

POLITECNICO DI TORINO



LAUREA MAGISTRALE IN  
INGEGNERIA MECCANICA

---

# Tecniche e strumenti per la diagnostica di motori elettrici

---

*Autore:*  
Christian Oliva

*Matricola:*  
265309

Relatore: Alessandro Fasana

A.A. 2020/2021



## Indice

<b>Indice</b>	<b>2</b>
<b>Elenco delle figure</b>	<b>4</b>
<b>1 Introduzione</b>	<b>7</b>
<b>2 I motori elettrici</b>	<b>9</b>
2.1 Monitoraggio delle condizioni di funzionamento . . . . .	9
2.2 Struttura motore elettrico . . . . .	13
2.3 Difetti riscontrabili in un motore . . . . .	19
<b>3 Ambito normativo</b>	<b>22</b>
3.1 Analisi vibrazionale . . . . .	23
3.1.1 ISO 13373-9:2017 . . . . .	23
3.1.2 Normativa cuscinetti ISO 10816-3:2009+A1:2017 . . . . .	30
3.2 Analisi elettrica . . . . .	35
<b>4 Brevetti esistenti</b>	<b>42</b>
4.1 I parametri essenziali per il monitoraggio di un motore elettrico	45
4.2 Brevetti da tenere in considerazione . . . . .	46
4.3 Altri brevetti . . . . .	54
<b>5 Cosa offre il mercato?</b>	<b>55</b>
5.1 Tecniche di monitoraggio e dispositivi . . . . .	56
5.1.1 Analisi della firma elettrica . . . . .	56
5.1.2 Analisi vibrazionale . . . . .	66
5.1.3 Emissioni acustiche . . . . .	71
5.1.4 Monitoraggio della temperatura . . . . .	77
5.2 Le proposte delle aziende . . . . .	82
5.3 Cosa conviene scegliere . . . . .	93
<b>6 Ambito letterario e possibilità future</b>	<b>96</b>
6.1 Metodi tradizionali . . . . .	96
6.2 Diagnosi dei guasti basata sull'intelligenza artificiale . . . . .	105
6.3 Altri possibili metodi . . . . .	110
6.3.1 Studio delle condizioni transitorie . . . . .	112
6.3.2 Rilevamento dei guasti tramite il vettore di Park . . . . .	118
6.3.3 Campionamento compressivo per il monitoraggio basato sulle vibrazioni . . . . .	121
6.4 Sviluppi futuri . . . . .	125

<b>7 Conclusioni</b>	<b>126</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>129</b>

## Elenco delle figure

2.1	Andamento al variare dell'uso delle tecnologie di manutenzione [4] . . . . .	11
2.2	Mercato PdM annuale [8] . . . . .	12
2.3	Spaccato motore asincrono [1] . . . . .	14
2.4	Specifiche tecniche RS PRO 187-9894 [2] . . . . .	15
2.5	Dettaglio statore [1] . . . . .	16
2.6	Spaccato cuscinetto [3] . . . . .	17
2.7	Elenco cause difetti [9] . . . . .	19
3.1	FiguraA.1-Valori massimi raccomandati per lo spostamento di alberi in base alla velocità di rotazione [16] . . . . .	24
3.2	Tabella A.1 norma [12] . . . . .	26
3.3	Flowchart metodologia norma [12] . . . . .	27
3.4	Vibrazioni eccessivi in un motore asincrono [12] . . . . .	28
3.5	Spettro di frequenza che mostra la componente a 120 Hz e multipli [12] . . . . .	29
3.6	Estratto della Figura 1 della norma: Punti di misura per macchina orizzontale [14] . . . . .	31
3.7	Figura 2 della norma: Punti di misura per macchina verticale [14] . . . . .	32
3.8	Tabella limiti zone per macchine del Gruppo 1 [14] . . . . .	33
3.9	Tabella limiti zone per macchine del Gruppo 2 [14] . . . . .	34
3.10	Rilevamento della corrente per l'analisi elettrica [15] . . . . .	36
3.11	Analisi della firma di corrente di motori con barre rotte [15] . . . . .	37
3.12	Difetti al traferro in motore elettrico [15] . . . . .	39
3.13	Tabella 1 da norma contenente frequenze tipiche dei difetti dei cuscinetti [15] . . . . .	39
3.14	Dimensioni cuscinetto [15] . . . . .	40
4.1	Difetti generali motore elettrico [17] . . . . .	43
4.2	Schema funzionale brevetto [26] . . . . .	49
4.3	Grafici ampiezze impulsi[27] . . . . .	52
4.4	Variazione del valor medio degli impulsi [27] . . . . .	53
4.5	Elenco parziale brevetti pubblicati [17] . . . . .	54
5.1	Diagramma a torta difetti motori elettrici [35] . . . . .	55
5.2	Schema per ESA [11] . . . . .	57
5.3	Corrente nel dominio del tempo [29] . . . . .	58
5.4	Corrente nel dominio della frequenza dopo FFT [29] . . . . .	59
5.5	Spettro di corrente per un motore sano [36] . . . . .	59
5.6	Spettro di corrente di motore con una barra rotta [36] . . . . .	60
5.7	Spettro di corrente di motore con due barre rotte [36] . . . . .	60
5.8	Esempio spettri di frequenza [37] . . . . .	62

5.9	Classificazione sensori di corrente: 1) Gli shunt possono essere isolati tramite un condizionatore di segnale interno o esterno, ma non sono intrinsecamente isolati [38]	63
5.10	Sensore ad effetto Hall: DS-CLAMP [38]	64
5.11	Specifiche tecniche DS-CLAMP [38]	65
5.12	Spettro in frequenza modificato relativo ad un disallineamento [39]	67
5.13	Spettro in frequenza con componenti del cuscinetto [39]	68
5.14	Formule per il calcolo delle frequenze fondamentali [40]	68
5.15	FastTRACER [41]	70
5.16	Specifiche tecniche FastTRACER [41]	70
5.17	Bande di frequenza vicino l'udibile [42]	71
5.18	Traccia dell'effetto corona in FFT [43]	73
5.19	Sensore Ultra-Trak 750 [45]	74
5.20	Specifiche tecniche Ultra-Trak 750 [45]	75
5.21	Schema 4Site [46]	76
5.22	Specifiche tecniche sistema 4Site [46]	76
5.23	Classi d'isolamento [30]	78
5.24	Rilevamento temperatura su un cuscinetto [47]	78
5.25	Rilevamento temperatura sul corpo del motore [47]	79
5.26	Termocamera a infrarossi FLUKE Ti480 PRO [10]	80
5.27	Caratteristiche termocamera Ti480 PRO [10]	80
5.28	Sonda di temperatura per avvolgimenti con rispettive caratteristiche[48]	81
5.29	Termosonda per avvolgimenti elettrici con rispettive caratteristiche[49]	81
5.30	Sensore ABB [33]	83
5.31	Specifiche sensore ABB [33]	85
5.32	Sensori Balluff con scheda tecnica [50]	87
5.33	ATPOL II [51]	88
5.34	Specifiche tecniche ATPOL II [51]	88
5.35	Elenco siti internet aziende	92
5.36	Confronto tra sensore ABB e sensore Balluff	95
6.1	Classificazione difetti nei motori a induzione [59]	97
6.2	Riepilogo del monitoraggio di diversi difetti utilizzando le emissioni acustiche [59]	98
6.3	Alcuni difetti rilevati utilizzando la termografia a infrarossi [59]	99
6.4	Riepilogo del monitoraggio di diversi difetti utilizzando le vibrazioni [59]	100
6.5	Riepilogo del monitoraggio di difetti tramite la MCSA [59]	101
6.6	Diagnosi dei guasti tramite intelligenza artificiale [64]	106
6.7	Elenco parziale articoli	110

6.8	Integrazione di diversi metodi per sviluppare un sistema di diagnostica unico [78] . . . . .	113
6.9	Evoluzione teorica delle armoniche legate ai danni al rotore ed eccentricità presenti nella corrente di avvio del motore [78] . . .	115
6.10	Grafici t-f della corrente d'avvio per diverse condizioni del rotore [78] . . . . .	116
6.11	Motore A: senza difetti, Motore B: difetti al rotore (andamento a V) [78] . . . . .	117
6.12	Curve Id,Iq al variare del carico: carico nullo (a), carico medio (b), carico massimo (c) [81] . . . . .	119
6.13	Curve relative a difetti di rugosità della superficie della pista esterna al variare del carico: carico nullo (a), carico medio (b), carico massimo (c) [81] . . . . .	120
6.14	Struttura CS per vettore singolo [82] . . . . .	123
6.15	Struttura CS per molteplici vettori [82] . . . . .	124
6.16	Differenti strategie di elaborazione del segnale [82] . . . . .	125

## 1 Introduzione

L'ambiente industriale rappresenta sicuramente una delle principali fonti di sviluppo del nostro paese, proprio per questo deve mantenere elevati livelli di produttività ed efficienza. Per fare in modo che ciò sia possibile è necessario che le linee produttive e, in particolare, i vari macchinari siano sempre in ottime "condizioni di salute". Molte sono le macchine che vengono regolarmente utilizzate nell'ambito industriale, come ad esempio compressori, pompe, ventilatori, trasportatori. Ciò che accomuna tutti questi macchinari è l'azionamento, affidato ai motori elettrici. Questo non deve stupire in quanto i motori elettrici rappresentano circa il 45% della domanda globale di elettricità, come viene suggerito da Meccanica News [32].

I motori elettrici assumono quindi un ruolo fondamentale nell'industria, in quanto rappresentano la principale fonte di energia per le diverse macchine. I motori utilizzati, grazie al continuo sviluppo, sono sempre più efficienti e performanti ma anche complessi, rendendo più difficili le operazioni volte a mantenerne le prestazioni ottimali. In situazioni normali questo potrebbe provocare dei fermi macchina, anche di molte ore, il che sarebbe controproducente per l'azienda sia in termini di costi sia in termini di produttività.

Il motore elettrico è formato da diversi componenti, ognuno dei quali ha probabilità di guastarsi. In particolare, si deve prestare attenzione soprattutto ai cuscinetti dell'albero rotante, questo perché una buona percentuale dei guasti al motore viene causata da loro danneggiamenti e più del 60 % dei guasti meccanici di uno stabilimento sono causati dalla loro usura [9].

Risulta quindi necessario per le aziende avere delle opportune strategie di manutenzione che non richiedano fermi macchina eccessivamente lunghi, ottimizzando così i tempi produttivi e riducendo i costi.

La presente tesi si propone di effettuare un'analisi su quelli che possono essere i metodi e le tecniche migliori per quanto riguarda il monitoraggio di macchinari industriali quali i motori elettrici.

In una prima parte introduttiva vengono descritti il motore elettrico ed i suoi componenti, riportando anche, in generale, i vari difetti che possono generarsi nel corso del suo funzionamento. Inoltre, si farà un breve accenno sul quale tipo di manutenzione è più opportuno utilizzare.

Successivamente, nel secondo capitolo, si passa all'analisi delle normative vi-

genti riguardanti il monitoraggio dei motori elettrici. Le norme, infatti, suggeriscono delle linee guida da seguire nel caso in cui si vogliano utilizzare specifiche tecniche di monitoraggio. Vengono in particolare riportate delle norme riguardanti l'analisi delle vibrazioni e l'analisi elettrica.

Segue il terzo capitolo, riguardante l'analisi brevettuale. Qui vengono studiati i brevetti inerenti all'ambito di controllo di alcuni dei parametri del motore elettrico, utilizzati per monitorarne le condizioni di funzionamento.

Si arriva poi alla parte di analisi di mercato, in cui vengono analizzate le tecniche ed i dispositivi attualmente utilizzati dalle industrie e dalle aziende per individuare per tempo l'insorgenza di difetti e quindi applicare strategie di manutenzione per evitare il fermo macchina. Vengono anche riportate le nuove proposte delle aziende in termini di dispositivi per migliorare il monitoraggio delle macchine.

Infine, l'ultimo capitolo, è un'analisi della bibliografia scientifica su quelli che potrebbero essere nuovi metodi per il monitoraggio dei motori elettrici, metodi che magari non sono ancora stati implementati nell'ambiente produttivo perché ancora troppo complessi e di difficile applicazione. Sarà presente anche un confronto tra le varie proposte per individuare la migliore.

## 2 I motori elettrici

### 2.1 Monitoraggio delle condizioni di funzionamento

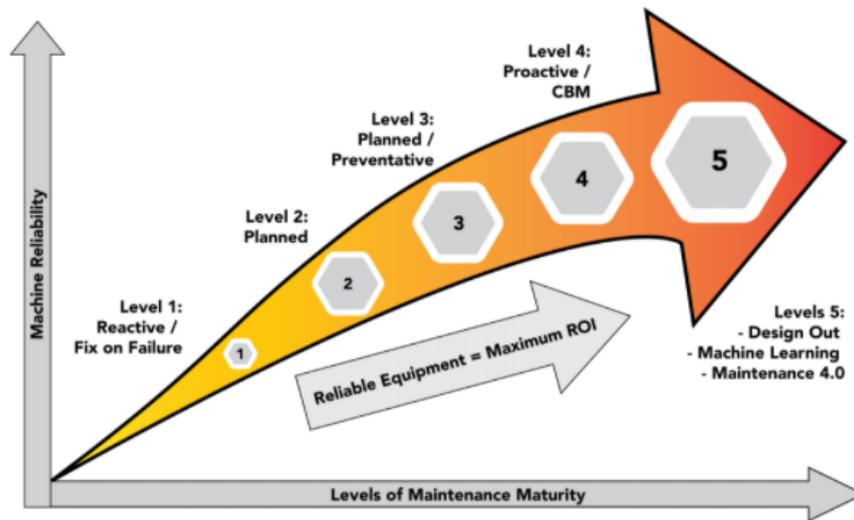
Evitare di risolvere un problema tempestivamente e lasciare che il componente guasto si rompa prima di agire non è esattamente la miglior strategia di manutenzione. Questo perché non si ha il controllo della situazione e quindi il blocco del macchinario potrebbe avvenire in qualsiasi momento, portando con sé una serie di problematiche.

Al giorno d'oggi sono molte le strategie di manutenzione che è possibile attuare per monitorare il funzionamento di una macchina. Tuttavia, tra le varie tecniche sta prendendo sempre più piede quella della manutenzione predittiva (PdM), che monitora le prestazioni e le condizioni delle apparecchiature durante il normale funzionamento per ridurre la probabilità di guasti, inoltre, tramite l'uso di formule predittive permette di sapere quando un pezzo di equipaggiamento potrebbe cedere. Grazie a questa caratteristica la manutenzione predittiva è, in un certo senso, una versione più accurata del "Condition-based maintenance". Quest'ultimo, detto CBM, si basa sull'attuazione di operazioni di manutenzione in base alle condizioni attuali della macchina. Così facendo, tramite test e dati ricavati per mezzo di sensori, si può programmare una manutenzione sulla macchina o sul pezzo danneggiato subito prima che si guasti definitivamente. Il monitoraggio delle condizioni di salute non si applica soltanto ai macchinari industriali, infatti viene utilizzato anche in altri campi, come ad esempio il controllo delle strutture ingegneristiche. In questo caso il monitoraggio assume il nome di "Structural Health Monitoring" (SHM), prevede l'analisi di un sistema nel tempo utilizzando delle misurazioni periodiche in modo da rilevare modifiche nelle proprietà dei materiali. L'uso di sistemi SHM consente di individuare in anticipo errori di progetto, controllare lo stato di salute della struttura anche in base all'andamento del carico a cui è sottoposta e anche generare allarmi per avvertire di eventuali guasti [6]. Inoltre, come suggerito nel libro: "An introduction to structural health monitoring" [7], in caso di eventi estremi come ad esempio terremoti, lo SHM può essere usato per un controllo rapido delle condizioni della struttura. In questo modo si riescono ad avere delle informazioni in tempo reale sulle conseguenze dell'evento sulla struttura.

Ritornando all'ambito industriale, per poter attuare la manutenzione predittiva è necessario il monitoraggio continuo delle condizioni di funzionamento della macchina, detto Condition Monitoring. I dati vengono raccolti in modo non distruttivo in maniera continuata tramite trasduttori, sensori o strumenti

portatili. I vantaggi della manutenzione predittiva sono enormi dal punto di vista del risparmio sui costi e includono la riduzione al minimo dei tempi di inattività, l'aumento della durata delle apparecchiature e dei ricavi. Naturalmente ci sono degli svantaggi nell'uso di questa tecnica, ma riguardano solo la sua implementazione. Serve infatti un enorme quantità di tempo per implementare una pianificazione che si basa sulla manutenzione predittiva, essendo un'iniziativa molto complessa. Oltre a questo, per poter adottare questo tipo di strategia, è necessario essere dotati degli strumenti giusti, come ad esempio una sensoristica adatta al tipo di analisi che si vuole svolgere. Questi non sono sempre economici, e la loro installazione potrebbe richiedere anche fermi macchina, quindi costi aggiuntivi per l'azienda. Tali sensori però acquisirebbero i dati direttamente dalla macchina per inviarli a determinate console in modo da essere analizzati e controllati in tempo reale. Una variazione delle misure effettuate rispetto allo stato di normale funzionamento indicherà la presenza di un difetto nella macchina e permetterà quindi di prevedere il momento del guasto. Sapendo ciò è possibile intervenire in tempo, così da evitare fermi macchina ed eventuali blocchi della produzione.

Applicando questa nuova tipologia di tecniche per il monitoraggio, oltre a migliorare la produzione e quindi i ricavi rispetto agli investimenti e a ridurre i costi dovuti ai guasti, quello che va ad aumentare è l'affidabilità della macchina ed anche la durata dell'evento di manutenzione, il che porta ad una maggior sicurezza di lavorazione. Viene riportato in *figura 2.1* un grafico raffigurante questo andamento:

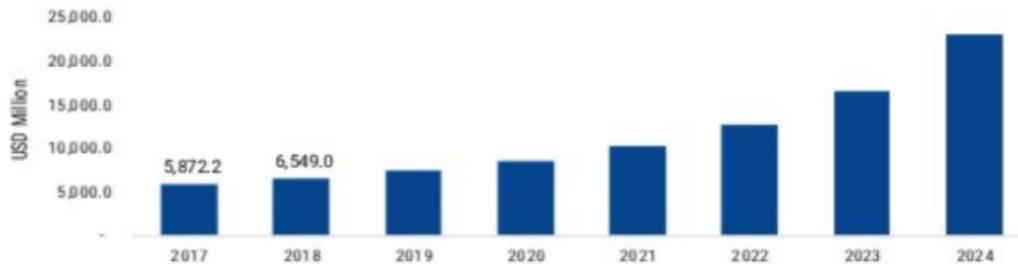


**Figura 2.1:** Andamento al variare dell'uso delle tecnologie di manutenzione [4]

Non bisogna però confondere la manutenzione predittiva con quella preventiva, che invece prevede azioni correttive su un macchinario solo dopo un certo numero di ore di funzionamento, indipendentemente dal fatto che l'attrezzatura necessiti di manutenzione.

La manutenzione predittiva inoltre consente non solo di ridurre i costi di manutenzione, ma anche di migliorare il servizio post-vendita. Le aziende produttrici, infatti, potendo prevedere quando un componente giunge a fine vita, possono usare queste informazioni per programmare la manutenzione e inviare i ricambi per tempo, portando così il servizio post-vendita a un livello superiore. A dimostrazione di ciò vi è la costante crescita del mercato basato sulla manutenzione preventiva, ossia sensori, dispositivi di analisi dei dati, consulenze e altro.

Riportato in *figura 2.2* l'andamento del mercato in termini di crescita annuale:



**Figura 2.2:** Mercato PdM annuale [8]

Come si può vedere in *figura 2.2* si prevede che il mercato continuerà ad espandersi anche nei prossimi anni.

Per quanto riguarda i motori elettrici la manutenzione predittiva comprende attività di monitoraggio statiche e dinamiche:

- Le analisi statiche comprendono dei test che verificano tutti i parametri elettrici all'interno del motore (ad esempio rivestimenti, isolamento). L'esecuzione di tutte le prove è indispensabile per individuare i problemi prima che portino ad eventuali guasti;
- Le analisi dinamiche monitorano il motore durante il suo normale funzionamento, in modo da valutare le grandezze elettriche in tempo reale ed osservarne gli eventuali effetti (sbilanciamenti delle tensioni, distorsione armonica, ecc..). Così facendo è possibile individuare problematiche ad esse legate ed intervenire prontamente per riparare il motore;

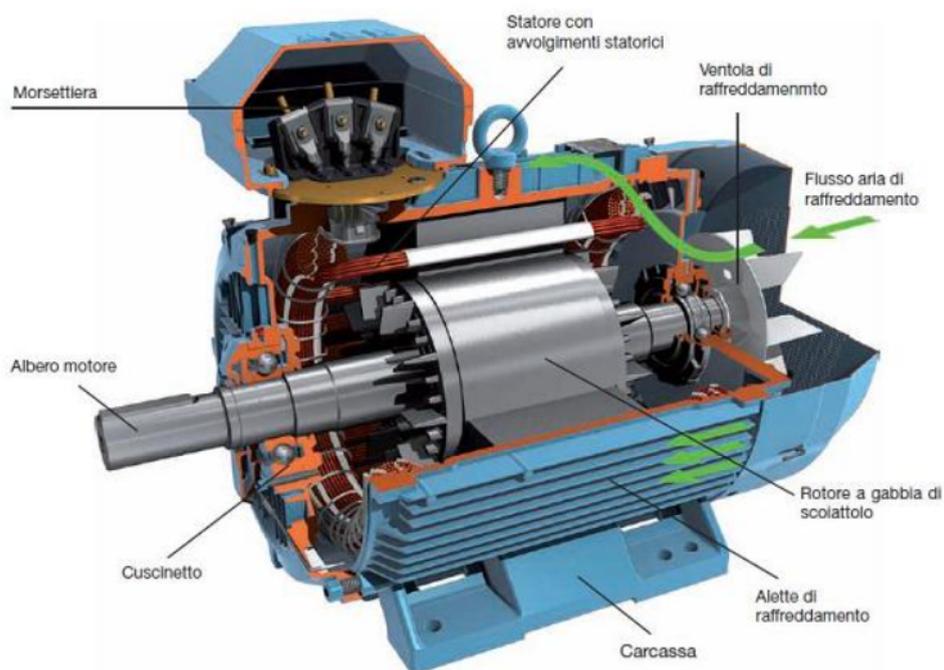
## 2.2 Struttura motore elettrico

Il motore elettrico non è altro che una macchina elettrica rotante che trasforma l'energia elettrica in meccanica e la trasmette tramite un albero rotante. Generalmente un motore elettrico è formato da una parte fissa, detta statore, e da una parte rotante, il rotore. Le forze elettromagnetiche che lo statore esercita sul rotore creano una coppia motrice che agisce in un piano normale all'asse di rotazione. Tale coppia fa ruotare l'asse e, con esso, il carico meccanico che vi è collegato.

Nell'ambito industriale il motore elettrico maggiormente utilizzato è quello asincrono, detto anche ad induzione per via del suo principio di funzionamento. Questo perché presenta delle ottime caratteristiche che rendono il suo utilizzo vantaggioso in svariati campi:

- È economico;
- Presenta una buona robustezza ed affidabilità;
- Ha un buon rapporto peso/potenza;
- Funziona a velocità costante;
- Può essere alimentato direttamente dalla rete.

Viene riportato in *figura 2.3* lo spaccato di un motore asincrono, per dare un'idea della sua struttura:



**Figura 2.3:** Spaccato motore asincrono [1]

Viene anche riportato un esempio di motore asincrono trifase utilizzato in campo industriale. Il motore preso in considerazione è il Motore c.a. trifase RS PRO 187-9894. Questo viene utilizzato in applicazioni come azionamento di pompe, ventilatori, macchine utensili, nastri trasportatori.

Riportate in *figura 2.4* le specifiche tecniche:

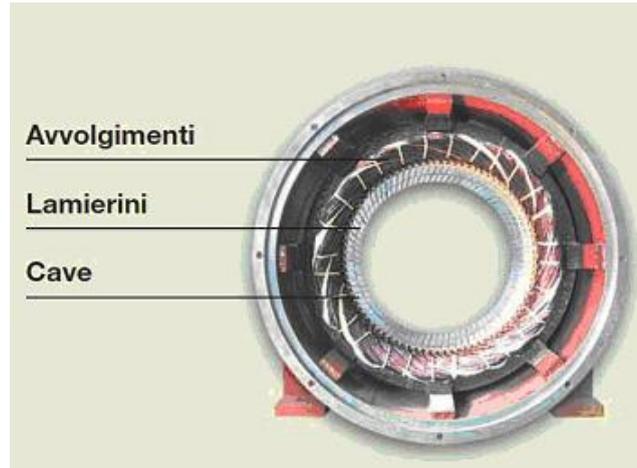
Attributo	Valore
Potenza nominale	11 kW
Classe di efficienza	IE3
Frequenza nominale	50Hz
Tensione di alimentazione	400 V
Fase	3
Velocità di uscita	1470 giri/min
Numero di poli	4
Tipo di montaggio	Montaggio a piede
Diametro asta	42k6
Lunghezza asta	110mm
Larghezza	553.5mm
Lunghezza	307mm
Corrente nominale	21,5 A
Profondità	398mm
Tipo di cuscinetto	Estremità con attacco, estremità senza attacco
Dimensioni	307 x 553,5 x 398 mm
Coppia in uscita massima	71,6 nm

**Figura 2.4:** Specifiche tecniche RS PRO 187-9894 [2]

Si passa adesso alla descrizione generale della struttura di un motore elettrico asincrono.

Tra le parti principali abbiamo sicuramente lo statore, che rappresenta l'insieme delle parti fisse e costituisce la parte di circuito magnetico che contiene gli avvolgimenti induttori.

Viene riportata in *figura 2.5* l'immagine di uno statore:



**Figura 2.5:** Dettaglio statore [1]

È costituito da lamierini isolati tra loro, nei quali vengono ricavate delle cave che contengono gli avvolgimenti primari. A questi avvolgimenti viene applicata la tensione di alimentazione che genera il campo magnetico. In base al tipo di collegamento degli avvolgimenti, che può essere a triangolo oppure a stella, è possibile alimentare il motore con tensioni differenti. È importante tenere sotto controllo lo statore, in quanto uno dei principali difetti che è possibile riscontrare nei motori elettrici è l'erosione dell'isolamento degli avvolgimenti. Questo fenomeno riduce la resistività elettrica dei materiali isolanti, in questo modo si ha un aumento delle correnti di dispersione che possono causare fermi inaspettati e in alcuni casi anche gravi incidenti alle persone vicine.

Il rotore, come si vede in *figura 2.3*, viene posto all'interno dello statore e rappresenta il circuito indotto del motore. Viene costituito da un sistema di sbarre conduttrici, coassiali all'asse di rotazione dell'albero. Le sbarre sono chiuse in cortocircuito da due anelli conduttori posti agli estremi che svolgono anche la funzione di fissaggio meccanico per le sbarre. Si ottiene così un rotore robusto e compatto al quale viene fissato anche l'albero del motore. Il campo magnetico indotto genera la rotazione dell'albero, convertendo l'energia elettrica in energia meccanica.

Altro componente importante sono i cuscinetti. Questi, infatti, oltre a fornire supporto all'albero, hanno un ruolo fondamentale nella riduzione del consumo di energia, in quanto riducono l'attrito tra le parti rotanti. I cuscinetti uti-

lizzati nei motori elettrici sono particolari, vengono infatti utilizzati cuscinetti schermati contro le correnti vaganti, per evitare che queste passino attraverso il cuscinetto provocando danni come la fessurazione delle piste o il deterioramento del lubrificante. Questi fenomeni oltre ad aumentare i livelli di rumorosità e di vibrazioni generano un surriscaldamento e contribuiscono a ridurre sensibilmente la durata di esercizio. Tutto questo può anche portare ad una rottura precoce del cuscinetto e quindi ad un fermo macchina. Cuscinetti con questa caratteristica vengono denominati ibridi, come suggerisce SKF [5]. I cuscinetti ibridi sono dotati di anelli in acciaio ed elementi volventi in nitruro di silicio ( $Si_3N_4$ ), che rendono il cuscinetto elettricamente isolato. Quelli più utilizzati sono i cuscinetti radiali a sfere.

Sono formati da:

- Due piste, una interna ed una esterna, su cui vengono ricavate le sedi per gli elementi volventi;
- Corpi volventi, in questo caso sfere;
- Gabbia di tenuta che separa le sfere e le guida nel movimento.

Riportato in *figura 2.6* lo spaccato di un cuscinetto:



**Figura 2.6:** Spaccato cuscinetto [3]

Altri elementi del motore elettrico sono: una ventola di raffreddamento, la

morsettiera per la connessione dei cavi e la carcassa che si occupa di smaltire il calore tramite le alette.

In genere le macchine elettriche rotanti, essendo costituite di pochi organi in movimento, non sono soggette a guasti per usura del materiale e quindi a rotture dei componenti meccanici, eccetto i supporti. I cuscinetti, infatti, possono costituire una delle principali cause di fermi per i motori asincroni, se non vengono monitorati in modo opportuno. Altri guasti sono invece quelli causati da sollecitazioni di tipo elettrico. Di solito sono solo difetti e non guasti veri e propri, ma tali difetti se non eliminati col giusto tempismo, possono portare a malfunzionamenti e fermi macchina.

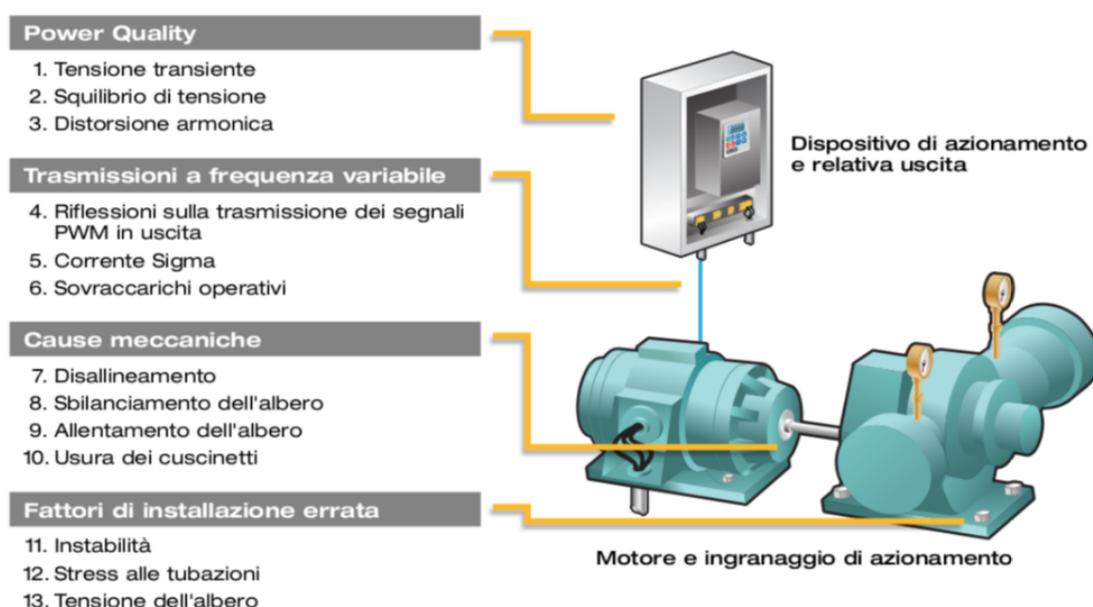
Per evitare l'insorgere di danni alle diverse parti del motore, che porterebbero a malfunzionamenti e quindi a probabili fermi macchina, diventa essenziale per le aziende utilizzare delle strategie di manutenzione per controllare frequentemente o meglio costantemente lo "stato di salute" delle macchine.

## 2.3 Difetti riscontrabili in un motore

Si è parlato di tecniche di manutenzione per individuare anomalie durante il funzionamento del motore, in modo da agire preventivamente evitando che queste diventino dei veri e propri guasti. Ma quali possono essere i danni che interessano un motore elettrico?

Innanzitutto, è importante ricordare che le cause dei vari problemi possono avere origini differenti. I guasti infatti possono essere dovuti a problemi di natura sia meccanica che elettrica. Secondo l'azienda FLUKE [10] le cause principali di guasti ai motori sono l'isolamento degli avvolgimenti e l'usura dei cuscinetti, i quali possono essere causati da diversi fattori.

Riportato in *figura 2.7* uno schema raffigurante i diversi tipi di guasto:



**Figura 2.7:** Elenco cause difetti [9]

Le varie cause possono essere raggruppate in quattro categorie diverse:

- Power Quality;
- Trasmissioni a frequenza variabile;
- Cause meccaniche;

- Fattori di installazione errata.

Volendone dare una breve descrizione:

1. Tensione transitoria: Causata da fonti interne o esterne, rappresenta una variazione in ampiezza e frequenza che può portare all'erosione dell'isolamento degli avvolgimenti del motore. Difficile da rilevare a causa della rarità delle occorrenze ma possiede una criticità elevata;
2. Squilibrio di tensione e Distorsione armonica: Le armoniche sono le fonti di tensione o corrente indesiderate che alimentano gli avvolgimenti del motore. L'energia in eccesso che si viene a creare circola negli avvolgimenti causando un aumento della temperatura operativa che riduce l'efficienza del motore e deteriora l'isolamento;
3. Riflessioni sulla trasmissione dei segnali PWM in uscita: Dovute a installazioni non corrette, causano dei difetti nell'isolamento degli avvolgimenti e possono portare a tempi di inattività;
4. Corrente Sigma: Correnti vaganti che circolano a seguito di vari fattori (tensione, capacità, induttanza) e che causano calore in eccesso negli avvolgimenti;
5. Sovraccarichi operativi: Si verificano quando un motore è sottoposto a un carico eccessivo. Elementi che caratterizzano il sovraccarico del motore sono un assorbimento eccessivo di corrente, un valore di coppia insufficiente e il surriscaldamento. Quasi il 30
6. Disallineamento: Un disallineamento dell'albero trasmetterà forze cicliche dannose lungo l'albero e nel motore, portando a eccessiva usura del motore e aumentando il carico meccanico apparente. Inoltre, il disallineamento può alimentare le vibrazioni sia nel carico sia nell'albero motore. Esistono disallineamenti angolari, paralleli e composti;
7. Sbilanciamento dell'albero: Lo sbilanciamento è la condizione di un componente rotante in cui il centro della massa non si trova sull'asse di rotazione. In altri termini, è presente un disequilibrio nel peso da qualche parte sul rotore. Porta ad usura prematura dei componenti di trasmissione meccanica;
8. Allentamento dell'albero: Dovuto ad un eccessivo gioco tra le parti può causare vibrazioni ed usura;

9. Usura dei cuscinetti: Causata da diversi tipi di fattori, come carichi maggiori, scarsa lubrificazione, usura, errato montaggio. Una volta verificatosi il guasto al cuscinetto, si viene a creare un effetto a catena che contribuisce ai guasti al motore. Il 13% dei guasti al motore sono causati da cuscinetti danneggiati e più del 60% dei guasti meccanici di uno stabilimento sono causati da usura dei cuscinetti. La criticità di questo problema è quindi molto elevata;
10. Instabilità: L'instabilità si verifica quando i piedini di montaggio di un motore o componente non sono posizionati in modo omogeneo o la superficie di montaggio non è a livello. Ciò induce disallineamenti e irregolarità nel funzionamento del motore;
11. Stress alle tubazioni: Lo stress alle tubazioni si riferisce alla condizione in cui alcune sollecitazioni, pressioni o forze che agiscono sul resto delle attrezzature situate nei pressi del motore elettrico si trasferiscono su di esso. Ciò causa stress sui componenti;
12. Tensione dell'albero: Quando la tensione dell'albero motore supera la capacità isolante della pasta per cuscinetti, possono verificarsi scariche elettriche verso il cuscinetto esterno, provocando corrosioni e scanalature nelle piste del cuscinetto. La tensione dell'albero è presente solo quando il motore è alimentato e in rotazione.

