_0) + b_1^2} - b_1] \quad (4.1)$$

- (d) Ricampionamento del segnale accelerometrico campionato ad istanti temporali costanti in base angolo con l'interpolazione Spline Cubica utilizzando il vettore dei tempi calcolati al passo precedente. Si ottiene così il segnale di partenza in funzione della posizione angolare dell'albero di riferimento.



Figura 4.3: Schema a blocchi dell'algoritmo per il ricampionamento ad incrementi angolari costanti di un segnale temporale.

4.3.2 Angular resampling with tau

1. *Input:*

- Nome del file
- Nome del record
- Segnale vibrazionale in base angolo
- Lunghezza del segnale
- Numero di punti per rotazione relative al primo albero
- Numero di punti per rotazione relative al secondo albero
- Numero di denti della ruota dentata sul primo albero
- Numero di denti della ruota dentata sul secondo albero

2. *Procedura* (Schema in Figura 4.4): Per poter calcolare il segnale sincrono con le ruote dentate di uno stadio preciso, bisogna riferirsi al segnale sincrono con il portasatelliti dello stadio di interesse. In genere il punto più accessibile per l'acquisizione del segnale tachimetrico è l'albero in ingresso pertanto, anche con un riduttore monostadio, è necessario ricampionare il segnale in base angolo riferendosi al portasatelliti dello stadio.

- (a) Caricamento del segnale in base angolo ottenuto dalla procedura descritta prima.
- (b) Conoscendo il rapporto di trasmissione di ogni stadio è possibile ricondursi all'albero di interesse, così da ricalcolare il nuovo vettore degli angoli associato all'albero di interesse.



Figura 4.4: Schema a blocchi dell'algoritmo per il ricampionamento ad incrementi angolari costanti di un segnale temporale attraverso un rapporto di riduzione.

- (c) Una volta ottenuto il nuovo vettore degli angoli, per avere il nuovo segnale di vibrazione associato all'albero di interesse si effettua un'interpolazione Spline Cubica.

4.3.3 Planet-Transducer relative position

1. *Input:*

- Nome del file
- Nome del record
- Segnale TSA relativo al portasatelliti
- Lunghezza del segnale
- Numero di denti della corona dentata
- Numero di satelliti

2. *Procedura* (Schema in Figura 4.5):

- (a) Caricamento del segnale TSA relativo al portasatelliti dello stadio in esame
- (b) Calcolo del valore RMS complessivo
- (c) Valutazione del valore picco-picco per ogni dente della corona
- (d) Calcolo della funzione MCF
- (e) Filtraggio della funzione MCF calcolata per ogni dente attorno all'ordine di rotazione del portasatelliti che corrisponde al numero dei satelliti. Ciascun massimo nella funzione MCF, calcolata per ogni dente, filtrata, darà l'istante di tempo corrispondente ad un valore di sfasamento tra il satellite e la posizione del trasduttore.

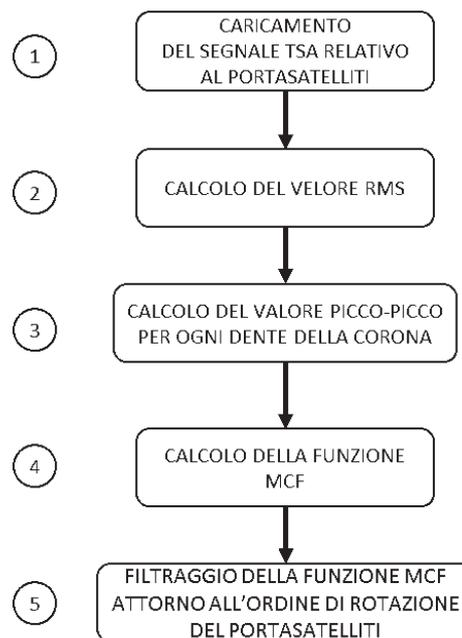


Figura 4.5: Schema a blocchi dell'algoritmo per l'individuazione della posizione dei satelliti.

4.3.4 Planetary TSA

1. *Input:*

- Nome del file
- Nome del record
- Segnale in base angolo riferito al portasatelliti dello stadio
- Numero di punti per rivoluzione del portasatelliti
- Numero di denti della corona
- Numero di denti del solare
- Numero di denti dei satelliti
- Numero di satelliti
- Sfasamento tra satellite e accelerometro

2. *Procedura* (Schema in Figura 4.6):

3. *Breve descrizione:*

Per i satelliti si ha:

- (a) Caricamento del segnale in base angolo sincrono con il portasatelliti dello stadio di interesse
- (b) Conoscendo il rapporto di trasmissione tra corona e satellite è possibile ricondursi all'albero della ruota satellite utilizzando l'algoritmo 4.3.2.
- (c) In funzione dello sfasamento calcolato con l'algoritmo precedente 4.3.3 si ricalcola il vettore angolare applicando anche la finestra di Forrester:

$$b(t) = (1 + \cos(2\pi f_c t))^{P-1} \quad (4.2)$$

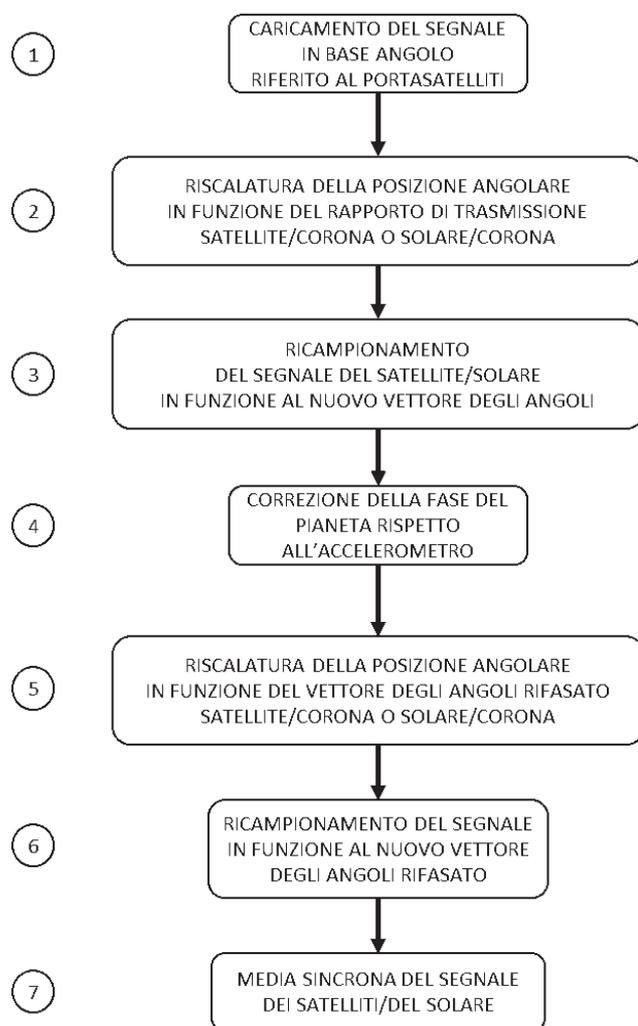


Figura 4.6: Schema a blocchi dell' algoritmo per il calcolo della media sincrona delle ruote dentate di uno stadio di riduzione epicicloidale.

- (d) Conoscendo il rapporto di trasmissione tra corona e satellite e la corretta fase relativa tra le ruote dentate è possibile avere il nuovo segnale di vibrazione associato al satellite effettuando un' interpolazione Spline Cubica.
- (e) Infine, il processo di separazione e media viene effettuato utilizzando tutti i dati vibrazionali disponibili.

Per il solare si ha:

- (a) Caricamento del segnale in base angolo sincrono con il portasatelliti dello stadio di interesse
- (b) Conoscendo il rapporto di trasmissione tra corona e solare è possibile ricondursi all'albero della ruota solare. In questo modo è possibile ricalcolare il nuovo vettore degli angoli associato alla ruota dentata utilizzando l'algoritmo 4.4.
- (c) Calcolo separato delle medie del solare: ciò coincide con il calcolo della media separata dei satelliti, ad eccezione del periodo mediato che è quello del solare anziché del satellite. La funzione della finestra di separazione è la stessa.

- (d) Poiché le media del solare calcolate attraverso ciascun satellite sono sfasate, occorre il riallineamento degli ingranamenti.
- (e) Una volta ottenuto il nuovo vettore degli angoli, per avere il nuovo segnale di vibrazione associato al solare si effettua un'interpolazione Spline Cubica.
- (f) Si effettua la media degli ingranamenti allineati.

4.4 Considerazioni conclusive sullo sviluppo del codice

Tra gli obiettivi del lavoro vi era lo sviluppo di un software dedicato all'analisi delle vibrazioni a fini diagnostici di rotismi epicicloidali, atto all'impiego in ambiente industriale. Era richiesto di implementare nel codice tecniche avanzate di analisi del segnale, con particolare riferimento a tecniche efficaci nella diagnostica delle trasmissioni epicicloidali, a partire dall'estrazione della media sincrona (Planetary TSA). L'attività ha preso le mosse da un'analisi di mercato che ha rilevato che non esistono prodotti commerciali con analoghe funzioni. Lo sviluppo della prima versione del codice è stato effettuato utilizzando il software commerciale Labview, i cui vantaggi sono:

- possibilità di creare, attraverso un linguaggio grafico, un programma con funzioni complesse, nonché interfacce uomo-macchina (HMI);
- presenza di un pacchetto in grado di riconoscere ed eseguire un programma scritto in linguaggio Matlab, il che ha permesso di integrare direttamente nel "vi" le parti di codice sviluppate e testate in Matlab;

mentre gli aspetti negativi riguardano:

- la lunghezza massima dei dati acquisibili, limitata dalla gestione della memoria, che deve essere contigua;
- il formato di dati *.tdms, difficilmente esportabile in altri programmi, il che rende più difficile condurre specifici post-processing successivi.

Con la seconda versione del software si intendeva superare i limiti della prima, impiegando il software Octave, il che ha portato i seguenti vantaggi:

- possibilità di analizzare segnali più lunghi;
- salvataggio dei dati analizzati in un formato compatto e strutturato come il *.mat.

L'aspetto negativo concerne il caricamento in Octave dei dati acquisiti da Labview, che comporta la conversione dei dati dal formato *.tdms a *.mat ed un allungamento dei tempi di processamento, in quanto non esiste una conversione diretta da *.tdms a *.mat. Con l'ultima versione del software si è operato un cambiamento radicale, scegliendo di implementare gli algoritmi in un linguaggio di più basso livello (ANSI C), compilabile per qualsiasi sistema operativo (Windows, Linux, Mac, ...); questa scelta ha comportato la scrittura di librerie dedicate ed ha permesso di ottenere i seguenti risultati.

- Azzerare i costi di licenza per il pacchetto di integrazione degli script MATLAB in ambiente LabVIEW.
- Migliorare la gestione dinamica della memoria.
- Aumentare la velocità e stabilità nell'esecuzione, dimezzando i tempi di analisi dei dati, anche grazie all'implementazione del metodo di Forrester e Blunt, rispetto a quello di McFadden implementato nelle precedenti versioni. Come si può vedere in Tabella 4.1, la terza versione del software riduce i tempi di estrazione della media sincrona di oltre il 50%, a parità di durata del segnale, rispetto alla prima versione (tale riduzione è legata da un lato al cambiamento di algoritmo, dall'altro alla scrittura dell'algoritmo in ambiente ANSI C). Inoltre, considerando il caso del secondo stadio, per poter effettuare 10 medie con la prima versione del programma occorre analizzare un segnale di 15 minuti, mentre la procedura di Forrester e Blunt permette l'estrazione della media sincrona da un segnale di 10 secondi.
- Utilizzare un formato di dati strutturato che ha la stessa compattezza dei formati *.tdms o *.mat, ma, a differenza di questi, è un formato libero e meglio esportabile in programmi terzi.

Capitolo 5

Indagine sperimentale

In questo capitolo si presentano le prove sperimentali condotte e se ne discutono i risultati. Viene così validato il codice software sviluppato e viene valutata e confrontata l'efficacia di alcune metriche nell'individuare l'insorgere di difetti – localizzati o distribuiti – ed il loro sviluppo.

5.1 La strumentazione

La scheda di acquisizione utilizzata per effettuare le acquisizioni è prodotta da National Instruments ed è composta da uno chassis ethernet NI cDAQ 9181 e un modulo di acquisizione dati a 4 canali principalmente per accelerometri NI 9234, le cui caratteristiche tecniche sono:

- 4 canali (BNC)
- Input Range $\pm 5V$
- Alimentazione accelerometri IEPE (0-2mA)
- Comunicazione con il PC via Ethernet

Il modulo di acquisizione dati consente di acquisirli in sincrono su quattro canali con una frequenza massima di 51kHz e una risoluzione di 24 bit. La scheda è configurata attraverso il software descritto nel capitolo precedente (Capitolo 4). I sensori utilizzati sono accelerometri piezoelettrici B&K 4507 con sensibilità di 100 mV/g che vanno incollati sulla cassa del riduttore. Per quanto riguarda il sensore giri, si è selezionato il tipo di trasduttore a seconda della prova. Infatti, in base alla configurazione del test ed ai motoriduttori oggetto di studio, la modalità migliore di acquisizione della posizione angolare risulta sempre diversa.

5.2 Il riduttore in prova

Il riduttore impiegato per le prove descritte in questo capitolo è il riduttore TR 304 L3 220; questo è un riduttore epicicloidale a tre stadi, con piedi e flangia per attacco motore (PAM). In Figura 5.1 è rappresentata una vista in sezione del riduttore TR 304 L3 220; tuttavia, tale schema manca dei piedi invece presenti in quello testato. La scelta è ricaduta su questo modello

in quanto è un riduttore epicicloidale multistadio con un rapporto di riduzione non eccessivamente elevato. Poiché la potenza è limitata dal freno a disposizione, si è preferito utilizzare un rapporto di riduzione non troppo elevato a discapito di un motore di trascinamento leggermente più potente. I dati del riduttore sono riportati in Tabella 5.1.

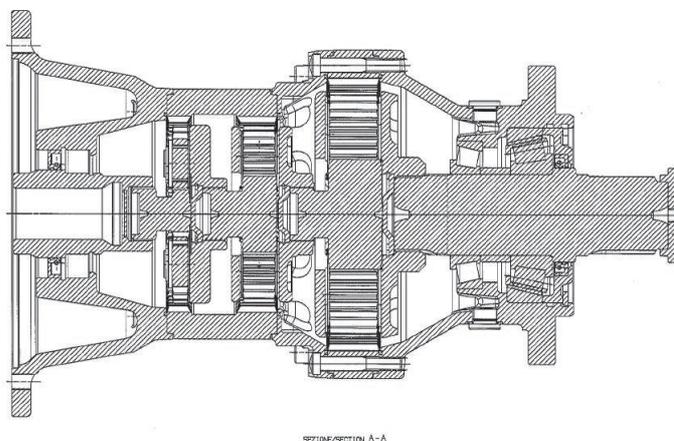


Figura 5.1: Vista in sezione del riduttore TR 304 L3 220.

Tabella 5.1: Dati riassuntivi della geometria del riduttore.

| Data | Stadio 1 | Stadio 2 | Stadio 3 |
|---------------------|----------|----------|----------|
| Denti del solare | 10 | 10 | 24 |
| Denti del satellite | 25 | 25 | 26 |
| Denti della corona | 62 | 62 | 78 |
| # di Pianeti | 3 | 3 | 4 |
| Rapporto Stadio | 7.2 | 7.2 | 4.25 |
| Rapporto Totale | 220 | | |
| N_{reset} | 25 | 25 | 4 |

5.3 Metodologia

I risultati dei test che saranno di seguito presentati, sono stati ottenuti mediante la seguente procedura di analisi:

1. acquisizione sincrona dei segnali dell'accelerometro e della tachimetrica;
2. ricampionamento del segnale accelerometrico in base angolo;
3. scalatura del segnale per l'analisi dello stadio di interesse;
4. media sincrona della ruota dentata di interesse (nel caso dei riduttori epicicloidali è necessario aver identificato la posizione dei satelliti);
5. calcolo dei parametri statistici sul segnale sincrono della ruota dentata di interesse;

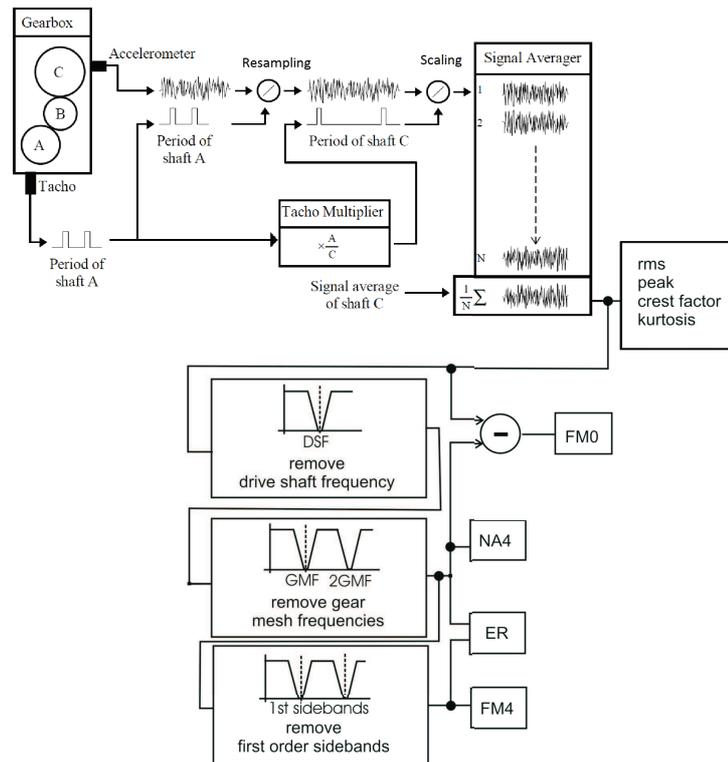


Figura 5.2: Metodologia seguita per il calcolo dei diversi parametri.

6. calcolo dei segnali residuo, differenza e regolare;
7. calcolo delle metriche FM0, FM4, ...

Le campagne di prova effettuate, di cui si descrivono nel seguito la conduzione ed i risultati, sono state eseguite presso la Sala Prove di Bonfiglioli Riduttori Spa e sono le seguenti:

- *Test 1:* prove su banco, al variare del carico, in presenza di difetti localizzati artificiali sulla dentatura dei satelliti e del solare; questo test è servito per validare le tecniche di estrazione della media sincrona relativa ai satelliti e al solare descritte nel Capitolo 3.
- *Test 2:* prova di usura accelerata su banco prova in configurazione back-to-back portata a fine vita (700 h); è stato condotto per la messa a punto di un indice capace di cogliere l'insorgere e l'evoluzione del pitting.
- *Test 3:* prova analoga al *Test 2*, interrotta a 250 h, quando il valore degli indicatori di condizione ha segnalato lo svilupparsi del pitting (poi effettivamente riscontrato); con questo test si sono validati gli indici messi a punto nel test precedente.
- *Test 4:* prove su banco, al variare del carico e della velocità, montando sia solari nuovi sia usurati nelle precedenti prove *Test 2* e *Test 3*. Questo test ha permesso di verificare il comportamento dell'indice RV al variare delle condizioni operative.

5.4 Test 1: Difetti localizzati artificiali sui satelliti e sul solare

5.4.1 Scopo e setup

Questa prova ha l'obiettivo di:

- caratterizzare il riduttore per stabilire il punto migliore in cui posizionare i sensori per acquisire i segnali accelerometrici;
- validare la metodologia di estrazione della media sincrona.



Figura 5.3: Test 1 - Configurazione della prova: a sinistra il riduttore montato sul banco freno; a destra un dettaglio del sensore tachimetrico.

Il riduttore descritto sopra è stato montato sul banco e collegato ad un freno a polveri magnetiche attraverso un doppio giunto cardanico (cfr. Figura 5.3 a)). Il riduttore è mosso da un motore asincrono trifase da $3kW$ ed è collegato al motore attraverso la flangia PAM. Per poter acquisire la posizione dell'albero veloce in ingresso è stata tolta la ventola al motore; sulla parte rimasta scoperta è stato posizionato del nastro nero sul quale è stato incollato un riferimento catarifrangente che interagisce con il sensore tachimetrico (Figura 5.3 b)) che è un laser di produzione Datalogic.

5.4.2 Conduzione ed esiti della prova

Sono state condotte prove in entrambe le direzioni di rotazione (CW/CCW) alla velocità nominale di 1500 rpm e con differenti carichi applicati (0 Nm, 380 Nm, 700 Nm). Il segnale è stato acquisito ad una frequenza di campionamento di 4600 Hz per 260 secondi, durata sufficiente per effettuare 5 medie sul secondo stadio. I dati delle prove sono riassunti in Tabella 5.2. Sono state eseguite diverse prove volte a capire il punto migliore in cui posizionare l'accelerometro. La regola generale vuole che si posizioni il sensore sulla cassa in prossimità della corona dello stadio che si vuole studiare. Tuttavia si è determinato che un solo accelerometro, incollato sulla cassa in corrispondenza del secondo stadio, permette di analizzare con buoni risultati anche il primo ed il terzo stadio. Con questa prova si sono volute validare le metodologie di estrazione della TSA introducendo dei difetti localizzati in alcune ruote del riduttore (cfr. Figura 5.4 e Figura 5.5), in particolare su un satellite del primo stadio e sul solare del secondo stadio; il difetto sul satellite è stato creato per ingranare con il solare in direzione CW e con la corona in direzione CCW; il difetto sul solare invece è stato indotto perché questo si presenti in

Tabella 5.2: Test 1 - Tabella riassuntiva delle prove effettuate.

| # Prova | Velocità [rpm] | Direzione | Carico [Nm] | Durata [s] | F _s [Hz] |
|---------|----------------|-----------|-------------|------------|---------------------|
| 1 | 1500 | CW | 0 | 260 | 4500 |
| 2 | 1500 | CCW | 0 | 260 | 4500 |
| 3 | 1500 | CW | 380 | 260 | 4500 |
| 4 | 1500 | CCW | 380 | 260 | 4500 |
| 5 | 1500 | CW | 700 | 260 | 4500 |
| 6 | 1500 | CCW | 700 | 260 | 4500 |

**Figura 5.4:** Satellite del primo stadio con un difetto localizzato artificiale sul profilo di uno dei denti.**Figura 5.5:** Solare del secondo stadio con un difetto localizzato artificiale sul profilo di uno dei denti.

una rotazione CW. Questi difetti sono stati realizzati con una penna pneumatica e, poiché le ruote dentate di questo riduttore sono cementate, questi sono risultati di non grande entità, in particolare sul solare del secondo stadio.

5.4.3 Analisi delle vibrazioni: risultati e discussione

Le prove sono state condotte con entrambe le ruote difettose montate sul riduttore. Il primo passo è stato quello di individuare il difetto sulla ruota satellite del primo stadio. Applicando i principali parametri statistici (RMS e K) al segnale temporale complessivo, solamente in un caso si rileva un valore "anomalo" per uno dei parametri statistici: il Kurtosis relativo alla prova

Tabella 5.3: Test 1 - Riassunto dei valori di RMS e K calcolati sul segnale temporale delle diverse prove.

| Prova | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| RMS | 0.047 | 0.052 | 0.075 | 0.085 | 0.095 | 0.11 |
| K | 3.03 | 3.81 | 3.31 | 5.57 | 3.32 | 3.76 |

4. In Tabella 5.3 sono riportati tutti i parametri calcolati per il segnale temporale complessivo. Per cercare di individuare i difetti creati si è pertanto calcolata la media sincrona. Dalla TSA dei segnali delle ruote dentate del primo stadio risulta così subito evidente il difetto sul satellite. In particolare si può vedere dalla Tabella 5.4 che nella prova a vuoto con senso di rotazione CCW il valore di Kurtosis raggiunge i livelli più elevati per il satellite numero due. In Figura 5.6 si può vedere il segnale sincrono relativo al secondo satellite del primo stadio, e si può notare bene la regione impulsiva tra i cento e i centocinquanta gradi di rotazione della ruota dovuto al difetto creato sul dente.

Dopo aver individuato abbastanza agevolmente il difetto creato sul satellite del primo stadio

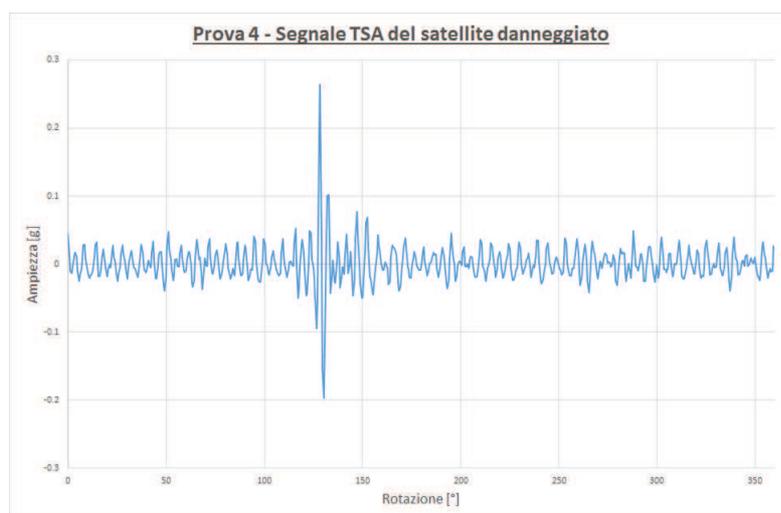


Figura 5.6: Media sincrona del satellite del primo stadio con il difetto localizzato artificiale estratto dal segnale acquisito nella Prova 4.

si è passati all'analisi del secondo stadio per cercare il difetto sul solare. Il difetto sul solare è stato indotto perché questo si presenti in una rotazione CW. Si è pertanto calcolata la TSA per le ruote solare del secondo stadio e, come si può vedere dalla Tabella 5.5, i parametri statistici ad essa applicati non danno risultati utili. In particolare, i valori di RMS indicano un aumento dell'energia per le prove 3 e 5 rispetto alla prova 1, ma questo è giustificato dal carico applicato durante le prove; i valori di Kurtosis invece non presentano valori oltre al 3 e pertanto non si può individuare la presenza di un difetto impulsivo. Andando ad analizzare più nel dettaglio il segnale sincrono con il solare del secondo stadio (Figura 5.7) non si riesce ad individuare in maniera netta alcun difetto di carattere impulsivo come giustamente descritto dal valore di K. Tuttavia si può notare un leggero aumento dell'ampiezza del segnale in corrispondenza di una rotazione di circa cento gradi, ma non è possibile associarlo ad un difetto. Questo test è stato

Tabella 5.4: Test 1 - Riassunto dei valori di RMS e K calcolati sulle medie sincrone dei segnali delle ruote dentate del primo stadio.

| Prova | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Solare - Stadio 1 | | | | | | |
| RMS | 0.006 | 0.008 | 0.016 | 0.021 | 0.027 | - |
| K | 2.3 | 2.51 | 3.0 | 2.3 | 4.6 | - |
| Satellite 1 - Stadio 1 | | | | | | |
| RMS | 0.011 | 0.022 | 0.044 | 0.011 | 0.058 | 0.07 |
| K | 3.3 | 5.08 | 2.8 | 3.3 | 3.2 | 3.0 |
| Satellite 2 - Stadio 1 | | | | | | |
| RMS | 0.013 | 0.025 | 0.041 | 0.013 | 0.055 | 0.073 |
| K | 2.9 | 2.8 | 2.9 | 4.0 | 3.2 | 3.5 |
| Satellite 3 - Stadio 1 | | | | | | |
| RMS | 0.012 | 0.027 | 0.043 | 0.012 | 0.057 | 0.043 |
| K | 2.8 | 27.2 | 2.4 | 2.8 | 3.3 | 4.6 |
| Corona - Stadio 1 | | | | | | |
| RMS | 0.010 | 0.015 | 0.035 | 0.011 | 0.048 | 0.049 |
| K | 2.8 | 3.46 | 2.9 | 2.8 | 2.8 | 2.4 |

Tabella 5.5: Tets 1 - Riassunto dei valori di RMS e K calcolati sulle medie sincrone dei segnali delle ruote dentate del secondo stadio.