### 3 Ambito normativo

Prima di passare all'analisi delle tecniche utilizzate nel campo della manutenzione è opportuno considerare un aspetto fondamentale, ossia quello normativo. Esistono infatti delle linee guida da seguire in modo da poter effettuare una corretta analisi dei macchinari industriali.

È stata pubblicata nel 2018 la normativa ISO 17359, che tratta delle procedure generali che devono essere considerate quando si intendono utilizzare delle strategie di “Condition Monitoring”. La norma è indirizzata ad ogni tipo di macchina, questo include ovviamente anche i motori elettrici. Al suo interno vengono descritti possibili difetti, parametri da monitorare e metodologie da seguire per poter implementare ed avere una corretta strategia di monitoraggio delle condizioni di funzionamento della macchina [13].

Naturalmente vi sono anche normative più specifiche riguardanti l'analisi del solo motore elettrico. Queste analisi riguardano sia la parte legata al monitoraggio tramite lo studio delle vibrazioni, il cui aumento può essere causato da particolari guasti al motore, specialmente quelli di tipo meccanico, sia la parte riguardante i parametri elettrici del motore, la cui improvvisa variazione potrebbe essere riconducibile alla nascita di difetti nel circuito elettrico.

Vengono adesso analizzate alcune delle normative riguardanti i motori elettrici.

## 3.1 Analisi vibrazionale

### 3.1.1 ISO 13373-9:2017

Per quanto riguarda l'analisi vibrazionale del motore elettrico è stata pubblicata nel 2017 la normativa ISO 13373-9:2017(E). Questa si propone come una guida da utilizzare quando si vuole svolgere un controllo delle vibrazioni su motori elettrici, tra cui quelli ad induzione utilizzati specialmente nell'ambito industriale. La normativa include alcune tabelle contenenti i possibili guasti rilevabili in un motore ed anche dei flowcharts che forniscono indicazioni sulla corretta procedura da seguire per una corretta analisi.

Come prima cosa viene spiegato come ricavare i dati necessari per eseguire l'analisi.

Per ottenere una misura delle vibrazioni possono essere utilizzati due diverse tipologie di trasduttori:

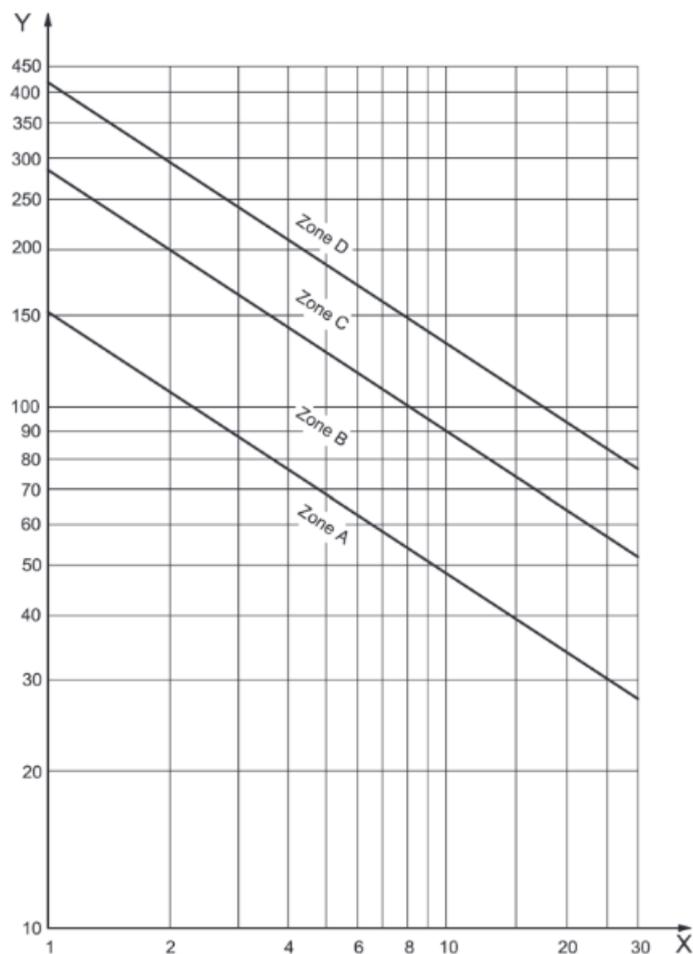
- Sonde induttive o capacitive, senza contatto, utilizzate su alberi rotanti;
- Accelerometri o trasduttori di velocità su parti non rotanti, ad esempio alloggiamenti di cuscinetti.

È importante utilizzare il giusto trasduttore e il giusto tipo di analisi per la diagnostica di specifici guasti. Per valutare l'intensità delle vibrazioni che vengono rilevate esistono anche standard internazionali, come ad esempio l'ISO 7919, ISO 10816 e ISO 20816. I valori riferiti alle vibrazioni, generalmente accelerazioni, che vengono rilevati devono essere confrontati con questi standard. In questo modo è possibile verificare se oltrepassano dei valori di soglia limite definiti, in modo da valutare la possibile presenza di guasti alla macchina.

Per dare un'idea di ciò viene sotto riportato un grafico estratto dalla normativa ISO 7919, raffigurante delle zone (A, B, C, D) che delimitano la massima vibrazione che può essere rilevata su un albero rotante nei pressi dei cuscinetti. Le zone sono state definite tramite studi ed esperienze internazionali. Ad esempio, le vibrazioni misurate su di un nuovo macchinario ricadono tipicamente nelle prima zona, detta zona A, definita da valori bassi se paragonata, al contrario, con le vibrazioni tipiche della zona D, le quali presentano una gravità tale da portare, in breve tempo, a seri danni alla macchina. Per quanto riguarda le zone situate nel mezzo abbiamo la B e la C, la prima si riferisce a macchine con vibrazioni accettabili per operazioni a lungo termine, la seconda invece a macchine che non possono essere adoperate ancora per molto tempo, quindi

richiedono azioni di manutenzione al più presto.

Riportato in *figura 3.1* il grafico che mostra la delimitazione delle zone in base alla velocità di rotazione dell'albero:



**Figura 3.1:** FiguraA.1-Valori massimi raccomandati per lo spostamento di alberi in base alla velocità di rotazione [16]

In *figura 3.1*:

- X spostamento picco a picco delle vibrazioni dell'albero, relativo al cuscinetto ( $\mu m$ );
- Y massima velocità operativa dell'albero x 1000 ( $r/min$ ).

Tornando alla norma ISO 13373, i parametri che possono influenzare le vibrazioni del motore e che quindi devono essere acquisiti per poter eseguire una migliore valutazione delle condizioni della macchina, sono:

- Velocità di rotazione;
- Carico;
- Orientamento del motore (verticale o orizzontale);
- Configurazione di montaggio;
- Temperatura.

Anche altri fattori come la posizione relativa del motore rispetto ad altre macchine, le vibrazioni indotte da altri macchinari e l'ambiente in cui viene installato devono essere considerati durante le analisi, in quanto possono andare ad influire sul risultato finale.

La normativa viene divisa in varie sezioni. La prima fornisce delle tabelle riguardanti i difetti che possono causare un eccessivo aumento di vibrazioni nel motore. La seconda tratta della metodologia da seguire e delle tecniche usate per l'analisi vibrazionale, quali ispezione visiva, analisi spettrale, analisi di fase, analisi ODS (analisi della forma di deflessione operativa). La terza infine fornisce degli esempi di casi studiati.

Più nel dettaglio abbiamo che la prima parte (Annex A) tratta dell'approccio sistematico all'analisi vibrazionale dei motori elettrici tramite le tabelle di difetti. Non vengono però considerati nelle tabelle i problemi causati da montaggio inadeguato del motore o problemi dei cuscinetti, che vengono invece trattati nella ISO 13373-3:2015.

Viene riportato in *figura 3.2* un estratto della normativa per dare un'idea della struttura della tabella:

Table A.1 — Fault table for vibration analysis of electric motors

Defect	Measurement conditions under which vibration change occurs	Initial rate of change of vibration amplitude	Major frequency component of changed vibration amplitude and phase angles	Subsequent behaviour of vibration with time	Effect on resonance speed	Effect of cutting power	Repeatability	Comments
Loose stator coils (synchronous motors)	Usually gradually develops with time	Slow rate of change	(Number of stator coils) times (1× rotational speed) with 1× rotational speed side-bands	Magnitudes increase with time	None	Immediate drop in vibration magnitudes	Yes	Unlikely to occur if stator winding is global vacuum pressure impregnated
Bent shaft extension	Usually after failure of driven equipment, or if high radial load is imposed	Fast rate of change	Mainly 1× rotational speed, but exhibit 2× supply frequency and modulation of this at 2× slip frequency in 2-pole squirrel-cage motors if bent shaft leads to non-uniform air gap	If due to high radial load on shaft extensions can increase with time and vary with load	None	Some initial drop in the 2× supply frequency component, but then slowly increases with time	Magnitudes can change with load and temperature	Can be confirmed by total indicated runout measurement on shaft extension
Rotor running off magnetic centre	After motor installation, or axial realignment with driven equipment	Depends on how far rotor is off its axial magnetic centre	High axial 1×, 2× or 3× rotational speed frequency with much lower radial vibration	Can change with load	None	Immediate drop in vibration magnitudes	Magnitudes can change with load and temperature	Higher magnitudes on motors with radial cooling ducts on stator and rotor

Figura 3.2: Tabella A.1 norma [12]

Per ogni difetto riportato vengono elencati:

- Condizioni di misura sotto cui avviene un cambio delle vibrazioni;
- Tasso di variazione iniziale dell'ampiezza della vibrazione;
- Componente principale in frequenza della variazione dell'ampiezza e degli angoli di fase;
- Conseguente comportamento della vibrazione nel tempo;
- Effetto sulla velocità di risonanza;
- Effetto della perdita di potenza;
- Ripetibilità;
- Commenti.

Viene così offerta una panoramica generale dei possibili difetti che possono essere riscontrati e degli effetti che essi generano.

La seconda parte (Annex B) contiene un flowchart che mostra la metodologia da seguire per l'analisi delle vibrazioni nei motori elettrici. Vi è una prima parte che indica come dare inizio alla procedura di analisi, in seguito vengono riportate due diverse metodologie che dipendono dalla frequenza predominante. Oltre al flowchart, la seconda parte descrive anche le diverse analisi che dovrebbero essere svolte sul motore elettrico e quando è opportuno utilizzarle, facendo riferimento ai vari steps mostrati nel flowchart.

L'analisi dei problemi del motore deve prevedere in prima battuta un'analisi visiva, segue un'analisi spettrale e un test di risonanza. Inoltre, se ritenuto necessario, si può anche procedere con l'analisi della forma d'onda, analisi di fase e ODS (analisi della forma di deflessione operativa).

Viene riportato in *figura 3.3* il primo flowchart, riguardante l'inizio della procedura di analisi:

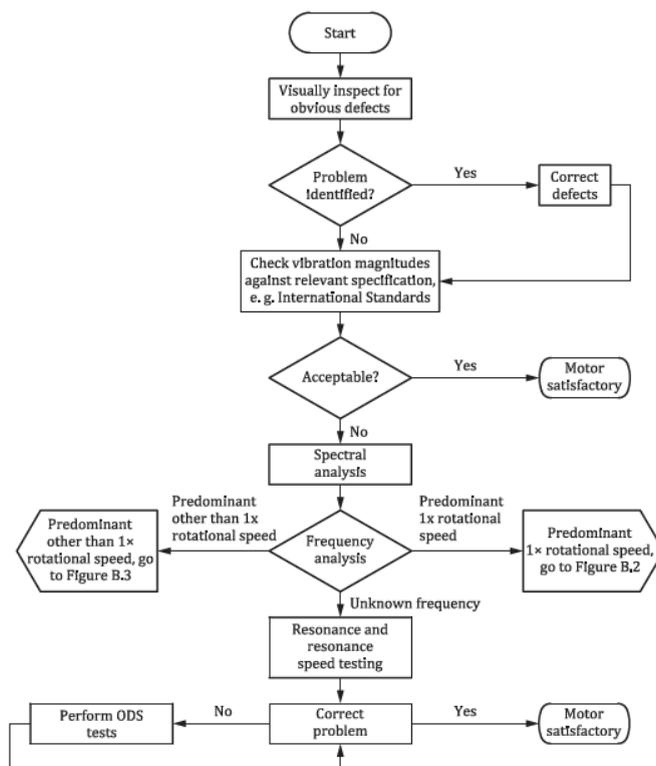


Figure B.1 — Start procedure

Figura 3.3: Flowchart metodologia norma [12]

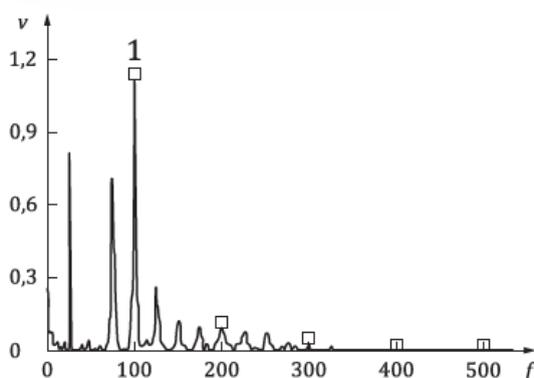
Come si può vedere, la metodologia viene divisa in vari step sequenziali:

1. Si inizia con un'ispezione visiva per individuare la presenza di difetti che non richiedono ulteriori analisi, come ad esempio errori nel montaggio;
2. Se non si trova alcuna causa al problema si esegue un'analisi delle vibrazioni;
3. Segue un'analisi spettrale, analisi in frequenza ed un test per la risonanza (per frequenze di cui non si conosce la provenienza);
4. Se il problema non è ancora stato risolto si procede con un ODS;
5. Si continua ad eseguire l'ODS fino alla correzione del problema e al ritorno del motore in condizioni di lavoro soddisfacenti.

Se l'analista seguendo la metodologia sopra descritta non riesce ancora a capire quale sia la causa del problema, si dovrebbe invitare un esperto per analizzare il caso in questione. In questo caso è l'azienda che decide a chi rivolgersi per avere una consulenza.

La parte successiva (Annex C) riporta degli esempi commentati di problemi legati alle vibrazioni nei motori elettrici.

Ne vengono riportati alcuni in *figura 3.4* e *figura 3.5*:

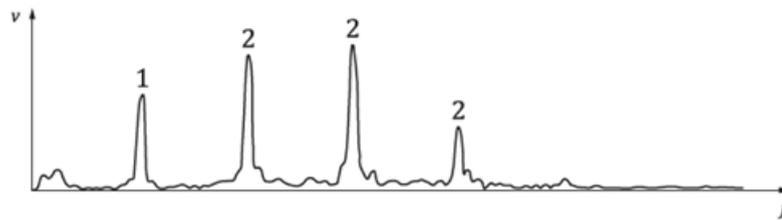


**Figura 3.4:** Vibrazioni eccessivi in un motore asincrono [12]

In *figura 3.4*:

- $f$  frequenza in ( $Hz$ );
- $v$  r.m.s intensità di vibrazione in ( $mm/s$ );
- 1 vibrazione a  $100 Hz$ .

Come si può notare in *figura 3.4* si ha un'elevata intensità di vibrazioni nel motore preso in esame, il quale risulta essere un motore a induzione a gabbia di scoiattolo da 75 kW, 4 poli 50 Hz che aziona una ventola. Per analizzare il problema sono stati utilizzati dei grafici dello spettro delle vibrazioni ed è stato individuato un picco alla frequenza di 100 Hz. Tramite l'analisi della firma di corrente ne è stata poi individuata la causa che risulta essere un problema nell'eccentricità del traferro. Correggendo il problema i valori diventano accettabili, il guasto è quindi stato risolto.



**Figura 3.5:** Spettro di frequenza che mostra la componente a 120 Hz e multipli [12]

In *figura 3.5*:

- $f$  frequenza ;
- $v$  velocità di vibrazione;
- 1 componente a  $120 Hz$ ;
- 2 multipli (componeti a  $240 Hz, 360 Hz, 480 Hz$ ).

Dalla *figura 3.5* si può facilmente vedere che per il motore preso in considerazione, un motore a 200kW 12 poli alimentato a 60 Hz, le componenti rappresentate presentano elevati valori di velocità. Questo sta ad indicare difetti negli avvolgimenti dello statore. Tramite l'analisi dello spettro è stato quindi possibile rilevare il guasto. Da notare che i grafici riportati sono esplicativi del fenomeno ma non rappresentano la situazione reale. Infatti, in un grafico reale si avrebbero molte più oscillazioni di frequenza dovute a disturbi o rumore di fondo.

### 3.1.2 Normativa cuscinetti ISO 10816-3:2009+A1:2017

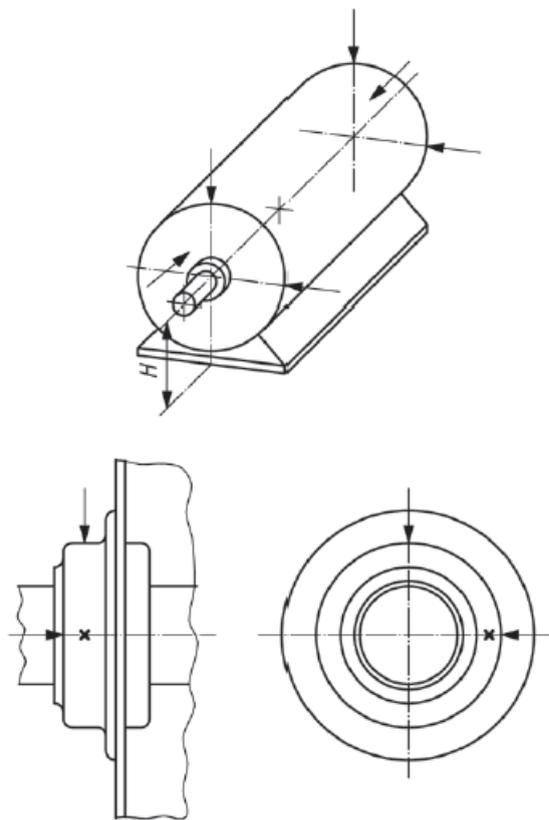
Altra normativa riguardante l'analisi vibrazionale è la ISO 10816-3:2009+A1:2017 che sostituisce la vecchia ISO 10816-3:2009, che è stata ritirata. La normativa offre le linee guida per la valutazione delle vibrazioni di vari tipi di macchine, effettuando la misurazione su parti rotanti o non rotanti. Nel particolare questa parte della normativa tratta delle misure effettuate su cuscinetti, sedi cuscinetti e alloggiamenti di macchine industriali (quest'ultimo quando le misure sono effettuate in "situ"). Tra le macchine trattate in questa parte della ISO 10816 sono compresi i motori elettrici di ogni tipologia. Le procedure seguite in questo documento seguono le linee guida della ISO 20816-1, altro standard che si occupa di fornire le linee guida per la misura delle vibrazioni meccaniche.

Secondo la normativa le apparecchiature per la misura devono avere un range di frequenza che va dai 10 ai 1000 Hz, secondo un altro standard che è la ISO 2954. Al suo interno vengono indicati i requisiti per gli strumenti che misurano l'intensità delle vibrazioni. Inoltre, bisogna prestare attenzione durante la misurazione. Affinché lo strumento di misura sia influenzato da fattori esterni come:

- Variazioni di temperatura;
- Campi magnetici;
- Campi sonori;
- Variazioni dell'alimentazione;
- Lunghezza del cavo del trasduttore;
- Orientamento del trasduttore (com'è stato effettuato il montaggio).

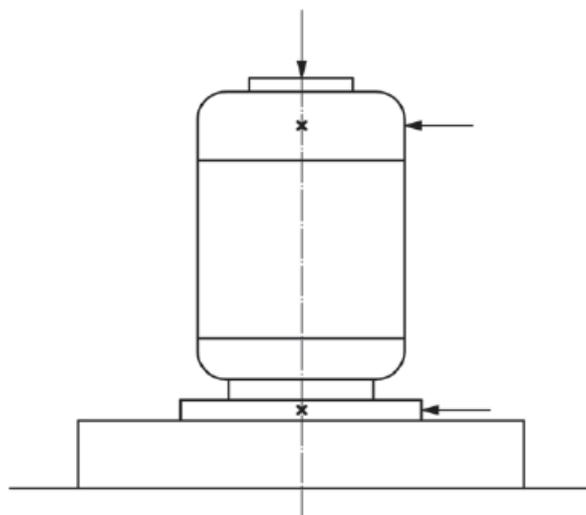
Il montaggio deve inoltre essere eseguito in modo tale da non falsare la misura. Per questa ragione le misure vanno effettuate su parti della macchina che sono facilmente accessibili e che permettono di rappresentare in modo ragionevole le vibrazioni dei cuscinetti, senza includere effetti di risonanza o amplificazioni dovute alla struttura.

Vengono a questo scopo fornite indicazioni sul montaggio dei trasduttori sulla struttura del motore. Riportate in *figura 3.6* e *figura 3.7* le posizioni di installazione:



**Figura 3.6:** Estratto della Figura 1 della norma: Punti di misura per macchina orizzontale [14]

In *figura 3.6* viene mostrata la posizione del trasduttore per misure su macchina montata orizzontalmente. I trasduttori possono essere piazzati in qualsiasi posizione angolare sulla sede dei cuscinetti, sono però preferite direzioni verticali e orizzontali per le macchine montate orizzontalmente.



**Figura 3.7:** Figura 2 della norma: Punti di misura per macchina verticale [14]

In *figura 3.7* si mostra che per le macchine montate verticalmente la posizione che fornisce la massima lettura delle vibrazioni, di solito quella nella direzione dell'asse elastico, deve essere o verticale o orizzontale.

In qualsiasi caso la posizione di misura deve essere registrata, insieme alle misure che ne derivano. Generalmente sono richieste due punti di misurazione radiali ortogonali per ogni cuscinetto, per avere un'adeguata sensibilità alle forze dinamiche della macchina. Può essere usato un trasduttore singolo nel caso in cui è risaputo che darà delle informazioni adeguate sull'intensità delle vibrazioni, ma bisogna comunque prestare attenzione.

La normativa fornisce anche indicazioni sul tipo di monitoraggio da eseguire su una particolare macchina e in quali particolari condizioni è preferito svolgerlo. Per grandi macchine o macchine le cui condizioni di funzionamento sono critiche per l'azienda è meglio usare strumenti per un monitoraggio continuo on-line, mentre per macchine di piccola taglia è sufficiente effettuare delle misure periodiche in modo da individuare eventuali difetti. Queste misurazioni devono essere effettuate quando il rotore ed i cuscinetti hanno raggiunto il regime di temperatura e in specifiche condizioni di velocità e carico. Se la macchina funziona a velocità variabile le misure devono essere effettuate in condizioni che durano almeno un certo periodo di tempo. Se però la misura risulta poco veritiera, come ad esempio troppo grande, si deve pensare all'in-

fluenza di vibrazioni esterne che vengono trasmesse alla macchina. Si devono quindi effettuare delle misure a macchina spenta per determinare il grado dell'influenza esterna.

A questo punto della ISO 10816 viene fatta una classificazione sulla gravità delle vibrazioni in base al tipo di macchina, potenza nominale e flessibilità dei supporti. In base al tipo di macchine e alla potenza nominale vengono divise in Gruppo 1 e Gruppo 2, mentre per quanto riguarda i supporti in rigidi e flessibili.

In seguito, viene descritta la procedura di valutazione dei due criteri principali per la determinazione delle vibrazioni sulle vari classi di macchine. Questi criteri sono:

- **Intensità delle vibrazioni:** Questo criterio riguarda la definizione dei limiti per l'ampiezza delle vibrazioni in modo coerente con i carichi dinamici sopportabili dai cuscinetti. Considera anche la massima vibrazione trasmissibile accettabile tramite la struttura della macchina. L'intensità di vibrazione massima osservata su ciascun cuscinetto viene valutata rispetto alle zone di valutazione per la classe di supporto. Le zone in questione sono quelle già descritte in precedenza parlando della ISO 7919, altro standard internazionale.

Vengono riportate in *figura 3.8* e *figura 3.9* due tabelle che definiscono i limiti della zone in base al tipo di macchina;

Support class	Zone boundary	r.m.s. displacement	r.m.s. velocity
		$\mu\text{m}$	mm/s
	A/B	29	2,3
Rigid	B/C	57	4,5
	C/D	90	7,1
	A/B	45	3,5
Flexible	B/C	90	7,1
	C/D	140	11,0

**Figura 3.8:** Tabella limiti zone per macchine del Gruppo 1 [14]

Support class	Zone boundary	r.m.s. displacement	r.m.s. velocity
		$\mu\text{m}$	$\text{mm/s}$
	A/B	22	1,4
Rigid	B/C	45	2,8
	C/D	71	4,5
	A/B	37	2,3
Flexible	B/C	71	4,5
	C/D	113	7,1

**Figura 3.9:** Tabella limiti zone per macchine del Gruppo 2 [14]

Da notare che le tabelle riportate sono valide solo per macchine in condizioni stazionarie, non sono applicabili per condizioni di transitorio.

- **Variazioni nell'intensità delle vibrazioni:** Questo criterio fornisce una valutazione di un cambiamento nell'intensità della vibrazione da un valore di riferimento stabilito in precedenza. Potrebbe verificarsi un cambiamento significativo nell'intensità della vibrazione che richiede un'azione correttiva, anche se la zona C (macchine che sono insoddisfacenti per operazioni a lungo termine e che richiedono dei rimedi) del Criterio 1 non è stata raggiunta. Tali cambiamenti possono essere istantanei o progressivi nel tempo e possono indicare un danno incipiente o qualche altra irregolarità. Il Criterio 2 è specificato sulla base della variazione dell'intensità della vibrazione a che si verifica in condizioni operative stazionarie. Le condizioni operative allo stato stazionario devono essere interpretate in modo da includere piccoli cambiamenti nella potenza della macchina o nelle condizioni operative;

La normativa continua con la definizione dei limiti operativi e di operazioni aggiuntive che è possibile aggiungere ai criteri citati.

## 3.2 Analisi elettrica

Nel campo dei parametri elettrici è stata pubblicata nel 2013, ed è ancora corrente la normativa ISO 20958:2013(E), riguardante il Condition Monitoring e la diagnostica di macchine dal punto di vista dell'analisi della firma elettrica. È applicabile ai motori ad induzione trifase, quindi del tipo utilizzato nell'ambito industriale.

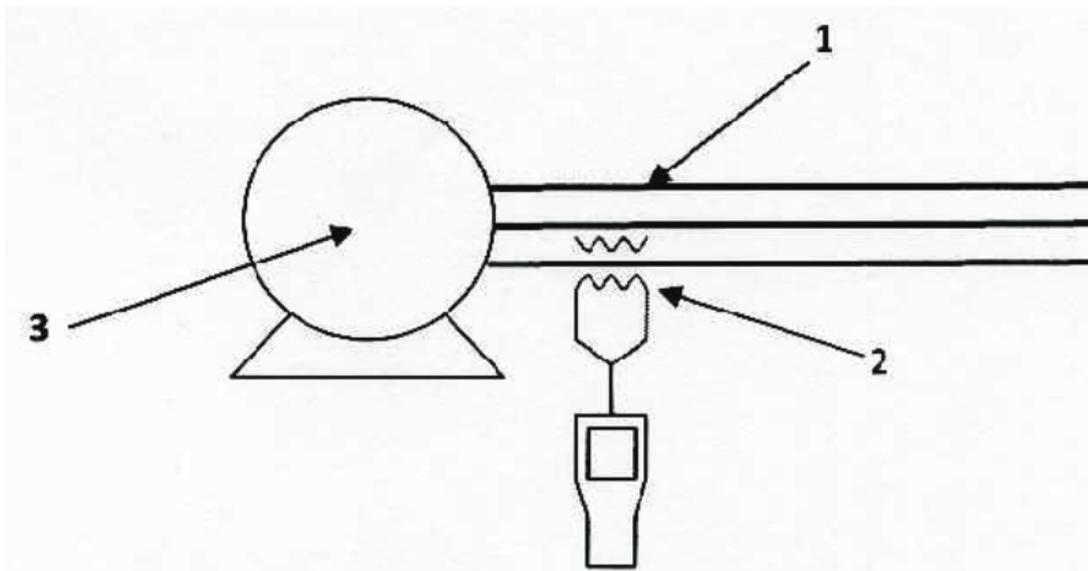
Alcune ricerche hanno dimostrato che la parti più vulnerabili di un motore ad induzione sono i cuscinetti e gli avvolgimenti di statore e rotore. Il motivo dell'applicazione della manutenzione predittiva a questi tipi di motore è quello di accertare l'integrità del motore e avvertire per tempo gli addetti alla manutenzione nel caso di possibili guasti. La normativa tratta appunto di come fare ciò tramite l'uso della firma elettrica. Al suo interno vengono descritte diverse tecniche che è possibile utilizzare per individuare eventuali problemi del motore.

La prima tecnica che viene descritta, ad esempio, è l'analisi della corrente di statore, la quale, essendo influenzata anche da flussi d'aria e corrente di rotore permette di rilevare problemi nel rotore. Questa è tra le tecniche maggiormente utilizzate nel campo del monitoraggio dei motori elettrici. Tramite il suo utilizzo è possibile rilevare:

- Barre di rotore rotte;
- Avvolgimenti di rotore fusi con vuoti interni;
- Eccessiva eccentricità del traferro;
- Difetti negli elementi volventi dei cuscinetti;
- Disallineamenti;
- Avvolgimenti di statore in corto.

Tra quelli elencati i più dannosi sono i problemi alla gabbia del rotore, eccentricità del traferro e problemi ai cuscinetti (questi possono anche essere identificati da un monitoraggio delle vibrazioni). La tradizionale CSA (current signature analysis) viene eseguita online, la corrente è analizzata tramite il suo contenuto in frequenza misurandolo tramite un trasformatore di corrente agganciato ad un cavo di alimentazione del motore.

Quanto detto viene illustrato in *figura 3.10*:



**Figura 3.10:** Rilevamento della corrente per l'analisi elettrica [15]

In *figura 3.10*:

1. Rappresenta la fase;
2. Sonda di corrente;
3. Motore a induzione;

Vengono descritti i difetti della gabbia statorica, in particolare dal punto di vista delle frequenze che si generano in seguito a tali difetti. Infatti, frequenze specifiche (vedi *equazione 3.1*) nella corrente indicano la presenza di avvolgimenti del rotore difettosi durante il normale funzionamento del motore. Questo tipo di rilevamento può anche essere confermato tramite l'analisi delle vibrazioni dei cuscinetti. Si può dire che la corrente che scorre nello statore dipenda anche dalla corrente indotta nello statore dal campo magnetico del rotore, quindi è possibile utilizzare lo statore per il rilevamento dei problemi del rotore. È possibile effettuare quest'analisi misurando le componenti della corrente a frequenze diverse da quella di alimentazione, tramite un analizzatore di spettro di frequenza ad alta risoluzione. Le componenti dovute a problemi del rotore sono viste come bande laterali alla frequenza fondamentale.

Queste componenti sono date dalla *formula 3.1*:

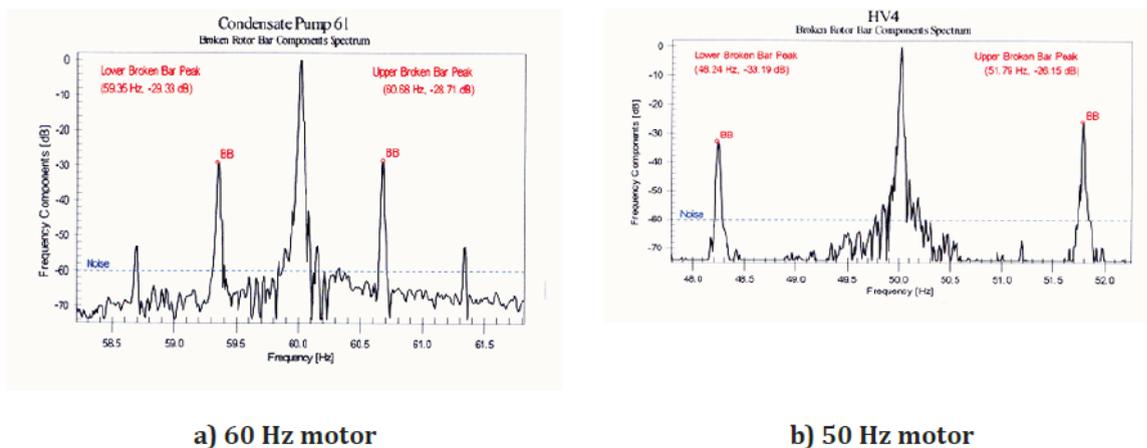
$$f = (1 \pm 2ks)f_1 \quad (3.1)$$

Dove:

- s scorrimento del rotore;
- $f_1$  frequenza di alimentazione;
- k pari a 1,2,3,etc.

Le correnti del rotore in un avvolgimento a gabbia producono un campo magnetico trifase efficace, che ha lo stesso numero di poli del campo dello statore, ma ruota alla frequenza di scorrimento rispetto alla rotazione del rotore. Se si verifica un'asimmetria della corrente del rotore, si ha un campo rotante all'indietro (cioè più lento). L'asimmetria si ha se una o più barre del rotore sono rotte o se ci sono rotture in un anello di cortocircuito che impediscono il flusso di corrente al loro interno.

Riportati in *figura 3.11* due grafici relativi all'analisi di corrente in motori con barre di rotore rotte:



**Figura 3.11:** Analisi della firma di corrente di motori con barre rotte [15]

La corrente viene analizzata con un analizzatore di spettro o un'unità di elaborazione del segnale digitale, che producono grafici simili a quelli mostrati in

*figura 3.11*, che fornisce esempi di motori a 60 Hz e 50 Hz con barre rotoriche rotte. Tipicamente, le bande laterali sono solo da 0,3 a 3 Hz dalla componente di frequenza di alimentazione, che risulta essere molto grande rispetto alle altre. Le correnti di banda laterale sono tipicamente da 100 a 1000 volte inferiori alle correnti della frequenza di alimentazione principale. Se invece ci sono delle componenti che risultano avere un'ampiezza maggiore, allora potrebbero esserci problemi con le barre rotoriche. Inizialmente questa tecnica forniva false indicazioni o non rilevava affatto problemi al rotore, ma grazie ai miglioramenti nella teoria, nel software e negli analizzatori di spettro e nella risoluzione del processore del segnale digitale adesso la tecnica risulta molto affidabile.

Di seguito sono descritti i difetti legati all'eccentricità del traferro.

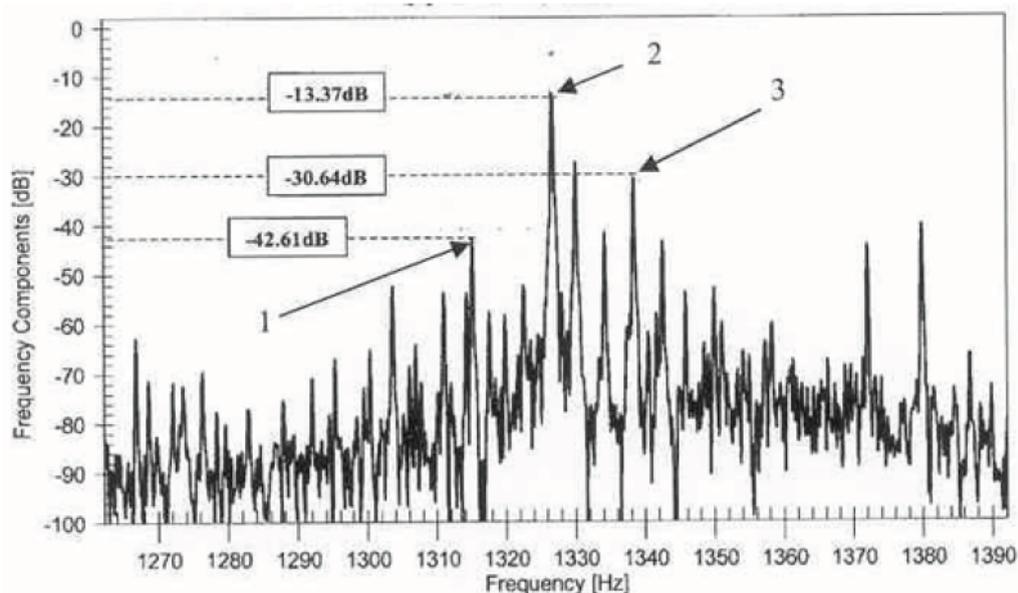
Ancora una volta vengono riportate le frequenze indicative del difetto, calcolabili tramite la *formula 3.2*:

$$f_{ecc} = f_1 \left( R_s \frac{1-s}{p} \pm \eta_{ws} \right) \pm f_1 \left( \frac{1-s}{p} \right) \quad (3.2)$$

Dove:

- $f_{ecc}$  componente in frequenza relativo all'eccentricità del traferro (Hz);
- $f_1$  frequenza di alimentazione (Hz);
- $R_s$  numero di slot del rotore, pari al numero di barre rotoriche;
- $\eta_{ws}$  pari a 1,3,5,etc., [1 corrisponde alla componente fondamentale della forma d'onda della forza magnetomotrice (m.m.f.), 3 corrisponde alla terza armonica,etc.];
- $s$  scorrimento del rotore;
- $p$  numero di poli.

Viene altresì riportato, in *figura 3.12*, un esempio di spettro che mostra il difetto:



**Figura 3.12:** Difetti al traferro in motore elettrico [15]

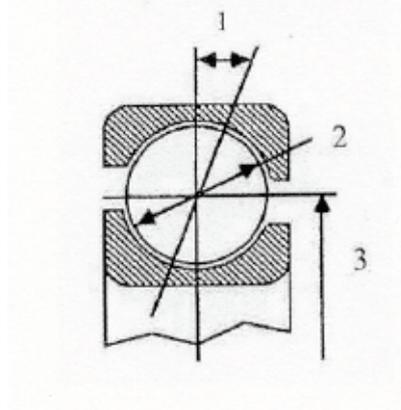
Per quanto riguarda i cuscinetti vengono ancora una volta riportate le frequenze tipiche di difetti che possono generare. Gli elementi rotanti nei cuscinetti producono delle componenti in frequenza particolari, in funzione della dimensione del cuscinetto e del tipo e posizione del difetto. Generalmente questi difetti si trovano nelle piste esterne, interne e sugli elementi volventi (sfere ad esempio).

Viene riportata in *figura 3.13* una tabella contenente le frequenze per l'individuazione di detti difetti:

Bearing defect location	Defect frequency
Ball	$f_{rb} = (D_{pit}/D_{ball})f_{rm} [1 - (D_{ball}/D_{pit} \cos\beta)^2]$
Outer race	$f_{ro} = (n/2) f_{rm} [1 - (D_{ball}/D_{pit} \cos\beta)]$
Inner race	$f_{ri} = (n/2) f_{rm} [1 + (D_{ball}/D_{pit} \cos\beta)]$

**Figura 3.13:** Tabella 1 da norma contenente frequenze tipiche dei difetti dei cuscinetti [15]

Per dare meglio un'idea dei valori da inserire nelle formule viene riportato in *figura 3.14* anche uno schema:



**Figura 3.14:** Dimensioni cuscinetto [15]

In *figura* 3.14:

1. angolo di contatto  $\beta$ ;
2. diametro sfera  $D_{ball}$ ;
3. diametro di pitch  $D_{pit}$ .

Oltre ai precedenti, che sono i principali problemi, nella normativa viene descritto come rilevare altri problemi meccanici come ad esempio il disallineamento dell'albero.

Dopo l'analisi della corrente di statore, altre tecniche che vengono descritte sono:

- L'analisi di corrente elettrica, tensione e potenza: Se oltre alla corrente si conosce anche la tensione di alimentazione e quindi, tramite il loro prodotto, la potenza è possibile identificare prima difetti legati al rotore e allo statore;
- Analisi del flusso magnetico: Analizzando lo spettro del flusso è possibile identificare la presenza di difetti relativi sia allo statore che al rotore;
- Analisi della scarica parziale: È possibile prevedere un guasto elettrico dello statore dalla misura della scarica parziale. Questa aumenta con

la graduale degradazione dell'isolamento degli avvolgimenti e indica la presenza di piccole scariche elettriche nello statore;

- Test delle interferenze elettromagnetiche: Questa tecnica può rilevare fenomeni di scarica parziale dovuti a difetti nell'isolamento;
- Analisi della corrente del rotore: È un parametro meno conveniente della corrente di statore, anche perché non è facilmente misurabile, al contrario della corrente statorica. Viene usata solo in macchine a rotore avvolto;
- Analisi della tensione dell'albero: Tensioni dell'albero possono essere causate da distorsioni del flusso magnetico, queste portano alla nascita di correnti sull'albero che possono risultare dannose per i cuscinetti. Comunque il monitoraggio di tali tensioni non è una tecnica comune, solo recenti sviluppi hanno dimostrato l'utilità di questo metodo.

## 4 Brevetti esistenti

Prima di affrontare l'analisi del mercato corrente vengono analizzati gli studi e le scoperte svolte fino ad oggi nel campo del monitoraggio dei motori elettrici. Nel corso degli anni infatti sono state svolte varie ricerche su quale fosse la metodologia da adottare per controllare nel miglior modo il funzionamento delle macchine industriali, come ovviamente i motori elettrici. Questo per evitare, come già detto, gravi guasti e possibili fermi macchina.

Così facendo sono stati rilevati dei parametri che, più di altri, forniscono informazioni sull'effettivo stato di salute della macchina. Ad esempio, alcuni dei parametri più ricorrenti sono: la corrente che circola nel motore, la temperatura degli avvolgimenti (soprattutto nello statore), la tensione di alimentazione, la coppia fornita dal motore, la velocità di rotazione dell'albero. Bisogna precisare che, nel caso di guasti del motore, si parla principalmente di guasti di natura elettrica e non meccanica. Questo perché, essendo macchine rotanti, non vi è un elevato rischio di rottura dei componenti, fatta eccezione per i supporti e quindi per i cuscinetti. In questo caso però sarebbe più opportuno parlare di usura del componente piuttosto che di rottura, inoltre risulterebbe utile monitorare anche le vibrazioni generate durante il funzionamento, così da rilevare efficacemente questo tipo di guasto. Essendo a conoscenza di ciò, in molti hanno ricercato metodi, tecniche e inventato dispositivi per poter monitorare tali tipi di difetti tramite l'uso dei suddetti parametri.

Partendo già dagli anni 90', fino ad oggi, è stato pubblicato un enorme numero di brevetti e molti di questi presentavano lo stesso obiettivo di base, ossia il monitoraggio delle condizioni del motore attraverso l'analisi dei parametri sopra citati in modo da prevenirne i guasti. Analizzando i vari brevetti è possibile notare una maggioranza di quelli che utilizzano come parametri di riferimento la corrente e la temperatura piuttosto che gli altri parametri. Tramite il controllo dei valori associati alla temperatura e alla corrente è infatti possibile rilevare quelle variazioni, quei cambiamenti nel funzionamento del motore che fanno presupporre un probabile difetto. C'è da dire che oltre ai motori utilizzati nell'ambito puramente industriale, molti brevetti riguardano anche motori elettrici per usi automobilistici o anche domestici. Anche in questo caso, nonostante alle volte vengano considerati altri parametri per il monitoraggio, come ad esempio la velocità di rotazione, vi è la tendenza al controllo degli stessi parametri, ossia corrente e temperatura. Questo da un'indicazione aggiuntiva sulla loro importanza, infatti indipendentemente dall'applicazione sono gli stessi parametri ad essere tenuti in considerazione.

Viene riportata in *figura 4.1* una tabella contenente delle informazioni riguardanti i principali difetti che porterebbero a guasti o fermi del motore, se non vengono adottate le giuste misure preventive. Vengono anche riportati degli esempi di brevetti che potrebbero fornire una metodologia di monitoraggio dei parametri responsabili:

Tipo di guasto del motore	Causa guasto/Parametro da controllare	Brevetto	Tecnica adoperata
Erosione dell'isolamento degli avvolgimenti	Tensioni e correnti transitorie/Corrente avvolgimento, temperatura	Method for the diagnostics of electromechanical system based on impedance analysis [US10310016B2]  System and method for iterative condition monitoring and fault diagnosis of electric machines [US10429419B2]	Ricavare i valori di impedenza da quello delle correnti e confrontarli con valori di soglia  Analisi della firma elettrica (MCSA)
Surriscaldamento del motore	Correnti vaganti, aumento della temperatura/Corrente avvolgimento, temperatura avvolgimenti	Method for monitoring the temperature of a motor winding [WO2020126126A1]  Assembly for monitoring a winding threshold temperature [US2020244063A1]	Misura della temperatura in base al tempo di propagazione di un segnale generato da un dispositivo di monitoraggio della temperatura  Monitoraggio della temperatura finché non raggiunge una certa soglia tramite il rilevamento della corrente
Sovraccarico operativo	Corrente assorbita eccessiva/ Corrente avvolgimento, aumento di temperatura del motore	Method for controlling electric motors, corresponding circuit and computer program product [US2020252021A1]  System and method for electric motor control in a manufacturing environment [WO2020107128A1]	Usare un circuito di riduzione di potenza che limita la potenza fornita al motore elettrico  Limitazione della potenza di alimentazione tramite un relè di sicurezza
Usura dei cuscinetti	Correnti parassite, mancanza lubrificante, scarso isolamento del cuscinetto/Correnti che circolano, livello o stato del lubrificante, stato del cuscinetto, aumento delle vibrazioni	Method for monitoring rolling bearings [US2020264073A1]  Interface module of an electric motor for calculating the service life of a bearing [CN101213436B]	Catturare lo spettro elettromagnetico emesso dall'antenna parassita, formata nel cuscinetto, che viene attivata dalla formazione di scintille nel cuscinetto durante il funzionamento  Interfaccia per monitorare la vita residua dei cuscinetti tramite trasduttori o sensori di temperatura

Figura 4.1: Difetti generali motore elettrico [17]

Altri difetti che possono interessare il motore sono le irregolarità nel traferro, rotture delle barre del rotore, connessioni anomale, albero motore allentato, disallineato o sbilanciato, sollecitazioni esterne che vengono trasmesse al motore.

Come si può notare in *figura 4.1* i parametri di corrente e temperatura sono ricorrenti e vengono quindi indicati in molti brevetti. In alcuni casi, come ad esempio il controllo dei cuscinetti, si dovrebbe tenere conto anche di altri fattori, quali aumento delle vibrazioni, velocità di rotazione dell'albero o problemi di disallineamento per avere un'analisi più accurata di quelle che sono le effettive condizioni del motore. Si è infatti detto che i cuscinetti rappresentano una delle principali fonti di guasto dei motori elettrici e di fermo macchina nelle industrie.

Risulta quindi consigliato, nel caso in cui si voglia monitorare il funzionamento di un motore elettrico, prestare una certa attenzione alla corrente che va ad alimentare il motore e che quindi circola negli avvolgimenti, ed alla temperatura che il motore raggiunge durante il funzionamento.

Per fornire una prova di ciò vengono velocemente riportati alcuni dei brevetti analizzati:

L'analisi della corrente era già presente in un brevetto del 1985 (GB2122749B) [18], in cui la corrente veniva considerata come una quantità da campionare per potere essere poi confrontata con dei valori di riferimento caratteristici di motori in buone condizioni di funzionamento.

Più tardi nel 1996 un altro brevetto (US5578937A) [19] la utilizzava come parametro di riferimento, adoperando poi la MCSA (Motor Current Signature Analysis, tecnica utilizzata anche ai giorni nostri) per rilevare la presenza di eventuali difetti.

Dal 2015 fino al 2018 ci sono state una serie di pubblicazioni su un'applicazione per il controllo dei motori elettrici utilizzati per l'alimentazione di strumenti per pozzi profondi (US10018030B2) [20]. Anche in questo caso veniva utilizzata la corrente del motore per poterne poi valutare il valore di coppia, che viene confrontato con quello di inizio lavoro per poter individuare variazioni riconducibili a difetti o guasti, ad esempio usura dei cuscinetti. Quelli riportati sono solo alcuni dei brevetti pubblicati, con lo scopo di dare un'idea dell'effettiva importanza dello studio della corrente del motore.

Discorso analogo può essere ripetuto per la temperatura del motore. Verso

la metà del 2001 un brevetto (GB2358302A) [21] indicava l'importanza della temperatura, insieme ad altri parametri, in quanto causa del degrado dell'isolamento degli avvolgimenti.

Nel 2004 viene pubblicato un altro brevetto che tratta del monitoraggio tramite sensori della temperatura del motore, per poter controllare e determinare la temperatura degli avvolgimenti (EP1450460A2) [22].

Andando avanti con gli anni troviamo altre pubblicazioni, che arrivano fino al 2020, incentrate sempre sul monitoraggio o la stima della temperatura degli avvolgimenti del motore in modo da prevenire ed evitare condizioni di guasto. In alcuni casi, invece di essere monitorati corrente e temperatura, vengono considerati come parametri di controllo la velocità di rotazione del motore o la coppia trasmessa al carico. Il numero di brevetti che li utilizza è però molto inferiore rispetto ai primi. In relazione a ciò si sconsiglia l'utilizzo di tali parametri per il controllo dei motori. Magari in futuro, con lo sviluppo di nuove tecnologie, sarà possibile ottenere dei buoni risultati in termini di controllo utilizzando anche altri parametri del motore.

#### **4.1 I parametri essenziali per il monitoraggio di un motore elettrico**

Dal confronto di diversi brevetti, come quelli riportati precedentemente, è possibile notare l'utilizzo, quasi sempre, di tecniche che richiedono il confronto dei parametri calcolati, misurati o stimati, con dei parametri di riferimento o di soglia. Questi ultimi vengono associati a delle condizioni di funzionamento in cui il motore non presenta difetti o guasti e quindi funziona correttamente, o per meglio dire è in "buona salute". Questo è valido sia per metodi che utilizzano la corrente come parametro di riferimento sia per quelli che tengono conto della temperatura degli avvolgimenti. In alcuni brevetti vengono tenuti in considerazione entrambi i parametri, ad esempio calcolando la corrente massima ammissibile del motore sulla base della temperatura attuale o viceversa. Considerando quanto detto, quest'ultima tipologia di brevetti sembra la più indicata e la più adatta per il monitoraggio dei motori, tenendo in considerazione più parametri contemporaneamente e fornendo quindi un'informazione più accurata sullo stato di funzionamento del motore.

Per quanto riguarda il monitoraggio dei cuscinetti di supporto dell'albero motore, bisogna tenere conto oltre che della corrente, che potrebbe portare alla generazione di correnti parassite, anche di fattori come lo sporco, mancanza o

stato del lubrificante, vita utile residua.

Le correnti parassite portano alla nascita di danneggiamenti sulle piste o sulle sfere/rulli per elettroerosione, nel caso in cui il cuscinetto non sia opportunamente isolato.

Lo sporco e il cattivo stato del lubrificante generano attriti e quindi aumentano l'usura riducendo la vita utile del cuscinetto, creando quindi la necessità di dover attuare azioni correttive.

## 4.2 Brevetti da tenere in considerazione

Dopo aver trovato i migliori parametri da considerare ai fini del monitoraggio dallo studio di vari brevetti, si passa all'analisi, nel dettaglio, di alcuni brevetti ritenuti validi ai fini del controllo dei motori.

Molto interessante risulta a questo proposito il brevetto “Assembly for monitoring a winding threshold temperature” (US2020244063A1) del 2020 [23], quindi molto attuale. Questo, pensato in particolare per un motore elettrico per ventilatori, propone un metodo per la protezione degli avvolgimenti del motore dai sovraccarichi termici e di monitorarne la temperatura limite. Negli azionamenti e nei motori elettrici è inevitabile che si verifichino perdite di calore, con conseguente aumento della temperatura. Di conseguenza, esiste una temperatura limite superiore che, una volta superata, può portare al danneggiamento del motore, ad esempio a causa del guasto dell'isolamento di un avvolgimento. Questa temperatura dipende dalla classe di isolamento dell'avvolgimento, determinata secondo la DIN 0530. Se l'avvolgimento del motore supera la temperatura consentita, il motore elettrico si danneggerà, comportando eventualmente un guasto dell'intera macchina. Pertanto, è necessaria una determinazione della temperatura dell'avvolgimento per proteggere il motore elettrico dal surriscaldamento.

Nel brevetto “Process for monitoring an electric motor for thermal overloading” (WO93/23904A1) [24], ad esempio, viene descritto un metodo per monitorare un motore elettrico in relazione a un sovraccarico termico, dove lo scopo è di mantenere bassi i costi tecnici. Questo metodo però non tiene conto dei fattori ambientali, che sono anche responsabili del comportamento termico del motore elettrico. Un importante fattore di influenza è la temperatura ambiente.

Altri metodi per la protezione di un motore elettrico dal surriscaldamento richiedono una misurazione della temperatura per mezzo di un sensore di temperatura, che è installato principalmente nell'avvolgimento del motore, come

ad esempio nel brevetto “Device for monitoring electric motor for thermal overload, produces corrected temperature signal depending on past output of temperature sensor” (DE19939997A1) [25].

I dispositivi e i metodi descritti nelle tecniche precedenti presentano una serie di inconvenienti, che si traducono in problemi nella pratica. Quando si utilizza un sensore di temperatura, è necessario un adeguato strato isolante tra quest’ultimo e l’avvolgimento per l’isolamento elettrico. Allo stesso tempo, questo strato isolante costituisce un isolamento termico, per cui soprattutto in caso di sovraccarico da correnti elevate si verifica una differenza di temperatura tra la porzione elettricamente attiva dell’avvolgimento stesso e il sensore di temperatura. Il risultato è uno spegnimento ritardato del motore elettrico quando l’avvolgimento del motore si è già surriscaldato. Il problema che il brevetto si propone di risolvere è quello di superare tali inconvenienti e di fornire un assieme nonché un metodo per proteggere un motore elettrico indipendentemente dalla velocità di rotazione, oltre a rilevare in modo affidabile una temperatura non ammissibile degli avvolgimenti del motore elettrico al fine di intraprendere una tempestiva riduzione del carico del motore o uno spegnimento del motore in corrispondenza o prima di un sovraccarico termico. In questo modo si evitano guasti al motore allungandone la vita utile e riducendo i costi di manutenzione.

Il brevetto propone un metodo per il monitoraggio utilizzando:

- Un dispositivo per rilevare la corrente di fase;
- Un dispositivo di spegnimento del motore nel caso in cui la corrente di fase superi un valore limite;
- Un dispositivo di monitoraggio della sovracorrente, collegato al precedente;
- Un dispositivo per rilevare la temperatura ambiente;
- Dispositivi per il calcolo e per la memorizzazione dei dati raccolti.

Gli steps da eseguire per il corretto monitoraggio sono:

1. Misura della corrente di fase per un certo intervallo di tempo;
2. Eseguire la trasformazione di Clark-Park della corrente misurata. Questa converte le componenti del dominio temporale di un sistema trifase in due componenti in un frame di riferimento rotante ortogonale (dq). Im-

plementare questo tipo di trasformata semplifica le operazioni di calcolo tramite la conversione della forma d'onda della corrente;

3. Calcolare la corrente dell'avvolgimento tramite la *formula* 4.1:

$$I_{avvolgimento} = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \quad (4.1)$$

4. Rilevamento della temperatura ambiente;  
 5. Calcolo della corrente massima consentita tramite la *formula* 4.2:

$$I_{spegnimento} = I_{maxavvolgimento} * K_{TU} \quad (4.2)$$

$K_{TU}$  è un fattore di correzione che dipende dai valori di temperatura ambiente e temperatura massima. Il calcolo di  $K_{TU}$  dipende dalle temperature, come si può vedere dalla *formula* 4.3 e *formula* 4.4:

$$K_{TU} = 1 \quad se \ T_U < T_Z \quad (4.3)$$

$$K_{TU} = 1 - \left( \frac{T_U - T_{max}}{T_{max}} \right) \quad se \ T_U > T_Z \quad (4.4)$$

- $T_U$ : Temperatura ambiente;
- $T_Z$ : Temperatura ambiente massima;
- $T_{max}$ : Sovratemperatura massima.

Un comparatore confronta la corrente di avvolgimento con la corrente di spegnimento e se la prima supera la seconda allora si ha lo spegnimento del motore. Vi sarà un riavvio del motore dopo un certo intervallo di tempo definito a priori, durante il quale il motore ritornerà a livelli di temperatura ottimali e adatti al funzionamento.

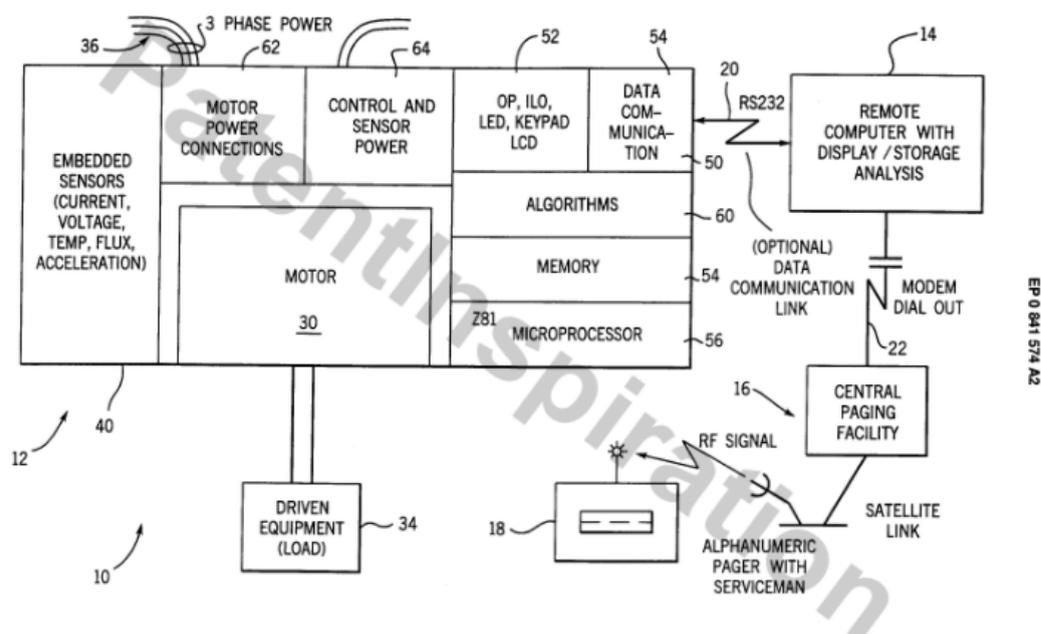
Altro brevetto, un po' più vecchio del precedente, ma che fornisce buone indicazioni su quello che deve essere un dispositivo per il monitoraggio di motori elettrici è "Diagnostic apparatus for an electric motor" (EP0841574B1) [26]. Il brevetto si propone di superare molti dei problemi delle apparecchiature e delle tecniche di monitoraggio convenzionali, fornendo una soluzione più adatta per diagnosticare le condizioni di un motore in funzione. Lo strumento diagnostico del motore deve essere in grado di osservare passivamente i parametri di funzionamento in modo discreto e quindi senza interferenze con il processo a cui il motore è collegato. Inoltre, l'invenzione fornisce la capacità di avvisare un operatore di varie condizioni di guasto del motore quando si verificano e,

inoltre, di avvisare l'operatore anche di avvertenze meno gravi riguardanti il funzionamento del motore. Il brevetto include un metodo diagnostico e un'apparecchiatura idealmente adatti per l'uso con un motore elettrico formato da un rotore, uno statore, almeno un cuscinetto che supporta il rotore e una pluralità di fili conduttori che trasportano corrente elettrica al motore. Si potrebbe applicare anche ad altre tipologie come ad esempio generatori elettrici, scatole del cambio e sistemi che includono "motori incorporati" come in apparecchi di consumo o simili.

L'apparato diagnostico deve essere formato almeno da:

- Un sensore nel motore per la misura iniziale dello stato di salute del motore;
- Un'unità di elaborazione collegata ai sensori per determinare l'effettivo stato di salute;
- Un'unità di comunicazione che manda un segnale diagnostico per indicare se vi è la presenza di guasti.

Viene riportata in *figura 4.2* uno schema funzionale del motore e dell'apparato diagnostico estratta dal brevetto [26]:



**Figura 4.2:** Schema funzionale brevetto [26]

Nel caso di quest'invenzione, l'apparato diagnostico comprende una pluralità di sensori per il monitoraggio delle condizioni fisiche del motore. Sono presenti sensori di vibrazione, di temperatura, di corrente elettrica, tensione elettrica e di flusso magnetico. Questi sensori monitorano le condizioni operative del motore e generano dei segnali in base ai valori dei parametri che vengono misurati. L'unità di elaborazione è collegata a questi sensori per determinare le condizioni di funzionamento del motore in base al primo segnale inviato dai sensori. L'unità di elaborazione genera, nel caso in cui siano presenti dei problemi, un segnale di funzionamento anomalo del motore quando le condizioni operative determinate si trovano in un intervallo predeterminato. Inoltre, all'interno dell'apparato diagnostico, l'unità di comunicazione del segnale risponde al segnale di funzionamento anomalo del motore e invia un segnale diagnostico del motore a un altro dispositivo, un essere umano o qualsiasi altro tipo di controllo di supervisione tramite un'unità di visualizzazione o tramite tecniche di paging (procedura di chiamata dell'utente).

Questo è in breve il funzionamento del dispositivo diagnostico, una descrizione più dettagliata dei componenti, collegamenti delle varie unità e operazioni eseguite viene riportata sul brevetto [26].

Per quanto riguarda il controllo dei cuscinetti del motore, un brevetto del 2020 "Method for monitoring rolling bearings" (US2020264073A1) [27] offre un metodo per monitorare e cercare di proteggere i cuscinetti, soprattutto dalle correnti indesiderate che possono andare ad usurarne gli elementi. Al giorno d'oggi i motori elettrici sono alimentati da convertitori di tensione del circuito intermedio. Questo potrebbe ad esempio formare una tensione di cuscinetto accoppiata capacitivamente. L'alimentazione tramite il convertitore di tensione del circuito intermedio può portare a tensioni di cuscinetto indesiderabili, che a loro volta possono portare a correnti nei cuscinetti del motore. Un tale flusso di corrente attraverso i cuscinetti può causare danni e persino guasti completi nelle macchine elettriche con cuscinetti volventi e scorrevoli. È quindi desiderabile evitare danni da un lato, e dall'altro è necessario monitorare lo stato di un tale cuscinetto volvente.

Come soluzioni si possono utilizzare cuscinetti isolati con materiale ceramico vicino l'anello esterno. Tuttavia, poiché questi cuscinetti sono molto costosi, una tale soluzione non è ideale per la produzione di massa. Sono quindi state utilizzate delle azioni correttive, basate su soluzioni note alle tecniche anteriori, come ad esempio l'uso di un'apparecchiatura per proteggere i cuscinetti di una macchina elettrica fornendo un dispositivo di compensazione che produca una corrente di compensazione per compensare una corrente di interferenza.

Nonostante questo, risulta sempre utile conoscere lo stato attuale del cuscinetto per poter individuare in tempo possibili danni al cuscinetto.

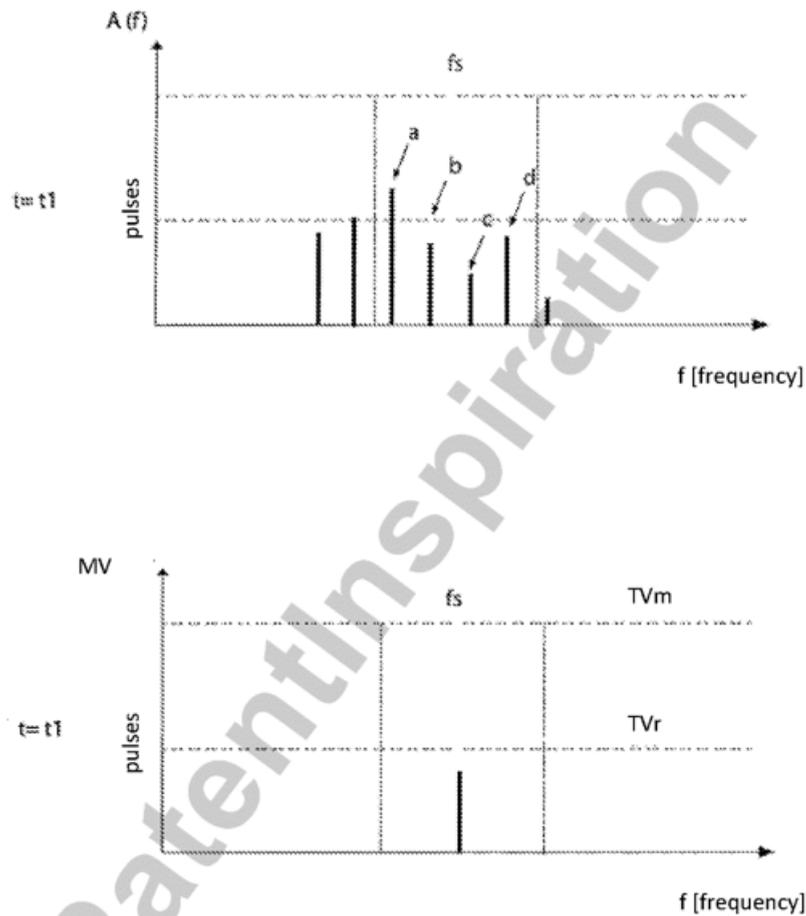
L'obiettivo del brevetto è quello di fornire un modo per monitorare lo stato dei cuscinetti di macchine rotanti per valutarne lo stato attuale ed eventuali cambiamenti di tale stato senza interruzioni operative. Per evitare di sostituire i cuscinetti in modo anticipati e quindi andare a sprecare ore di funzionamento è necessario un metodo che accerti le condizioni del cuscinetto in modo accurato, senza l'uso di sensori o tecniche complesse.

Quello che viene proposto è un metodo che utilizza la valutazione degli impulsi elettromagnetici, in una banda di frequenza particolare (specifica del danno), in un certo intervallo di tempo. Secondo il brevetto, infatti, questi impulsi vengono generati dalle scintille elettriche che si creano tra pista e sfera del cuscinetto. Com'è noto, prendendo ad esempio un campanello elettrico e una radio, una scintilla elettrica generata nel campanello produce un'onda elettromagnetica ad alta frequenza che può accoppiarsi all'antenna radio. Lo stesso fenomeno si verifica tra la pista del cuscinetto e la sfera del cuscinetto. La corrente del cuscinetto porta alla scintilla elettrica, e insieme alla rotazione delle parti del cuscinetto (sfere e pista) provoca un tipo di elettroerosione. A seconda dello stato di danneggiamento del cuscinetto, viene prodotto un certo numero di scintille per unità di tempo e un rispettivo numero di particolari onde elettromagnetiche. Dopo aver valutato gli impulsi si prosegue con la determinazione del valore medio dei segnali in uscita dal ricevitore.

Vengono riportati in *figura 4.3* due grafici che mostrano le ampiezze degli impulsi elettromagnetici rilevati e il loro valor medio.

Si nota che nel caso riportato il valore medio degli impulsi sta sotto i valori di soglia, quindi il cuscinetto non presenta ancora condizioni di danno.

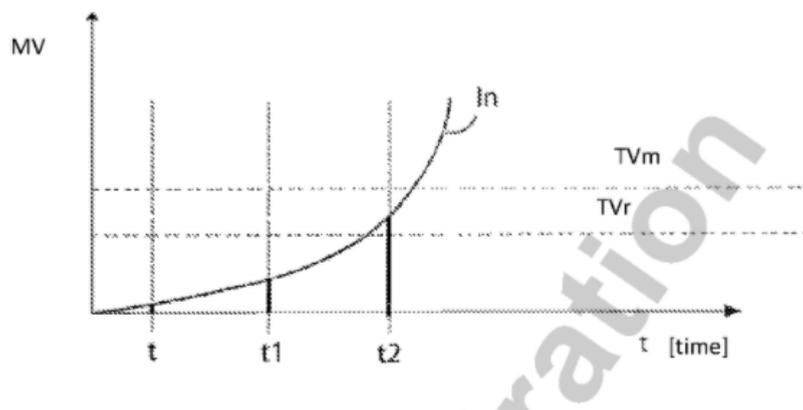
Nel caso in cui il valore aumentasse si avrebbe il superamento della soglia:



**Figura 4.3:** Grafici ampiezze impulsi[27]

Infine, si va a calcolare la velocità di variazione del valor medio. Da questa velocità si può determinare lo stato del cuscinetto in quanto il valor medio aumenta e cambia con velocità crescente con l'aumento del danneggiamento del cuscinetto.

Viene riportato in *figura 4.4* l'andamento del valor medio:



**Figura 4.4:** Variazione del valor medio degli impulsi [27]

In seguito, nel brevetto viene proposto di effettuare un'analisi spettrale dello spettro elettromagnetico che è stato misurato, a questo proposito devono essere utilizzati un'antenna ricevente e un dispositivo di valutazione. La prima riceve le onde elettromagnetiche, il secondo si occupa della loro analisi. Vengono anche utilizzati dei set di dati di riferimento che contengono gli impulsi elettromagnetici di una particolare banda di frequenza per diversi stati del cuscinetto: in questo modo, tramite il confronto dei valori calcolati è possibile sapere quale sia lo stato attuale del cuscinetto. Risulta particolarmente vantaggioso definire un differenziale massimo come differenziale di soglia assoluto oltre il quale il cuscinetto sarà considerato "difettoso".

Pertanto, ad esempio, quando l'aumento degli impulsi elettromagnetici per intervallo di tempo supera il valore differenziale di soglia può essere emesso un segnale di errore. Per le applicazioni industriali si può anche pensare di inserire un secondo valore di soglia, chiamato differenziale di soglia relativo, che rappresenta uno stato prima del valore assoluto. In questo modo sarebbe possibile prevedere quando avverrà il guasto del cuscinetto. Il tempo di guasto può essere previsto utilizzando il gradiente effettivo e il tempo di funzionamento medio. Per ridurre le interferenze causate da altre sorgenti come emettitori radio o sorgenti di interferenza nel motore, durante la misurazione il ricevitore deve rilevare solo una particolare banda di frequenza delle onde elettromagnetiche.

Il metodo descritto essendo semplice ed economico, oltre ad essere molto recente, si presta bene al monitoraggio dei cuscinetti montati in motori elettrici nell'ambito industriale.

### 4.3 Altri brevetti

Quelli sopra riportati sono solo alcuni dei brevetti pubblicati nel corso degli anni che propongono metodi per il monitoraggio dei motori elettrici. In realtà, il numero di brevetti presente nelle banche dati, con lo stesso obiettivo, è elevatissimo e questo fornisce un'ulteriore prova dell'importanza del controllo del loro funzionamento.