| Prova | 1 | 3 | 5 |
|-------------------|-------|-------|-------|
| Solare - Stadio 2 | | | |
| RMS | 0.006 | 0.014 | 0.015 |
| K | 3.1 | 2.5 | 2.9 |

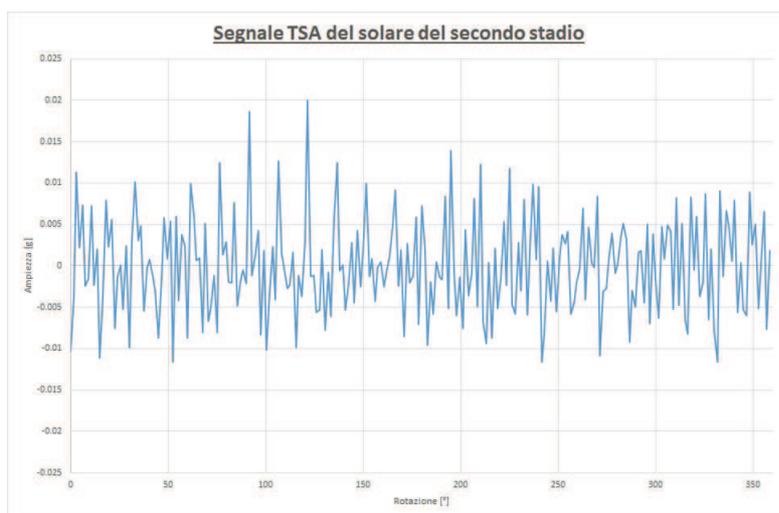


Figura 5.7: Media sincrona del solare del secondo stadio con il difetto localizzato artificiale estratto dal segnale acquisito nella Prova 4.

utilizzato per validare il programma nelle sue varie versioni. La versione che fa riferimento alla procedura di Forrester per l'estrazione delle medie sincrone relative ai satelliti, si distingue in quanto è in grado di discernere con precisione il satellite sul quale è presente il difetto. Infatti i valori di Kurtosis per la TSA dei satelliti, calcolate con la metodologia di McFadden, sono elevati su tutti e tre i satelliti mentre con il metodo di Forrester il Kurtosis risulta elevato solamente per uno dei satelliti.

5.5 Test 2: Usura accelerata portata a fine vita

5.5.1 Scopo e setup

Questo test è stato realizzato per simulare un caso reale di danneggiamento durante il funzionamento del riduttore. A differenza della condizione del test precedente - difetti noti in quanto creati artificialmente - si vuole ora portare il riduttore al massimo danneggiamento possibile senza comprometterne la funzionalità e creare problemi nell'area di prova. La prima prova di durata è stata eseguita su due riduttori TR 304 L3, chiamati rispettivamente "Riduttore A" e "Riduttore B", in una configurazione denominata back to back (Figura 5.8). Lo schema e i dati del riduttore sono riportati in Tabella 5.1. Per poter avere il massimo controllo della prova ed ottenere elevati carichi applicati si è scelta una configurazione a riduttori contrapposti con ricircolo di potenza elettrica (Figura 5.8), dove uno dei due riduttori lavora come moltiplicatore. I due riduttori identici sono stati collegati attraverso l'albero lento, mediante un doppio giunto cardanico. Ognuno di essi è stato azionato da un motore elettrico asincrono trifase da 4 kW dotato di un encoder incrementale a 1024 linee utilizzato per il controllo in retroazione. Per poter gestire la potenza in maniera efficace si sono impiegati due inverter: il primo aziona un motore elettrico per portare in trascinamento i due riduttori controllandone la velocità attraverso l'encoder di estremità montato sul retro del motore, il secondo inverter comanda il motore collegato al riduttore in moltiplica. Questo motore infatti lavora come generatore di corrente e attraverso l'inverter è possibile regolare l'assorbimento di corrente grazie al control-

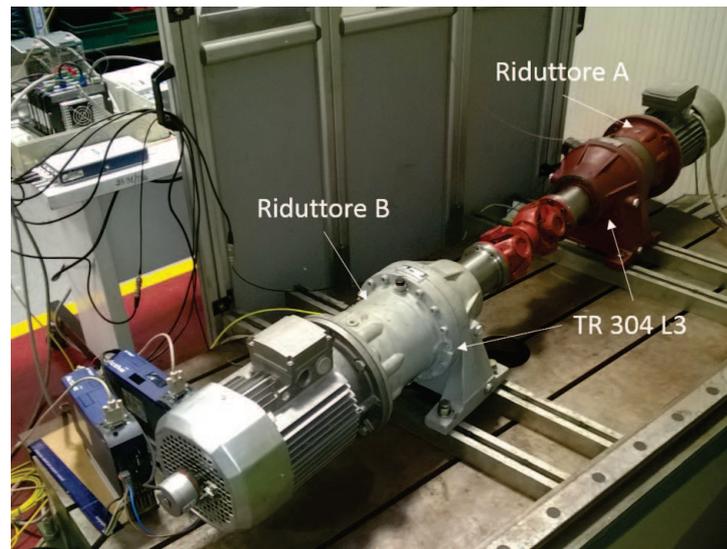


Figura 5.8: Test 2 - Configurazione per la prova di usura accelerata portata a fine vita.

lo di posizione fornito dall'encoder montato in estremità al motore che lavora in generazione. Due accelerometri piezoelettrici sono stati montati sulle corone dei due riduttori. I segnali di vibrazione sono stati acquisiti in continuo con una frequenza di campionamento di 25600Hz. Il segnale tachimetrico è stato ottenuto attraverso la funzione dell'inverter di duplicare il segnale dell'encoder riducendo di un trentesimo il numero di linee. Infatti, 1024 linee a 1500 rpm, considerando dieci armoniche delle frequenza di rotazione, richiedono una frequenza di campionamento in analogico molto maggiore della capacità della scheda utilizzata (500 kHz contro i 51 kHz). Per mezzo di software di calcolo aziendale è stato stimato dopo quanto tem-



Figura 5.9: Olio contenuto dei riduttori a fine della prova: a sinistra l'olio contenuto nel riduttore e a destra l'olio contenuto nel moltiplicatore.

po si sarebbe innescato il fenomeno del pitting. Il calcolo è stato effettuato impostando l'olio standard previsto a catalogo per il riduttore che lavorava in moltiplica (Riduttore B) e un olio con viscosità minore per il riduttore oggetto della prova di danneggiamento (Riduttore A). Si è poi incrementato il carico oltre quello nominale di catalogo per ottenere una durata della prova compatibile con i tempi dello studio, limitandola a meno di 1000 ore. Il risultato previsto è quello di un danneggiamento per pitting del solare del secondo stadio azionando il riduttore

A ad una velocità costante di 1500rpm con una coppia applicata di 4400Nm (superiore del 30% alla coppia nominale riportata a catalogo per questa velocità). Nella Figura 5.9 è possibile vedere la differenza tra i due oli scelti alla fine della prova; ovviamente risulta molto più scuro quello del riduttore che si è danneggiato, mentre è praticamente nuovo l'olio presente nel moltiplicatore.

5.5.2 Conduzione ed esiti della prova



Figura 5.10: Condizione del solare del primo e del secondo stadio per il Riduttore A alla fine del Test 2.

La prova di usura non si è manifestata solamente sulle ruote dentate ma anche sulle tenute, infatti la tenuta del PAM del riduttore A si è danneggiata e ha cominciato a trafilare olio dopo circa 600 ore. Il danneggiamento della tenuta è stato causato probabilmente dalla maggiore abrasività dell'olio dovuta alla polvere di ferro presente in esso. A causa della scarsa lubrifi-

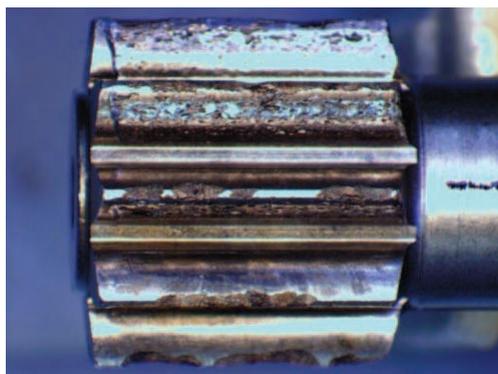


Figura 5.11: Test 2 - Dettaglio dell'usura sui denti del solare del secondo stadio del Riduttore A.

cazione, il pitting distribuito si dovrebbe sviluppare nel secondo solare del riduttore A. Alla fine della prova (circa 700 ore) il riduttore oggetto del test è stato ispezionato per verificarne lo stato di usura, e il pitting distribuito è stato trovato sul solare del secondo stadio come previsto. Nella Figura 5.10 si possono vedere i solari del primo e del secondo stadio. Come previsto, gli effetti della prova di fatica accelerata, danneggiamento per pitting, sono molto evidenti sul solare del secondo stadio (cfr. Figura 5.11): questo presenta una forte ricalcatura nell'area di

contatto dovuta alla pressione dell'ingranamento con i satelliti e un pitting che ha interessato anche il profilo di testa della dentatura e il fianco non in presa (crushing).

5.5.3 Analisi delle vibrazioni: risultati e discussione

I risultati di questa prova sono riportati negli articoli [42] e [90], ai quali (anche se non presente tra gli autori dell'art. [42]) si è contribuito con lo studio della prova, la sua configurazione, l'acquisizione dei dati, nonché in ultimo, alla discussione dei risultati ottenuti dalle analisi eseguite con il software, da cui sono stati selezionati gli indici di condizione e le loro modifiche. L'analisi dei segnali ha visto il calcolo di numerosi indici statistici applicati sia al segnale temporale complessivo sia ai segnali TSA di tutte le ruote. Di seguito vengono presentati solamente quelli relativi al solare del primo e del secondo stadio. Inoltre, per visualizzare i risultati del test ogni sei ore, i grafici sono stati creati con un sottoinsieme di 107 acquisizioni. La Figura

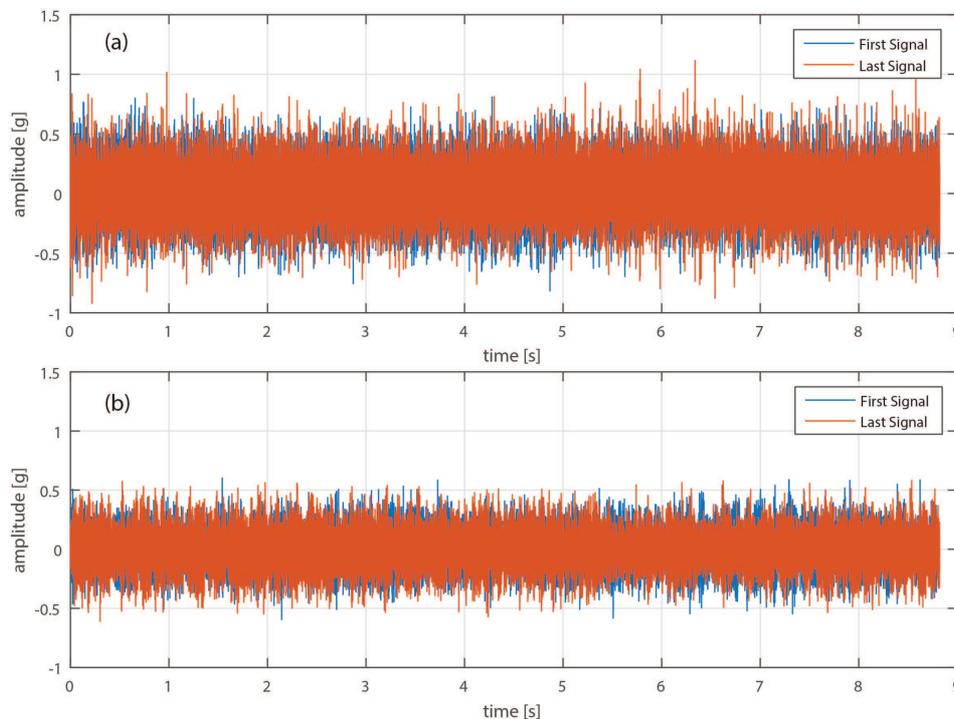


Figura 5.12: Segnali temporali relativi alla prima e all'ultima acquisizione: (a) Riduttore A, (b) Riduttore (b).

5.12 illustra il primo e l'ultimo segnale temporale analizzato per entrambi i riduttori, e nessuna evidente variazione di ampiezza può essere rilevata in entrambi i casi. Nella fattispecie, le ultime acquisizioni (Figura 5.12 (a) e (b)) non mostrano alcun particolare aumento nell'energia di vibrazione, quindi nessuna significativa evidenza della ruota danneggiata può essere rilevata nei segnali nel tempo. Al fine di ottenere le informazioni possibili circa la ruota danneggiata, i principali parametri statistici, quali RMS e Kurtosis, vengono valutati sui segnali temporali. È ben noto che il valore RMS è correlato all'energia media del segnale, mentre il Kurtosis è sensibile ai contenuti impulsivi. La Figura 5.13 mostra il risultato di questa analisi. I valori RMS di Riduttore A relativi ai segnali nel tempo sono maggiori di quelli di Riduttore B (Figura 5.13 (a)); questo effetto potrebbe essere correlato ai diversi oli utilizzati nei riduttori. Poiché i

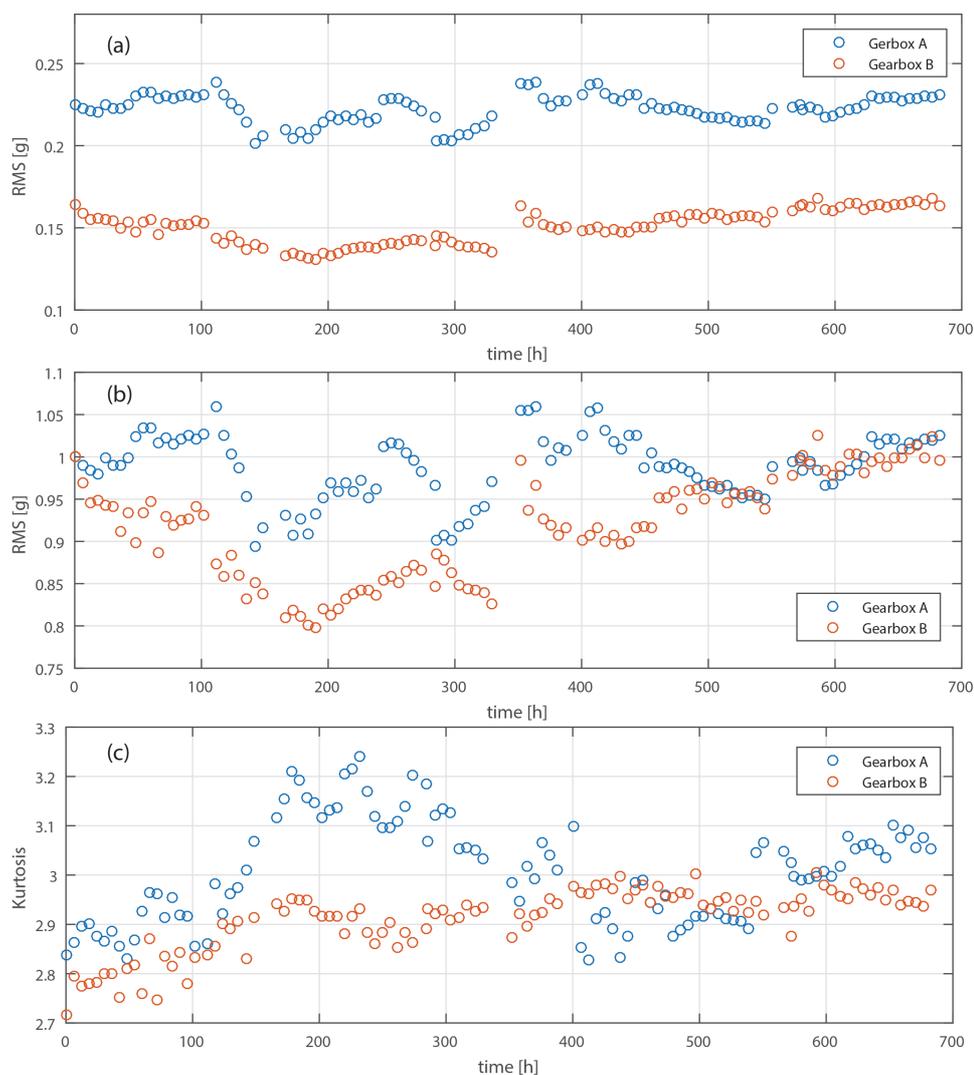


Figura 5.13: Trend delle statistiche calcolate sul segnale vibrazionale complessivo: (a) RMS, (b) RMS normalizzato con il valore del primo campione, (c) Kurtosis.

valori dell'energia principale dei segnali nel tempo sono differenti e l'evoluzione del danneggiamento sulla ruota è relativo ad un aumento dell'energia del segnale, per poter confrontare i valori dei trends RMS dei riduttori A e B, si è deciso di normalizzarli, dividendoli per il primo valore dell'andamento temporale. Il risultato di questa normalizzazione è riportato in Figura 5.13 (b) dove si può vedere un aumento nella tendenza del valore RMS del segnale del riduttore A rispetto a B nell'intervallo temporale 100-400 [h], mentre le tendenze sono paragonabili alla fine della prova. Da questo risultato, non può essere rilevata nel riduttore A nessuna certezza di un guasto in una delle ruote. L'ultima statistica valutata sui segnali nel tempo è graficata in Figura 5.13(c). I risultati mostrano un aumento dei valori di Kurtosis nel riduttore A rispetto a B nell'intervallo temporale 150-350 [h], mentre sono paragonabili alla fine della prova. L'incremento dei valori di Kurtosis potrebbe essere collegata all'innesco del pitting. In realtà, la formazione di pitting è correlata ad un aumento del contenuto impulsivo nel segnale temporale. Questo comportamento viene rilevato dal Kurtosis, tuttavia, con l'avanzare del difetto i contenuti impulsivi del segnale diminuiscono e il valore Kurtosis crolla. Pertanto, questa statistica può anche rilevare l'innesco del guasto ma non la sua propagazione.

Per meglio evidenziare l'evoluzione del guasto, le statistiche precedentemente descritte ven-

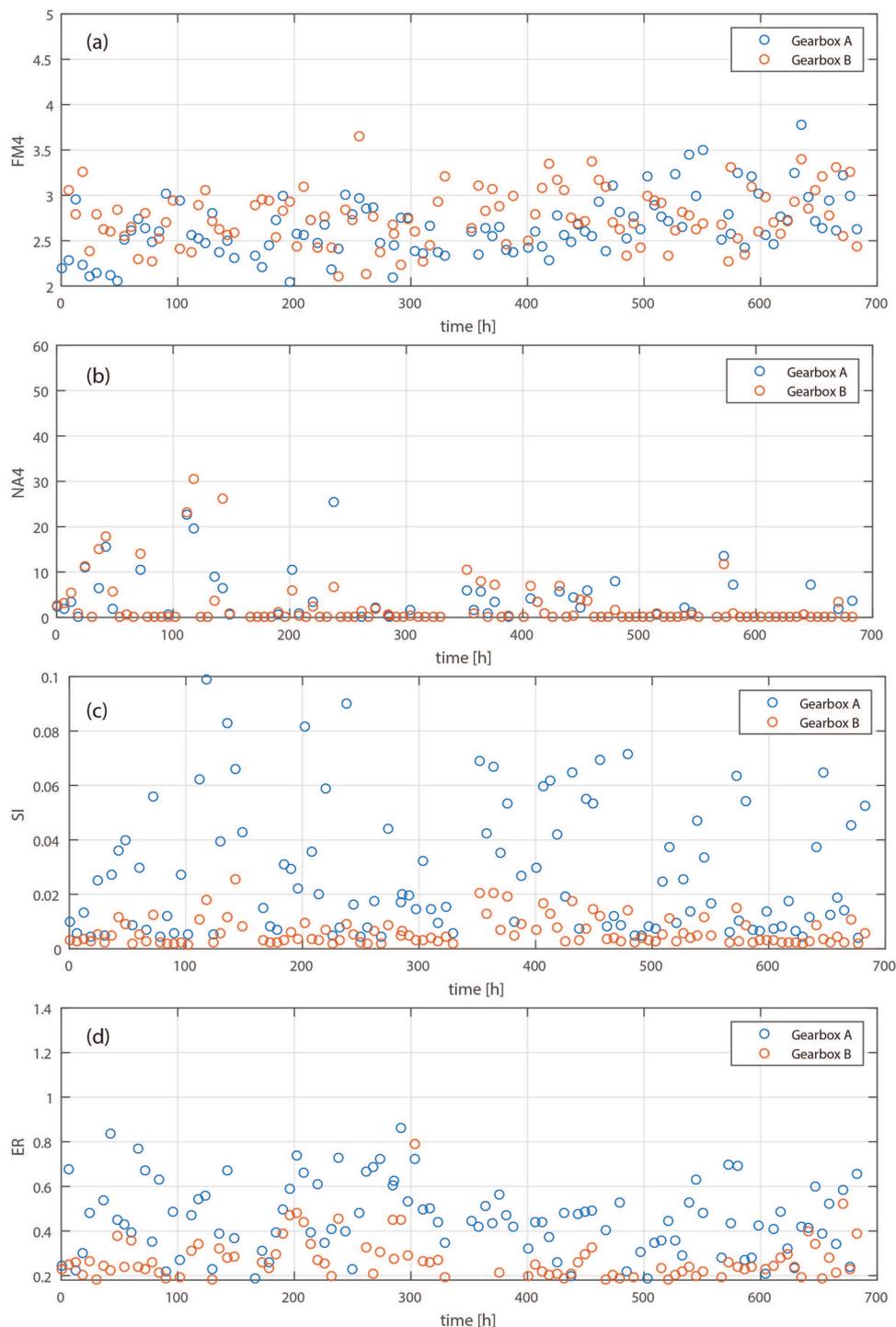


Figura 5.14: Statistiche calcolate sul segnale TSA del solare del primo stadio: (a) FM4, (b) NA4, (c) SI, (d) ER.

gono applicate a tutte le ruote di entrambi i riduttori, calcolati sui segnali TSA estratti, relativi ai satelliti e al solare. I risultati di questa analisi si possono osservare in Figura 5.14 e in Figura 5.15 e sono relativi, rispettivamente, al primo e secondo solare. La Figura 5.14 illustra l'evoluzione dei parametri statistici valutati sul solare del primo stadio dove, nessuna tendenza può essere rilevata nei parametri statistici, solo SI e ER mostrano valori diversi tra i due riduttori (cfr. Figure 5.14(c) e 5.14(d)). Questo comportamento non può essere correlato alla presenza

di un guasto nel primo solare di Riduttore A, in quanto i valori di questi parametri statistici all'inizio e alla fine della prova sono comparabili. Pertanto, nessuna evidenza di un possibile guasto può essere rilevata nel primo solare del riduttore A dall'analisi dei parametri statistici.

La Figura 5.15 mostra i risultati dell'analisi delle statistiche proposte per i segnali sincroni

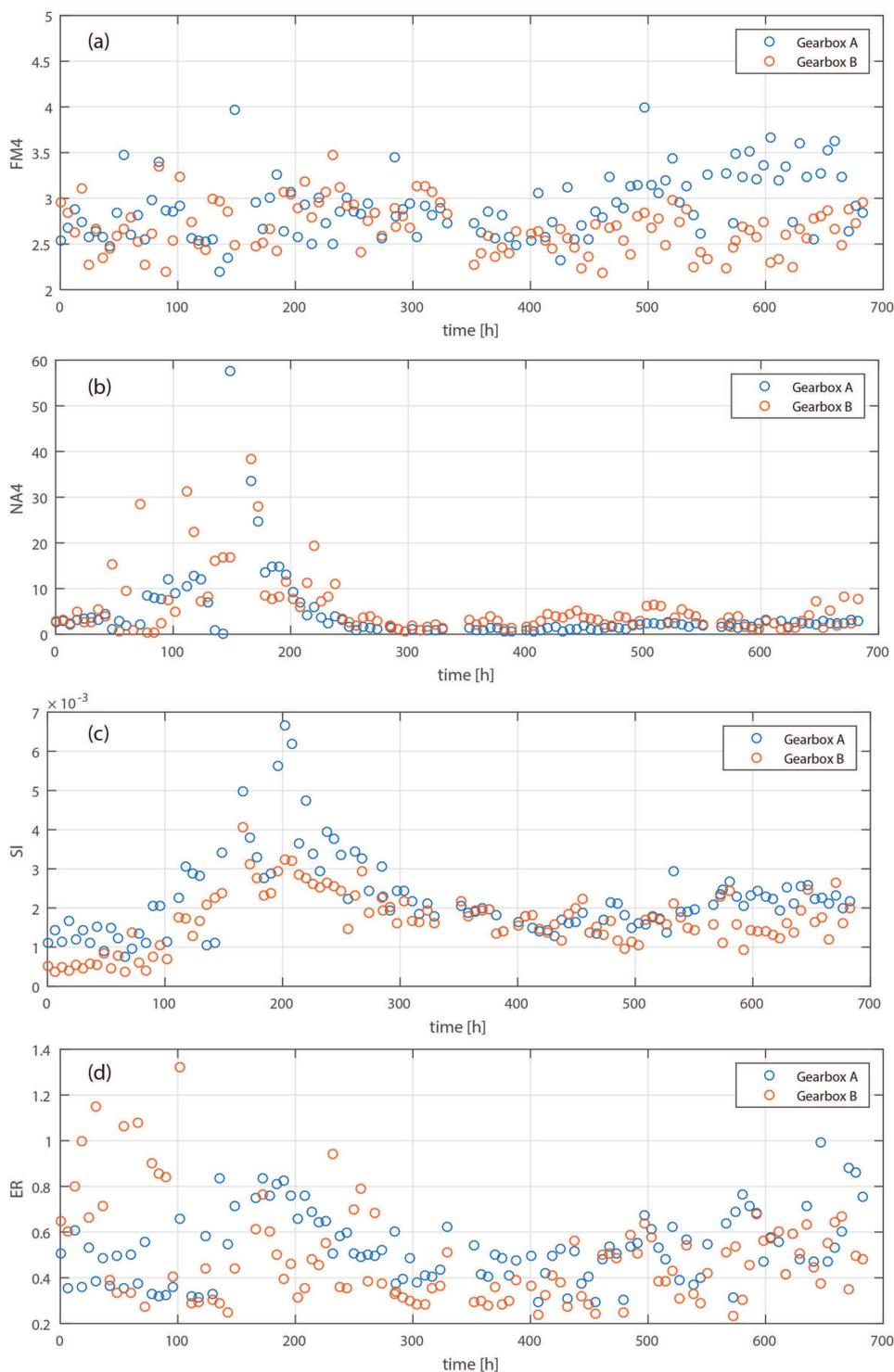


Figura 5.15: Statistiche calcolate sul segnale TSA del solare del secondo stadio: (a) FM4, (b) NA4, (c) SI, (d) ER.

con i solari del secondo stadio per il riduttore A e B. Il valore della statistica FM4 (Figura 5.15(a)) mostra un aumento del suo valore alla fine del test nel Riduttore A rispetto B, tuttavia

questo aumento non giustifica completamente la presenza di un guasto distribuito. Informazioni diagnostiche interessanti possono essere ottenute con l'analisi delle statistiche NA4 e SI. È possibile vedere, in particolare dalla Figura 5.15(c), un aumento del valore di ampiezza dei parametri statistici di Riduttore A rispetto a B dopo circa 200 [h], che potrebbe essere connesso all'inizio del guasto. Questo comportamento è ben correlato con la tendenza del Kurtosis, che mostra un aumento dei valori del riduttore A a circa 200 [h]. Anche queste statistiche potrebbero rilevare l'inizio del guasto, ma non la sua crescita.