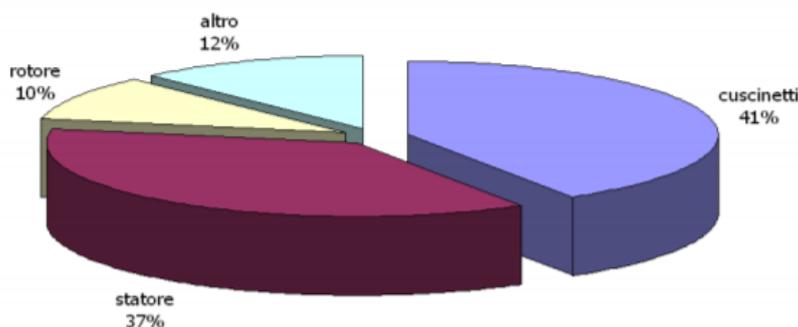
Per poter dare un'idea sul numero viene riportata in *figura 4.5* una tabella temporale, comprendente dei brevetti e la loro rispettiva data di pubblicazione. Si basti pensare che naturalmente anche negli anni non riportati sono stati pubblicati nuovi brevetti, e spesso anche più di uno nello stesso anno:

Brevetto	Pubblicazione
Improvements in and relating to Controlling Electric Motors (GB191107785A)	28/03/1912
Device for the government of electric motors (ES288163A1)	01/11/1963
Controlling device for electric motors (WO9317490A1)	02/09/1993
Method and device for controlling electric motors (EP0567781A3)	20/04/1994
Electric motor control device (JP2004173348A)	17/06/2004
Method and apparatus for controlling an electric motor (US2007182350A1)	09/08/2007
Motor Control Circuit and Method of Monitoring a Motor (US9667181B2)	30/05/2017
Abnormality diagnosis device for electric motor equipment, abnormality diagnosis method for electric motor equipment, and abnormality diagnosis system for electric motor equipment (WO2020208743A1)	15/10/2020

**Figura 4.5:** Elenco parziale brevetti pubblicati [17]

## 5 Cosa offre il mercato?

Come viene dimostrato nei precedenti capitoli, il monitoraggio dei motori elettrici è ormai diventato un dovere per qualsiasi azienda che voglia mantenere alti i livelli di produttività. Molti dei settori industriali richiedono che i motori funzionino per lunghi periodi di tempo, per questo è necessario monitorarli in maniera adeguata, per evitare guasti prematuri. In seguito a vari studi e ricerche è stato dimostrato che la maggior parte dei difetti riscontrabili nei motori elettrici sono quelli riguardanti statore e cuscinetti, come viene di seguito riportato:



**Figura 5.1:** Diagramma a torta difetti motori elettrici [35]

Com'è infatti stato già anticipato nell'introduzione un motore non controllato, che presenta dei difetti come quelli riportati in *figura 5.1*, può portare a fermi macchina indesiderati e quindi a costi non programmati per l'azienda. Di norma queste sono delle complicazioni che si preferisce evitare.

Fortunatamente molti sono i dispositivi e le tecniche attualmente in commercio che possono essere adoperate per tale scopo. Alcune di queste venivano già utilizzate in passato e, col trascorrere del tempo sono state rese più efficaci grazie anche allo sviluppo tecnologico, che ha portato alla nascita di nuove apparecchiature e tecnologie ben più sofisticate e affidabili di quelle precedenti. Ne è un esempio la nascita dell'IoT (Internet of Things). I dispositivi IIoT, Industrial Internet of Things, permettono infatti ai tecnici di monitorare in remoto ed in modo continuo le condizioni di funzionamento così da ridurre il rischio di fermi macchina non programmati.

Si passa adesso all'analisi del mercato attuale, per capire quali soluzioni vengono presentate, quali tecniche, metodologie, dispositivi e in che modo possano essere usate per il monitoraggio dei motori elettrici industriali.

## 5.1 Tecniche di monitoraggio e dispositivi

Molte sono le tecniche sviluppate durante gli anni per il monitoraggio dei motori elettrici. Tra le più utilizzate abbiamo quelle che si basano sull'analisi dei segnali elettrici del motore e quelle che si basano sull'analisi vibrazionale. Altri tipi di tecniche sono quelle basate sull'analisi dei rumori emessi dal motore o sul monitoraggio della temperatura.

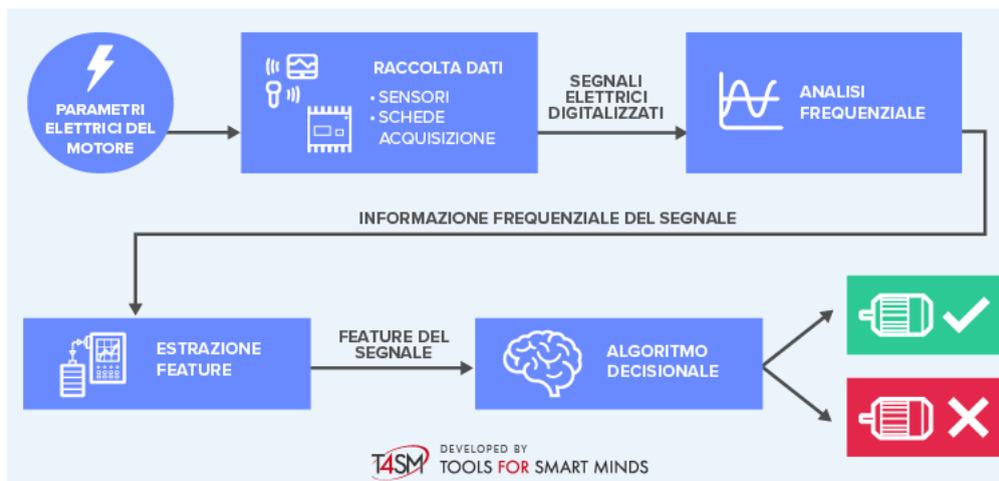
### 5.1.1 Analisi della firma elettrica

Uno dei principali metodi per monitorare il funzionamento di un motore elettrico è quello di utilizzare l'analisi della sua firma elettrica.

L'analisi della firma elettrica, detta ESA (Electrical Signature Analysis), comprende un insieme di tecniche basate sull'analisi dei segnali di alimentazione del motore. Tramite queste tecniche si vuole rilevare precocemente l'insorgenza di anomalie che potrebbero portare a futuri guasti del motore. Una delle caratteristiche più rilevanti dell'ESA, che la rende ottima per la manutenzione predittiva, è che può essere applicata in modo continuativo al motore, non richiede quindi un fermo nella produzione. Inoltre, non è necessario installare dei sensori sulle parti rotanti del motore per raccogliere i dati necessari all'analisi. Si presta quindi bene al monitoraggio remoto dei macchinari.

Le tecniche ESA hanno come base la misurazione di alcuni parametri elettrici che riguardano l'alimentazione del motore, come ad esempio la corrente o la tensione. In caso di normale funzionamento questi parametri presenteranno dei valori "standard", tipici di un motore elettrico in buono stato. Tramite un confronto fra questi valori e quelli misurati in tempo reale è possibile capire se il motore sta funzionando correttamente o se ci vi è la presenza di una qualche anomalia. Per entrare un po' nel dettaglio tecnico, è noto che sia la corrente che la tensione assorbita da un motore durante il suo funzionamento hanno uno spettro di frequenze ben definito. Tale spettro presenta un picco alla frequenza della tensione di alimentazione (50 o 60 Hz, a seconda dello standard elettrico adottato dai vari paesi). Nel momento in cui si viene a creare un problema di natura meccanica, questo si va a riflettere anche sull'assorbimento di corrente, andando ad alterarne lo spettro. I parametri elettrici del motore passano quindi dall'averne un'unica frequenza dominante all'averne una serie di componenti aggiuntive, dette spurie. La frequenza di queste spurie dà indicazioni relative al tipo di guasto, mentre la loro intensità fornisce informazioni circa la loro "gravità".

Viene riportato in *figura 5.2* lo schema procedurale da seguire per il controllo del motore tramite tecniche ESA:



**Figura 5.2:** Schema per ESA [11]

Quello di cui si ha inizialmente bisogno è uno strumento per l'analisi dei dati di alimentazione del motore. Questa può essere svolta da sensori di corrente e/o tensione, eventualmente integrati in schede di acquisizione. Le caratteristiche di questi sensori dipendono ovviamente dal tipo di motore che si vuole analizzare e da cosa si vuole ottenere. Una volta raccolti i parametri elettrici del motore questi devono essere elaborati da analizzatori di frequenza, che convertono i segnali estratti dai sensori in un segnale comodo per l'analisi successiva. A partire dagli spettri dei segnali andranno estratte delle informazioni che verranno poi analizzate dagli algoritmi decisionali. Questi valuteranno se il motore sta funzionando correttamente oppure no

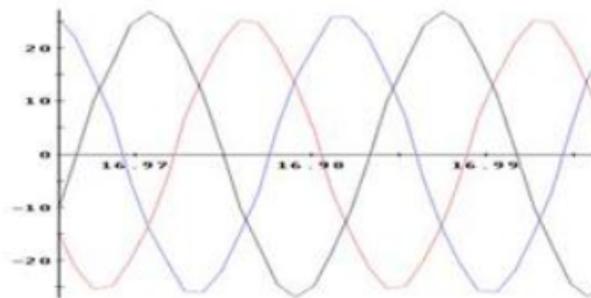
- Irregolarità statiche e/o dinamiche nel traferro;
- Irregolarità e/o rotture nelle barre del rotore;
- Problemi relativi allo statore;
- Connessioni anomale nell'avvolgimento dello statore;
- Albero di rotazione piegato; Problemi relativi ai cuscinetti.

Tra le tecniche principali ESA risulta molto valida l'analisi della firma della corrente del motore, con sigla MCSA (Motor Current Signature Analysis), una

tecnologia che si sta diffondendo sempre di più nel mondo industriale e che permette di rilevare facilmente guasti meccanici, problemi di allineamento e molto altro tramite l'uso di uno spettro di corrente demodulato. La tecnica è in circolazione già dal 1985 e si è sempre dimostrata valida nel corso degli anni.

Essa consiste nell'analizzare la corrente di una delle fasi del motore elettrico e, tramite la FFT (Fast Fourier Transform), ricavarne lo spettro in maniera semplice e rapida dal punto di vista del calcolo. A partire dallo spettro è possibile effettuare un'analisi di tutte le componenti in frequenza della corrente di alimentazione ed individuare, tramite la presenza di componenti spurie, che tipo di guasto è presente.

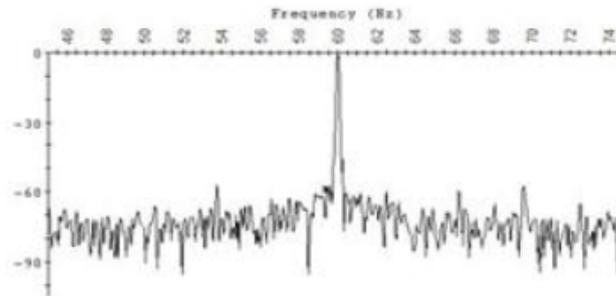
La firma della corrente del motore viene registrata nel dominio del tempo e, rappresentata in un grafico, fornisce un'onda sinusoidale del tipo riportato in *figura 5.3*:



**Figura 5.3:** Corrente nel dominio del tempo [29]

Per analizzare i dati si esegue, come già detto, una Fast Fourier Transform (FFT). Questa è un'operazione matematica progettata per estrarre le informazioni sulla frequenza dal dominio del tempo e trasformarle nel dominio della frequenza.

Un esempio di spettro viene riportato in *figura 5.4*:

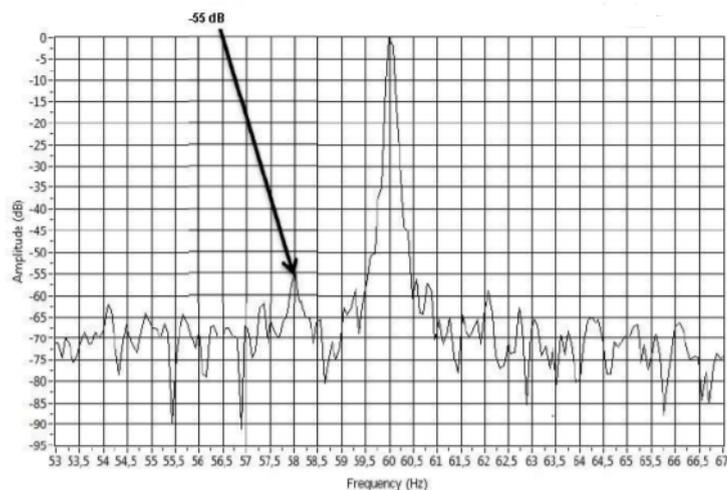


**Figura 5.4:** Corrente nel dominio della frequenza dopo FFT [29]

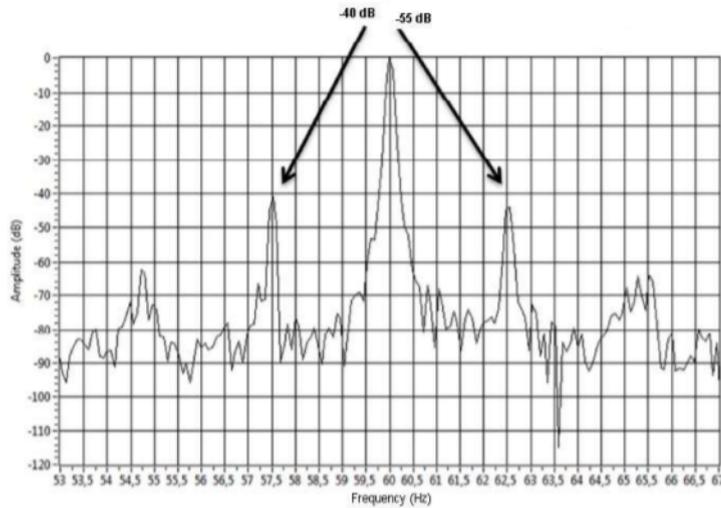
Analizzando questo grafico è possibile individuare la presenza di componenti spurie del segnale, e da queste andare a capire che tipo di guasto è presente e come poterlo risolvere.

Vengono riportati a scopo informativo, in *figura 6.4*, *figura 5.6* e *figura 5.7*, degli esempi di grafici che mostrano la presenza di difetti meccanici, in particolare danneggiamenti alle barre del rotore.

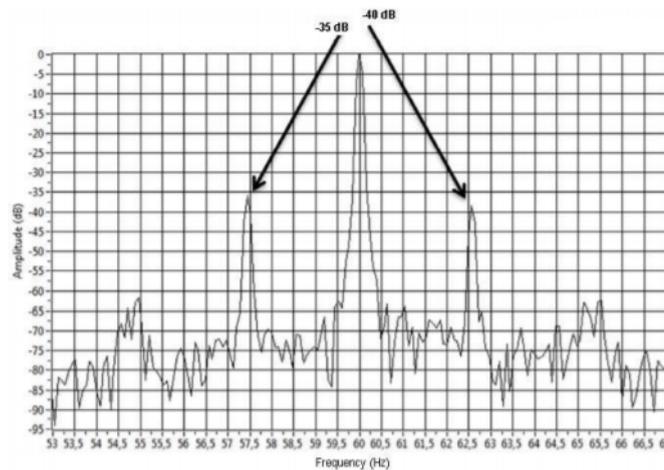
I grafici sono stati presi dall'articolo: "Analysis of Combined Motor Current Signature and Vibration-Monitoring Techniques in the Study of Broken Bars in Three-Phase High-Performance Induction Motors" [36]:



**Figura 5.5:** Spettro di corrente per un motore sano [36]



**Figura 5.6:** Spettro di corrente di motore con una barra rotta [36]



**Figura 5.7:** Spettro di corrente di motore con due barre rotte [36]

Come si può notare dai grafici si nota la presenza di picchi a valori di frequenza diversi da quella di alimentazione. Questi sono riconducibili a delle barre rotoriche rotte.

Sebbene lo spettro FFT sia efficace per il rilevamento dei danni al rotore, è stata rilevata nel tempo la difficoltà nell'analizzare molti dei segnali ad alta frequenza. A questo proposito è stato sviluppato lo spettro di corrente demodulato. La demodulazione è semplicemente il processo di portare la frequenza

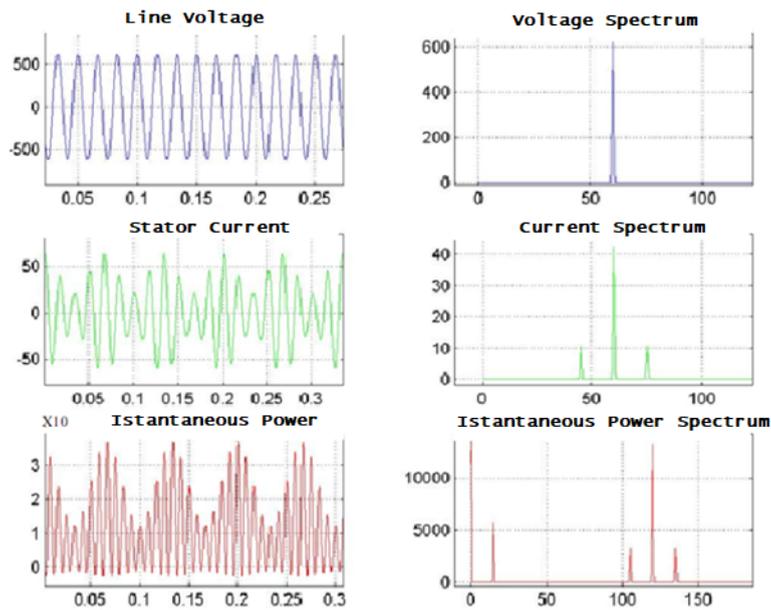
portante fuori dallo spettro. In questo caso, la frequenza portante è la frequenza elettrica fondamentale utilizzata. Dopo aver rimosso la frequenza portante, le frequenze relative alle variazioni del carico vengono visualizzate sullo spettro di corrente demodulato.

Un'altra tecnica che fa parte delle ESA è l'analisi della tensione di alimentazione, detta VSA (Voltage Signature Analysis). La tecnica segue la stessa strategia di analisi della firma di corrente. In questo caso non viene più analizzata la corrente di fase ma la tensione di alimentazione, in questo modo si possono rilevare problemi legati all'alimentazione del motore. Questa tecnica è usata maggiormente per l'analisi dei generatori, mentre nel caso di motori elettrici può essere impiegata in caso di problemi legati alla potenza del motore o per l'analisi dello sbilanciamento elettrico dello statore, insieme con l'analisi della firma di corrente.

Abbiamo infine l'IPSA (Instantaneous Power Signature Analysis) che analizza la potenza assorbita dal motore e che, così facendo, controlla allo stesso tempo sia la corrente che la tensione. Ricordiamo infatti che la potenza è data dal prodotto della tensione per la corrente. In questo modo se vi sono delle componenti spurie nello spettro di corrente o di tensione, queste appariranno anche in quello della potenza. La grande differenza tra questa tecnica e MCSA e VSA è che considera le informazioni presenti nei segnali di tensione e corrente di una fase del motore contemporaneamente e il componente di guasto demodulato appare sotto il nome di frequenza caratteristica. A partire da queste informazioni è quindi possibile effettuare un'analisi aggiuntiva rispetto alle tecniche precedenti. La sua applicazione richiede però delle misure aggiuntive, infatti oltre alla corrente assorbita è necessario effettuare delle misure anche sulla tensione di alimentazione.

Ad esempio, se il motore presenta un guasto meccanico alla frequenza di 15 Hz, con alimentazione a 60 Hz, lo spettro di potenza avrà la frequenza fondamentale a 120 Hz con modulazioni di 15 Hz a 105 e 135 Hz, oltre a presentare la componente di caratteristica di guasto a 15 Hz.

Vengono riportati in *figura 5.8* gli spettri di tensione, corrente e potenza relative all'esempio citato:



**Figura 5.8:** Esempio spettri di frequenza [37]

Considerando quanto detto è facilmente intuibile che la tecnica più efficace è l'IPSA, in quanto fornisce un maggior numero di informazioni. Questa però non viene sempre applicata in quanto richiede la misura oltre che della corrente anche della tensione di alimentazione. Questo richiede l'uso di strumenti aggiuntivi rispetto alla classica MCSA, la quale, essendo più rapida e di facile applicazione viene utilizzata maggiormente nelle aziende.

I dati necessari per questi tipi di analisi possono essere ricavati grazie all'uso di strumenti come i sensori di corrente. Questi comprendono varie tipologie, come ad esempio pinze amperometriche o trasduttori di corrente. Una volta acquisiti ed elaborati i valori necessari grazie ad un sistema di acquisizione dati (DAQ) è possibile valutare le condizioni del motore.

Una corrente produce sempre un campo magnetico, questo si può misurare utilizzando tecniche come l'effetto Hall. Esistono infatti trasduttori basati su questo principio ma non sono gli unici. Generalmente per i motori usati co-

me azionamenti industriali vengono utilizzate sensori di corrente closed-loop, i quali utilizzano un circuito di controllo del feedback per fornire un'uscita proporzionale all'ingresso. Rispetto ai sensori ad open loop forniscono una maggiore precisione, una migliore compensazione della deriva della temperatura (variazione) e immunità ai disturbi elettromagnetici. In questo modo si evitano errori di misura.

L'azienda Dewesoft [38], produttrice di sistemi di acquisizione dati, propone una vasta gamma di sensori e trasduttori di corrente.

Vengono elencate in *figura 5.9* le diverse tipologie:

	Shunt	Hall Effect	CT	Rogowski	Zero Flux
<b>Tipo di connessione</b>	Diretta	Indiretta	Indiretta	Indiretta	Indiretta
<b>Corrente</b>	AC and DC	AC and DC	AC	AC	AC and DC
<b>Precisione</b>	Elevata	Media	Media	Bassa	Elevata
<b>Range</b>	Basso	Medio	Elevato	Medio	Elevato
<b>Drift</b>	Bassa	Media	Media	Elevata	Bassa
<b>Isolamento</b>	No <sup>1)</sup>	Si	Si	Si	Si

**Figura 5.9:** Classificazione sensori di corrente: 1) Gli shunt possono essere isolati tramite un condizionatore di segnale interno o esterno, ma non sono intrinsecamente isolati [38]

Per misurare la corrente è possibile usare due metodi diversi: o per contatto diretto tramite amperometro o sensore di shunt, o misurando il campo elettromagnetico che genera. Nel primo caso inserendo un resistore di precisione su un circuito, si verificherà una caduta di tensione su di esso. L'uscita del sensore shunt viene misurata dal sistema di acquisizione dati, che applica la legge di Ohm per determinare la corrente che scorre attraverso il circuito. La massima corrente che sarà possibile rilevare dipenderà però dalle caratteristiche del sensore, di solito quindi vengono collegati due resistori in parallelo per aumentare il campo di misura. A causa di tale limitazione questo tipo di sensori viene usata per le applicazioni a bassa corrente.

Per misurare la corrente tramite il suo campo magnetico vengono utilizzati

i sensori ad effetto Hall. Le pinze amperometriche ad effetto Hall funzionano facendo passare il conduttore attraverso il loro nucleo aperto. Pertanto, forniscono un metodo senza contatto per misurare le correnti AC e DC ed anche un elevato range di misura. Questo si presta bene per un monitoraggio rapido e sicuro della corrente, non dovendo installare sensori all'interno del motore, evitando anche fermi macchina dovuti all'installazione.

Come esempio viene riportato in *figura 5.10* il DS-CLAMP-150DC della Dewesoft:



**Figura 5.10:** Sensore ad effetto Hall: DS-CLAMP [38]

Vengono altresì riportate in *figura 5.11* alcune delle specifiche tecniche:

<i>Current Range</i>	<i>200 A DC or 150 A AC RMS</i>
<i>Sensitivity</i>	<i>20 mV/A</i>
<i>Accuracy (+25°C)</i>	<i>1 % + 2 mA</i>
<i>Bandwidth</i>	<i>DC to 100 kHz</i>
<i>Resolution</i>	<i>± 1 mA</i>
<i>TEDS</i>	<i>Fully supported</i>
<i>Conductor Position Sensitivity</i>	<i>± 0.5 %</i>
<i>Zero Offset (+25°C)</i>	<i>± 10 mV max. + 1 mV/°C</i>
<i>Error du Earth Magnetic Field</i>	<i>± 0.5 mV</i>
<i>Temp. Coefficient</i>	<i>± 0.02 % of reading / °C</i>
<i>Zero</i>	<i>Auto zero @ power supply of sensor</i>
<i>Dimensions [mm]</i>	<i>205 x 60 x 15</i>
<i>Max. Conductor Size</i>	<i>32 mm</i>
<i>Power Supply</i>	<i>± 10 V</i>
<i>Current Consumption</i>	<i>30 mA + 1mA/A measured</i>
<i>Jaws Open Indication</i>	<i>Yes</i>
<i>Operating Temp.</i>	<i>0 to + 60 °C</i>
<i>Operating Humidity</i>	<i>15 % to 85 % (not condensing)</i>
<i>Safety Standards</i>	<i>EN 61010-1:2010 EN 61010-2-032:2012 EN 61010-2-031:2012</i>
<i>EMC Standards</i>	<i>EN 61326-2-2:2013</i>

**Figura 5.11:** Specifiche tecniche DS-CLAMP [38]

Da notare che il range di corrente dipende dal modello considerato, esistono altri modelli con range di corrente più ampi, nel caso in cui serva un maggior campo di misura. Il sensore presenta una buona accuratezza con una banda analogica fino a 100kHz, anche questa variabile con il modello. Buono anche il range della temperatura di esercizio.

Altri sensori che possono essere utilizzati sono ad esempio i trasformatori di corrente, i sensori rogowsky, i zero flux:

- Trasformatori di corrente: Sono sensori induttivi costituiti da un avvolgimento primario, un nucleo magnetico e un avvolgimento secondario. Vengono utilizzati quando le correnti AC nei circuiti sono troppo elevate per essere rilevate direttamente. Tramite questo sensore, infatti, la corrente viene trasformata in una più bassa grazie al rapporto di spire tra avvolgimento primario e secondario;
- Sensori rogowsky: Hanno il vantaggio di poter avvolgere grandi fasci di cavi, sono facili da installare e quindi indicati per le misure sul campo;

- Sensori zero flux: Simili ai sensori ad effetto Hall, ma utilizzano un avvolgimento invece che un sistema ad effetto Hall. Hanno una precisione elevata nella misura di corrente con accuratezza dello 0.002%.

### 5.1.2 Analisi vibrazionale

Le vibrazioni rappresentano uno dei principali indicatori di guasto, insieme al rumore o alla temperatura. Un loro studio può quindi permettere di individuare in tempo dei possibili guasti del motore. L'analisi vibrazionale viene impiegata principalmente per macchine rotanti ad alta velocità e consente di monitorare le vibrazioni della macchina, tramite l'uso di sensori, in tempo reale. Una macchina che funziona in condizioni ottimali mostra un particolare schema di vibrazione, il quale in caso di guasti subirà delle variazioni.

Queste variazioni si verificheranno nel caso in cui vengano generate delle vibrazioni causate da guasti meccanici come:

- Guasti nei cuscinetti;
- Alberi piegati;
- Sbilanciamento meccanico;
- Problemi ai giunti o alle cinghie di trasmissione.

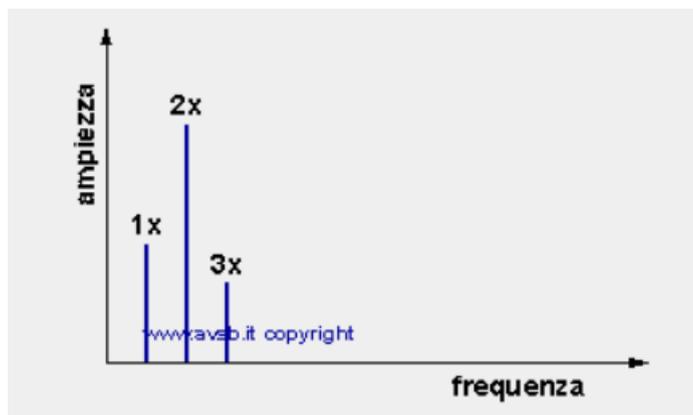
In generale, però, una misura di vibrazione anomala può anche essere sintomo di guasti di tipo elettrico:

- Problemi di traferro non uniforme (eccentricità statica o dinamica);
- Guasti negli avvolgimenti di statore e di rotore;
- Sbilanciamenti nell'alimentazione elettrica.

Questo non deve sorprendere in quanto ogni anomalia elettrica produce un'asimmetria nella distribuzione del flusso magnetico al traferro. Ogni asimmetria nella distribuzione del flusso magnetico al traferro produce una diversa distribuzione delle forze elettromagnetiche presenti all'interno della macchina elettrica, che si ripercuote sull'andamento delle vibrazioni della macchina stessa. Inoltre, l'anomalia determina anche una variazione del flusso magnetico disperso, sia all'interno che all'esterno della macchina. Per questo, talvolta può essere utile anche il rilievo delle vibrazioni sulla cassa del motore e sulle testate degli avvolgimenti di statore.

Monitorando in modo proattivo l'apparecchiatura, un tecnico qualificato può confrontare le letture con le modalità di guasto note per determinare dove si stanno verificando i problemi. L'analisi delle vibrazioni permette quindi di identificare le possibili cause di guasto conoscendone le frequenze caratteristiche, calcolate in base ai loro componenti ed in funzione delle velocità, confrontando i dati rilevati con quelli caratteristici. Ogni tipologia di guasto infatti andrà ad agire su una particolare componente dello spettro in frequenza, basandosi su questo è possibile individuare per tempo l'insorgenza di guasti.

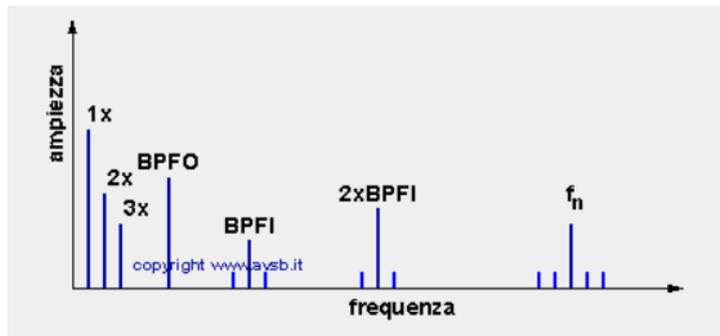
Per fare un esempio, se si considera un disallineamento (angolare, radiale o composto), questo andrà a modificare la frequenza  $2X$  (corrisponde al doppio della frequenza di rotazione dell'albero). Quindi nello spettro quest'ultima avrà un'ampiezza maggiore rispetto alle altre. Riportato in *figura 5.12* l'esempio citato:



**Figura 5.12:** Spettro in frequenza modificato relativo ad un disallineamento [39]

Un altro esempio è quello riferito alle vibrazioni generate dai cuscinetti. La misura delle vibrazioni introdotte dal cuscinetto e il calcolo delle frequenze caratteristiche dei cuscinetti permettono di identificare nell'analisi di spettro i difetti di questi componenti.

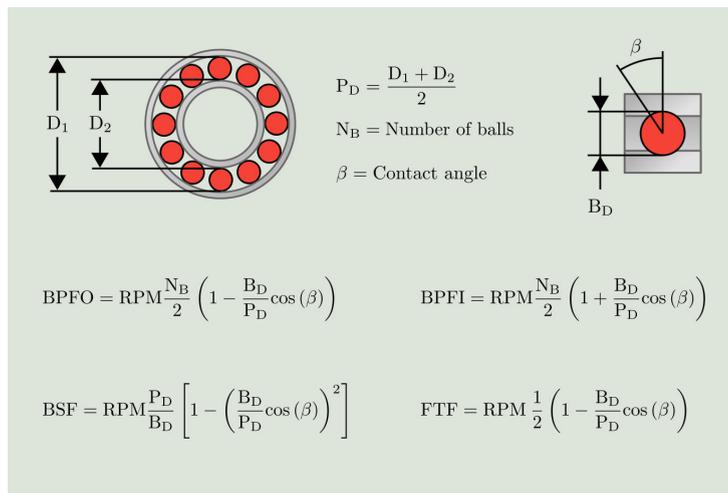
Lo spettro in frequenza sarà del tipo riportato in *figura 5.13*:



**Figura 5.13:** Spettro in frequenza con componenti del cuscinetto [39]

Gli esempi riportati in *figura 5.12* e *figura 5.13* rappresentano degli spettri ideali, nella realtà le componenti in frequenza non saranno così evidenti e vi sarà la presenza di altre componenti, dovute ad esempio al rumore di fondo. Le diverse componenti in *figura 5.13* saranno generate da guasti in diverse parti del cuscinetto. Queste genereranno una o più frequenze di guasto caratteristiche negli spettri di frequenza che ci consentiranno di identificare rapidamente dove sta il difetto. In figura si notano due delle possibili componenti in frequenza, quelle riferite alle piste interna (BPF1) ed esterna (BPFO). Ci sono poi le componenti generate dagli elementi volventi (BSF) e dalla gabbia di tenuta (FTF).

Vengono riportate in *figura 5.14* le formule per calcolare tali componenti in frequenza:



**Figura 5.14:** Formule per il calcolo delle frequenze fondamentali [40]

Tra i parametri che possono essere tenuti in considerazione come grandezza nella misura delle vibrazioni abbiamo: ampiezza della vibrazione (spostamento), velocità della vibrazione, accelerazione della vibrazione. Per le vibrazioni nel campo di frequenza che va da 10 a 100 Hz viene utilizzata la velocità, però nella misura di vibrazioni in macchine elettriche rotanti vengono usati anche sensori di spostamento e accelerazione. I punti in cui misurare le vibrazioni dipendono dal tipo di informazione che si vuole ricevere ed anche dalla struttura della macchina. Nel caso di motori elettrici asincroni le vibrazioni si misurano sulla struttura della macchina, in prossimità delle sedi dei cuscinetti. Questo perché in tali punti si applicano i carichi dinamici e le forze eccitatrici, inoltre perché i cuscinetti sono anche tra gli elementi critici di un motore elettrico e quindi andrebbero controllati uno ad uno.

Per quanto riguarda il campo vibrazionale, per poter raccogliere le grandezze necessarie alle analisi è necessario utilizzare gli strumenti giusti e di solito vengono utilizzati gli accelerometri. Un esempio è quello proposto dal gruppo Sequoia IT, un'azienda specializzata nel fornire soluzioni per la misura ed il monitoraggio vibrazionale. Si è già detto quanto la misura delle vibrazioni sia importante per rilevare per tempo guasti alle macchine. Quindi monitorando costantemente il livello delle vibrazioni e confrontandolo con i dati acquisiti quando la macchina è in condizioni normali, si può determinare il suo "stato di salute". Vi è però un aspetto negativo, ossia l'elevato costo degli strumenti necessari a tale misurazione e la necessità di affidarsi esclusivamente a personale specializzato.

Questo viene ad esempio superato grazie al FastTRACER di Sequoia IT, un accelerometro con tecnologia MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems). L'analisi delle registrazioni del sensore si basa su procedure d'indagine standardizzate, comprensibili e attuabili da chiunque tramite il solo utilizzo di un computer.

Viene riportata in *figura 5.15* l'immagine di questo accelerometro:



**Figura 5.15:** FastTRACER [41]

Oltre alla triassialita, il vantaggio più evidente dell'utilizzo dei MEMS negli accelerometri è la possibilità di eliminare la catena di misura, perché ogni sua parte è già integrata nel dispositivo stesso. Inoltre, questi strumenti sono affidabili, economici, piccoli e leggeri. Inoltre, FastTRACER, grazie alla sua tecnologia MEMS, riesce a resistere a urti e shock, che possono facilmente verificarsi in un ambiente industriale. I dati vengono acquisiti tramite il software FTAnalyzer, fornito insieme al prodotto. I dati di vibrazioni vengono trasferiti direttamente al PC tramite una normale porta USB, questo grazie ai software applicativi diventa un analizzatore di vibrazione, adatto alle attività di manutenzione dei macchinari. Oltre alle vibrazioni risulta possibile calcolare anche velocità e spostamento, e il valore della vibration severity seguendo la norma ISO 10816.