Per individuare meglio l'inizio e la crescita del guasto è stata studiata la varianza del segnale

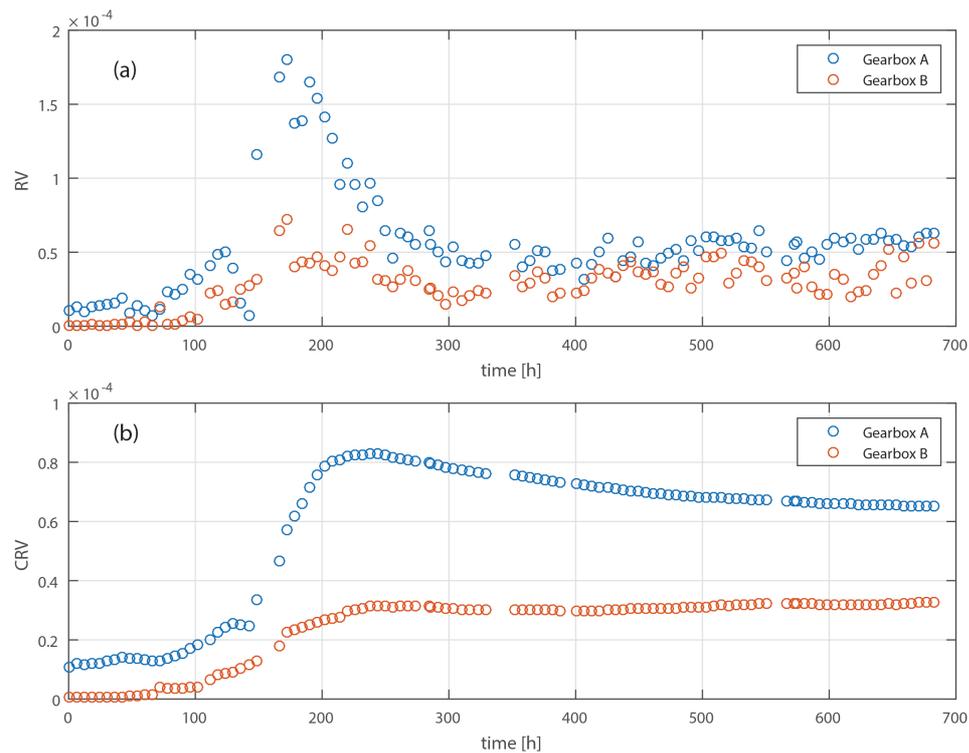


Figura 5.16: Statistiche calcolate sul segnale TSA del solare del secondo stadio: (a) RV, (b) CRV.

residuo relativa al secondo solare. La Figura 5.16 mostra i risultati di questa analisi dove si nota un aumento della varianza del segnale residuo del secondo solare per il riduttore A dopo circa 200 [h]. È possibile vedere, confrontando il parametro RV con SI o NA4, che la varianza residua può evidenziare meglio l'inizio del guasto, e i valori RV di Riduttore A al termine del test sono ancora superiori ai valori di cambio B. I parametri RV mostrano migliori prestazioni rispetto agli usuali parametri statistici, ma la caduta dei valori del parametro al termine del test potrebbe causare problemi per SVM o altri sistemi diagnostici. Al fine di evitare la caduta del parametro, viene valutata la varianza del segnale residuo cumulativo (CRV). La Figura 5.16(b) rappresenta i parametri CRV per i solari del secondo stadio, in cui sia l'innesco che la crescita del guasto possono essere evidenziati. In realtà, il valore cumulativo garantisce la tendenza crescente del parametro statistico, che potrebbe evitare problemi nell'uso di questa statistica per l'algoritmo di diagnostica basato su SVM.

Oltre alle metriche appena citate si sono calcolati anche i valori per NA4* e NA4mod [90]. Gli andamenti di questi due indici sono mostrati in Figura 5.17 e Figura 5.18. Il parametro NA4* non risulta essere un indice affidabile per identificare l'innesco e la propagazione del pitting.

Infatti, come è stato evidenziato in Figura 5.17, il Riduttore B ha valori molto più alti che il Riduttore A, e questo non è accettabile.

La tendenza dell'indice NA4mod invece risulta molto interessante e promettente (cfr. Figura

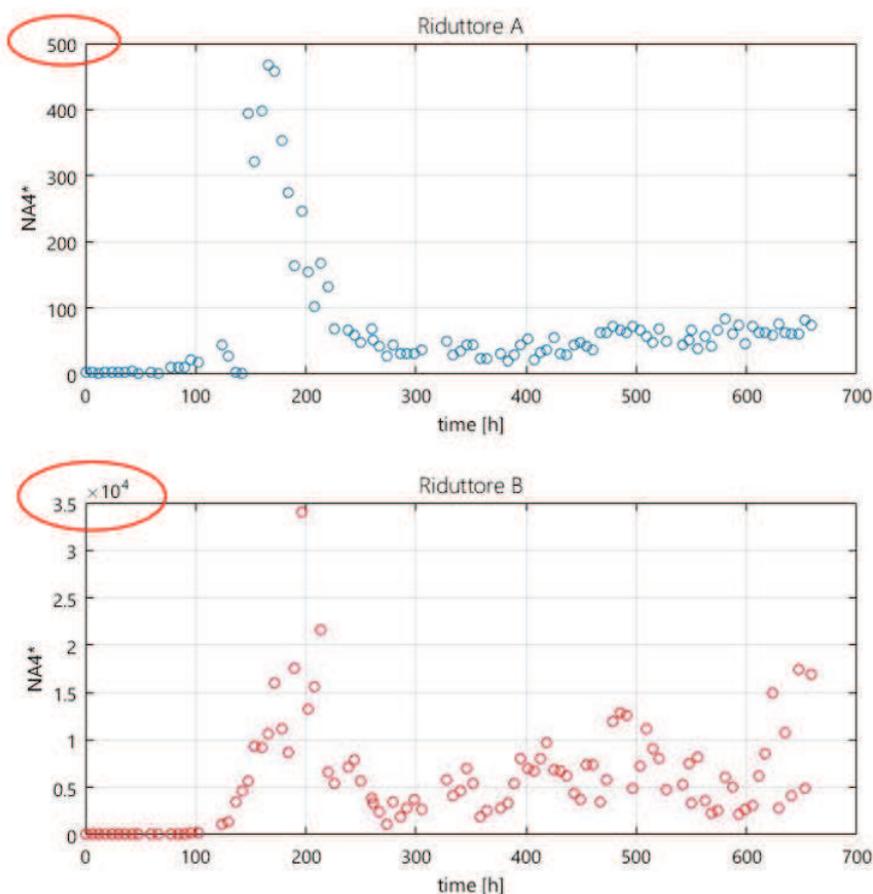


Figura 5.17: Statistiche calcolate sul segnale TSA del solare del secondo stadio per il Riduttore A e il Riduttore B. *N.B. Si faccia attenzione alla diversa scala delle ordinate.*

5.18). Infatti il valore per il riduttore A presenta un aumento tra le 150-200 [h], assente per il riduttore B, correlabile con l'aumento mostrato dagli indici sopra descritti e indice di un possibile innesco del pitting. Inoltre questo parametro si dimostra anche abbastanza affidabile per il monitoraggio dell'avanzamento del difetto in quanto il suo valore per il Riduttore A rimane sempre superiore a quello relativo al Riduttore B.

5.6 Test 3: Usura accelerata interrotta ad inizio pitting

5.6.1 Scopo e setup

Se con i test precedenti si sono individuati gli indici migliori per determinare l'innesco del pitting e la sua evoluzione, con questa prova si vogliono validare le procedure per il calcolo degli indici selezionati per un loro possibile futuro utilizzo in ambito industriale. La configurazione della prova è sostanzialmente quella del Test 2 per layout dei riduttori, velocità di

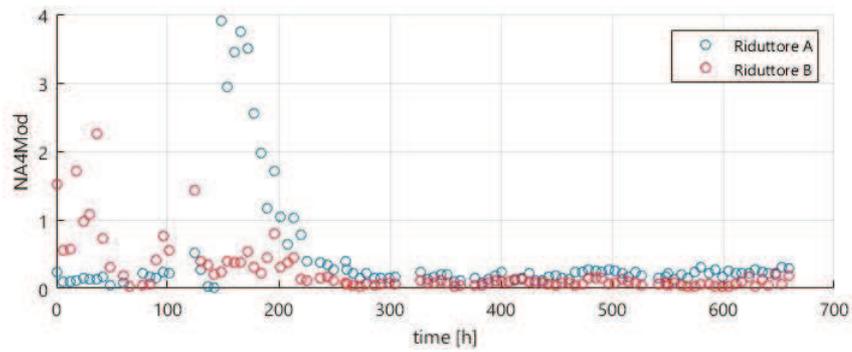


Figura 5.18: Statistiche calcolate sul segnale TSA del solare del secondo stadio per il Riduttore A e il Riduttore B.



Figura 5.19: Test 3 - Configurazione per la prova di usura accelerata interrotta al primo manifestarsi del pitting rilevabile utilizzando il parametro RV.

trascinamento, carico applicato e olio utilizzato (Figura 5.19). La differenza principale consiste nell'interruzione della prova quando gli indici selezionati evidenziano l'innescato del pitting.

5.6.2 Conduzione ed esiti della prova



Figura 5.20: Test 3 - Dettaglio dell'usura sui denti del solare del secondo stadio del Riduttore A.

La prova è stata condotta sempre a 1500 rpm e 4400 Nm di carico. Al fine di avere i segnali con lo stesso contenuto in frequenza come quelli dei test precedenti e poter applicare lo stesso

algoritmo di analisi è stata mantenuta la stessa frequenza di campionamento pari a 25kHz. Le acquisizioni sono state eseguite una volta al giorno. In Figura 5.20 è possibile vedere lo stato del solare al momento dell'interruzione del test in cui si può chiaramente notare la presenza del pitting.

5.6.3 Analisi delle vibrazioni: risultati e discussione

In questa prova si sono calcolati diversi parametri statistici sul segnale TSA del solare del secondo stadio e ci si è concentrati principalmente sulla valutazione dei parametri NA4, NA4*, NA4mod, RV e CRV, questi ultimi applicati al segnale residuo del solare del secondo stadio.

Se si graficano anche i valori degli indici NA4, NA4* e NA4mod, si può distinguere chiara-

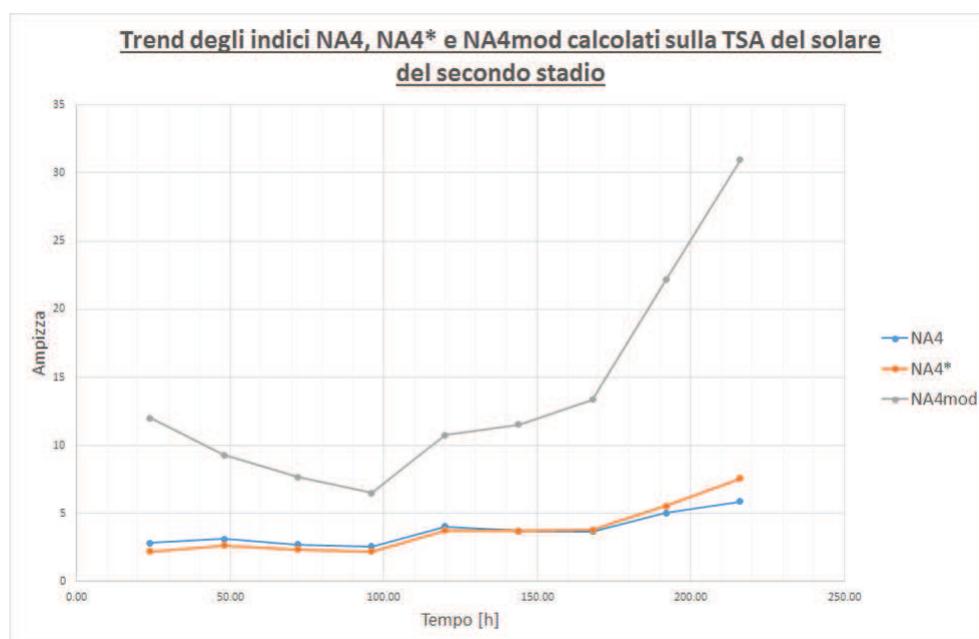


Figura 5.21: Test 3 - Confronto tra le statistiche calcolate sul segnale TSA del solare del secondo stadio: NA4, NA4*, NA4mod

mente, in Figura 5.21, come il valore NA4mod funzioni molto bene, crescendo più rapidamente degli altri. Avendo constatato che il parametro RV ha un incremento netto quando si innesca il pitting, si è calcolato un limite di allarme che fosse discriminante tra la condizione sana e quella di innesco del difetto. Per determinare questa soglia si è preso il valore medio di RV più tre volte σ_L calcolato con i valori della varianza del segnale residuo del solare del secondo stadio nei primi due giorni di prova (in cui si presume essere in condizioni sane): (cfr. Figura 5.22). Con dimostrata presunzione si è ritenuto plausibile che il riduttore fosse in condizione sana durante i primi due giorni di funzionamento. Dalla Figura 5.22 si osserva il trend di RV del segnale residuo del solare del secondo stadio calcolato utilizzando una porzione di segnale temporale lunga 10 secondi, lunghezza sufficiente per effettuare 10 medie. Si nota come si abbia un andamento orizzontale per i primi 4 giorni. Al quinto si verifica un aumento che non si mantiene. Dopo ulteriori tre giorni di costanza dell'indice, questo subisce un aumento deciso che comporta l'interruzione della prova. All'ispezione del riduttore, dopo circa 200 [h] di prova, è stata riscontrata la presenza di pitting come mostrato precedentemente in Figura 5.20.

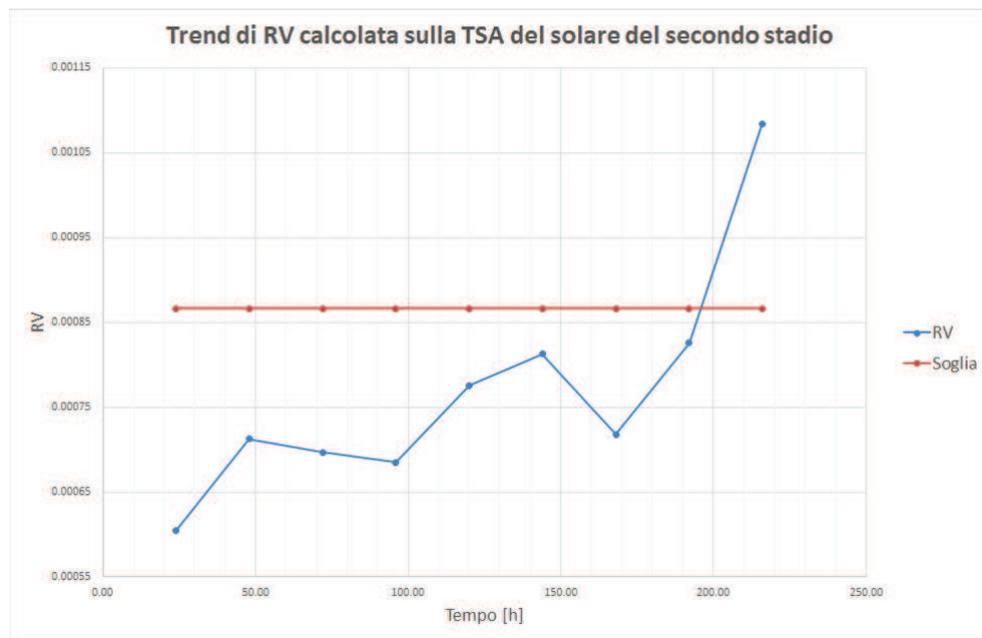


Figura 5.22: Test 3 - Trend RV calcolato sul segnale TSA del solare del secondo stadio.

Questo conferma la validità del valore della varianza applicata al segnale residuo del solare del secondo stadio. Dal confronto tra il trend dell'indice CRV con quello dell'indice RV si può ca-

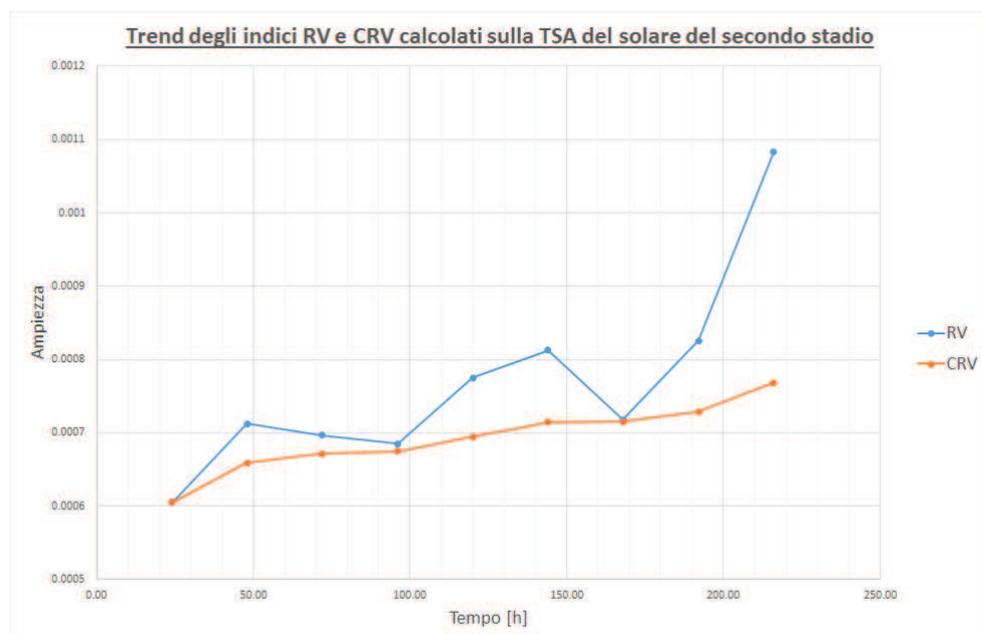


Figura 5.23: Test 3 - Confronto tra le statistiche calcolate sul segnale TSA del solare del secondo stadio: RV, CRV.

pire il vantaggio del segnale cumulativo. Quando avviene l'innesco del pitting il valore di CRV sale molto più rapidamente rispetto al valore di RV (vedi Figura 5.23). Applicando il limite al trend di CRV del test 2 (Figura 5.16) si scopre che anche il valore CRV per il Riduttore B supera la soglia calcolata (Figura 5.24). Pertanto si è aperto il riduttore B utilizzato per il test 2 per verificare lo stato di salute delle ruote dentate e si è scoperto che il solare del secondo stadio era affetto da un leggero pitting alla base del dente (Figura 5.25). Tuttavia le condizioni

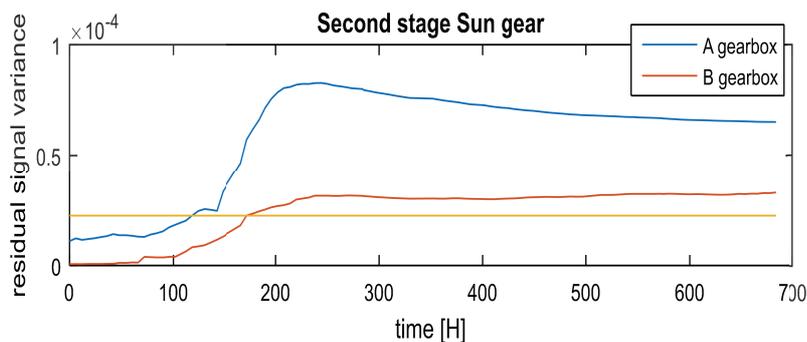


Figura 5.24: Test 2 - Confronto trend CRV calcolato sul segnale TSA del solare del secondo stadio per il Riduttore A e per il Riduttore B.

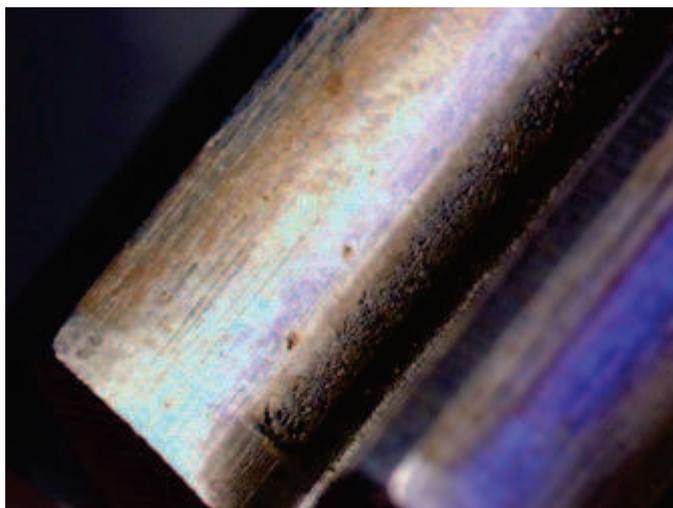


Figura 5.25: Test 2 - Dettaglio dell'usura sui denti del solare del secondo stadio del Riduttore B.

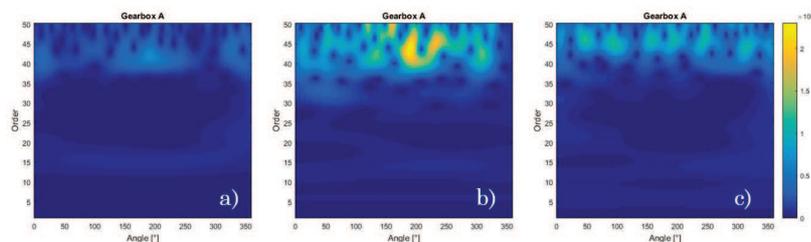


Figura 5.26: Test 2 - Trasformata Wavelet calcolata sul segnale TSA del solare del secondo stadio per il Riduttore A in tre condizioni diverse: (a) inizio prova, (b) innesco del pitting, (c) fine della prova.

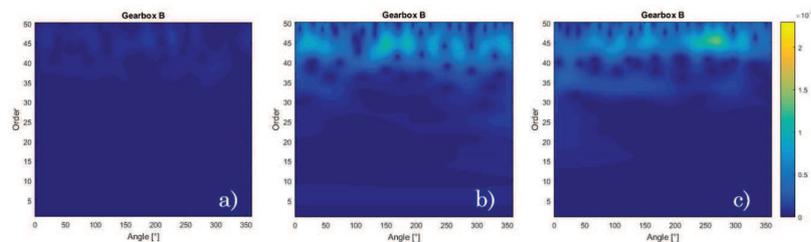


Figura 5.27: Test 2 - Trasformata Wavelet calcolata sul segnale TSA del solare del secondo stadio per il Riduttore B in tre condizioni diverse: (a) inizio prova, (b) innesco del pitting sul Riduttore A, (c) fine della prova.

di usura tra i due solari del secondo stadio del test 2 sono molto diverse. Calcolando la Trasformata Wavelet (Figura 5.26, Figura 5.27) in tre momenti della prova (inizio, innesco pitting e fine), considerando il campo 40 - 50 ordini, si può vedere bene come l'innesco del pitting sia avvenuto attorno alle 150 h (Figura 5.26(b)). Confrontando le Wavelet del riduttore A con quelle del riduttore B, si può notare come, alla fine della prova, il contenuto ad alta frequenza relativo al quarto ordine dell'ingranamento sia maggiore per il Riduttore A.

5.7 Test 4: Variazione di coppia resistente

5.7.1 Scopo e setup

In questo test si è scelto di concentrarsi sul parametro RV in quanto, dalle prove precedenti, è risultato quello con le prestazioni migliori. Pertanto con questo test si è voluto valutare se, al variare del carico applicato, si conferma l'efficacia diagnostica della varianza del residuo (RV) calcolata sul segnale sincrono con il solare del secondo stadio, per le diverse condizioni di usura ottenute. La prova è stata condotta sempre a 1500 rpm variando la coppia resistente.



Figura 5.28: Test 4 - Configurazione della prova con il riduttore montato sul banco freno.

5.7.2 Conduzione ed esiti della prova

La configurazione è la stessa del Test 1 tranne per i carichi applicati. Al fine di avere i segnali con lo stesso contenuto in frequenza dei test precedenti e poter applicare la stessa procedura di analisi è stata mantenuta la stessa frequenza di campionamento pari a 25 kHz. I segnali sono stati acquisiti per 10 secondi, tempo sufficiente per effettuare 10 medie sincrone per le ruote del secondo stadio. La Tabella 5.6 presenta le prove condotte a diversi valori della coppia resistente all'uscita del II stadio, che è quello che viene monitorato. In ciascuna prova il carico è stato mantenuto costante perché questa procedura richiede un carico costante durante l'acquisizione del segnale per poter effettuare una valutazione corretta dei segnali sincroni con le ruote dentate d'interesse. Questa difficoltà si riduce nell'ultima versione del software che implementa l'algoritmo di Forrester, in quanto il tempo per un'acquisizione è di alcuni secondi, invece di diversi minuti, rendendo più probabile avere una coppia stabile durante l'acquisizione. In

Tabella 5.6: Test 4 - Tabella riassuntiva delle prove effettuate

| № Prova | Velocità [rpm] | Direzione | Durata [s] | F _s [Hz] | Coppia in uscita del II stadio [Nm] |
|---------|----------------|-----------|------------|---------------------|-------------------------------------|
| 1 | 1500 | CCW | 10 | 25600 | 0 |
| 2 | 1500 | CCW | 10 | 25600 | 181 |
| 3 | 1500 | CCW | 10 | 25600 | 264 |
| 4 | 1500 | CCW | 10 | 25600 | 330 |
| 5 | 1500 | CCW | 10 | 25600 | 363 |
| 6 | 1500 | CCW | 10 | 25600 | 429 |
| 7 | 1500 | CCW | 10 | 25600 | 495 |
| 8 | 1500 | CCW | 10 | 25600 | 660 |
| 9 | 1500 | CCW | 10 | 25600 | 845 |
| 10 | 1500 | CCW | 10 | 25600 | 924 |



Figura 5.29: Test 4 - Confronto tra i solari del secondo stadio utilizzati: a sinistra un ingranaggio nuovo, al centro il solare estratto dal Riduttore A alla fine del Test 3, a destra il solare estratto dal Riduttore A alla fine del Test 2.

Figura 5.29 sono mostrati i solari utilizzati. Da sinistra verso destra sono riportati un solare nuovo, il solare risultante del test 3 e quello del test 2.

5.7.3 Analisi delle vibrazioni: risultati e discussione

Dall'analisi del RV si può vedere che questo parametro è sensibile alla variazione di carico (Figura 5.30). Tuttavia questo indice rimane efficace al variare del carico in quanto all'aumentare di esso si ha una netta distinzione tra il parametro calcolato per il solare sano ed i solari affetti da pitting, in quanto l'ampiezza del primo è sempre inferiore a quella del solare con il pitting leggero che a sua volta è sempre minore di quello con pitting avanzato. Questo è anche giustificato dal fatto che la varianza del segnale residuo dovrebbe essere meno sensibile all'influenza del carico perché nel segnale sincrono sono stati eliminate le componenti relative all'ingranamento.

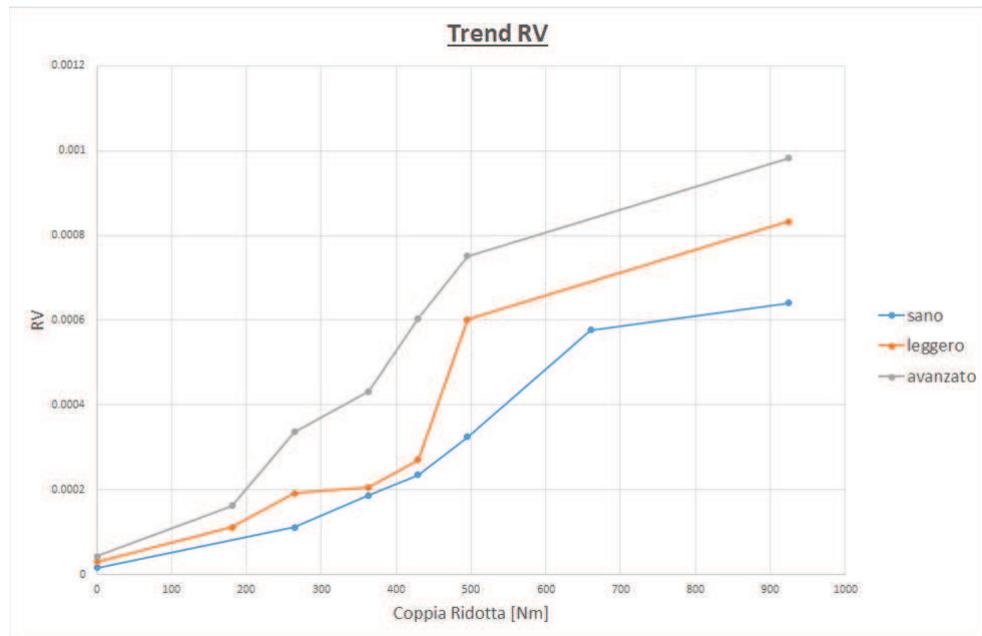


Figura 5.30: Test 4 - Confronto tra i trend di RV calcolate sul segnale TSA del solare del secondo stadio, in funzione della coppia ridotta al secondo stadio, per il solare sano, il solare del Test 3 (leggero) ed il solare del Test 2 (avanzato).