Le specifiche tecniche di questo strumento vengono riportate in *figura* 5.16:

Sensor:	Triaxial, MEMS
Full scale:	5g (Optional 2g e 18g)
Frequency Range:	0-2500 Hz
Protection Grade:	IP67
Dimension:	30 x 55.5 x 15 mm
Weight:	55g
Shock Resistance:	10.000 g
Cable:	3m standard. Available Extensions up to 30m

**Figura 5.16:** Specifiche tecniche FastTRACER [41]

Naturalmente esistono altri sensori che è possibile utilizzare per il rilevamento di questo tipo di vibrazione, ma quello proposto da Sequoia IT presenta delle

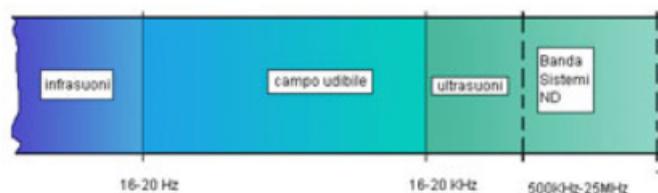
ottime caratteristiche. FastTracer, oltre a essere facile da usare e molto robusto, è uno strumento triassiale e capace di misurare frequenze comprese tra 0 e 2500 Hz, rispondendo alle esigenze della normativa ISO 10816.

### 5.1.3 Emissioni acustiche

Negli ultimi anni gli strumenti ad ultrasuoni hanno subito un grande sviluppo, il che ha reso l'analisi delle componenti acustiche una nuova tecnica da utilizzare per il monitoraggio delle apparecchiature. Gli ultrasuoni sono delle onde che si propagano nel mezzo ad una frequenza superiore alla banda udibile. Una delle ragioni principali per analizzare queste onde è la sicurezza. Un'ispezione ad ultrasuoni di apparecchiature elettriche, ad esempio, può essere eseguita senza aprire l'armadio di contenimento. Inoltre, offre anche altri vantaggi come ad esempio efficienza, velocità di raccolta dei dati, possibilità di combinare il rilevamento con una diagnosi più elaborata.

Un esempio dell'utilizzo degli ultrasuoni è quello dell'ispezione meccanica, tramite gli ultrasuoni è possibile rilevare e misurare le onde acustiche generate da difetti dei cuscinetti, come frizione o sfregamento dovuti a scarsa lubrificazione. Basandosi sulla propagazione di onde ad altissima frequenza, la tecnologia utilizza alte frequenze, al di sopra del limite dell'udito umano dei 20 kHz.

Riportata in *figura 5.17* la parte della banda di frequenze relative al campo degli ultrasuoni:



**Figura 5.17:** Bande di frequenza vicino l'udibile [42]

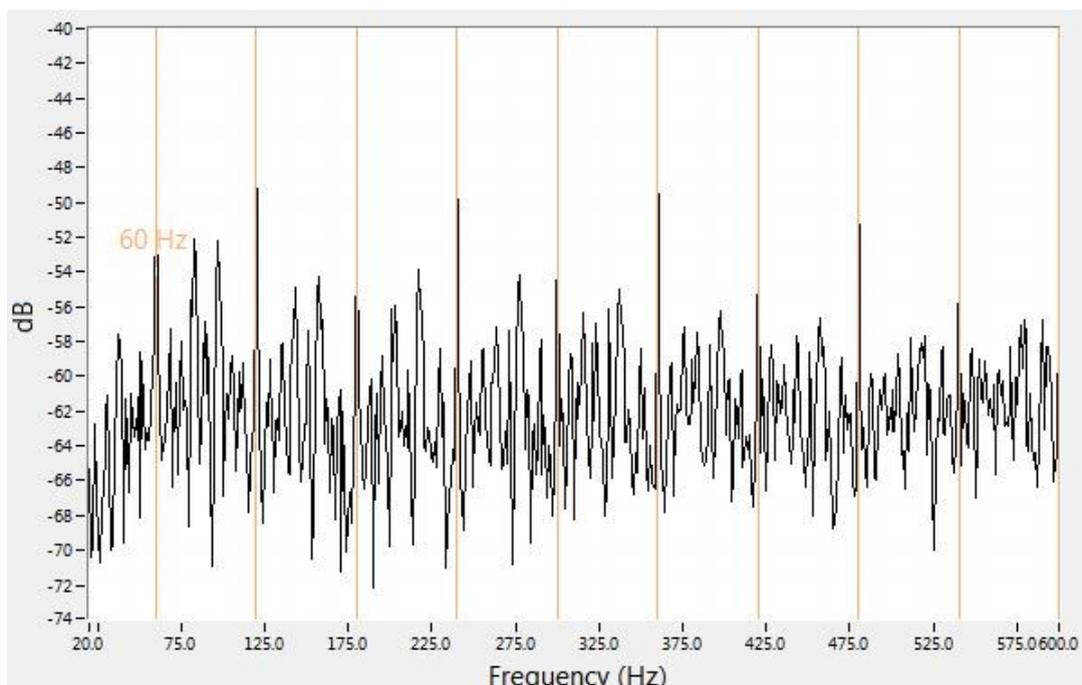
Queste frequenze sono sensibili agli urti e insensibili a fenomeni a bassa frequenza come la velocità di funzionamento della macchina, la quale generalmente maschera possibili difetti dei cuscinetti nella normale analisi vibrazionale. Tramite l'unione dell'Internet of Things e della tecnologia ad ultrasuoni è stato possibile sviluppare nuove soluzioni di monitoraggio che uniscono versatilità, efficienza e connettività. I sensori raccolgono i dati relativi alla macchina, durante tutto il suo ciclo di lavoro, sotto forma di valori in dB e li inviano ad un

dispositivo centrale per la successiva elaborazione. In questo modo è possibile monitorare le condizioni della macchina in modo automatizzato, impostando anche dei segnali di allarme nel caso vengano individuati dei difetti.

Oltre all'ispezione meccanica è possibile applicare questa metodologia anche alle ispezioni di tipo elettrico. Ad esempio, si può utilizzare per rilevare guasti elettrici come archi elettrici o l'effetto corona.

Gli archi elettrici si possono generare in seguito a sovratensioni, l'effetto corona si viene a generare quando si ha ionizzazione dell'aria presente attorno ad un conduttore elettricamente carico e viene causato dall'intensità del campo elettrico. È un fenomeno che si associa ad apparati ad alta tensione come trasformatori, generatori o motori elettrici. Seppure non produca elevati aumenti di temperatura, emette ultrasuoni. Un dato importante riguardo l'effetto corona è che si presenta soltanto quando il valore di tensione supera i 1000 V. Poiché a valori uguali o superiori a 1000 V l'aria diventa un mezzo conduttore. Se l'ispezione viene eseguita su tensioni inferiori a 1000 V, e viene comunque rilevato un ultrasuono, l'ispettore può escludere che si tratti di effetto corona. Gli ultrasuoni generati da questo fenomeno possono essere raccolti dai sensori per essere analizzati.

Un esempio di rilevamento di effetto corona viene riportato in *figura 5.18*:



**Figura 5.18:** Traccia dell'effetto corona in FFT [43]

Quando la traccia sonora dell'effetto corona viene analizzata tramite software di analisi spettrale, è possibile notare un'armonica principale di 60 Hz (Varia in base al tipo di standard adottato dal paese). Al peggiorare delle condizioni, si verificherà una perdita dell'armonica dominante e una diminuzione dell'uniformità d'ampiezza dell'ultrasuono registrato.

Gli strumenti ad ultrasuoni possono essere di due tipologie air-borne e structure-borne, in base al tipo di rilevazione che eseguono. I primi rilevano suoni che vengono trasmessi via aerea, quindi indicati per l'analisi di difetti elettrici mentre i secondi rilevano i suoni che si trasmettono tramite le strutture, quindi adatti alle analisi meccaniche, come ad esempio quelle sui cuscinetti del motore.

Per il loro monitoraggio o quello di altri asset meccanici, molto indicati sono i sensori Ultra-Trak 750 della UE Systems, come viene suggerito nell'articolo: "Ultrasuoni e IIOT, il futuro del condition monitoring" [44]. L'Ultra-Trak 750 è un sensore e trasmettitore a ultrasuoni a funzionamento continuo che può interfacciarsi con i sistemi di monitoraggio e controllo degli impianti esistenti fornendo il rilevamento in tempo reale dei livelli acustici per il preallarme di guasti ai cuscinetti e problemi di lubrificazione.

In *figura 5.19* viene riportata l'immagine del sensore:



**Figura 5.19:** Sensore Ultra-Trak 750 [45]

Questo sensore viene montato in prossimità del cuscinetto che si vuole monitorare. Quando vengono rilevate delle variazioni di ampiezza delle onde ultrasonore, da 12 fino a 50 volte rispetto ad una linea di base impostata, significa che il cuscinetto sta entrando nella fase iniziale del cedimento. Tramite l'uso di sensori di questo tipo è quindi possibile monitorare e rilevare le fasi iniziali dei guasti nei cuscinetti senza la necessità di dover usare sensori su più assi.

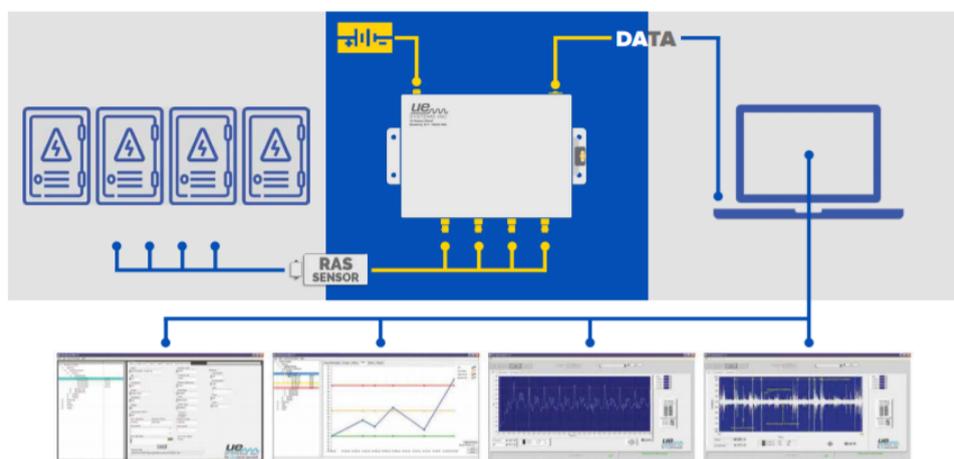
Vengono riportate in *figura 5.20* le caratteristiche tecniche del sensore:

<b>Alimentazione (loop powered)</b>	18-30 V (30 mA max)
<b>Alimentazione (uscita in corrente)</b>	18-30 V
<b>Assorbimento di corrente (alimentato da loop)</b>	4-20 mA (25 mA max) 30 mA max proporzionale al rilevamento del segnale a ultrasuoni
<b>Assorbimento di corrente (uscita corrente)</b>	30 mA max
<b>Uscita (loop powered)</b>	Demodulato / eterodinato
<b>Uscita (uscita in corrente)</b>	Demodulato / eterodinato 4-20 mA proporzionale al segnale ultrasonoro rilevato
<b>Intervallo di temperatura ambiente</b>	32 ° -122 ° F (0 ° -50 ° C)
<b>Frequenza di rilevamento</b>	40 kHz ( $\pm$ 2 kHz)
<b>Regolazione della sensibilità non volatile</b>	Chiusura contatto pulsante o segnale di controllo TTL
<b>Cavo</b>	Schermato RF (diverse lunghezze disponibili)
<b>Trasduttore</b>	Piezoelettrico
<b>Metodo di attacco</b>	10/32 montaggio filettatura hold
<b>Housing</b>	Acciaio inossidabile: resistente all'acqua e alla polvere, soddisfa i requisiti NEMA 4X. Supera le classificazioni IP 64

**Figura 5.20:** Specifiche tecniche Ultra-Trak 750 [45]

Per quanto riguarda il monitoraggio di tipo elettrico, in riferimento all'articolo prima citato [44], una soluzione è quella offerta sempre da UE Systems: il 4Site. Questo strumento ascolta in tempo reale le emissioni elettriche delle apparecchiature, tramite trasduttori RAS piezoelettrici, alla ricerca di un primo suono ad alta frequenza prodotto da guasti di tipo elettrico. 4Site rileva i suoni ad alta frequenza prodotti dalla ionizzazione dell'aria, dovuta a cause come ad esempio l'effetto corona. Ad ogni emissione elettrica appartiene una specifica impronta audio che, insieme all'intensità del segnale, viene registrata da 4Site. Questi suoni vengono poi analizzati attraverso il software di analisi spettrale ad ultrasuoni per giungere ad una diagnosi e produrre un report. Il sistema può monitorare fino a quattro punti nello stesso momento.

Riportato in *figura 5.21* lo schema di funzionamento del sistema:



**Figura 5.21:** Schema 4Site [46]

Riportate in *figura 5.22* le specifiche tecniche:

<b>Involucro esterno</b>	Acciaio inossidabile; Dimensioni: 22,8cm x 15,24cm x 7,62cm Peso: 2,1 kg
<b>Alimentazione</b>	24V, 1 amp (regolata)
<b>Circuiteria</b>	Circuiti allo stato solido analogici e digitali SMD con compensazione della temperatura e conversione RMS
<b>Risposta in frequenza</b>	20 kHz - 100 kHz centrata su 40 kHz
<b>Tempo di risposta</b>	<10ms
<b>Temperatura Operativa</b>	0°C - 50°C
<b>Trasduttore</b>	RAS piezoelettrico, involucro in acciaio inossidabile
<b>Cavo</b>	Ingresso e uscita BNC (lunghezza: 7,62 m - può essere ordinato di lunghezze superiori fino a 30,48 m)
<b>Attacco trasduttore</b>	Filettato femmina 10/32
<b>Software</b>	Ultratrend DMS 6.0 o superiore

**Figura 5.22:** Specifiche tecniche sistema 4Site [46]

#### 5.1.4 Monitoraggio della temperatura

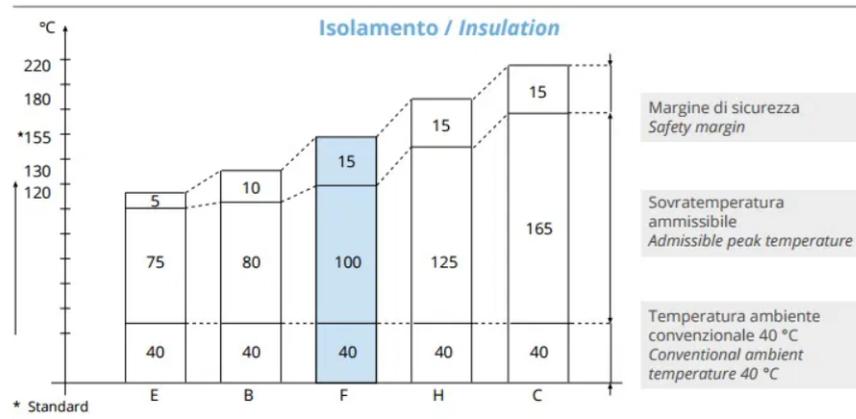
Nota come tecnologia di test non distruttiva e non intrusiva, la termografia ad infrarossi viene molto utilizzata nell'ambito della manutenzione predittiva. Sul sito internet Elektro.it si afferma che: " Nel settore elettrico è sicuramente una delle più efficaci, insieme ovviamente alle attività di monitoraggio continuo delle grandezze fisiche in gioco (in particolare corrente, tensione, e temperatura)" [47].

La termografia ad infrarossi è una tecnica che permette di individuare e quindi di misurare, a distanza, il calore emesso da un qualsiasi corpo caldo. Quest'ultimo emette radiazioni nella lunghezza d'onda dell'infrarosso. Tramite l'uso di telecamere termiche, il personale è in grado di rilevare le alte temperature (note anche come hotspot) nelle apparecchiature, il tutto senza bisogno di un contatto con l'impianto stesso. Per questo viene considerata una prova non distruttiva, poiché non provoca alterazioni al sistema in seguito alla verifica. I componenti usurati, compresi i circuiti elettrici malfunzionanti, generalmente emettono calore che viene visualizzato come un punto caldo su un'immagine termica. Identificando rapidamente gli hotspot, le ispezioni a infrarossi possono individuare i problemi e aiutare a evitare riparazioni costose e fermi macchina.

Nei motori elettrici questa tecnica viene utilizzata per controllare componenti come cuscinetti, avvolgimenti, morsettiere, che sono parti a rischio di sovratemperatura. Le telecamere permettono un monitoraggio in maniera continuata. In questo modo si ha sempre sotto controllo la temperatura che si raggiunge nel motore in funzione. Toccherà quindi ai tecnici stabilire se la temperatura raggiunta è da considerare riconducibile a un guasto o meno. Oppure si potrebbero utilizzare degli algoritmi che, tramite dei valori di soglia impostati, stabiliscano se è necessaria qualche azione di manutenzione.

Per capire quale sia il livello massimo di temperatura raggiungibile da un motore elettrico è necessario conoscere a quale classe di isolamento appartiene. La classe di isolamento definisce la qualità e l'insieme di trattamenti degli avvolgimenti usati nella costruzione di un motore elettrico. Per evitare dispersioni di corrente gli avvolgimenti di un motore sono impregnati di speciali resine. In base alla qualità della resina si definisce il massimo valore di temperatura alla quale il motore può lavorare e quindi la classe di isolamento. Maggiore è la classe di isolamento, maggiore è la sovratemperatura alla quale il motore può resistere. La sovratemperatura è la differenza di temperatura tra la temperatura ambiente e un margine di sicurezza dalla temperatura massima ammissibile.

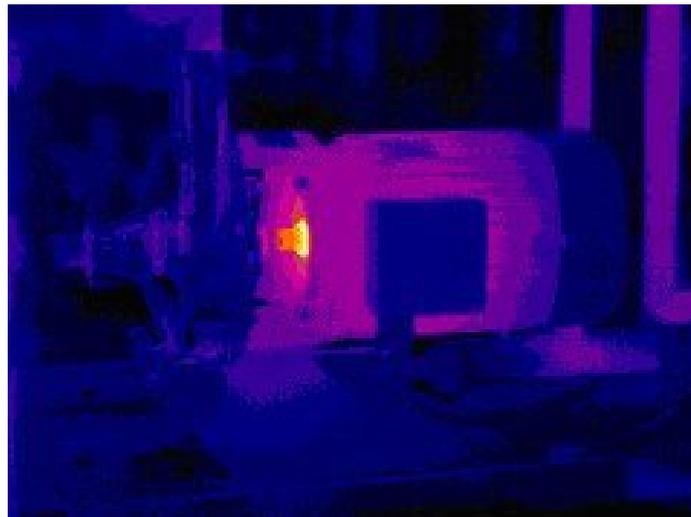
Viene riportato in *figura 5.23* un grafico rappresentante le diverse classi di isolamento:



**Figura 5.23:** Classi d'isolamento [30]

Conoscendo la classe di isolamento è quindi possibile conoscere quale temperatura può sopportare il motore e quindi stabilire quando un certo valore di temperatura può essere associato a un guasto.

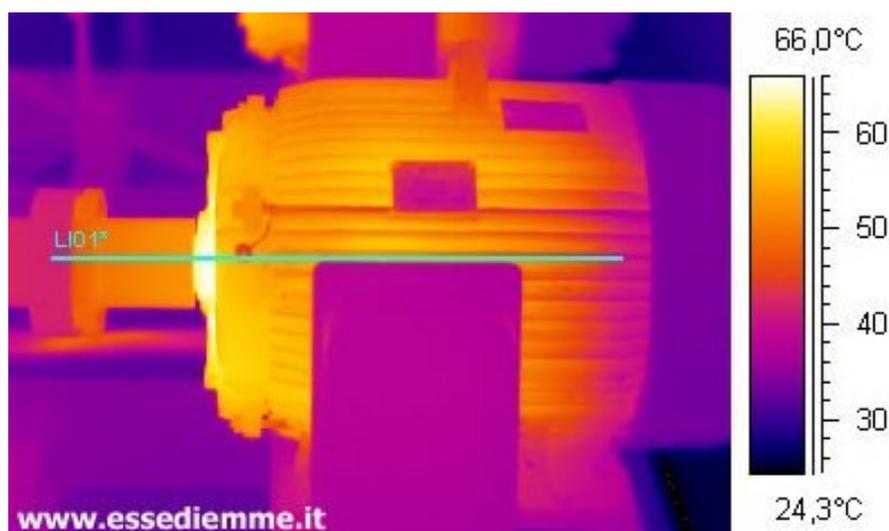
Il rilevamento tramite telecamera mostrerà un'immagine del tipo riportato in *figura 5.24*:



**Figura 5.24:** Rilevamento temperatura su un cuscinetto [47]

Nell'esempio riportato in *figura 5.24* è stato individuato un cuscinetto del motore che raggiunge una temperatura troppo elevata, come si nota ha un colore acceso se paragonato al resto dell'apparecchiatura. Questo può suggerire elevato attrito nel cuscinetto causato ad esempio dalla mancanza di un'adeguata lubrificazione, il che porta ad un aumento di temperatura. Una volta individuato l'elemento si provvederà ad agire in modo da risolvere il problema e far tornare la temperatura ad un livello accettabile per un corretto funzionamento.

Un altro esempio di rilevamento è quello mostrato in *figura 5.25*:



**Figura 5.25:** Rilevamento temperatura sul corpo del motore [47]

Nell'esempio in *figura 5.25* viene rilevata una temperatura alta dell'intero motore, questo può essere causato dall'usura dei suoi componenti che quindi generano attrito con il conseguente aumento di temperatura. Essendo a conoscenza di questo si procederà all'individuazione del o dei componenti guasti per evitare la nascita di un problema più grave di un innalzamento di temperatura.

Com'è stato già detto questa tecnica, per poter essere applicata, richiede l'utilizzo di termocamere ad infrarossi. In questo modo il monitoraggio avviene in maniera non invasiva e veloce.

A titolo informativo viene riportato in *figura 5.26* l'esempio di una termocamera:



**Figura 5.26:** Termocamera a infrarossi FLUKE Ti480 PRO [10]

Le specifiche tecniche sono invece riportate in *figura 5.27*:

<b>Caratteristiche principali</b>	
IFOV con obiettivo standard (risoluzione spaziale)	0,93 mRad, D:S 1065:1
Risoluzione del sensore	640 x 480 ( 307.200)
SuperResolution	Rileva e unisce il quadruplo dei dati per creare un'immagine 1280 x 960 (614.400 pixel)
Messa a fuoco MultiSharp™	Proprio così, messa a fuoco degli oggetti vicini e lontani su tutto il campo visivo.
Messa a fuoco automatica LaserSharp®	Sì, per immagini messe a fuoco in modo uniforme
Misuratore laser della distanza	Sì, calcola la distanza dall'obiettivo per immagini messe a fuoco in modo preciso e visualizza la distanza sullo schermo
Messa a fuoco manuale avanzata	Sì
Robusto display touchscreen	LCD 640 x 480 da 3,5" (orizzontale)
Design resistente ed ergonomico per l'utilizzo con una sola mano	Sì
Zoom digitale	2x e 4x
<b>Misura della temperatura</b>	
Range di misura della temperatura (non calibrata al di sotto di -10 °C)	Da ≤ -10 °C a 1000 °C
Precisione	± 2 °C o 2% (a 25 °C nominali, a seconda del valore maggiore)
Sensibilità termica (NETD)*	Temperatura target ≤0,05 °C a 30 °C (50 mK)
Correzione dell'emissività sullo schermo	Sì (sia valore che tabella)
Compensazione della temperatura riflessa di sfondo sullo schermo	Sì
Correzione della trasmissione sullo schermo	Sì
* Migliore possibile	

**Figura 5.27:** Caratteristiche termocamera Ti480 PRO [10]

Oltre alla termografia ad infrarossi esistono altri metodi per monitorare la temperatura dei motori elettrici, come ad esempio l'uso di sensori installati sul motore. Questi sensori raccoglieranno i dati e li invieranno direttamente ad un PC o Cloud per poter essere analizzati. In seguito, verrà stabilito se il livello di temperatura raggiunto potrebbe causare danni al motore o se invece non si corrono pericoli. I sensori possono essere utilizzati ad esempio per la misura della temperatura di avvolgimenti e cuscinetti. Gli elementi di misura più comuni sono i Pt 100 e Pt 1000, realizzati in platino, questi vengono generalmente utilizzati nei sensori e nelle sonde per misurare la temperatura di avvolgimenti, cuscinetti, olio motore e trasmissione.

Sono riportati degli esempi, con accanto le rispettive caratteristiche tecniche, in *figura 5.28* e *figura 5.29*:



Elemento:	Sonda Pt100
Numero di conduttori:	2-3-4
Massima temperatura di esercizio:	180 ° C
Precisione:	Classe B + -0.3 ° C
Lunghezza sensore:	35 mm
Lunghezza del cavo:	da 500 a 3000 mm (su richiesta)

**Figura 5.28:** Sonda di temperatura per avvolgimenti con rispettive caratteristiche[48]



Elemento:	Termoresistenza al platino PT100/PT1000
Numero conduttori:	2-3-4
Massima temperatura:	Relativa all'elemento di misura
Lunghezza sonda:	Su richiesta
Grado di protezione:	IP67
Precisione:	secondo norma IEC751

**Figura 5.29:** Termosonda per avvolgimenti elettrici con rispettive caratteristiche[49]

La differenza tra le sonde dipende soprattutto dall'elemento di misura utilizzato. Le termoresistenze in platino Pt100 hanno una resistenza nominale di 100  $\Omega$  al punto di fusione del ghiaccio (0 °C).

La resistenza nominale delle Pt1000 a 0 °C è invece di 1.000  $\Omega$ . Il campo di temperatura operativo e il tempo di risposta sono gli stessi per entrambi. Tuttavia, a causa della diversa resistenza nominale, le letture delle sonde Pt1000 sono maggiori di un fattore 10 rispetto alle Pt100. Questa differenza diventa evidente quando si confrontano configurazioni a 2 fili, in cui si verificano errori di misura. Ad esempio, l'errore di misura in una Pt100 potrebbe essere di + 1,0 °C, mentre quello di una Pt1000 con la stessa esecuzione potrebbe essere di + 0,1 °C. La scelta del tipo di sonda dipende comunque dalle esigenze dell'azienda.

## 5.2 Le proposte delle aziende

Quelli elencati fino ad ora sono i principali metodi che è possibile seguire per effettuare un monitoraggio delle condizioni di funzionamento del motore. Ognuno di questi metodi richiede, per poter essere applicato, l'utilizzo di un particolare dispositivo in modo da poter estrarre i dati richiesti per procedere al controllo.

Molti dei settori industriali esigono che i motori funzionino per lunghi periodi di tempo, per questo è necessario monitorarli in maniera adeguata, per evitare guasti prematuri che porterebbero a blocchi nella produzione. Esistono delle aziende che si occupano proprio di questo e a tal proposito producono dispositivi di monitoraggio, offrono suggerimenti sulle metodologie di controllo delle condizioni, effettuano consulenze. Tra i dispositivi abbiamo, oltre a degli strumenti per effettuare determinati controlli sulla macchina, anche nuovi sensori che permettono il monitoraggio continuo delle condizioni del motore. Tramite l'avvento dell'Industrial Internet of Things, detto (IIoT), questo è molto più facile rispetto al passato. I dispositivi IIoT, infatti, permettono ai tecnici di monitorare in remoto le condizioni di funzionamento in modo da ridurre i fermi macchina non programmati. La progressiva diffusione dei dispositivi e delle applicazioni IoT (Internet of Things), assieme alla disponibilità di strumenti analitici evoluti e all'emergere delle tecnologie di AI (Artificial Intelligence) e machine learning (ML), permettono oggi di integrare nei macchinari industriali sensori d'ogni tipo, e di connettere in rete tali attrezzature, per poi monitorarne di continuo lo stato di funzionamento. In base ai dati raccolti, vengono elaborati modelli predittivi che consentono di ottimizzare la strategia di ma-

nutrizione. Ad esempio, il modello può indicare che gli attuali programmi e pratiche sono ideali e non richiedono modifiche, oppure che è urgente evitare un guasto; o, ancora, che è possibile rimandare un intervento dispendioso perché quella determinata attrezzatura non ne ha realmente necessità. In aggiunta, più dati vengono acquisiti dai sensori e più gli algoritmi di ML possono apprendere sulla storia e sulle condizioni delle macchine, migliorando di continuo le metodologie di manutenzione. C'è però uno svantaggio, ossia che implementare in tutta una linea di produzione dispositivi IIoT non è proprio economico. Per ovviare a questo problema alcune aziende hanno sviluppato dei sensori che comunicano i dati operativi raccolti dal motore direttamente ad un PC o Cloud per essere poi analizzati.

Vengono sotto riportate alcune delle aziende che offrono soluzioni per il monitoraggio dei motori elettrici.

Un primo esempio viene fornito dall'azienda ABB, società tecnologica a livello globale, la quale ha sviluppato "ABB Ability™ Smart Sensor" per i motori a bassa tensione.

Viene riportata in *figura 5.30* l'immagine del sensore:



**Figura 5.30:** Sensore ABB [33]

Questo sensore converte i motori tradizionali in motori smart, collegandoli ai dispositivi senza alcun cavo e, tramite algoritmi particolari studiati dall'ABB, raccoglie le informazioni sullo stato di salute del motore. Viene letteralmente "attaccato" sul telaio del motore e tramite la tecnologia Bluetooth comunica ed invia i dati operativi ad una piattaforma cloud. I dati che possono essere raccolti dal sensore sono: vibrazioni, temperatura del motore, velocità di rotazione. In seguito, utilizzando degli algoritmi, sarà possibile conoscere

condizioni dei cuscinetti, eccentricità del traferro, condizioni dell'avvolgimento del rotore, consumi energetici, ore di esercizio, numero di avvii. La successiva analisi dei dati raccolti fornirà indicazioni più chiare circa lo stato di salute del motore. In questo modo è possibile pianificare interventi in base alle effettive esigenze della macchina.

Tra le caratteristiche principali di questo sensore troviamo quindi:

- Facilità e rapidità di installazione;
- Trasferimento dei dati senza cablaggio;
- Possibilità di salvare tutti i dati su un cloud in modo da poterli usare per analisi future.

Vengono adesso riportate in *figura 5.31* le specifiche tecniche del sensore:

<b>SPECIFICATIONS</b>	
<b>Temperature measurement</b>	
Measurement range	-40 °C to +85 °C
Resolution	0.05 °C
Accuracy (baseplate temperature)	+/-0.5 °C
<b>Vibration measurement (overall velocity values)</b>	
Amplitude range	0.04 - 700 mm/s (25 Hz)
Frequency range	10 Hz - 1 kHz
<b>Wireless communication</b>	
Network / radio standard	Bluetooth® 4.0 / IEEE 802.15.1
Frequency	2.4 GHz, license free ISM band
Range	With mobile phone: 1 - 10 m With gateway: approx. 50 m (can vary in an industrial environment depending on the facility layout)
<b>Power</b>	
Battery type (not replaceable)	3.0 V Lithium Permanganate (Li-MnO4) button cell CR2477N
Estimated battery lifetime	Batteries have a design life of 5 years. Expect 3 - 5 years depending on usage, settings and temperatures
Measured skin temperature (°C)	+40 °C      +70 °C
Battery life in years, sensor in default configuration	approx. 5      approx. 3
Default configuration: Sensor measures once per hour and stores data to memory. Stored data must be collected at least monthly with a Bluetooth® mobile device or gateway.	
<b>Environmental</b>	
Temperature	Operation: -40 °C to +80 °C Storage: +10 °C to +25 °C
IP class	IP66 (dust-tight and resistant to powerful water jetting)
Vibration (of mounted surface)	<15 g at 100 Hz
<b>Certifications</b>	
CE, FCC, IC, RCM, EAC, UL, C-UL, SRE, SUBTEL	
Safe areas only; no hazardous area certification	
<b>Physical</b>	
Weight	0.26 kg
Case material	Stainless steel/Thermoplastic
Mounting	Centrally on motor frame, parallel to motor shaft; ensure good contact Ensure that correct mounting kit is used; ready-made mounting kits might not be available for all kinds of motors

Figura 5.31: Specifiche sensore ABB [33]

Un aspetto negativo potrebbe essere proprio l'uso della tecnologia Bluetooth, in quanto soggetta a interferenze dovute ad esempio a ostacoli fra il sensore e il dispositivo che riceve i dati. Nel caso in cui vengano adoperati più sensori, l'azienda ha sviluppato l'ABB Ability™ Smart Sensor gateway [33], che si occupa di raccogliere automaticamente i dati da un certo numero di sensori e li trasmette al cloud per essere analizzati. Questo sensore permetterebbe quindi, dato il gran numero di dati che può raccogliere, di svolgere analisi diverse senza dover utilizzare sensori differenti. Potrebbe ad esempio essere utilizzato per un'analisi delle vibrazioni del motore e allo stesso tempo controllare la temperatura del motore tramite l'efficienza del raffreddamento, evitando l'installazione di ulteriori sensori all'interno del motore.

Un altro esempio di azienda che ha sviluppato soluzioni per il condition monitoring è la Balluff, specialista in sensori e soluzioni per l'automazione. Essa propone due tipi di sensori in grado di rilevare diverse grandezze fisiche come: vibrazioni, temperatura, umidità relativa, di elaborarle e successivamente inviarle, tramite IO-Link ad un sistema di acquisizione. L' IO-Link è un protocollo di comunicazione seriale basato su standard aperti che consente lo scambio bidirezionale dei dati tra i sensori e i dispositivi che supportano IO-Link. Così facendo si riesce a rendere più efficiente ed affidabile l'intero impianto. Inoltre, i sensori comunicano anche il proprio stato di funzionamento, così da sapere se il sensore funziona nel miglior modo possibile o se è necessario un controllo. Le caratteristiche di questi sensori sono:

- Possibilità di effettuare misure differenti con lo stesso dispositivo;
- Circuito per l'analisi dei dati incorporato nel sensore;
- Indicatori di stato;
- Connessione veloce e semplice grazie all'IO-Link;
- Compattezza per l'utilizzo anche in spazi ristretti.

Altra caratteristica che li rende particolarmente indicati è la possibilità di poter impostare dei valori limite per gli allarmi, così facendo il sensore segnalerà immediatamente determinate condizioni.

Vengono riportate in *figura 5.32* le immagini e le specifiche tecniche dei due sensori:

CONDITION MONITORING  
SENSOR WITH  
MULTIFUNCTION



	BCM0002	BCM0001
Function modules	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Vibration (velocity/acceleration)</li> <li>■ Contact temperature</li> <li>■ Relative humidity</li> <li>■ Ambient pressure</li> <li>■ Sensor self-awareness</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Vibration (velocity/acceleration)</li> <li>■ Contact temperature</li> <li>■ Sensor self-awareness</li> </ul>
Vibration, frequency range	2...3200 Hz	2...3200 Hz
Vibration, measuring principle	MEMS	MEMS
Measuring range	Vibration, velocity RMS	0...220 mm/s at 79.4 Hz (3 measuring axes)
	Vibration, acceleration RMS	0...16 g
	Contact temperature	0...70 °C
	Relative humidity	5...95 %RH
	Ambient pressure	300...1100 hPa
Interface	IO-Link 1.1, COM3 (230.4 kBaud)	IO-Link 1.1, COM3 (230.4 kBaud)
Interface setting options	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Flexible process data configuration</li> <li>■ Vibration measurement based on ISO 10816-3</li> <li>■ Data preprocessing (e.g. RMS, peak to peak, mean, standard deviation, min, max)</li> <li>■ Events (pre-alarms and main alarms)</li> <li>■ Delay times for alarms</li> <li>■ Search function with LED display (plng)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Flexible process data configuration</li> <li>■ Vibration measurement based on ISO 10816-3</li> <li>■ Data preprocessing (e.g. RMS, peak to peak, mean, standard deviation, min, max)</li> <li>■ Events (pre-alarms and main alarms)</li> <li>■ Delay times for alarms</li> </ul>
IP rating	IP67	IP67, IP68, IP69K
Housing material	Stainless steel (1.4404, 1.4301)	Stainless steel (1.4404, 1.4301)
Dimensions	32 × 20 × 10 mm	32 × 20 × 10 mm
Connection	1.5 m PUR cable with M12 male, 3-pole	1.5 m PUR cable with M12 male, 3-pole

Figura 5.32: Sensori Balluff con scheda tecnica [50]

La differenza tra i due modelli sta nel rilevamento della pressione ambiente e dell'umidità relativa, infatti il secondo sensore non permette di acquisire tali dati. Questo non è necessariamente un aspetto negativo, in quanto dipenderà poi dal tipo di applicazione per cui verrà utilizzato.

Volendo rimanere sul campo del condition monitoring, un'azienda specializzata è la "DarkWave Thermo". Propone vari dispositivi per il monitoraggio dei motori elettrici, inoltre è anche partner tecnico e distributore autorizzato di Easy Tool, l'importatore ufficiale italiano degli strumenti statunitensi ALL-TEST Pro. Tra le varie soluzioni proposte troviamo uno strumento per il monitoraggio tramite analisi di tipo ESA (Electrical Signature Analysis) online. Lo strumento in questione è "ATPOL II" della gamma ALL TEST Pro.

Riportata in *figura 5.33* l'immagine dello strumento:



**Figura 5.33:** ATPOL II [51]

Oltre a verificare motori AC/DC e le macchine ad essi collegati, può essere usato anche per il controllo di generatori, alternatori e inverter. L'apparecchio viene collegato ai circuiti elettrici di comando tramite dei connettori e i vari test vengono effettuati con il sistema in funzione. Le forme d'onda di corrente e tensione acquisite vengono controllate tramite analisi dello spettro. Tra i vari parametri che è possibile controllare abbiamo: entità del carico, squilibri di corrente e tensione, difetti nel rotore.

Le specifiche tecniche sono riportate in *figura 5.34*:

<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Size: 3.88" x 7.72" x 2.14" (9.86cm x 19.61cm x 5.44cm)</li> <li>✓ Weight: 1.1 lb (0.50 kg)</li> <li>✓ Operating range: 32°- 122° F (0° – 50° C) and relative humidity to 70%</li> <li>✓ Power requirement: 12 VDC @ 500mA, wall mount power supply included. Internal Li-ion operates 8 hours after 4 hours charge.</li> <li>✓ Environmental Protection: IP40 per IEC 529</li> <li>✓ Voltage: 1-1000 Vrms steady state using the 1-6000A Flex CT (#45011); Display Range 1-6 megavolt (using input ratios); Accuracy 0.1% of reading over input range +/- 0.3 Vrms; Repetition Rate – Measure every cycle of every input. Frequency Response: No de-rating of accuracy for harmonics through 3900 Hz.</li> <li>✓ Current: 0.005 – 6000 Amps, AC or DC with proper CT attached; Display Range 1mA – 6 Megamps (using input ratios); Accuracy 0.1% plus accuracy of current probe; Repetition rate – Measure every cycle of every input. Frequency Response: dependent on current probe attached. With HA1000: no de-rating of accuracy for harmonics through 3900 Hz.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Frequency: 0.25% accuracy for                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• DC, 22 – 200 Hz, 360 – 440 Hz fundamental frequency</li> <li>• DC and 22-3900 Hz included in RMS</li> <li>• 22-3900 Hz for harmonic measurements</li> </ul> </li> <li>✓ Harmonic Distortion: Out to 65th range; 1% resolution of fundamental</li> <li>✓ Power, Energy, Cost, Power Factor: 1 Watt to 999MW display range; 0.5% accuracy plus accuracy of CT</li> <li>✓ Swell/Dip Detection: RMS measured every half cycle of every input</li> <li>✓ High Speed Transient Detection: Measured every 8 µSec on every input</li> <li>✓ Quantity of Captured Waveforms – set by user allocation of memory</li> <li>✓ SD Memory Card Slot for SD cards up to 32 GByte</li> </ul>
---	---

**Figura 5.34:** Specifiche tecniche ATPOL II [51]

Quelle riportate finora sono aziende che forniscono delle soluzioni abbastanza innovative nel campo del condition monitoring, con strumenti in grado di controllare più parametri contemporaneamente. Esistono altre aziende che, oltre a produrre strumenti di misura per il monitoraggio delle condizioni delle apparecchiature, offrono test per la ricerca di guasti sviluppati per superare le criticità delle principali industrie.

Una di queste è la “Fluke” [10], già citata in precedenza per quanto riguarda i difetti riscontrabili nei motori elettrici. L’azienda, oltre a proporre una vasta gamma di strumenti per il controllo delle apparecchiature, suggerisce quali sono i test da effettuare per riuscire a prolungare la durata operativa del motore [52]. Questi sono: misura di temperatura, vibrazioni, allineamento alberi, resistenza d’isolamento ed elettrica. Tutte queste procedure sono abbastanza rapide e facili da eseguire, data la possibilità di eseguirli tramite l’utilizzo di strumenti portatili. I risultati ottenuti dai test sono molto importanti poiché forniscono indicazioni sulle prestazioni del sistema e quindi aiutano a capire quando sarà necessario un intervento di manutenzione.

Più nel dettaglio abbiamo:

- Controllo della temperatura: Una temperatura elevata non indica necessariamente un problema, ma un componente con temperatura superiore rispetto a quelli simili circostanti oppure un aumento della temperatura potrebbero indicare una qualche anomalia;
- Analisi delle vibrazioni: Per rilevare problemi di squilibrio, disallineamento, allentamento e problemi dei cuscinetti;
- Misura della resistenza d’isolamento: La misura della resistenza d’isolamento relativa agli avvolgimenti del motore consente di individuare preventivamente il livello di deterioramento causato da calore, invecchiamento, corrosione, sporco, umidità e vibrazioni eccessive;
- Squilibrio della corrente elettrica: Una delle cause alla base del surriscaldamento del motore, può essere dovuto a cause come l’erogazione dell’alimentazione difettosa, o un guasto della resistenza di isolamento all’interno degli avvolgimenti del motore;
- Disallineamento dell’albero: Porta alla nascita di vibrazioni nel motore le quali possono portare alla generazione di guasti nei cuscinetti. Ciò comporta la loro sostituzione, in procedure di riparazione e tempi di inattività non pianificati. Inoltre, riduce la durata della vita operativa del macchinario.

Naturalmente vengono offerti anche gli strumenti necessari per svolgere tali test. Tra i prodotti si possono trovare telecamere acustiche con diversi range di misurazione, sonde amperometriche per il rilevamento della corrente, sensori di vibrazioni, termocamere, strumenti per l'allineamenti di alberi e molto altro.

Altra azienda che deve essere citata è l'SKF [5], azienda specializzata nella produzione e nella vendita di cuscinetti volventi e servizi correlati al mercato interno ed esterno, che offre un'ampia gamma di servizi e prodotti per la revisione, la manutenzione e il monitoraggio dei macchinari rotanti. In particolare, la SKF Solution Factory la quale offre servizi per migliorare l'efficienza e l'affidabilità degli asset, ridurre i costi di manutenzione, incrementare la produttività e ottimizzare il design delle macchine critiche.

Per quanto riguarda i motori elettrici, oltre a produrre cuscinetti appositi per resistere alle correnti e cuscinetti sensorizzati per avere feedback sul motore, SKF offre interventi di manutenzione predittiva con attività statiche e dinamiche:

- **Analisi Statiche:** Sono dei test volti a verificare tutti gli isolamenti presenti all'interno del motore, dai rivestimenti delle singole spire, all'isolamento tra le fasi fino all'isolamento verso terra. Per individuare la presenza di difetti nel motore è indispensabile eseguire tutti i test;
- **Analisi Dinamiche:** Monitorando il motore durante il normale funzionamento è possibile valutare in tempo reale tutte le grandezze elettriche in gioco e visualizzare eventuali problematiche a esse legate (sbilanciamenti delle tensioni e delle correnti, distorsione armonica). Utilizzando le funzioni dedicate all'analisi in frequenza è possibile diagnosticare problematiche elettriche e meccaniche, provenienti sia dal motore stesso (eccentricità rotorica, barre rotoriche danneggiate) che dal carico ad esso collegato (squilibrio, disallineamento).

Un'altra azienda è la ISE [53], che si occupa di manutenzione predittiva e condition monitoring. Oltre a produrre strumentazione per il condition monitoring, offre servizi di consulenza, tutoraggio e monitoraggio.

Alcuni dei principali test che vengono generalmente eseguiti per valutare le condizioni di funzionamento sono:

- **Analisi delle vibrazioni:** eseguita tramite strumentazione portatile o con sistemi online che vengono installati sulla macchina. Quando vengono rilevati livelli di vibrazione che superano il range stabilito, e che quindi potrebbero indicare guasti, vengono fatte delle previsioni per individuare

il possibile momento del guasto;

- Termografia: tramite termocamera vengono rilevate le zone con squilibri termici rispetto ai range di temperatura di esercizio, che dipende dal tipo di motore. In seguito, si individuano le cause dell'anomalia e si preparano le opportune azioni correttive;
- Misure elettriche: vengono eseguite diagnosi sui motori elettrici per indicare danni agli avvolgimenti, squilibri di corrente o tensione. Le analisi vengono eseguite sia con il motore in funzione sia a macchina ferma, per indagini più accurate.

Altri test sono: misure di ultrasuoni, ispezioni videoendoscopiche (un'analisi di tipo visivo), controllo dell'allineamento delle macchine rotanti.

Anche la CMS (Condition Monitoring Services Inc.) [54], come la precedente, offre consulenze e servizi di monitoraggio sul campo. Questi si basano sull'analisi delle vibrazioni, analisi ad infrarossi ed ultrasuoni.

Vi è poi la Siemens [55], che oltre a produrre diversi tipi di motori elettrici industriali offre anche dei sistemi di monitoraggio delle condizioni di funzionamento. In particolare, il SIPLUS CMS che utilizza tecnologie basate sull'IoT per migliorare la condivisione dei dati che vengono raccolti. Il sistema registra ed analizza i parametri meccanici e, tramite degli algoritmi già presenti al suo interno, fornisce informazioni per il rilevamento precoce dei danni meccanici.

Naturalmente quelle sopra citate non sono le uniche aziende presenti sul mercato che si occupano di questo tipo di applicazioni.

Volendone citare altre:

- Ifm: azienda che si occupa di sensoristica. Offre sensori per svolgere il monitoraggio dello stato di salute delle macchine, come ad esempio sensori per l'analisi delle vibrazioni. Inoltre, produce anche strumenti di tipo IO-Link, che migliora la comunicazione e il salvataggio dei dati raccolti [56];
- Eastway: altra azienda che offre soluzioni di condition monitoring. Oltre a proporre i classici test quali analisi vibrazionale, termografia, misure di tipo elettrico produce anche un sistema di monitoraggio online per permettere un controllo continuo del funzionamento delle macchine [57];
- Lenze: azienda italiana produttrice di motori elettrici, riduttori ed altro, offre anche soluzioni di condition monitoring. In particolare, soluzioni

basate sulla modellazione della macchina e sul machine learning [58].

Per fornire un quadro generale si può dire che la maggior parte delle aziende presenti sul mercato offre soluzioni che si basano sulle tecniche citate precedentemente.

In particolare soluzioni che riguardano il monitoraggio delle vibrazioni, tramite la produzione di strumenti e sensori, o tramite servizi di consulenza. A supporto di ciò viene riportato in *figura 5.35* un elenco dei siti delle aziende che sono stati analizzati:

Nome azienda	Sito internet
Ifm	<a href="http://www.ifm.com">www.ifm.com</a>
Eastway	<a href="http://www.eastwaytech.com">www.eastwaytech.com</a>
Lenze	<a href="http://www.lenze.com">www.lenze.com</a>
CMS	<a href="http://www.cms-online.be">www.cms-online.be</a>
SKF	<a href="http://www.skf.com">www.skf.com</a>
Fluke	<a href="http://www.fluke.com">www.fluke.com</a>
ISE	<a href="http://www.iseweb.net">www.iseweb.net</a>
BRÜEL & KJÆR VIBRO	<a href="http://www.bkvibro.com">www.bkvibro.com</a>
Valmet	<a href="http://www.valmet.com">www.valmet.com</a>
PdM Reliability	<a href="http://www.pdm-reliability.com">www.pdm-reliability.com</a>
RITEC	<a href="http://ritec-eg.com">ritec-eg.com</a>
Schaeffler	<a href="http://www.schaeffler.co.uk">www.schaeffler.co.uk</a>
Adash Ltd.	<a href="http://www.adash.com">www.adash.com</a>
PRUFTECHNIK	<a href="http://www.pruftechnik.com">www.pruftechnik.com</a>
Micromega Dynamics	<a href="http://www.micromega-dynamics.com">www.micromega-dynamics.com</a>
ERBESSD-INSTRUMENTS	<a href="http://www.erbessd-instruments.com">www.erbessd-instruments.com</a>
Emerson	<a href="http://www.emerson.com">www.emerson.com</a>

**Figura 5.35:** Elenco siti internet aziende

### 5.3 Cosa conviene scegliere

Dopo aver analizzato le varie proposte presenti sul mercato, in termini di metodologie e di strumenti, per favorire un funzionamento ottimale del motore, è opportuno fare un confronto per capire quale sia la migliore soluzione da applicare.

Tra le tecniche riportate:

- ESA (Electrical Signature Analysis);
- Analisi vibrazionale;
- Monitoraggio a ultrasuoni;
- Termografia.

Bisogna stabilire quale offra i migliori risultati in termini di affidabilità nel rilevamento prematuro dei guasti e monitoraggio continuo. È infatti questa la direzione verso cui il mercato si sta spingendo, ovvero un controllo perenne del motore durante il suo funzionamento in modo da individuare tempestivamente anomalie e problemi che porterebbero a fermi macchina o, nel peggiore dei casi, a rotture del motore o dei suoi componenti.

Come viene riportato all'inizio del capitolo, i principali guasti rilevabili nei motori elettrici sono quelli riguardanti cuscinetti e statore, sono poi presenti quelli relativi al rotore e ad altre cause. Una buona tecnica di monitoraggio dovrebbe quindi essere in grado di rilevare tali guasti e fornire informazioni aggiuntive sulla tipologia del difetto. Tra le tecniche sopra elencate tutte permettono di rilevare problemi provenienti dai cuscinetti e dallo statore, tramite la temperatura, le onde sonore, le vibrazioni o la corrente. Quelle che però forniscono informazioni aggiuntive su che difetto in particolare stia producendo un determinato effetto sono l'analisi della firma elettrica e l'analisi vibrazionale. Infatti, tramite lo studio delle componenti in frequenza, che viene svolto in entrambe le tecniche, è possibile conoscere quale componente in particolare sia responsabile per gli errori nel funzionamento del motore. Entrambe le tecniche sono molto valide e hanno dimostrato nel tempo di essere affidabili, quindi la scelta su quale metodo adottare va a ricadere sull'azienda. Questa, in base alle proprie esigenze, può decidere o di implementare delle strategie di condition monitoring oppure, considerato il costo iniziale di implementazione, affidarsi a delle aziende di consulenza per controllare lo stato dei propri macchinari, aziende come l'SKF o la Fluke. Bisogna però considerare che qualsiasi tecnologia di monitoraggio presenta punti di forza e di debolezza. Ogni tecnologia applicata darà una visione più completa dello stato di salute dell'attrezzatura

che viene controllata. Ad esempio, se si considerano le due tecniche prima citate, si può dire che tramite un'analisi delle vibrazioni alcuni guasti non vengono rilevati nello spettro di vibrazioni fino a quando il guasto non è relativamente grave. Questo vale ad esempio per l'usura delle cinghie o degli accoppiatori che collegano il motore elettrico al carico. Invece utilizzando l'MSCA si ha la capacità di rilevare il guasto con abbastanza anticipo da programmare eventi correttivi. Tuttavia, l'MCOSA non è destinata a sostituire un programma di vibrazione, è invece usata al meglio come tecnologia complementare a un buon programma di vibrazione. Infatti, un buon programma di manutenzione predittiva è potente se riesce a verificare i guasti con più di una tecnologia. Così facendo oltre a garantire la validità del guasto si riescono a fornire informazioni aggiuntive sulle modalità di riparazione del guasto.

Nel caso in cui l'azienda decida di procedere con tecniche di monitoraggio sarà necessario acquistare delle attrezzature adeguate, come sistemi di acquisizione dati, sensori, trasduttori o altro, in base al tipo di monitoraggio che si vuole implementare. A questo proposito, in base a quanto detto sull'utilizzo di più tecniche, si potrebbe pensare di utilizzare dei sensori capaci di rilevare più di dato nello stesso momento, così da poter poi effettuare diverse analisi contemporaneamente ed avere un panoramica maggiore su quelle che sono le condizioni del motore. In questo modo si evita anche di dover installare più sensori sulla stessa macchina, il che non sempre risulta veloce ed economico. Alle volte infatti l'installazione di sensori, come quelli negli avvolgimenti di statore, richiedono fermi macchina, il che porta ad una perdita per l'azienda. Una buona proposta in questo senso risultano i sensori proposti da ABB e da Balluff, i quali consentendo il rilevamento di più dati permettono un controllo più accurato delle prestazioni del motore.

Risulta quindi opportuno fare un confronto tra le caratteristiche comuni ai due sensori. Questo viene riportato in *figura 5.36*:

	ABB: <u>Ability™</u> Smart Sensor	Balluff: <u>BCM0002</u>
Misura di temperatura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Range di temperatura varia dai -40 ai +85 °C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Range di temperatura da 0 a 70 °C</li> </ul>
Misura delle vibrazioni	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Range di ampiezza da 0.04 a 700 mm/s</li> <li>• Range di frequenza dai 10 ai 1000 Hz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Range di ampiezza da 0 a 220 mm/s (velocità)</li> <li>• Range di ampiezza da 0 a 16 g (accelerazione)</li> <li>• Range di frequenza da 2 a 3200 Hz</li> </ul>
Tipo di connessione	Bluetooth 4.0 con portata fino a 50 m se si usa il gateway	Cavo PUR da 1.5 m

**Figura 5.36:** Confronto tra sensore ABB e sensore Balluff

Come si può notare il primo sensore presenta un range di temperatura leggermente maggiore, non considerando la parte al di sotto dello 0 (non utile per i motori elettrici generalmente). Per quanto riguarda il rilevamento delle vibrazioni entrambi rispettano il minimo range indicato dalla normativa ISO 10816, il sensore Balluff presenta però la possibilità di misurare anche l'accelerazione, oltre ad avere un range di frequenza maggiore. In quanto a comodità di installazione viene favorito il sensore ABB, grazie anche alla mancanza di cablaggio. Nonostante questo, essi non rappresentano la miglior scelta in assoluto. Infatti, questo dipenderà comunque dal metodo di monitoraggio, infatti nel caso in cui si voglia eseguire un'analisi degli ultrasuoni entrambi i sensori sono praticamente inutilizzabili. Da notare inoltre che nessuno dei due permette il rilevamento della corrente, quindi nel caso in cui si voglia eseguire un'analisi ESA si dovrà ricorrere a trasduttori o sonde di corrente.

In seguito alle varie ricerche il metodo consigliato per eseguire un monitoraggio predittivo del motore elettrico è quello di combinare diverse tecniche, così da avere informazioni più accurate sul difetto. Sicuramente un utilizzo in contemporanea di tecniche ESA e analisi vibrazionale fornirebbe abbastanza dati da prevedere la maggior parte dei guasti. Il monitoraggio tramite ultrasuoni sebbene sia più sicuro e rapido, considerando soluzioni senza l'uso di sensori ma con rilevazioni tramite strumentazione, oltre ad essere non invasivo non permette però di rilevare ogni possibile difetto che potrebbe essere presente, converrebbe quindi abbinarlo ad altre tecniche se si vuole avere un buon metodo di controllo. Ragionamento analogo per la termografia, il semplice rilevamento di temperatura non fornisce abbastanza indicazioni sul tipo di guasto.

## 6 Ambito letterario e possibilità future

Finora sono stati analizzati, tramite l'analisi dei brevetti, i risultati di ricerche svolte nel passato e che hanno portato allo sviluppo di diverse tecniche e di strumenti per favorire il monitoraggio dei motori elettrici. Nel precedente capitolo sono state anche illustrate le diverse proposte del mercato attuale, per quanto riguarda tecnologie e dispositivi utili ai fini dell'analisi delle condizioni dei motori elettrici nell'ambito industriale. Si passa ora ad uno studio riguardante pubblicazioni o articoli scientifici, provenienti da ricerche svolte nell'ambito del monitoraggio dei motori elettrici. Queste ricerche si basano sia sul semplice studio di tecniche già esistenti, in modo da capirne tutte le potenzialità, sia sullo sviluppo di nuove metodologie o strumenti di misura. Verranno inoltre riportate delle possibili soluzioni che si potranno o che si è già iniziato ad implementare nell'ambito industriale.

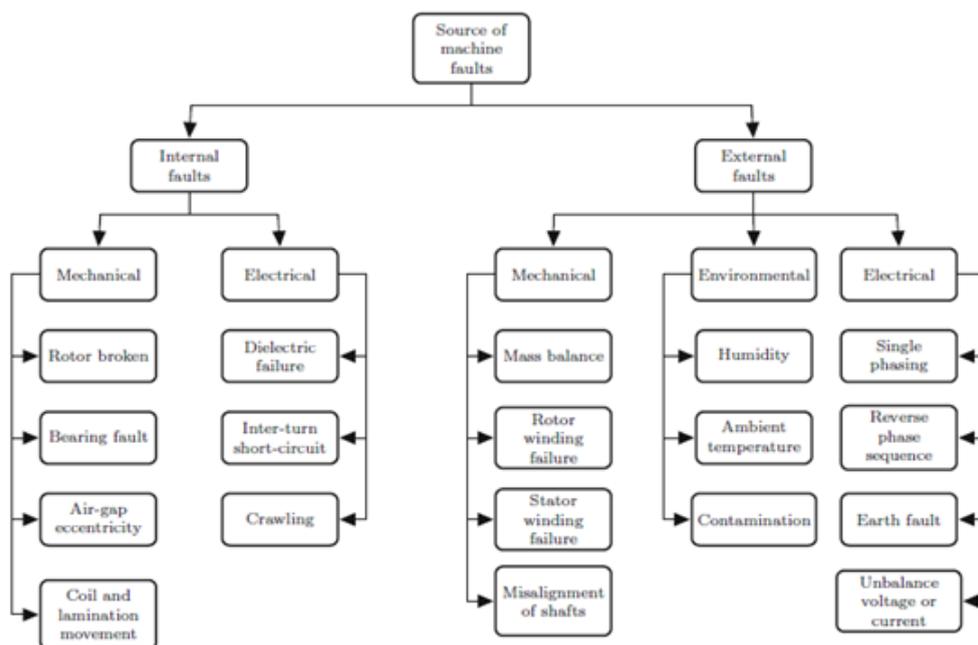
### 6.1 Metodi tradizionali

Prima di parlare di nuove tecnologie per il monitoraggio è opportuno cercare in letteratura anche qualche informazione riguardante i diversi metodi attualmente utilizzati. In questo modo si può fornire qualche ulteriore prova della validità delle tecniche citate nel capitolo precedente.

Interessante a questo proposito risulta: "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Induction Motors: A Review", scritto da Anurag Choudhary, Deepam Goyal, Sudha Letha Shimi, Aparna Akula e pubblicato nel 2018 [59].

L'articolo si concentra sulla ricerca e sulla sintesi dei recenti sviluppi nel campo del condition monitoring e della diagnosi dei guasti per determinare lo stato di salute dei motori a induzione. Prima di parlare di questo vengono elencati i vari guasti che è possibile ritrovare in un motore elettrico.

Viene riportato in *figura 6.1* un diagramma contenente i vari tipi di difetti a scopo illustrativo:



**Figura 6.1:** Classificazione difetti nei motori a induzione [59]

Nell’articolo sono anche presenti dati sui vari tipi di difetti ricavati da aziende quali ABB, IEEE, EPRI. Dopo una rassegna dei vari tipi di guasti che potrebbero essere presenti nei motori a induzione, tra questi i guasti relativi ai cuscinetti e allo statore sono i principali, vengono trattate alcune delle tecniche di condition monitoring utilizzate per rilevare tali difetti.

Vengono descritte tecniche come il monitoraggio delle emissioni acustiche, la termografia a infrarossi, l’analisi delle vibrazioni e l’analisi della corrente. Queste dopotutto sono tra le tecniche attualmente utilizzate per il rilevamento dei guasti, è quindi opportuno citarle anche nell’ambito letterario.

Il monitoraggio delle emissioni acustiche permetterebbe di rilevare, con un certo anticipo, alcune condizioni di guasto, così da trovare in tempo soluzioni per la manutenzione. Utilizza tecniche basate sul monitoraggio degli ultrasuoni per rilevare problemi relativi ai cuscinetti e al rotore. È stato osservato in letteratura che questo metodo di monitoraggio è meno efficiente per la diagnosi dei guasti nei motori rispetto ai metodi di monitoraggio sviluppati di recente. Questo è riportato in articoli quali:” A comparative experimental study on the use of acoustic emission and vibration analysis for bearing defect identification and estimation of defect size” [60], “Machinery faults detection using acoustic

emission signal” [61], “Acoustic analysis techniques for condition monitoring of roller bearings” [62].

Alcuni dei guasti verificatisi nei motori a induzione e rilevati utilizzando la tecnica di analisi delle emissioni acustiche sono riportati in *figura 6.2*:

Fault	Year	Data processing/feature extraction	Input signal	Description
Bearing	2000	Method of ringdown counts	AE	Ring down counts based on acoustic signal has ability to detect faults in both rolling ball and inner race of the bearings
Bearing defect	2006	Data acquisition and FFT	Vibration and AE	Effective to detect bearing defects
Bearing and seal rubbing	2011	Discrete wavelet transforms	Vibration and AE	Improves air-gap torque profile for both healthy and faulty conditions of IM (with one broken). bar
Bearing	2013	Data acquisition card using LabVIEW software	AE	Data acquisition approach for monitoring the bearing defects

**Figura 6.2:** Riepilogo del monitoraggio di diversi difetti utilizzando le emissioni acustiche [59]

La termografia a infrarossi è una tecnica di monitoraggio non invasiva, utilizzata come strumento di rilevamento dei guasti senza contatto. Uno dei principali vantaggi della termografia è che richiede una strumentazione minima, inoltre non è invasiva e non richiede un fermo macchina.

È stata oggetto di molti studi, come ad esempio:” Fault detection in induction motors and the impact on the kinematic chain through thermographic analysis” [63], in cui viene proposta una nuova tecnica per il rilevamento precoce dei guasti e inoltre, viene studiato l’impatto su una catena cinematica utilizzando la termografia. È stato dimostrato che la tecnica proposta ha la capacità di migliorare la diagnosi e che può essere applicata anche a qualsiasi motore a induzione che sia a regime termico.

In *figura 6.3* vengono riportati dei guasti rilevati tramite la termografia:

Fault	Year	Camera used	Detector (spectral range in $\mu\text{m}$ )	Description
Inter-turn	2013	FLIR-i60 TIR	Uncooled microbolometer (7.513 $\mu\text{m}$ )	Infrared images of IM are considered for feature extraction using image processing i.e. Histogram mean value, Hullindex, and Hotarea
Broken rotor bar, bearing, mass unbalance	2014	FLIR A310	Uncooled microbolometer (7.513 $\mu\text{m}$ )	Diagnosis can be performed with weak signal
Losses estimation	2014	FLIR InfraCam SD	Uncooled FPA microbolometer (8–14 $\mu\text{m}$ )	An image processing technique divides a thermal image in several isotherms to calculate the natural convection in each image
Cooling	2015	–	Uncooled FPA microbolometer (8–14 $\mu\text{m}$ )	Prevented the IM components before any catastrophe failures
Misalignment	2015	FLIR 440	Uncooled microbolometer (7.513 $\mu\text{m}$ )	Developed an on-line temperature measurement system to detect abnormal conditions
Thermal error	2015	FLIR ThermoCAM565	Uncooled microbolometer (7.513 $\mu\text{m}$ )	Generated an ANFIS based thermal error model of machine tools using fuzzy c-means clustering
Cooling	2016	FLIR-E60	Uncooled microbolometer	Ability to extract the features from weak signals and to early detect the faults in IM
Bearing	2016	FLIR Lepton	Uncooled VOx microbolometer (8–14 $\mu\text{m}$ )	An economical thermographic analysis based bearing fault detection in IM
Bearing	2016	FLIR A310	Uncooled microbolometer (7.513 $\mu\text{m}$ )	Determine the level of affectation on IM monitoring using thermal analysis
Bearing, cooling	2017	model Fluke Ti-100	Uncooled microbolometer (7.5–14 $\mu\text{m}$ )	Cover better analysis under various operating conditions of IM in petrochemical plant
Broken bars, bearing	2017	FLIR E4	Uncooled microbolometer (7.513 $\mu\text{m}$ )	Proposed a novel method of area selection of image differences using three classifiers i.e. nearest neighbour (NN), k-means, back propagation neural network (BPNN)

**Figura 6.3:** Alcuni difetti rilevati utilizzando la termografia a infrarossi [59]

Durante il loro funzionamento i motori generano delle vibrazioni che sono collegate al loro stato di salute. Nel caso in cui siano presenti dei problemi, le vibrazioni generate cambieranno di conseguenza. Queste vibrazioni sono causate dall'effetto della forza elettromagnetica sulle parti del motore. Nell'articolo [59] viene anche riportata un'espressione matematica che indica questo tipo di vibrazione.

La *formula* 6.1 mostra la suddetta equazione:

$$P(\alpha, t) = P(r, w) \cos(r\alpha - wt - \Psi_p) \quad (6.1)$$

Nell'equazione 6.1:

- $P(r, w)$  è l'ampiezza della forzante;
- $r$  rappresenta il modo di vibrare;

- $\Psi_p$  l'angolo di fase;
- $w$  la frequenza angolare;
- $\alpha$  la coordinata angolare;
- $t$  il periodo.

In caso di guasto viene generato un forte segnale vibrazionale, mentre quando il motore lavora in condizioni normali il segnale è debole. Per ricavare i dati necessari ad eseguire un'analisi vibrazionale è necessario utilizzare sensori come gli accelerometri, che vengono montati opportunamente sulla macchina. Tramite degli algoritmi è poi possibile individuare la causa del guasto.

In *figura 6.4* sono riportati dei rilevamenti di difetti effettuati tramite l'analisi delle vibrazioni:

Fault	Year	Data processing/feature extraction	Input signal	Description
Bearing	1999	Time and frequency domains along with signal processing techniques	Vibration	Computed individual signal processing techniques using theoretical and experimental data
Phase imbalance	2012	STFT	Vibration	Developed vibration monitoring procedure for phase imbalance of IM
Inter-turn short circuit	2012	Vibration specified harmonic amplitude	Vibration	Accomplished a series of time-domain analysis and frequency-domain analysis for inter-turn short circuit
Broken rotor	2013	Vibration signal analysis using FFT	Steady-state vibration	Developed a load independent fault diagnosis method
Fan gearboxes	2000	FFT analyser	Current	Investigated the ability of spectrum analysis for diagnosing the defective elements in gearbox
Bearing	2017	Vibration spectrum analysis using FFT	Current	Diagnose the slight misalignment between the bearings, overall vibration and the spectra gives much quicker and precise results

**Figura 6.4:** Riepilogo del monitoraggio di diversi difetti utilizzando le vibrazioni [59]

Per quanto riguarda l'analisi della corrente, la MCSA (Motor Current Signature Analysis) è stata considerata una delle tecniche più popolari per individuare difetti nelle macchine elettriche rotanti. Essa consiste, com'è già stato detto precedentemente, nell'acquisire i segnali di corrente dallo statore e successivamente analizzarli per produrre uno spettro in frequenza. Tramite questo spettro è possibile determinare la presenza e le cause di possibili difetti nel motore elettrico. I segnali di corrente vengono misurati tramite sensori come

le sonde di corrente, che vengono collegate ai cavi di alimentazione. Questo tipo di monitoraggio si basa sulle variazioni generate nel segnale di corrente a causa di difetti nei componenti.

La *figura 6.5* mostra degli esempi di rilevamenti di difetti effettuati tramite MCSA, che viene utilizzata come strumento per il condition monitoring di motori a induzione:

Fault	Year	Data processing/feature extraction	Input signal	Description
Broken rotor bar or stator	2001	FFT	Stator current	To improve MCSA monitoring technique for broken rotor bar
Stator broken rotor bars, bearing	2007	FFT	Stator current	To develop start-up current procedure on basis of MCSA. Four case studies of IM fault diagnosis have also been presented
Broken bar	2011	Neural Network	Stator current	High performance MCSA technique with NN has been proposed. Mixed eccentricity harmonic inherent can be detected efficiently
Bearing, mass unbalanced misalignment	2014	FFT	Stator current	Complementary technique for incipient bearing fault detection using IRT and MCSA
Bearings, broken rotor bars, air-gap eccentricity	2015	FFT, wavelet analysis, Park's vector approach, fuzzy logic	Stator current	An early fault detection system with intelligent approach

**Figura 6.5:** Riepilogo del monitoraggio di difetti tramite la MCSA [59]

In letteratura [81] vengono nominate altre due tecniche: il monitoraggio del suono e l'analisi chimica.

Nel primo caso, quando ad esempio si ha un difetto in un cuscinetto, si verrà a generare del rumore. Il monitoraggio dei cuscinetti potrebbe quindi essere fatto attraverso la misura della sua pressione acustica. Per effettuare questo tipo di analisi lo strumento utilizzato è il microfono. Questo infatti permette di registrare il rumore prodotto dai cuscinetti, che può poi essere analizzato da degli operatori. La misura del suono ha dimostrato di interferire meno con il funzionamento del motore rispetto alle altre tecniche, però i rumori indesiderati e il suono di sottofondo devono essere separati, per non falsare l'analisi. Nel caso in cui non si riesca a isolare le diverse fonti di rumore si avranno delle analisi errate. Questa tecnica non è però usata nel monitoraggio dei motori elettrici industriali, infatti non vi è alcuna praticità nell'applicare la misura del rumore in un impianto industriale. Questo perché la presenza di altri macchinari in funzione renderebbero molto bassa la precisione del rilevamento.

Per quanto riguarda l'analisi chimica si sa che la degradazione dei lubrificanti mediante il calore produce un gran numero di prodotti chimici sotto forma di stati solidi, liquidi e gassosi. Allo stesso modo, la degradazione dei cuscinetti

produce detriti. Pertanto, i lubrificanti hanno non solo i propri materiali di degradazione, ma anche quelli trasportati dai detriti dei cuscinetti. Quindi, l'analisi chimica di questi grassi e oli lubrificanti può essere utilizzata come strumento di diagnosi dei guasti e monitoraggio delle condizioni per i guasti dei cuscinetti. Sebbene l'analisi di questi grassi possa fornire informazioni utili sulla salute dei cuscinetti, l'analisi può essere eseguita solo se sono disponibili oli lubrificanti e grassi. Pertanto, questa analisi è applicabile solo a macchine di grandi dimensioni che utilizzano lubrificanti a olio. Per le macchine di piccole e medie dimensioni, i grassi sono solitamente incapsulati all'interno di cuscinetti e quindi i metodi di analisi chimica non sono effettuabili. Inoltre, i risultati dell'analisi non sono immediati in quanto si deve prima prevedere un fermo macchina per prelevare il campione di lubrificante da analizzare. Vengono quindi preferite altre tecniche all'analisi chimica del lubrificante.

Tra quelle sopraelencate, le tecniche principali e maggiormente utilizzate sono il monitoraggio delle vibrazioni e l'analisi della corrente, com'è stato già anticipato nei precedenti capitoli.