5.8 Considerazioni conclusive sui risultati delle prove

In questo capitolo sono stati presentati i risultati di quattro campagne di prove sperimentali, condotte al fine di individuare indicatori di condizione per il monitoraggio dei rotismi epicicloidali, adatti al monitoraggio in ambienti industriale, e di valutarne l'efficacia. I principali risultati possono essere sintetizzati come segue.

- Per il rilevamento di difetti localizzati sulla dentatura, il Kurtosis calcolato sulla media sincrona risulta efficace e sensibile; a differenza delle metriche specifiche per gli ingranaggi (FM0, FM4, NA4) risulta più semplice da calcolare.
- Riguardo al monitoraggio dell'insorgere e dell'evoluzione dell'usura di pitting sulla dentatura, si è valutata l'efficacia delle metriche proposte in letteratura e di altre originali qui proposte: la varianza RV del segnale residuo (TSA depurata dalle armoniche di ingranamento e delle prime due armoniche della rotazione), la corrispondente varianza cumulativa, CRV (media al tempo corrente della precedente) e la metrica NA4mod, definita come rapporto tra il momento del quart'ordine del segnale residuo e la media al tempo corrente del quadrato della varianza del segnale regolare. Tali metriche hanno evidenziato una capacità di rilevamento soddisfacente, con maggiore affidabilità rispetto ad altre metriche presenti in letteratura.
- Il parametro RV ha evidenziato una sensibile influenza alla variazione del coppia: all'aumentare della coppia cresce la differenza tra i valori relativi alla condizione integra e quella usurata.

- La terza metrica proposta, NA4mod, è anch'essa sensibile sia all'innesco che all'evoluzione del pitting, ma in maniera meno netta rispetto ai parametri RV e CRV.
- Risulta confermata la necessità di far seguire al rilevamento mediante gli indici statistici analisi avanzate (come analisi nel dominio Tempo-Frequenza), in grado di diagnosticare la condizione con maggiore sicurezza e precisione.
- I risultati sperimentali sono stati anche impiegati per verificare l'efficacia degli algoritmi implementati nel codice di analisi diagnostica descritto al Capitolo 4.

Conclusioni

La presente tesi si colloca nell'ambito della diagnostica delle trasmissioni ad ingranaggi, in particolare dei rotismi epicicloidali. L'attività ha preso le mosse dalla constatazione dei limiti delle strumentazioni di analisi attualmente sul mercato, soprattutto in relazione alla diagnostica delle trasmissioni epicicloidali complesse. Il lavoro si è articolato nelle seguenti attività.

- Verificare ed implementare un algoritmo per estrarre la media sincrona del solare e dei singoli satelliti di un rotismo epicicloidale.
- Sviluppare un codice software dedicato all'analisi delle vibrazioni a fini diagnostici di rotismi epicicloidali, atto ad essere impiegato in ambiente industriale.
- Individuare indicatori di condizione per il monitoraggio dei rotismi epicicloidali, valutandone sperimentalmente l'efficacia.

Le conclusioni della tesi, relativamente ai diversi aspetti trattati sono le seguenti.

A) Algoritmo per la media sincrona negli epicicloidali.

Si è mostrato che nei rotismi epicicloidali la vibrazione misurata sulla cassa presenta modulazioni dovute al movimento dei satelliti rispetto al trasduttore, oltre agli effetti di possibili guasti. Le caratteristiche della modulazione dipendono dal numero di denti delle ruote e dagli altri parametri costruttivi del rotismo. Si deve utilizzare una specifica procedura per l'estrazione della media sincrona di ciascun satellite e del solare, alla quale si possono poi applicare le tecniche standard di analisi e di valutazione delle metriche per la diagnostica dei difetti. Sono stati studiati due metodi presenti in letteratura per l'estrazione della media sincrona negli epicicloidali; questi metodi sono stati poi implementati, risolvendo alcune problematiche applicative. Dal confronto tra i metodi, si può evidenziare quanto segue. Riguardo al metodo di McFadden:

- Per effettuare un numero di medie N_e sono richiesti tempi di acquisizione relativamente lunghi, pari a $N_e N_{reset} / f_c$. Ne consegue che le condizioni di prova – in particolare la coppia – devono rimanere costanti per un lungo periodo di tempo.
- La corretta identificazione della posizione dei satelliti e la scelta del tipo e della forma della finestra temporale sono scelte critiche che influenzano la qualità della media sincrona estratta; compare infatti nello spettro della media sincrona una componente all'ordine N_g/c che è legata all'errore introdotto dalla finestra stessa.

Riguardo al metodo di Forrester e Blunt:

- La media del segnale viene eseguita sul periodo di rotazione relativo del satellite, $1/(f_p + f_c)$.
- La finestra temporale di separazione, $b(t)$, è a valori reali, multipla e periodica con la rotazione del portasatelliti, $1/f_c$; è una serie di Fourier con meno di P termini. Utilizzando l'algoritmo di Forrester e Blunt, previa una selezione accurata delle caratteristiche della finestra temporale, nel caso che il portasatellite compia un numero intero di rivoluzioni nel tempo di media, è possibile effettuare l'estrazione con un 'leakage' minimo della vibrazione dagli altri pianeti, nessuna perdita di dati vibrazionali e nessuna distorsione del segnale mediato.
- Il numero di medie ottimali con questo metodo deve essere un multiplo intero del numero di denti della corona N_a , od un multiplo intero di N_a/c . Ne consegue quindi che i tempi di acquisizione richiesti sono notevolmente minori rispetto al metodo di McFadden.

Dal punto di vista applicativo, le differenze principali tra la procedura di McFadden e quella di Forrester e Blunt risiedono: 1) nel tempo necessario per effettuare lo stesso numero di medie; 2) nell'errore dovuto all'applicazione della finestatura per l'estrazione di porzioni di segnale di vibrazione della ruota di interesse, presente nella procedura di McFadden ed assente in quella di Forrester e Blunt.

B) Sviluppo del codice per la diagnostica vibratoria delle trasmissioni ad ingranaggi.

L'attività ha preso le mosse da un'analisi di mercato che ha rilevato che non esistono prodotti commerciali atti ad un'efficace diagnostica di trasmissioni epicicloidali. Il software contiene moduli per acquisizione dei segnali vibratorii, filtraggio, ricampionamento in base tempo e in base angolo (anche considerando il rapporto di trasmissione), media sincrona (TSA), individuazione della fase dei satelliti, media sincrona per gli epicicloidali (Planetary TSA), estrazione dei segnali residui, differenziali e regolari, trasformata di Fourier, Power Spectral Density, Envelope, demodulazioni di ampiezza e fase, calcolo di parametri statistici e metriche specifiche per gli ingranaggi. L'assemblaggio dei vari moduli permette di costruire procedure specifiche di analisi dei dati. E' risultato necessario scegliere linguaggio e strategie di implementazione particolari per incrementare l'efficienza del codice, a fronte della necessità di trattare grosse quantità di dati e garantire la stabilità. Si rileva che non esistono prodotti commerciali con analoghe funzioni. Lo sviluppo della prima versione del codice è stato effettuato utilizzando il software commerciale Labview, i cui vantaggi sono:

- possibilità di creare, attraverso un linguaggio grafico, un programma con funzioni complesse, nonché interfacce uomo-macchina (HMI);
- presenza di un pacchetto in grado di riconoscere ed eseguire un programma scritto in linguaggio Matlab, il che ha permesso di integrare direttamente nel "vi" le parti di codice sviluppate e testate in Matlab;

mentre gli aspetti negativi riguardano:

- la lunghezza massima dei dati acquisibili, limitata dalla gestione della memoria, che deve essere contigua;
- il formato di dati *.tdms, difficilmente esportabile in altri programmi, il che rende più difficile condurre specifici post-processing successivi.

Con la seconda versione del software si intendeva superare i limiti della prima, impiegando il software Octave, il che ha portato i seguenti vantaggi:

- possibilità di analizzare segnali più lunghi;
- salvataggio dei dati analizzati in un formato compatto e strutturato come il *.mat.

L'aspetto negativo concerne il caricamento in Octave dei dati acquisiti da Labview, che comporta la conversione dei dati dal formato *.tdms a *.mat ed un allungamento dei tempi di processamento, in quanto non esiste una conversione diretta da *.tdms a *.mat. Con l'ultima versione del software si è operato un cambiamento radicale, scegliendo di implementare gli algoritmi in un linguaggio di più basso livello (ANSI C), compilabile per qualsiasi sistema operativo (Windows, Linux, Mac, ...); questa scelta ha comportato la scrittura di librerie dedicate ed ha permesso di ottenere i seguenti risultati.

- Azzerare i costi di licenza per il pacchetto di integrazione degli script MATLAB in ambiente LabVIEW.
- Migliorare la gestione dinamica della memoria.
- Aumentare la velocità e stabilità nell'esecuzione, dimezzando i tempi di analisi dei dati, anche grazie all'implementazione del metodo di Forrester e Blunt, rispetto a quello di McFadden implementato nelle precedenti versioni. Come si può vedere in Tabella 4.1, la terza versione del software riduce i tempi di estrazione della media sincrona di oltre il 50%, a parità di durata del segnale, rispetto alla prima versione (tale riduzione è legata da un lato al cambiamento di algoritmo, dall'altro alla scrittura dell'algoritmo in ambiente ANSI C). Inoltre, considerando il caso del secondo stadio, per poter effettuare 10 medie con la prima versione del programma occorre analizzare un segnale di 15 minuti, mentre la procedura di Forrester e Blunt permette l'estrazione della media sincrona da un segnale di 10 secondi.
- Utilizzare un formato di dati strutturato che ha la stessa compattezza dei formati *.tdms o *.mat, ma, a differenza di questi, è un formato libero e meglio esportabile in programmi terzi.

C) Indicatori per il monitoraggio delle condizioni degli epicicloidali e validazione sperimentale.

Sono state condotte quattro campagne di prove sperimentali, finalizzate ad individuare indicatori di condizione per il monitoraggio dei rotismi epicicloidali, adatti al monitoraggio in ambienti industriale, e a valutarne l'efficacia. I principali risultati possono essere sintetizzati come segue.

- Per il rilevamento di difetti localizzati sulla dentatura, il Kurtosis calcolato sulla media sincrona risulta efficace e sensibile; a differenza delle metriche specifiche per gli ingranaggi (FM0, FM4, NP4) risulta più semplice da calcolare.
- Riguardo al monitoraggio dell'insorgere e dell'evoluzione dell'usura di pitting sulla dentatura, si è valutata l'efficacia delle metriche proposte in letteratura e di altre originali qui proposte: la varianza RV del segnale residuo (TSA depurata dalle armoniche di ingranamento e delle prime due armoniche della rotazione), la corrispondente varianza cumulativa, CRV (media al tempo corrente della precedente) e la metrica NA4mod, definita come il rapporto tra il momento del quart'ordine del segnale residuo e la media al tempo corrente del quadrato della varianza del segnale regolare. Tali metriche hanno evidenziato una capacità di rilevamento soddisfacente, con maggiore affidabilità rispetto ad altre metriche presenti in letteratura.
- Il parametro RV ha evidenziato una sensibile influenza alla variazione del coppia: all'aumentare della coppia cresce la differenza tra i valori relativi alla condizione integra e quella usurata.
- La terza metrica proposta, NA4mod, è anch'essa sensibile sia all'insorgere che all'evoluzione del pitting, ma in maniera meno netta rispetto ai parametri RV e CRV.
- Risulta confermata la necessità di far seguire al rilevamento mediante gli indici statistici analisi avanzate (come analisi nel dominio Tempo-Frequenza), in grado di diagnosticare la condizione con maggiore sicurezza e precisione.
- I risultati sperimentali sono stati anche impiegati per verificare l'efficacia degli algoritmi implementati nel codice di analisi diagnostica.

In sintesi, il presente lavoro ha realizzato un codice software originale ed efficiente per l'acquisizione e l'analisi a fini diagnostici delle vibrazioni di trasmissioni ad ingranaggi, con particolare riferimento a rotismi epicicloidali; sono state sviluppate ed implementate metriche originali ed algoritmi specifici per la media sincrona degli epicicloidali; l'efficacia delle tecniche e del sistema diagnostico è stata verificata attraverso accurate prove sperimentali.

Bibliografia

- [1] M. Aboelmaged. *E-maintenance research: a multifaceted perspective*. J Manufact Tech Manag, 2015.
- [2] G. Chryssolouris et al. Digital manufacturing: history, perspectives, and outlook. *Journal of Engineering Manufacture*, 2009.
- [3] S. Delvecchio, G. D’Elia, e G. Dalpiaz. On the use of cyclostationary indicators in ic engine quality control by cold tests. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 60–61:208–228, 2015. DOI: 10.1016/j.ymssp.2014.09.015.
- [4] M. Spagnol. Maintenance of electrical machines: Instantaneous angular speed analysis. *PhD Thesis*, 2015.
- [5] G. S. Maruthi e Vishwanath Hegde. Application of mems accelerometer for detection and diagnosis of multiple faults in the roller element bearings of three phase induction motor. *IEEE SENSORS JOURNAL*, 16(1), January 2016.
- [6] R. Lazzarini, C. Stefanelli, e M. Tortonesi. *Leveraging ICT to Enable e-Maintenance for Automated Machines*. Taylor and Francis, 2014.
- [7] J. Smith. Gear noise and vibration. *Marcel Dekker Inc*, 1999.
- [8] T. Hidaka, Y. Terauchi, e K. Nagamura. Dynamic behavior of planetary gear - 6th influence of meshing-phase. *Bulletin of the JSME*, page 1026–1033, July 1979.
- [9] H.N. Ozguven e D.R. Houser. Dynamic analysis of high speed gears by using loaded static transmission error. *Journal of Sound and Vibration*, 125(1):71–83, August 1988.
- [10] D.M. Blunt e J.A. Kellerb. Detection of a fatigue crack in a uh-60a planet gear carrier using vibration analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(8):2095–2111, November 2006.
- [11] J. Ribrant e L.M. Bertling. Survey of failures in wind power systems with focus on swedish wind power plants during 1997–2005. *IEEE Trans. Energy Convers.*, 22:167–173, 2007.
- [12] R.B. Randall. Vibration-based diagnostics of gearboxes under variable speed and load conditions. *Meccanica*, 51(12):3227–3239, 2016.