I risultati dei rilevamenti dei guasti sui motori utilizzando l'analisi delle vibrazioni e della corrente statorica sono anche stati confrontati, per stabilire quale metodo sia più efficace e in quale circostanza. Ne risulta che i guasti relativi allo statore sono più facilmente rilevabili tramite l'analisi della corrente di statore, quindi tramite l'uso della MCSA, mentre il monitoraggio tramite vibrazioni è molto utile per il rilevamento dei danni relativi ai cuscinetti.

Molti dei metodi sono costosi, complessi e non sempre riescono a fornire tutte le informazioni necessarie ad un buon monitoraggio. Inoltre, alcune tecniche riescono ad individuare facilmente solo un particolare tipo di guasto, ma non tutti. Attualmente il monitoraggio della corrente e delle vibrazioni sono le tecniche principali per il condition monitoring dei motori a induzione.

Dalla letteratura è stato ricavato che sono preferite agli altri metodi di diagnosi per una serie di motivi:

- Tecniche non intrusive, affidabili e non molto costose;
- Efficaci nell'analisi del segnale e quindi nell'indicare le attuali condizioni della macchina;
- Facilmente misurabili per l'elaborazione del segnale;
- Sono in grado di distinguere la maggior parte dei guasti meccanici ed elettrici;

- Possono essere eseguite online, poiché sia la corrente che le vibrazioni possono essere misurate online, grazie all'uso dei sensori.

Per analizzare i segnali acquisiti dai motori a induzione, e ricavarne informazioni utili al rilevamento di eventuali guasti, sono necessarie delle tecniche di elaborazione del segnale. Queste sono state sviluppate nel dominio del tempo, della frequenza e del tempo-frequenza. La scelta di uno dei tre dipende dal tipo di informazione desiderata per la diagnosi.

A questo proposito, nell'articolo: "Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review", di Purushottam Gangsar e Rajiv Tiwari, pubblicato nel 2020 [64] vengono descritti i tre tipi di dominio:

- Tempo: Quando si verificano guasti nei diversi componenti dei motori a induzione, i segnali di vibrazione e di corrente variano nel dominio del tempo. La distribuzione e l'ampiezza dei segnali variano in base alle condizioni di guasto ma la differenza tra i segnali di vibrazione di motori normali senza difetti e quelli difettosi non è facilmente distinguibile. Per quanto riguarda i segnali di corrente, la variazione per i diversi guasti non è chiaramente rilevabile poiché la frequenza di linea è la componente principale e il segnale di guasto è modulato sull'onda sinusoidale della frequenza di linea. Cambiamenti o variazioni nei segnali di vibrazione e corrente per diversi tipi di guasto non possono essere previsti o distinti esaminando direttamente questi segnali, a causa delle scarse informazioni o degli squilibri della macchina, specialmente nella fase iniziale del guasto. Questo significa che le variazioni nel dominio del tempo per i segnali di corrente e di vibrazioni sono troppo piccole per essere rilevate e quindi un confronto fra i segnali di un motore sano e uno difettoso non è efficace per individuare la presenza di guasti. Per poter effettuare un confronto bisognerebbe quindi elaborare i segnali in una forma più appropriata e, tipicamente, si ricorre all'estrazione delle funzioni statistiche che possano fornire indicazioni sui guasti rilevabili. Bisogna però capire quale caratteristica sia sensibile ad un determinato guasto;
- Frequenza: La presenza di guasti in un motore a induzione va a cambiare lo spettro in frequenza dei segnali di vibrazione e di corrente, modificandone la distribuzione con la comparsa di nuove componenti in frequenza. Queste componenti sono caratteristiche del tipo di guasto che le ha causate e quindi analizzandole è possibile capire quale sia il componente difettoso. Comunque, per sistemi complessi risulta difficile individuare le frequenze caratteristiche dei difetti, poiché gli spettri di corrente o delle

vibrazioni possono essere influenzati da diversi fattori, come ad esempio rumore di fondo o anche la presenza di altri difetti. Lo spettro in frequenza, quindi, potrebbe non essere sempre affidabile;

- Tempo-Frequenza: Questo tipo di analisi, in seguito a varie prove, è stata ritenuta efficace per il rilevamento dei guasti. Infatti, studiando l'evoluzione dello spettro dei segnali vibrazionali al variare del tempo è possibile migliorare l'estrazione delle informazioni per l'individuazione dei difetti.

I classici metodi basati sull'analisi dei segnali non sono però sempre affidabili, in quanto dipendono dalle condizioni di funzionamento del motore. Sono quindi stati sviluppati anche metodi di diagnostica basati su modelli matematici, a volte detti model based. Questi ultimi possono essere più efficaci degli altri solo se il modello sviluppato è molto accurato. Purtroppo, sono spesso necessarie delle ipotesi per poter sviluppare un modello che tenga in considerazione la dinamica di una macchina, inoltre non è possibile sviluppare dei modelli affidabili per sistemi complessi. Tra i due diversi metodi sono quindi preferiti i primi, spesso indicati come data driven.

## 6.2 Diagnosi dei guasti basata sull'intelligenza artificiale

Con l'aumento del numero di macchine rotanti è aumentata anche la necessità di sviluppare dei sistemi di manutenzione economici ed efficienti, in modo da garantire l'affidabilità delle macchine.

Negli ultimi anni sono quindi state sviluppate tecniche di monitoraggio più sofisticate, basate sull'intelligenza artificiale. Questi metodi di diagnosi rappresentano, anche se spesso ancora solo in embrione, una procedura affidabile per diagnosticare i guasti di tipo meccanico ed elettrico nei motori ad induzione. In questo modo migliorano anche l'efficienza della diagnosi dei guasti, specialmente durante il processo di manutenzione predittiva. Le diagnosi basate su questa tecnologia sono state considerate migliori rispetto agli approcci tradizionali, in quanto si basano solo sui dati e quindi non richiedono la conoscenza dettagliata del modello del motore o l'interazione di un operatore che analizzi i risultati.

Le tecniche basate sull'IA utilizzano degli algoritmi di associazione, che permettono ad esempio collegare i "sintomi" della macchina con la presenza di un determinato difetto, e i processi decisionali per risolvere i problemi di diagnostica.

In entrambi gli articoli sopra citati [59],[64] viene fatto riferimento a questi nuovi metodi di diagnosi.

I sistemi diagnostici basati sull'intelligenza artificiale sono formati da metodi basati sull'analisi dei segnali e da strumenti di classificazione, come ad esempio: Artificial Neural Network (ANN), Fuzzy Logic (FL), Support Vector Machine (SVM). Un loro futuro sviluppo potrebbe portare ad un miglioramento nel rilevamento dei guasti ed alla capacità di autodiagnostica delle macchine. Questi sistemi possono analizzare dati differenti, come ad esempio vibrazioni, correnti, temperatura.

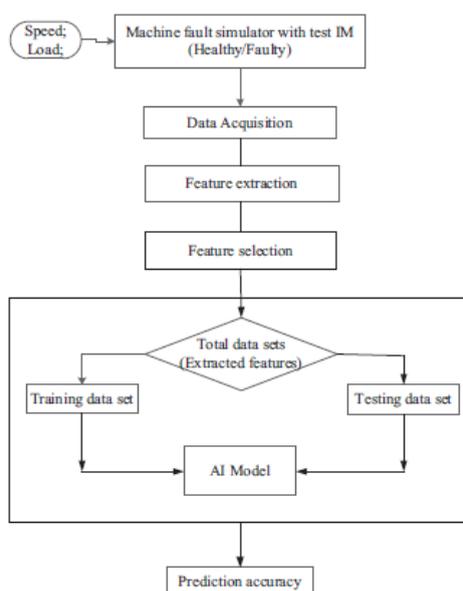
Il loro funzionamento si basa generalmente su cinque steps:

1. **Acquisizione dei dati:** I dati vengono acquisiti tramite l'uso di sensori o strumenti di misura e vengono in seguito analizzati;
2. **Estrazione delle caratteristiche (features):** Utilizzata per ridurre il numero dei dati acquisiti considerando solo quelli importanti, ossia che forniscono delle informazioni utili per capire le condizioni della macchina. Queste caratteristiche possono essere determinate utilizzando dati nel dominio del tempo (valor medio, varianza, deviazione standard), nel dominio della frequenza (RMS, ampiezza dello spettro) e anche nel dominio tempo-frequenza (coefficienti delle diverse trasformate come ad

esempio la Wavelet). È importante scegliere il metodo più adatto prima di estrarre le caratteristiche del segnale, poiché è da queste che dipende il funzionamento dell'algoritmo;

3. Selezione delle caratteristiche: Vengono selezionate le caratteristiche più rilevanti per la determinazione del guasto, per far ciò si possono utilizzare delle tecniche di ottimizzazione, come ad esempio l'analisi della componente principale (PCA);
4. Diagnosi del guasto: Il guasto viene individuato, isolato e identificato. L'individuazione indica la presenza di un difetto nella macchina, l'isolamento permette di capire quale componente della macchina è guasto, l'identificazione determina la gravità e il tipo di guasto;
5. Previsione sul sistema: Viene fatta una previsione sulla vita residua della macchina, in questo modo è possibile agire di conseguenza e prendere le giuste contromisure. Non è comunque affidabile al 100%, per questo motivo deve essere affiancata dalla diagnosi e non può rimpiazzarla completamente.

Viene riportato in *figura 6.6* l'esempio di un grafico illustrante il funzionamento della diagnostica tramite IA:



**Figura 6.6:** Diagnosi dei guasti tramite intelligenza artificiale [64]

Vengono adesso descritti i sistemi citati precedentemente:

- ANN: Un Artificial Neural Network è un algoritmo che permette ad un computer di imparare dall'esperienza e poter prevedere un risultato a partire da determinate informazioni. È la tecnica basata sull'IA più comunemente utilizzata ed è stata molto studiata in letteratura per riuscire a svilupparne un affidabile sistema di monitoraggio. Ad esempio, nell'articolo: "A neural network approach to real-time condition monitoring of induction motors" [65] il NN viene utilizzato come base per un sistema di rilevamento dei guasti incipienti per motori di piccola e media taglia. Questo sistema sarebbe in grado di superare i limiti diagnostici riscontrabili in altre procedure grazie all'utilizzo di parametri aggiuntivi, come ad esempio la corrente dello statore. In: "ANN Based multi-classification using various signal processing techniques for bearing fault diagnosis" [66] sono stati analizzati i difetti dei cuscinetti tramite l'uso della Wavelet Packet Decomposition (WPD) unito all'ANN, con una percentuale di rilevamento dei difetti pari al 90%. L'ANN è stato anche utilizzato per individuare dei difetti basandosi sulle immagini termiche acquisite tramite termocamera. Questo è riportato nell'articolo: "Diagnosis of the three-phase induction motor using thermal imaging" [67], in cui gli autori hanno sviluppato una tecnica per l'estrazione delle caratteristiche basata sulle immagini termiche. Ma sono presenti degli svantaggi abbastanza rilevanti, come ad esempio il prezzo delle termocamere, che sono più costose rispetto ai sensori usati da metodi di analisi con altri segnali come ad esempio le vibrazioni;
- FL: Lo scopo principale della fuzzy logic è quello di ottimizzare la scelta delle priorità. In breve, è una logica multivalore dal funzionamento simile al vero/falso, come nel caso della logica booleana. Può però assumere qualsiasi valore compreso tra 0 e 1, in questo modo offre una certa flessibilità nelle decisioni imitando il ragionamento umano. Anche questa tecnica è stata studiata da molti ricercatori, in letteratura è infatti possibile trovare molti articoli relativi al suo studio. In: "A simple fuzzy logic approach for induction motors stator condition monitoring" [68] viene proposto l'utilizzo della FL per la diagnostica dei motori a induzione. Vengono utilizzate le sue funzioni di appartenenza per descrivere l'ampiezza della corrente dello statore, così facendo le condizioni del motore sono controllate usando la regola decisionale della logica fuzzy. Un altro articolo che parla dell'uso della FL sulla corrente di statore per individuare i guasti è: "Induction motor stator faults diagnosis by a current Concordia pattern-based fuzzy decision system" [69]. Altro articolo

è:” FPGA-based online detection of multiple combined faults in induction motors through information entropy and fuzzy inference” [70], in cui viene sviluppata una metodologia di diagnostica per l’identificazione di più guasti combinati nei motori a induzione basata sull’entropia dell’informazione e le decisioni della logica fuzzy;

- SWM: Modello di apprendimento automatico che può essere associato ad algoritmi di apprendimento sia per la classificazione che per la regressione. Ha acquisito una certa popolarità nel campo della diagnostica e inizialmente fu introdotto per la classificazione binaria, che gestisce problemi a due classi. In seguito, sono state sviluppate tecniche per problemi multi-classe per potersi occupare anche di situazioni con più difetti. Dato un certo numero di esempi utilizzati per l’apprendimento, ognuno dei quali etichettato con la rispettiva classe di appartenenza fra le possibili, un algoritmo di addestramento per le SVM costruisce un modello che sarà successivamente in grado di assegnare i nuovi esempi a una delle classi. Tutte queste tecniche sono state utilizzate e confrontate da diversi ricercatori per studiarne l’efficacia nel rilevamento dei difetti dei motori ad induzione. In:” Data fusion for multiple mechanical fault diagnosis in induction motors at variable operating conditions” [71], l’autore esegue l’unione di dati di corrente e delle vibrazioni per diagnosticare i guasti meccanici come i difetti dei cuscinetti o disallineamenti, sulla base del SVM multi-classe. In questo lavoro vengono utilizzate firme create dalle caratteristiche nel dominio della frequenza. Si è giunta alla conclusione che l’affidabilità della diagnostica sviluppata è aumentata in modo significativo con la fusione dei dati. È stato anche eseguito uno studio riguardante un’applicazione industriale del SVM per la diagnostica dei difetti meccanici. Questo è riportato nell’articolo:” SVM practical industrial application for mechanical faults diagnostic” [72], nel quale viene anche determinata la posizione ottimale per l’installazione dei sensori per l’acquisizione dei segnali vibrazionali, importante per ridurre il numero di sensori e quindi il costo della manutenzione. Dalla letteratura si può notare che le caratteristiche di un determinato problema in domini diversi sono differenti fra loro. È stato eseguito uno studio comparativo, riportato in:” Analysis of Time, Frequency and Wavelet Based Features of Vibration and Current Signals for Fault Diagnosis of Induction Motors Using SVM” [73], delle caratteristiche di vibrazione e corrente nei tre domini per la diagnosi dei guasti dei motori con l’utilizzo del SVM. I risultati mostrano che l’SVM fornisce una classificazione accurata con le caratteristiche di ogni dominio.

Tra le tecniche sopra riportate quelle basate sull'SVM sono state definite come le più indicate per il condition monitoring dei motori a induzione trifase, almeno secondo l'articolo "Condition monitoring and fault diagnosis of induction motor using support vector machine" [74].

Uno dei problemi principali dei metodi basati sull'intelligenza artificiale è però che le analisi sono state eseguite e controllate utilizzando segnali ricavati da laboratori. Quindi le varie caratteristiche statistiche utilizzate sono state estratte da segnali generati in ambienti controllati. Se l'analisi di uno stesso difetto fosse eseguita in un ambiente industriale ci sarebbero delle differenze dovute ad esempio alle condizioni di lavoro, condizioni dell'ambiente, variazioni nei tipi di guasti della stessa classe, rumori di fondo. Nonostante questo, ci si aspetta che, usando la caratteristica adeguata, l'algoritmo riconosca comunque il tipo di difetto. La generalizzazione è quindi una delle sfide nei sistemi di intelligenza artificiale, che permette di produrre output per input non incontrati durante "l'addestramento" in laboratorio.

Il problema della generalizzazione potrebbe essere risolto rendendo un sistema di apprendimento più adattivo, ad esempio fornendo una sufficiente varietà di dati al problema diagnostico, in modo che il sistema di apprendimento possa essere spinto a sviluppare un modello generalizzato.

Secondo quanto analizzato in letteratura i sistemi di monitoraggio basati sull'AI necessitano di ulteriore studio prima di essere implementate in veri sistemi di manutenzione. La generalizzazione è uno dei punti cruciali nell'apprendimento automatico per essere in grado di produrre output per input che non sono stati analizzati e di cui quindi si hanno poche informazioni.

### 6.3 Altri possibili metodi

La letteratura è ricca di articoli che hanno come tema principale il condition monitoring. Oltre a quelli precedentemente citati, sono stati ricercati altri articoli contenenti nuove tecniche di monitoraggio.

Viene riportata in *figura 6.7* una tabella contenente alcuni degli articoli analizzati:

Nome articolo (anno pubblicazione)	Argomento trattato
Fault Detection in Induction Motors using Park's Vector Approach and Wavelet Analysis (2014)	Utilizzo della PVA e della trasformata di Wavelet per rilevare i guasti
Multiple-fault detection and identification scheme based on hierarchical self-organizing maps applied to an electric machine (2019)	Metodo di diagnosi multipla per rilevare i guasti nelle macchine elettriche
Optimal demodulation-band selection for envelope-based diagnostics: A comparative study of traditional and novel tools (2019)	Nuovo strumento per l'individuazione delle frequenze dei difetti in anticipo rispetto ai metodi tradizionali
Comprehensive Monitoring of Electrical Machine Parameters Using an Integrated Fiber Bragg Grating-Based Sensor System (2018)	Monitoraggio dei parametri delle macchine utilizzando un nuovo tipo di sensori
Automatic Fault Diagnostic System for Induction Motors under Transient Regime Optimized with Expert Systems (2018)	Regime transitorio utilizzando un sistema di rilevamento ottimizzato
Fault Detection of VFD-Fed Induction Motor Under Transient Conditions Using Harmonic Wavelet Transform (2020)	Regime transitorio tramite la trasformata di Wavelet (tempo-frequenza)
Electrical Monitoring under Transient Conditions: A New Paradigm in Electric Motors Predictive Maintenance (2020)	Regime transitorio tramite armoniche tempo-frequenza
Recent Advances in Modeling and Online Detection of Stator Interturn Faults in Electrical Motors (2011)	Statore del motore elettrico utilizzando modelli e analisi online
Differential evolution applied to line-connected induction motors stator fault identification (2018)	Guasti allo statore rilevati tramite analisi differenziale
A Rolling Bearing Fault Diagnosis-Optimized Scale-Space representation for the Empirical Wavelet Transform (2018)	Cuscinetti controllati mediante la trasformata di Wavelet empirica
A Review of Artificial Intelligence Methods for Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Rolling Element Bearings for Induction Motor (2020)	Cuscinetti dei motori elettrici controllati tramite metodi basati su IA

**Figura 6.7:** Elenco parziale articoli

Come si può notare in *figura 6.7*, in molti articoli viene presentata l'analisi delle condizioni del motore tramite l'utilizzo delle condizioni transitorie, non

più statiche come nelle classiche analisi elettriche. Questo perché è stato rilevato che alcuni tipi di analisi, sotto condizioni di parametri variabili, riportavano dei risultati errati.

Quanto detto viene ad esempio fatto notare nell'articolo: "Advanced Analysis of Motor Currents for the Diagnosis of the Rotor Condition in Electric Motors Operating in Mining Facilities" [75]. Viene infatti detto che il classico metodo della MCSA non è consigliabile per applicazioni in cui la velocità del motore cambia continuamente, a causa di transitori o variazioni di carico, perché può fornire indicazioni sbagliate e quindi portare a errate decisioni. Viene così proposto l'utilizzo di un nuovo metodo introdotto recentemente, chiamato ATCSA (Advanced transient current signature analysis). Il metodo proposto si basa sull'analisi della corrente del motore indipendentemente dal suo regime di funzionamento, quindi include anche l'analisi delle correnti durante un transitorio. Nella sua modalità più semplice questo nuovo approccio si basa sull'analisi della corrente richiesta dal motore durante il processo di accensione.

Altro articolo in cui vengono considerate le condizioni transitorie è: "Fault Detection of VFD-Fed Induction Motor Under Transient Conditions Using Harmonic Wavelet Transform" [76]. Al suo interno, oltre a parlare dell'importanza dell'utilizzo di un VFD (Variable frequency drive), viene introdotto un altro metodo per il controllo dei guasti nei motori a induzione durante le condizioni transitorie. L'aggiunta di un VFD a un motore a induzione trifase consente di modificare la velocità in base al carico, risparmiando energia e quindi consumando meno. Oltre a questo, altro vantaggio è l'aumento della durata del motore e un controllo della velocità economico. Ancora una volta viene presentata l'analisi della firma di corrente del motore come buona tecnica di monitoraggio. Questo è dovuto principalmente alle sue caratteristiche, come l'applicazione non intrusiva, il basso costo e l'affidabilità. Diversi autori hanno sviluppato tecniche di MCSA per il rilevamento dei guasti nei motori ad induzione alimentati con dei VFD per funzionamenti stazionari. Nonostante il successo del rilevamento dei guasti, queste tecniche possono essere inutili durante le condizioni operative previste da un VFD, caratterizzate da regimi transitori. L'articolo propone l'uso della MWHWPT (multiple-windowed harmonic wavelet packet transform) come strumento di diagnostica.

Oltre all'analisi generale dei motori elettrici vengono anche studiati, in alcune pubblicazioni, nuovi sensori per il loro monitoraggio. A questo proposito risulta interessante l'articolo: "Comprehensive Monitoring of Electrical Machine Parameters Using an Integrated Fiber Bragg Grating-Based Sensor System"

[77]. Viene qui esposto il problema del monitoraggio, sempre più richiesto per controllare in tempo reale il funzionamento dei motori elettrici. Utilizzando un metodo tradizionale per monitorare più parametri si avrebbe un aumento nel numero dei sensori necessari, il che porterebbe, tra le altre cose, a problemi di spazio. Si introduce quindi una soluzione basata sull'uso di sistemi di rilevamento basati su fibra ottica integrata, per misurare i parametri critici delle macchine elettriche. Un sistema basato su questi sensori permetterebbe di monitorare simultaneamente parametri come: vibrazioni del motore, velocità del rotore, coppia, verso di rotazione, andamento della temperatura lungo gli avvolgimenti.

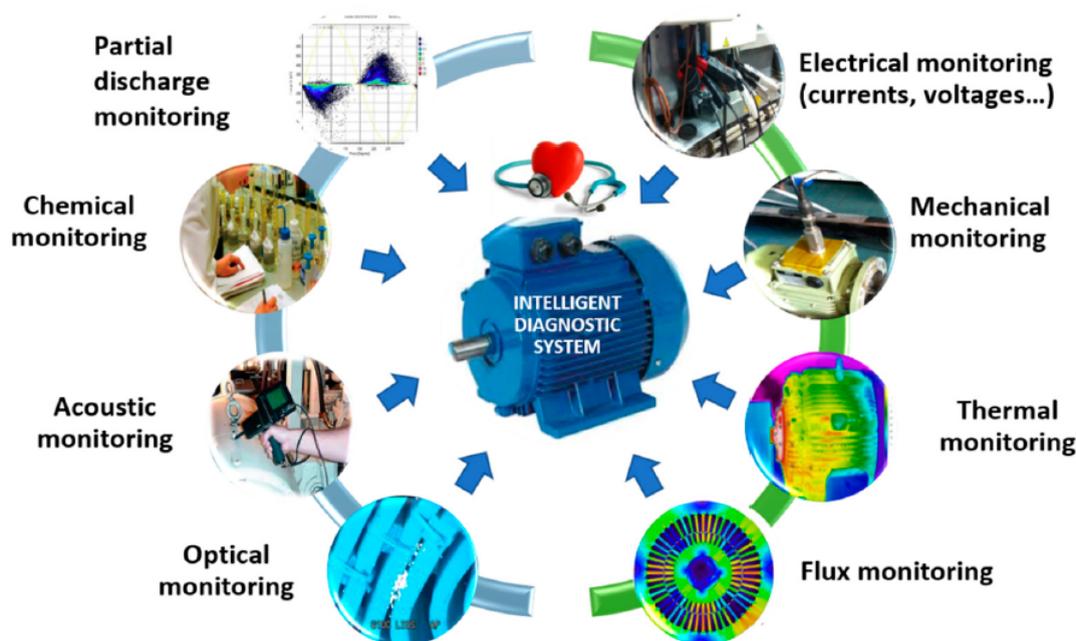
Verranno adesso analizzate più nel dettaglio alcune soluzioni che potrebbero essere, magari in futuro, implementate in una strategia di condition monitoring industriale.

### 6.3.1 Studio delle condizioni transitorie

Risulta interessante l'articolo di Jose Antonino-Daviu, intitolato: "Electrical Monitoring under Transient Conditions: A New Paradigm in Electric Motors-Predictive Maintenance" [78]. Al suo interno viene affrontato il tema del monitoraggio dei motori elettrici, essendo questo un campo di primaria importanza, com'è stato già anticipato nei precedenti capitoli. In particolare, si specifica che i metodi classici si basano sull'analisi di quantità stazionarie del motore e che questi saranno rimpiazzati da metodologie che si adattano ad ogni condizione della macchina, come ad esempio il transitorio di avvio. Tutto ciò implica l'utilizzo di strumenti avanzati per processare i segnali in modo da fornire più affidabilità sullo stato di salute della macchina. Come si è già detto in precedenza, la presenza di anomalie e difetti in un motore, anche se non porta necessariamente ad un fermo macchina, può causare gravi inefficienze e decrementi nella produzione. Ricordiamo queste anomalie essere problemi ai cuscinetti, all'isolamento degli avvolgimenti dello statore, danni alle barre rotliche, problemi di raffreddamento.

Le tecniche sviluppate fino ad ora si basano sul monitoraggio di grandezze come la corrente, le vibrazioni, la temperatura. L'inconveniente è che non esiste un metodo che, analizzando una singola quantità, determini la condizione generale di tutto il motore ma solo riferita a particolari tipi di guasti. Un esempio è l'analisi delle vibrazioni che si è dimostrata molto affidabile per il rilevamento dei guasti di tipo meccanico, ma non altrettanto per altri tipi di difetti. La tendenza che si è creata è quindi quella di utilizzare diverse tecniche combinate per poter avere delle indicazioni complete sulle condizioni del motore.

Viene riportata in *figura 6.8* l'idea di base:



**Figura 6.8:** Integrazione di diversi metodi per sviluppare un sistema di diagnostica unico [78]

Nei recenti anni è stato dimostrato che tecniche come l'analisi della corrente o quella delle vibrazioni, sotto particolari condizioni di funzionamento possono dare risultati sbagliati. Ad esempio, l'MSCA può dare diagnosi errate quando controlla danni al rotore sotto condizione di velocità variabile (questo è stato ad esempio riportato nell'articolo del 2018 di J.A. Antonino-Daviu; Alfredo Quijano-López; Martin Rubbiolo; Vicente Climente-Alarcon: "Advanced Analysis of Motor Currents for the Diagnosis of the Rotor Condition in Electric Motors Operating in Mining Facilities" [75]).

Sono quindi state svolte molte ricerche per sviluppare nuovi metodi che potessero superare gli inconvenienti delle tecnologie esistenti. Una delle nuove tendenze nel campo del condition monitoring si basa sullo sviluppo di tecniche che analizzano le grandezze in ogni regime di funzionamento, come appunto i transitori. Questo può fornire informazioni più utili rispetto ai metodi tradizionali evitando indicazioni falsate. L'idea su cui si basa questo nuovo tipo di approccio è l'analisi delle evoluzioni tempo-frequenza che vengono seguite dai

componenti legati al guasto, a differenza dei vecchi metodi che analizzavano grandezze stazionarie di corrente, vibrazione o flussi.

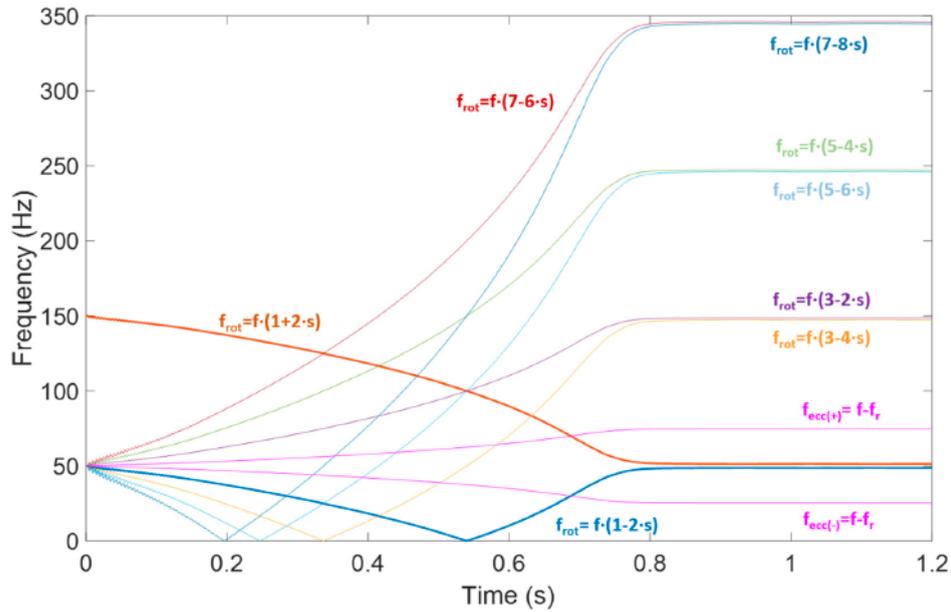
Per studiare questi transitori è necessario utilizzare strumenti avanzati per analizzare del segnale, quali le trasformate tempo-frequenza, che permettono di identificare l'evoluzione caratteristica causata dai guasti in un grafico tempo-frequenza.

I vantaggi legati a questa nuova metodologia sono:

- Evitare false indicazioni: le analisi tempo-frequenza, ad esempio delle correnti, si sono dimostrate immuni ad alcuni fenomeni che possono invece fornire false indicazioni quando si utilizzano approcci classici;
- Elevata affidabilità: la diagnosi non si basa su una singola evoluzione ma sulle molteplici evoluzioni provocate dal guasto nel transitorio considerato;
- Adattabilità a diversi regimi di lavoro: l'analisi delle grandezze transitorie porta a conclusioni di diagnosi corrette indipendentemente dal livello di carico della macchina o dalla condizione di lavoro.

L'idea di base di questo nuovo metodo è che le armoniche legate ai difetti cambiano in frequenza durante i transitori.

Viene riportato un esempio in *figura 6.9*:



**Figura 6.9:** Evoluzione teorica delle armoniche legate ai danni al rotore ed eccentricità presenti nella corrente di avvio del motore [78]

Il grafico mostra le evoluzioni che ci si aspetterebbe dalle armoniche associate ai danni al rotore e a quelli dovuti ad eccentricità o disallineamenti, presenti nella corrente iniziale del motore.

- $f$  rappresenta la frequenza di alimentazione;
- $f_{rot}$  indica le armoniche legate ai danni del rotore;
- $f_{ecc}$  indica le armoniche legate alle eccentricità.

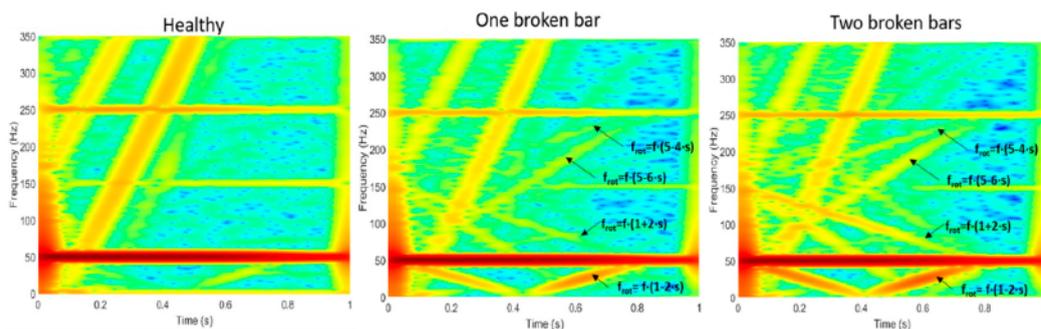
Come già detto, per poter utilizzare questo nuovo metodo di diagnosi, è necessario utilizzare strumenti come le trasformate tempo-frequenza. Queste permettono di trovare le evoluzioni in tempo e frequenza dei componenti con difetti durante il transitorio corrispondente, inoltre possono anche calcolare gli indicatori della gravità del danno basandosi sulle stesse evoluzioni. Esistono diverse trasformate tempo-frequenza, ognuna con i suoi vantaggi e svantaggi, divise in due gruppi principali: trasformate discrete e trasformate continue. Generalmente le trasformate discrete sono migliori per i sistemi di analisi online e i dispositivi di condition monitoring portatili, dove è necessaria una diagnosi rapida, mentre quelle continue si prestano bene per le diagnosi off-line e più dettagliate.

A questo punto nell'articolo vengono riportati esempi reali di applicazione di queste nuove tecniche sia in motori da laboratorio, sia in macchine da campo. I test in laboratorio sono stati svolti su diversi motori a induzione a 4-poli con diversi livelli di danni al rotore e disallineamenti.

I motori sono stati azionati ed operavano fino al raggiungimento delle condizioni di regime, le forme d'onda della corrente di fase sono state acquisite tramite l'uso di una pinza amperometrica collegata ad un oscilloscopio. Inoltre, venivano registrati anche i flussi vaganti tramite l'uso di sensori. I dati raccolti sono stati poi analizzati in un computer tramite una trasformata tempo-frequenza specifica, la STFT (Short-Time Fourier Transform).

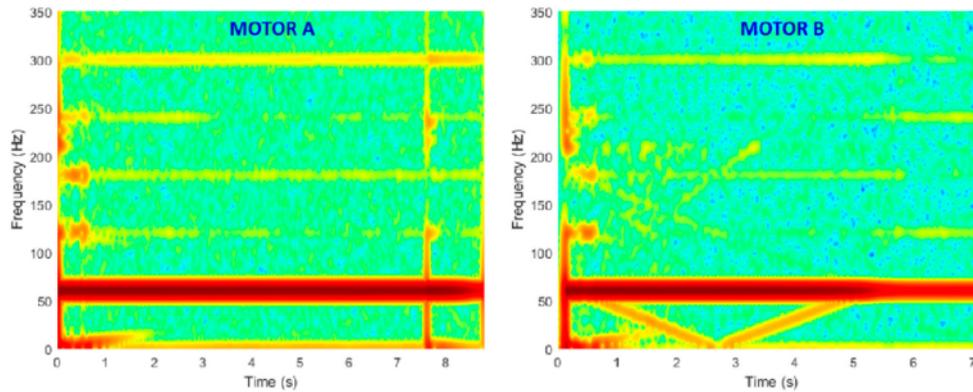
Vengono di seguito riportati in *figura 6.10* e *figura 6.11* degli esempi:

- Difetti rilevati tramite la STFT relativi ai test in laboratorio:



**Figura 6.10:** Grafici t-f della corrente d'avvio per diverse condizioni del rotore [78]

- Esempio di motori da campo:



**Figura 6.11:** Motore A: senza difetti, Motore B: difetti al rotore (andamento a V) [78]

Come si può vedere dalla *figura 6.11*, questo metodo di analisi risulta affidabile per individuare danni al rotore. Si può infatti notare l'andamento a V, caratteristico dei danni alle barre rotoriche, anche nei motori usabili in applicazioni reali. In particolare, *figura 6.11* si riferisce ad un motore per impianti di estrazione dell'acqua.

L'articolo forniva una panoramica del monitoraggio elettrico in condizioni di transitorio, un nuovo approccio che sta attirando l'attenzione di molti ricercatori e aziende nell'area del monitoraggio delle condizioni dei motori elettrici. Sono state messe in mostra le potenzialità di questa nuova tecnologia, che potrebbe, in un futuro, entrare a far parte delle strategie di manutenzione utilizzate nelle industrie.

In ogni caso, oltre ai vari aspetti positivi, esistono anche degli aspetti negativi che potrebbero far optare per l'utilizzo delle normali analisi in regime stazionario. Ad esempio, se consideriamo un'analisi di tipo online, questa richiederà l'utilizzo di trasformate di tipo discreto in quanto implicherà una diagnosi quasi immediata delle condizioni di funzionamento. Essendo le trasformate tempo-frequenza degli strumenti che richiedono una certa potenza di calcolo, poiché analizzano l'evoluzione nel tempo delle varie componenti in frequenza di un dato segnale, il risultato sarà una rappresentazione non molto chiara delle varie evoluzioni delle armoniche del difetto. Se invece consideriamo un'analisi off-line e che quindi, come detto in precedenza, necessita di un'analisi di tipo

continuo avremo problemi legati al grande carico computazionale, che quindi richiederà strumenti di calcolo più potenti e quindi più costosi.

### 6.3.2 Rilevamento dei guasti tramite il vettore di Park

Un'altra tecnica di analisi che sta ricevendo attenzioni negli ultimi anni è la PVA (Park Vector Analysis), utilizzata per il rilevamento di guasti nei cuscinetti, nel rotore e nello statore. Alcuni articoli in cui viene fatto riferimento a questa tecnica sono, ad esempio: "Induction motor stator fault diagnosis technique using Park vector approach and complex Wavelets" [79] e "Induction motor mechanical fault identification using park's vector approach" [80]. È una tecnica non invasiva e si basa sull'utilizzo della trasformata di Park per la semplificazione dell'analisi dei sistemi trifase. Tramite la trasformata tre grandezze AC bilanciate, come le correnti di fase ( $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ ), sono ridotti a due quantità DC ( $I_d$ ,  $I_q$ ). È quindi possibile eseguire calcoli semplificati su queste quantità DC prima di eseguire la trasformata inversa per recuperare le quantità AC effettive. Inoltre, è un metodo di tipo grafico che analizza lo stato del motore e non richiede espressioni analitiche per calcolare le specifiche frequenze dei difetti.

Le correnti di statore possono essere rappresentate, in condizioni ideali, tramite le equazioni 6.2, 6.3, 6.4:

$$I_a = I_f \cos(2\pi f_s t - \delta) \quad (6.2)$$

$$I_b = I_f \cos(2\pi f_s t - 2\pi/3 - \delta) \quad (6.3)$$

$$I_c = I_f \cos(2\pi f_s t + 2\pi/3 - \delta) \quad (6.4)$$

Dove:

- $I_f$  è la corrente di alimentazione;
- $f_s$  è la frequenza di alimentazione;
- $\delta$  è l'angolo di fase iniziale.

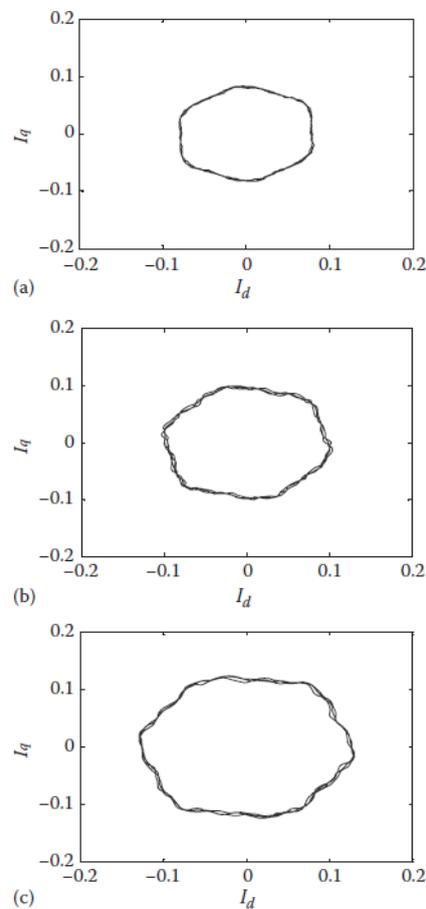
Applicando la trasformata le tre correnti vengono convertite in due, tramite le equazioni 6.5, 6.6:

$$I_d = \sqrt{\frac{2}{3}} I_a - \frac{1}{\sqrt{6}} I_b - \frac{1}{\sqrt{6}} I_c \quad (6.5)$$

$$I_q = \frac{1}{\sqrt{2}}I_b - \frac{1}{\sqrt{2}}I_c \quad (6.6)$$

Queste due quantità vengono poi rappresentate graficamente sottoforma di curve.

Le curve  $I_d$ ,  $I_q$  per un motore sano in varie condizioni di carico sono riportate in *figura 6.12*. Idealmente, un motore privo di difetti dovrebbe avere le curve con una forma circolare. Tuttavia, nel funzionamento reale, un motore non presenta una forma circolare perfetta, ad esempio a causa della presenza di asimmetrie o a causa dello squilibrio dell'alimentazione. Inoltre, la dimensione della forma risulta essere più grande all'aumentare del carico.

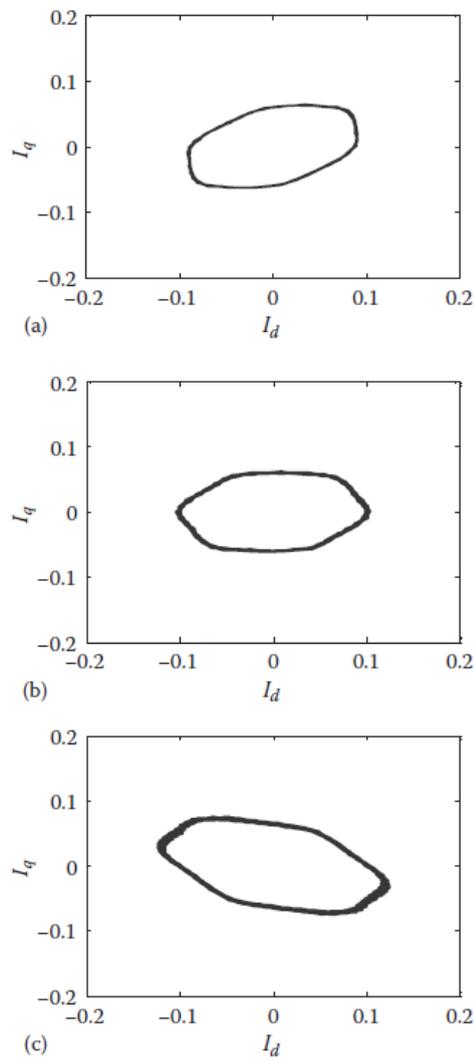


**Figura 6.12:** Curve  $I_d, I_q$  al variare del carico: carico nullo (a), carico medio (b), carico massimo (c) [81]

Nel caso ci sia la presenza di difetti queste curve avranno forma e dimensione

differenti.

Vengono, a scopo di esempio, riportati in *figura 6.13* dei grafici raffiguranti l'andamento delle curve nel caso di guasti dovuti a difetti nei cuscinetti:



**Figura 6.13:** Curve relative a difetti di rugosità della superficie della pista esterna al variare del carico: carico nullo (a), carico medio (b), carico massimo (c) [81]

Per confermare la variazione nei valori  $I_d, I_q$  vengono utilizzati degli indici statistici, come ad esempio il CSF (Curve Spalling Factor).

Nell'equazione 6.7 viene riportato come calcolare tale indice:

$$CSF = \frac{(\Delta I_d I_q)_{av}}{(I_d I_q)_{av}} \quad (6.7)$$

I valori da inserire nella formula del CSF sono calcolati come indicato nelle equazioni 6.8, 6.9:

$$(\Delta I_d I_q)_{av} = \frac{\sum_{k=1}^{N/2} \left| \sqrt{I_{dk}^2 + I_{qk}^2} - \sqrt{I_d^2 \left(\frac{N}{2}\right)^k + I_q^2 \left(\frac{N}{2}\right)^k} \right|}{N/2} \quad (6.8)$$

$$(I_d I_q)_{av} = \frac{\sum_{k=1}^N \left| \sqrt{I_{dk}^2 + I_{qk}^2} \right|}{N} \quad (6.9)$$

Questo indice varierà a seconda del tipo di guasto, questo indica che ogni difetto produrrà dei grafici  $I_d, I_q$  differenti. Questi varieranno in termini di spessore, dimensione e forma. L'analisi tramite la trasformata di Park è quindi un mezzo utile per la diagnosi dei guasti nei motori a induzione.

### 6.3.3 Campionamento compressivo per il monitoraggio basato sulle vibrazioni

Negli ultimi anni c'è stato un interesse crescente nell'applicazione del campionamento compressivo, detto CS (Compressive Sampling), nella diagnostica dei difetti delle macchine. Questo viene confermato nel libro: "Condition Monitoring with Vibration Signals", pubblicato nel 2020 [82]. Quanto detto vale soprattutto per i segnali vibrazionali, poiché hanno una rappresentazione comprimibile in diversi domini, come ad esempio quello in frequenza. L'idea di base è che un segnale avente una rappresentazione sparsa o comprimibile può essere ricostruito da un minor numero di misurazioni lineari, al di sotto della frequenza di campionamento di Nyquist.

I vantaggi dell'utilizzo del CS nelle tecniche di monitoraggio basate sulle vibrazioni sono:

- Calcoli ridotti: L'uso del CS riduce il numero dei dati acquisiti, quindi anche il numero di calcoli necessari per estrarre informazioni;
- Ridotto costo di trasmissione: Nel caso in cui si debbano mandare dati tramite connessione wi-fi il costo della trasmissione sarebbe inferiore avendo meno dati;

- Aumenta il numero di macchine che possono essere monitorate tramite il WSN (Wireless Sensor Network): L'acquisizione di una grande quantità di dati limita il numero di macchine che possono essere monitorate in remoto, a causa ad esempio della larghezza di banda o dei vincoli di alimentazione. Una forte riduzione della quantità dei dati aumenterà il numero di macchine che possono essere monitorate in remoto.

Al posto dell'elaborazione di tutti i dati vibrazionali raccolti, la metodologia consiste nell'identificare un numero inferiore di caratteristiche possa rappresentare la grande quantità di segnali acquisiti pur conservando le informazioni importanti circa le condizioni della macchina. Il CS permette il campionamento a frequenze di campionamento inferiori a quella di Nyquist. L'idea del CS è che molti segnali hanno rappresentazioni sparse o comprimibili in qualche dominio, ad esempio trasformata di Fourier (FT) e possono essere recuperati da un minor numero di misurazioni, in determinate condizioni.

Il CS si basa su due principi:

- Sparsità del segnale di interesse;
- Matrice delle misurazioni che soddisfa la minima perdita di informazioni dei dati.

Considerando che  $x \in R^{n \times 1}$  sia il segnale originale indicizzato nel tempo, data una matrice di trasformazione sparsificante  $\Psi \in R^{n \times n}$ , le cui colonne sono gli elementi  $\{\Psi_i\}_{i=1}^n$ , il segnale si può rappresentare secondo l'equazione 6.10:

$$x = \Psi s \quad (6.10)$$

"s" è un vettore colonna di coefficienti di dimensioni  $n \times 1$ .

Se gli elementi "Ψ" della matrice producono delle rappresentazioni q-sparse di "x", allora "x" di lunghezza "n" può essere rappresentato con un numero di coefficienti non nulli  $q \ll n$ .

L'equazione 6.10 può quindi essere riscritta come riportato nell'equazione 6.11:

$$x = \sum_{i=1}^q \Psi_{ni} s_{ni} \quad (6.11)$$

"ni" è l'indice degli elementi e dei coefficienti corrispondenti agli elementi non nulli di "q".

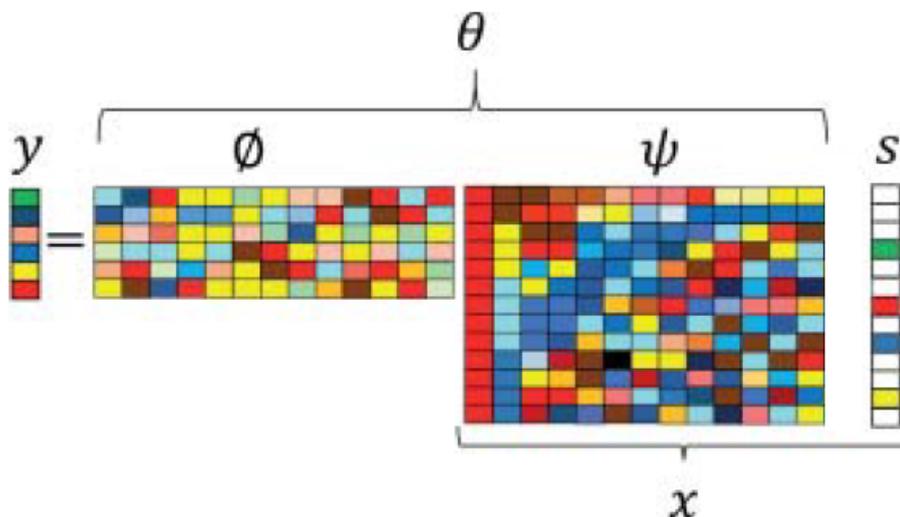
Basandosi sul framework CS, un numero  $m \ll n$  di proiezioni del vettore "x" può essere calcolato utilizzando un gruppo di vettori di misurazione  $\{\Phi\}_{j=1}^m$  e la rappresentazione sparsa "s" del vettore "x" tramite l'utilizzo della formula 6.12:

$$y = \Phi\Psi s = \theta s \tag{6.12}$$

- "y" è un vettore colonna di dimensioni  $m \times 1$  delle misurazioni compresse;
- "θ" è la matrice di misurazione, ottenuta come "ΦΨ".

Sulla base della teoria del CS, il segnale originale "x" può essere ricostruito dalle misurazioni compresse "y" utilizzando l'algoritmo di recupero. Questo può essere fatto recuperando prima i vettori di rappresentazione sparsi "s" e poi utilizzando l'inverso della trasformata sparsificante "Ψ" per recuperare il segnale originale "x".

Una rappresentazione della struttura del CS viene riportata in figura 6.14:

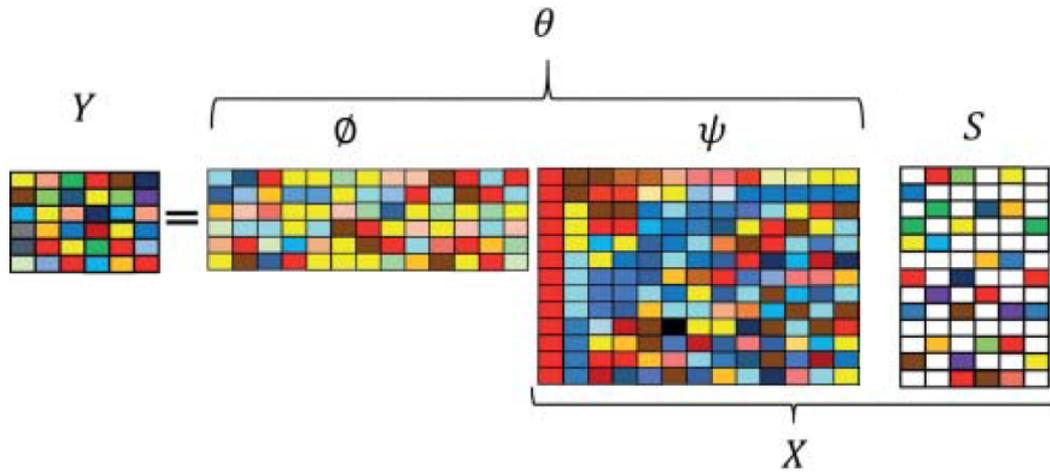


**Figura 6.14:** Struttura CS per vettore singolo [82]

Il modello qui descritto è pensato per recuperare un vettore dal corrispondente vettore di misurazione compressa. Ma il campionamento compressivo può essere applicato anche a misurazioni vettoriali multiple, per segnali che sono

rappresentati come una matrice con un insieme di vettori sparsi congiuntamente.

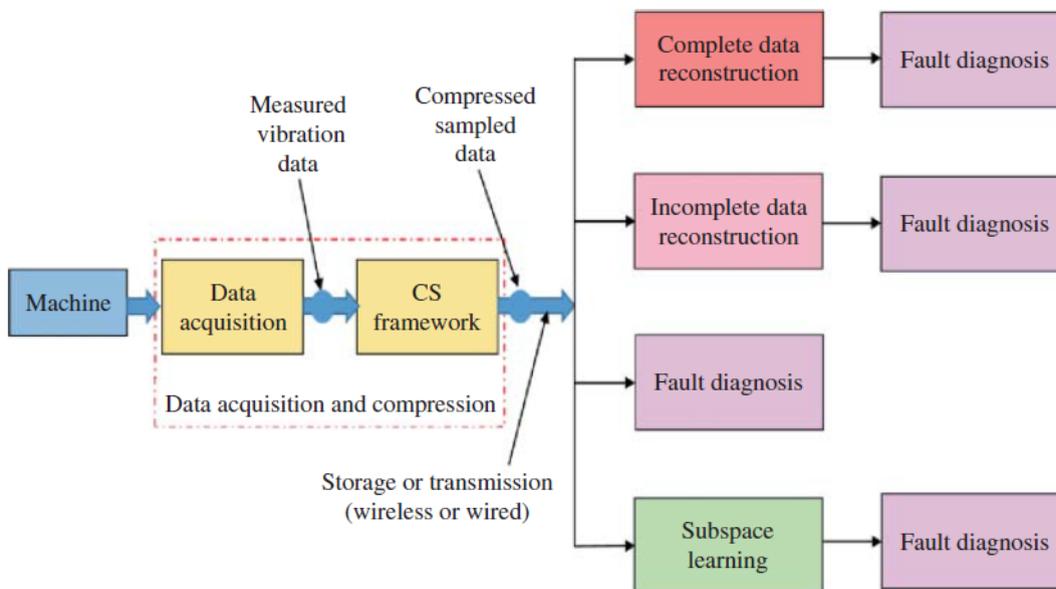
Viene riportata in *figura 6.15* la struttura per misurazioni multiple:



**Figura 6.15:** Struttura CS per molteplici vettori [82]

Il modello basato sul CS produce dati compressi da una grande quantità di dati vibrazionali acquisiti. Questi dati diventano quindi disponibili per ulteriori elaborazioni.

Sono riportati in *figura 6.16* i diversi tipi di elaborazione:



**Figura 6.16:** Differenti strategie di elaborazione del segnale [82]

Le diverse possibilità sono state studiate e validate nel corso degli anni da vari ricercatori.

La tecnica del CS risulta utile nelle situazioni in cui si ha un elevato numero di dati e strumenti di calcolo non molto potenti. Infatti, riducendo il numero di elementi da analizzare si andrebbe a ottimizzare il tempo di calcolo e quindi il rilevamento di possibili difetti.

## 6.4 Sviluppi futuri

Com'è emerso dalla ricerca nell'ambito letterario esistono molti metodi e tecniche per analizzare il funzionamento dei motori a induzione. Le tecniche tradizionali sono a volte inefficienti e conducono a errori nell'individuare i difetti, per questo nuovi metodi sono continuamente studiati. Molti di questi sono ancora solo oggetto di ricerche in laboratorio, ma nulla può negare che potranno essere introdotti, in futuro, nelle strategie di monitoraggio industriali.

## 7 Conclusioni

In questa tesi sono state analizzate le diverse proposte per il monitoraggio adottate per il controllo dei motori elettrici utilizzati maggiormente nell'ambiente industriale.

Questi sono in particolare i motori asincroni detti anche ad induzione, macchine fondamentali nelle industrie poiché forniscono energia ai macchinari e mantengono elevato il livello produttivo. Le aziende sono quindi concentrate sul loro monitoraggio e sul rilevamento precoce dei guasti, soprattutto nelle applicazioni critiche, onde evitare fermi macchina e costi di manutenzione aggiuntivi. Ne è stata quindi analizzata la struttura e in seguito anche le varie tipologie di guasti riscontrabili. Questi includono ad esempio i danni agli avvolgimenti di statore, danni alle barre rotoriche o difetti dei cuscinetti.

L'analisi è iniziata con una ricerca nell'ambito normativo sulle norme da seguire nel caso in cui si voglia svolgere un'analisi delle condizioni di funzionamento di un motore elettrico. Sono state quindi analizzate alcune delle normative attualmente vigenti, riguardanti soprattutto l'analisi di tipo vibrazionale e quella di tipo elettrica, essendo queste le tipologie di analisi più comuni. Queste normative devono essere rispettate in quanto forniscono delle linee guida di base per eseguire un corretto monitoraggio basato sulle tecniche citate in precedenza. Come esempio di ciò si può considerare l'azienda Sequoia [41], la quale afferma che il suo prodotto, l'accelerometro FastTracer, rispetta la norma ISO 10816 nell'eseguire le analisi sulla vibration severity.

In seguito, si è passato ad uno studio dei brevetti pubblicati nel corso degli anni, a dimostrazione dell'importanza che il monitoraggio dei motori elettrici ha ricevuto nel tempo. Questo conferma anche la sua utilità nel rilevamento dei danni al motore.

Si è arrivati così all'analisi di mercato, in cui sono state studiate le diverse strategie di monitoraggio attualmente in uso, gli strumenti utilizzati per portare avanti tali analisi e le soluzioni proposte dalle aziende. Sono state riportate tecniche come le analisi di tipo ESA, l'analisi delle vibrazioni, l'analisi delle emissioni acustiche, la termografia a infrarossi. Di ogni tecnica sono state fornite informazioni riguardanti il funzionamento di base, il tipo di difetti che è possibile rilevare e gli strumenti da utilizzare per attuarla. Sono state altresì riportate le proposte di diverse aziende per quanto riguarda soluzioni per il monitoraggio dei motori elettrici. Si è arrivati a stabilire che le tecniche maggiormente utilizzate sono l'analisi dei segnali vibrazionali e le MCSA, in

quanto sono facilmente attuabili, accurate ed affidabili.

Infine, è stata analizzata anche la letteratura scientifica, riportando i risultati di ricerche svolte su diversi articoli, pubblicazioni e libri riguardanti tecniche di monitoraggio di motori ad induzione. In particolare, sono citati articoli che trattano di alcune nuove metodologie di analisi che si stanno sviluppando e che potrebbero migliorare l'analisi delle condizioni di funzionamento dei motori elettrici industriali. Nelle applicazioni pratiche non si riesce a trovare un sistema di diagnosi in grado di individuare tutti i tipi di guasto simultaneamente, per questo molti ricercatori stanno svolgendo studi per sviluppare dei sistemi di analisi di guasti multipli. Si stanno ad esempio sviluppando metodi basati sull'intelligenza artificiale, anche se sono ancora necessarie altre ricerche prima di poter essere utilizzati in reali strategie di monitoraggio. Infatti, secondo quanto discusso in letteratura i metodi basati sull'AI richiedono ancora molto sviluppo, sia teorico sia numerico sia pratico.

La scelta della strategia di monitoraggio dipende comunque dal tipo di analisi che si vuole eseguire e dal tipo di guasto che si vuole rilevare. Nel caso in cui si voglia un monitoraggio completo è attualmente impossibile utilizzare una sola tecnica di rilevamento. A questo proposito sono attualmente in corso ricerche sull'utilizzo combinato di più tecniche di monitoraggio simultaneamente.

Dall'analisi di mercato è emerso che molte delle soluzioni commerciali si basano sullo sviluppo della sensoristica, in modo da migliorare la qualità dei dati ricavati dalla macchina al fine di avere delle analisi più accurate. Ad esempio, si possono considerare i sensori sviluppati da aziende come ABB [33], Balluff [50] che, pur essendo in grado di raccogliere più dati contemporaneamente, non sono in grado di fornire un quadro di monitoraggio completo. Servirebbe, come già detto, l'uso combinato di tecniche e quindi di strumenti diversi. In linea di massima quando si cerca di effettuare un monitoraggio più accurato risulta utile integrazione di analisi elettrica e analisi vibrazionale. Questo però non è l'unico modo di agire, è infatti anche possibile utilizzare un'analisi di tipo termico combinata ad una di tipo elettrica, in quanto guasti di tipo elettrico portano generalmente all'aumento della temperatura del motore, come nel caso di perdita dello strato di isolamento. In questo caso oltre all'utilizzo di sensori è possibile utilizzare strumenti come ad esempio le termocamere, utili per il rilevamento dei guasti di natura termica. A questo proposito risultano numerose anche le aziende produttrici di strumenti, come ad esempio la Fluke [10] che produce una vasta gamma di strumenti per il monitoraggio. Numerose sono anche le aziende fornitrici di servizi di manutenzione e di mo-

monitoraggio per altre aziende, anche se la maggior parte di esse offre la stesse tipologia di analisi, generalmente vibrazionale, come viene riportato in *figura 5.35*, è quindi difficile stabilire quale azienda rappresenti la migliore soluzione rispetto alle altre. Quello che è certo è che il monitoraggio delle condizioni di funzionamento sta assumendo un'importanza sempre crescente nell'ambito industriale, questo a dimostrazione della sua utilità nel rilevamento precoce dei guasti. Risulta infatti impensabile cercare di mantenere degli elevati livelli produttivi senza un'adeguata strategia di monitoraggio che rilevi per tempo difetti o guasti nelle macchine che potrebbero portare a ritardi o errori nella produzione. Come conseguenza di ciò anche il mercato relativo alla manutenzione predittiva sta crescendo, come mostrato in *figura 2.2*, fornendo una chiara prova della diffusione che sta avendo e che continuerà ad avere questo tipo di tecniche.

## Bibliografia

- [1] Sito internet: "*progettazione-impianti-elettrici.it*"
- [2] Sito internet: "*it.rs-online.com*"
- [3] Sito internet: "*ilprogettistaindustriale.it*"
- [4] Sito internet: "*cbmpartners.com*"
- [5] Sito azienda SKF: "*skf.com*"
- [6] "*I Sistemi SHM per la manutenzione e la sicurezza delle infrastrutture*", itismagazine.it (2018)
- [7] Charles R Farrar and Keith Worden: "*An introduction to structural health monitoring*" (2010)
- [8] "*Predictive Maintenance Market by Component, Type, Growth and Forecast - 2024 - MRFR*", marketresearchfuture.com (2020)
- [9] "*13 cause comuni di guasto ai motori*", fluke.com (2020)
- [10] Sito azienda Fluke: "*fluke.com*"
- [11] Claudio Crema: "*Manutenzione predittiva di motori elettrici: Analisi della firma elettrica*", toolforsmartmind.com (2019)
- [12] Normativa: "*BS ISO 13373-9:2017 Condition monitoring and diagnostics of machines-Vibration condition monitoring*", bsol.bsigroup.com
- [13] Normativa: "*BS ISO 17359:2018-TC Tracked Changes Condition monitoring and diagnostics of machines-General guidelines*", bsol.bsigroup.com
- [14] Normativa: "*BS ISO 10816-3:2009+A1:2017 Mechanical vibration-Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts*", bsol.bsigroup.com
- [15] Normativa: "*BS ISO 20958:2013 Condition monitoring and diagnostics of machine systems-Electrical signature analysis of three-phase induction motors*", bsol.bsigroup.com
- [16] Normativa: "*BS ISO 7919-3:2009+A1:2017 Mechanical vibration. Evaluation of machine vibration by measurements on rotating shafts*", bsol.bsigroup.com

- [17] Sito internet: "app.patentinspiration.com"
- [18] Brevetto: "Electrical condition monitoring of electric motors", (GB2122749B), app.patentinspiration.com
- [19] Brevetto: "Instrument for analysis of electric motors based on slip-poles component", (US5578937A), app.patentinspiration.com
- [20] Brevetto: "Condition monitoring of electric motor", (US10018030B2), app.patentinspiration.com
- [21] Brevetto: "Integrated electric motor operational condition monitor", (GB2358302A), app.patentinspiration.com
- [22] Brevetto: "Method for monitoring the temperature of an electromotor", (EP1450460A2), app.patentinspiration.com
- [23] Brevetto: "Assembly for monitoring a winding threshold temperature", (US2020244063A1), app.patentinspiration.com
- [24] Brevetto: "Process for monitoring an electric motor for thermal overloading", (WO93/23904A1), app.patentinspiration.com
- [25] Brevetto: "Device for monitoring electric motor for thermal overload, produces corrected temperature signal depending on past output of temperature sensor", (DE19939997A1), app.patentinspiration.com
- [26] Brevetto: "Diagnostic apparatus for an electric motor", (EP0841574B1), app.patentinspiration.com
- [27] Brevetto: "Method for monitoring rolling bearings", (US2020264073A1), app.patentinspiration.com
- [28] "Strumentazione ALL TEST Pro", darkwavethermo.com
- [29] Dallas Fossum: "Identifying Mechanical Faults with Motor Current Signature Analysis", reliableplant.com
- [30] "Surriscaldamento motore elettrico? Vediamo le classi", ndr.it
- [31] Patrick Zirnhelt: "Predictive Maintenance Explained", reliableplant.com
- [32] Anna Bonanomi: "Sensori intelligenti per il monitoraggio dei motori", meccanicanews.com (2018)
- [33] "ABB Ability<sup>TM</sup> Smart Sensor per motori", new.abb.com

- [34] CosaWeb: "*Il motore elettrico: come funziona*", b2voice.com (2019)
- [35] Lucia Frosini: "*Analisi delle vibrazioni per la diagnostica delle macchine rotanti*", Università di Pavia
- [36] Ronaldo Siqueira da Gama, Caio César Jacob Silva, Carlos Eduardo Ferreira Nascimento, Alexandre Messias da Silva and Cesar da Costa: "*Analysis of Combined Motor Current Signature and Vibration-Monitoring Techniques in the Study of Broken Bars in Three-Phase High-Performance Induction Motors*", hilarispublisher.com (2017)
- [37] Erik Leandro Bonaldi, Levy Ely de Lacerda de Oliveira, Jonas Guedes Borges da Silva, Germano Lambert-Torres and Luiz Eduardo Borges da Silva: "*Predictive Maintenance by Electrical Signature Analysis to Induction Motors*", intechopen.com (2012)
- [38] "*Come Effettuare Misure di Corrente Utilizzando un Trasduttore o un Sensore di Corrente*", dewesoft.com (2020)
- [39] Sito internet: "*avsb.it*"
- [40] Alfonso Fernandez: "*Rolling element bearing components and failing frequencies*", power-mi.com
- [41] "*Le vibrazioni e la loro misura*", sequoia-vibrationmonitoring.com
- [42] "*Cenni sulla metodologia di analisi a ultrasuoni*", consulser.it
- [43] "*Manutenzione dei sistemi elettrici – come gli ultrasuoni e gli infrarossi possono migliorare la sicurezza e l'affidabilità dei controlli*", uesystems.com
- [44] Fabrizio La Vita: "*Ultrasuoni e IIOT, il futuro del condition monitoring*" (2020), manutenzione-online.com
- [45] "*Ultra-Trak 750 – Bearing Condition & Lubrication Monitoring Transmitter*", uesystems.com
- [46] "*4Site*", uesystems.com
- [47] "*La termografia ad infrarossi nella manutenzione degli impianti elettrici*", elektro.it
- [48] "*Sonde di temperatura per motori elettrici*", guilcor.com
- [49] "*Termosonda per avvolgimenti elettrici*", newtonvenezia.it

- [50] ” *Condition Monitoring in una varietà di applicazioni*”, balluff.com
- [51] ” *ALL-TEST PRO On-Line II<sup>TM</sup>*”, alltestpro.com
- [52] ” *Controllo dello stato di motori e inverter*”, fluke.com
- [53] Sito azienda ISE: ” *iseweb.net*”
- [54] Sito azienda CMS: ” *:conditionmonitoringservices.com*”
- [55] Sito azienda Siemens: ” *new.siemens.com*”
- [56] Sito azienda ifm: ” *ifm.com*”
- [57] Sito azienda Eastway: ” *eastwaytech.com*”
- [58] Sito azienda Lenze: ” *lenze.com*”
- [59] Anurag Choudhary, Deepam Goyal, Sudha Letha Shimi, Aparna Akula: ” *Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Induction Motors: A Review*” (2020)
- [60] Abdullah M. Al-Ghamd, David Mba: ” *A comparative experimental study on the use of acoustic emission and vibration analysis for bearing defect identification and estimation of defect size*” (2005)
- [61] Dongsik Gu, Byeong-Keun Choi: ” *Machinery faults detection using acoustic emission signal*” (2011)
- [62] M. Entezami et al.: ” *Acoustic analysis techniques for condition monitoring of roller bearings*” (2014)
- [63] Armando Guadalupe Garcia-Ramirez, Luis Alberto Morales-Hernandez, Roque Alfredo Osornio-Rios, Juan Primo Benitez-Rangel, Arturo Garcia-Perez, Rene de Jesus Romero-Troncoso: ” *Fault detection in induction motors and the impact on the kinematic chain through thermographic analysis*” (2014)
- [64] Purushottam Gangsar, Rajiv Tiwari: ” *Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review*” (2020)
- [65] M. -. Chow, P. M. Mangum and S. O. Yee: ” *A neural network approach to real-time condition monitoring of induction motors*” (1991)

- [66] Chenxi Wu, Tefang Chen, Rong Jiang, Liwei Ning: "*ANN Based multi-classification using various signal processing techniques for bearing fault diagnosis*" (2015)
- [67] Adam Glowacz, Zygfryd Glowacz: "*Diagnosis of the three-phase induction motor using thermal imaging*" (2016)
- [68] Zeraoulia M, Abdeslam Mamoune, Hervè Mangel, Mohamed Benbouzid: "*A simple fuzzy logic approach for induction motors stator condition monitoring*" (2005)
- [69] F. Zidani, M. E. H. Benbouzid, D. Diallo and M. S. Nait-Said: "*Induction motor stator faults diagnosis by a current Concordia pattern-based fuzzy decision system*" (2003)
- [70] R. J. Romero-Troncoso et al.: "*FPGA-based online detection of multiple combined faults in induction motors through information entropy and fuzzy inference*" (2011)
- [71] J. D. Martínez-Morales, E. Palacios and D. U. Campos-Delgado: "*Data fusion for multiple mechanical fault diagnosis in induction motors at variable operating conditions*" (2010)
- [72] Lane Maria Rabelo Baccarini, Valceres Vieira Rocha e Silva, Benjamin Rodrigues de Menezes, W.M. Caminhas: "*SVM practical industrial application for mechanical faults diagnostic*" (2010)
- [73] Purushottam Gangsar, Rajiv Tiwari: "*Analysis of Time, Frequency and Wavelet Based Features of Vibration and Current Signals for Fault Diagnosis of Induction Motors Using SVM*" (2017)
- [74] Rakesh A. Patel, Bhavesh Bhalja: "*Condition monitoring and fault diagnosis of induction motor using support vector machine*" (2016)
- [75] J. A. Antonino-Daviu, A. Quijano-López, M. Rubbiolo, V. Climente-Alarcon: "*Advanced Analysis of Motor Currents for the Diagnosis of the Rotor Condition in Electric Motors Operating in Mining Facilities*" (2018)
- [76] M. A. Hmida, A. Braham: "*Fault Detection of VFD-Fed Induction Motor Under Transient Conditions Using Harmonic Wavelet Transform*" (2020)
- [77] M. Fabian, D. M. Hind, C. Gerada, T. Sun, K. T. V. Grattan: "*Comprehensive Monitoring of Electrical Machine Parameters Using an Integrated Fiber Bragg Grating-Based Sensor System*" (2018)

- [78] Jose Antonino-Daviu: ” *Electrical Monitoring under Transient Conditions: A New Paradigm in Electric Motors-Predictive Maintenance*” (2020)
- [79] Dionysios Spyropoulos, Epaminondas D Mitronikas: ” *Induction motor stator fault diagnosis technique using Park vector approach and complex Wavelets*” (2012)
- [80] S. Ben Salem, W. Touti, K. Bacha and A. Chaari: ” *Induction motor mechanical fault identification using park’s vector approach*” (2013)
- [81] Nordin Saad, Muhammad Irfan, Rosdiazli Ibrahim: ” *Condition Monitoring and Faults Diagnosis of Induction Motors: Electrical Signature Analysis*” (2018)
- [82] Hosameldin Ahmed, Asoke K. Nandi: ” *Condition Monitoring with Vibration Signals*” (2020)