- [13] R.B. Randall. Editorial for special edition on gear and bearing diagnostics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2001.
- [14] A.K.S. Jardine, D. Lin, e D. Banjevic. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006.
- [15] W. Zhou, T.G. Habetler, e R.G. Harley. Stator current-based bearing fault detection techniques: a general review. In *Proceedings of IEEE International Symposium on diagnostics for electric machines, power electronics and drives*, 2007.
- [16] B. Assaad, M. Eltabach, e J. Antoni. Vibration based condition monitoring of a multistage epicyclic gearbox in lifting cranes. *Mechanical System and Signal Processing*, 2014.
- [17] M. R. de Smidt. Internal vibration monitoring of a planetary gearbox. *Master Thesis*, 2009.
- [18] P.D. Samuel, J.K. Conroy, , e D.J. Pines. Planetary trasmission diagnostics. *NASA technical report*, 2004.
- [19] N. Sawalhi e R.B. Randall. Gear parameter identification in wind turbines using diagnostic analysis of gearbox vibration signals. *Mechanical Systems and Signal Processing* 20, 42(1–2):368–376, January 2014.
- [20] H. Weronika. An application of statistica tools in the identification of the transient vibrations of bucket-wheel excavators under random loads. *Proceeding of CMMNO2013*, 2013.
- [21] Z. Feng e M.J. Zuo. Fault diagnosis of planetary gearboxes via torsional vibration signal analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing* 20, 2006.
- [22] A.K.S. Jardine, D. Lin, e D. Banjevic. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing* 20, 2006.
- [23] R.B. Randall. Vibration based condition monitoring. *Wiley*, 2011.
- [24] R.B. Randall. State of the art in monitoring rotating machinery. *Proceedings of ISMA 2002*, 2002.
- [25] R.B. Randall. Editorial for special edition on gear and bearing diagnostics. *Mechanical System and Signal Processing*, 2001.
- [26] P.D. Samuel e D.J. Pines. A review of vibration-based techniques for helicopter transmission diagnostics. *Journal of Sound and Vibration*, 282:475–508, 2005.
- [27] U. Meneghetti, A. Maggiore, e E. Funaioli. Lezioni di meccanica applicata alle macchine, vol.3 - dinamica e vibrazioni delle macchine, 2010.

- [28] P.D. McFadden. Examination of a technique for the early detection of failure in gears by signal processing of the time domain average of the meshing vibration. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1987.
- [29] G. Dalpiaz, A. Rivola, e R. Rubini. Effectiveness and sensitivity of vibration processing techniques for local fault detection in gears. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2000.
- [30] G. D'Elia. Fault detection in rotating machines by vibration signal processing techniques. *PhD Thesis*, 2008.
- [31] P.D. McFadden. Detecting fatigue cracks in gears by amplitude and phase demodulation of the meshing vibration. *ASME Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design*, 1986.
- [32] R.B. Randall. A new method of modeling gear faults. *Journal of Mechanical Design*, 1982.
- [33] M.J. Brennan, M.H. Chen, e A.G. Reynolds. Use of vibration measurements to detect local tooth defects in gears. *Sound and Vibration*, 1997.
- [34] J. Ma e C.J. Li. Gear defect detection through model-based widband demodulation of vibrations. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1996.
- [35] A. Brandt. Noise and vibration analysis - signal analysis and experimental procedures, 2011.
- [36] P. Večeř, M. Kreidl, e R. Šmíd. Condition indicators for gearbox condition monitoring systems. *Acta Polytechnica*, 45(6), 2005.
- [37] H.J. Decker, R.F. Handshuh, e J.J. Zakrajsek. An enhancement to the na4 gear vibration diagnostic parameter. *NASA Technical Memorandum 106553*, 1994.
- [38] H.J. Decker e D.G. Lewicki. Spiral bevel pinion crack detection in a helicopter gearbox. *NASA Technical Memorandum 212327*, 2003.
- [39] C. Capdessus, E. Sekko, e J. Antoni. Speed transform, a new time-varying frequency analysis technique. *Advances in Condition Monitoring Of Machinery in Non-stationary Operation, Part of series of lectures notes in Mechanical Engineering*, 2013.
- [40] G. D'Elia, E. Mucchi, e G. Dalpiaz. On the time synchronous average in planetary gearboxes. *Surveillance* 7, 2013.
- [41] V.V. Polyshchuk, F.K. Choy, e M.J. Braun. Gear fault detection with time frequency based parameter np4. *International journal of rotating machinery*, 2002.
- [42] G. D'Elia, M. Cocconcelli, R. Rubini, e G. Dalpiaz. Evolution of gear condition indicators for a conscious diagnostics of planetary gearboxes. *Proceeding of International Conference Surveillance 8, Roanne, France, October 20-21, 2015*.

- [43] R.B. Randall. Frequency analysis. *K. Larsen and Son*, 1987.
- [44] Z.K. Peng e F.L. Chu. Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: a review with bibliography. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2004.
- [45] N. Baydar e A. Ball. Detection of gear failures via vibration and acoustic signals using wavelet transform. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2003.
- [46] W.J. Wang e P.D. McFadden. Application of wavelets to gearbox vibration signals for fault detection. *Journal of sound and vibration*, 1996.
- [47] O. Rioul e M. Vetterli. Wavelet and signal processing. *IEEE SP Magazine*, 1991.
- [48] D. Kanneg e W. Wang. A wavelet spectrum technique for machinery fault diagnosis. *Journal of signal and information porcessing*, 2011.
- [49] H. Bendjama, S. Bouhouche, e M.S. Boucherit. Application of wavelet transform for fault diagnosis in rotating machinery. *International journal of machine learning and computing*, 2012.
- [50] M. Wolfgang e P. Flandrin. Wigner-ville spectral analysis of non- stationary process. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1985.
- [51] W.J. Staszewski, K. Worden, e G.R. Tomlinson. Time-frequency analysis in gearbox fault detection using the wigner-ville distribution and pattern recognition. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1997.
- [52] J. Antoni. Cyclostationarity by examples. *Mechanical System and Signal Processing*, 2009.
- [53] J. Antoni, F. Bonnardot, A. Raad, e M. El Badaoui. Cyclostationary modeling of rotating machine vibration signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2004.
- [54] W.A. Gardner. The spectral correlation theory of cyclostationary time-series. *Signal Processing*, 1986.
- [55] I. Antoniadis e G. Glossiotis. Cyclostationary analysis of rolling-element bearing vibration signals. *Journal of Sound and Vibration*, 2001.
- [56] R.B. Randall, J. Antoni, e 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*, 2001.
- [57] C. Capdessus, M. Sidahmed, e J.L. Lacoume. Cyclostationary processes: Application in gear faults early diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2000.
- [58] Z.K. Zhu, Z.H. Feng, e F.R. Kong. Cyclostationarity analysis for gearbox condition monitoring: Approaches and effectiveness. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2005.

- [59] A. Raad, J. Antoni, e M. Sidahmed. Indicators of cyclostationary: theory and application to gear fault monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2008.
- [60] J.S. Bendat e A. Piersol. Random data: analysis and measurement procedures. Wiley, 1971. New York.
- [61] K. Shin e J. Hammond. Fundamentals of signal processing for sound and vibration engineers. Wiley, 2008.
- [62] R.B. Randall. A new method of modelling gear faults. *Journal of Mechanical Design*, 1982.
- [63] R.B. Randall. Frequency analysis. *Bruel and Kjaer*, 1985.
- [64] J.W. Cooley e J.W. Tukey. An algorithm for the machine calculation of complex fourier series. *Mathematics of Computing*, 1965.
- [65] A.V. Oppenheim e R.W. Schaffer. Digital signal processing. *Prentice Hall International*, 1975.
- [66] N.G. DeBruijn. Uncertainty principles in fourier analysis. *Inequalities*, 1967.
- [67] J. Mathew. Monitoring the vibrations of rotating machine elements - an overview. *Machine Condition Monitoring Research Bulletin*, 1989.
- [68] R.B. Randall. Computer aided vibration spectrum trend analysis for condition monitoring. *Maintenance Management International*, 1985.
- [69] C.K. Mechefske e J. Mathew. A comparison of frequency domain trending and classification parameters when used to detect and diagnose faults in low speed rolling element bearings. *Machine Condition Monitoring Research Bulletin*, 1991.
- [70] Y.T. Su e S.J. Lin. On initial fault detection of a tapered roller bearing: Frequency domain analysis. *Journal of Sound and Vibration*, 1992.
- [71] P.D. McFadden. Determining the location of a fatigue crack in a gear from phase of the change in the meshing vibration. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1988.
- [72] P.D. McFadden. Analysis of the vibration of the input bevel pinion in ran wessex helicopter main rotor gearbox wak143 prior to failure. *Aero Propulsion Report 169*, 1985.
- [73] S. Braun. Mechanical signature analysis. *Academin Press Inc*, 1986.
- [74] R.M. Stewart. Some useful data analysis techniques for gearbox diagnostics. *University of SOuthampton Report MHM/R/10/77*, 1977.
- [75] K. Janssens e L. Britte. Comparison of torsional vibration measurement techniques. *Proceeding of Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations 2013*, 2013.

- [76] P.D. McFadden. Interpolation techniques for the time domain averaging of vibration data with application to helicopter gearbox monitoring. *Aero Propulsion Memorandum 437*, 1986.
- [77] P.D. McFadden. A model for the extraction of periodic waveforms by time domain averaging. *Aero Propulsion Technical Memorandum 435*, 1986.
- [78] S. Braun. The extraction of periodic waveforms by time domain averaging. *Acustica*, 32:69–77, 1975.
- [79] N.S. Swansson, B.D. Forrester, e I.M. Howard. Fault detection in helicopter transmissions: Trends in health and usage monitoring. *Australian Aeronautical Conference*, 1989.
- [80] G.P. Succi. Synchronous averaging for gearbox vibration monitoring. *Supplemental Contract Report R9110-001-RD*, 1991.
- [81] B.D. Forrester. Advanced vibration analysis techniques for fault detection and diagnosis in geared transmission systems. *PhD Thesis, Swinburne University of Technology*, Febbraio 1996.
- [82] K.R. Fyfe e D.S. Munk. Analysis of computed order tracking. *Mechanical System and signal procesing*, 1997.
- [83] C.L. Groover, M.W. Trethewey, K.P. Maynard, e M.S. Lebold. Removal of order domain content in rotating equipment signals by double resampling. *Mechanical systems and signal processing*, 2005.
- [84] Y. Li, F. Gu, G. Harris, A. Ball, N. Bennett, e K. Travis. The measurement of instantaneous angular speed. *Mechanical Systems and signal procesing*, 2005.
- [85] P.R. Bélanger. Estimation of angular velocity and acceleration from shaft encoder measurements, 1991.
- [86] H. Herlusen, S. Gade, e H. Konstantin-Hansen. Characteristics of the vold/kalman order tracking filter. *Journal of sound and vibration*, 1999.
- [87] W. Youssef, F. Guillet, e M. Elbadaoui. Characterization of counter technique for instantaneous angular speed measurement: Application on gear box signal. *Proceedings of ICS6*, 2011.
- [88] J. N. Lygouras, V. Kodogiannis, T. P. Pachidis, e G. C. Sirakoulis. A new method for digital encoder adaptive velocity/acceleration evaluation using a tdc with picosecond accuracy. *Microprocessor and microsystems*, 2009.
- [89] J.J. Zakrajsek. An investigation of gear mesh failure prediction techniques. *NASA Technical Memorandum 102340*, 1989.

- [90] F. Berlato, G. D'Elia, E. Mucchi, e G. Dalpiaz. Condition monitoring indicators for distributed gear faults in planetary gearboxes. *X Giornata Ettore Funaioli, Bologna 15.07.2016*, 2016.
- [91] P.D. Samuel e D.J. Pines. Vibration separation and diagnostics of planetary geartrains. *American Helicopter Society 56th Annual Forum, Virginia Beach, VA, May 2000*.
- [92] P.D. McFadden e J.D. Smith. An explanation for the asymmetry of the modulation sidebands about the tooth meshing frequency in epicyclic gear vibration. *Proc Instn Mech Engrs*, 1985.
- [93] M. Inalpolat e A. Kahraman. A theoretical and experimental investigation of modulation sidebands of planetary gear sets. *Journal of Sound and Vibration*, 2009.
- [94] P.D. McFadden. A technique for calculating the time domain averages of the vibration of the individual planet gears and the sun in an epicyclic gearbox. *Journal of Sound and Vibration 144*, 1991.
- [95] P.D. McFadden. Windows function for the calculation of the time domain averages of the vibration of the individual planet gears and sun gear in an epicyclic gearbox. *Journal of Vibration and Acoustics 116*, 1994.
- [96] B.D. Forrester. A method for the separation of epicyclic planet gear vibration signatures. *United States Patent 6,298,725*, Ottobre 2001.
- [97] D.M. Blunt. Synchronous averaging of epicyclic sun gear vibration. *United States Provisional Patent Application*, 24 gennaio 2003.
- [98] G. D'Elia, E.Mucchi, e M.Cocconcelli. On the identification of the angular position of gears for the diagnostics of planetary gearboxes. *Mechanical Systems and Signal Processing 83*, page 305–320, 2017.
- [99] D. Forrester e D. Blunt. Analysis of epicyclic gearbox vibration. *HUMS 2003 Conference*, 2003.
- [100] B.D. Forrester. A method and apparatus for performing selective signal averaging. *Australian Patent 672166, 40638/95*.