

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL  
ÁREA DO CONHECIMENTO DE EXATAS E ENGENHARIAS**

**GUSTAVO CARDOZO ADRIANO**

**UM ESTUDO SOBRE DIAGNÓSTICO DE MOTORES DE INDUÇÃO  
ATRAVÉS DA ANÁLISE ESPECTRAL DE VIBRAÇÕES**

**CAXIAS DO SUL**

**2020**

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL  
ÁREA DO CONHECIMENTO DE EXATAS E ENGENHARIAS**

**GUSTAVO CARDOZO ADRIANO**

**UM ESTUDO SOBRE DIAGNÓSTICO DE MOTORES DE INDUÇÃO  
ATRAVÉS DA ANÁLISE ESPECTRAL DE VIBRAÇÕES**

Monografia apresentado como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, do curso de Engenharia de Controle e Automação, Área do Conhecimento de Ciências Exatas e Engenharias na Universidade de Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Holsbach Costa

**CAXIAS DO SUL**

**2020**

Adriano, Gustavo

UM ESTUDO SOBRE DIAGNÓSTICO DE MOTORES DE INDUÇÃO ATRAVÉS DA ANÁLISE ESPECTRAL DE VIBRAÇÕES/ GUSTAVO CARDOZO ADRIANO. – CAXIAS DO SUL, 2020-

37 p. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Holsbach Costa

Trabalho de Conclusão de Curso – UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL  
ÁREA DO CONHECIMENTO DE EXATAS E ENGENHARIAS , 2020.

1. Manutenção preditiva. 2. Análise espectral. 3. Método do envelope.  
I. Dr. Guilherme Holsbach Costa. II. Universidade de Caxias do Sul. III. Área do Conhecimento de Ciências Exatas e Engenharias. IV. Graduação em Engenharia de Controle e Automação.

GUSTAVO CARDOZO ADRIANO

UM ESTUDO SOBRE DIAGNÓSTICO DE MOTORES DE INDUÇÃO  
ATRAVÉS DA ANÁLISE ESPECTRAL DE VIBRAÇÕES

Monografia apresentado como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, do curso de Engenharia de Controle e Automação, Área do Conhecimento de Ciências Exatas e Engenharias na Universidade de Caxias do Sul.

Aprovado em 07/12/2020

**Banca Examinadora**

---

Prof. M.Sc. Bruno Fensterseifer Dias  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

---

Prof. M.Sc. Tiago Cassol Severo  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus por ter me dado saúde e forças para superar as dificuldades.

A meus pais, que mesmo diante das dificuldades sempre priorizaram e incentivaram meus estudos.

Ao meu orientador, Prof. Guilherme Holsbach pela amizade, pelo suporte e tempo dedicados a este trabalho.

A Universidade de Caxias do Sul, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram todo o conhecimento aqui adquirido.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

## RESUMO

A análise de vibrações é uma ferramenta utilizada para detectar e diagnosticar problemas de funcionamento de uma máquina rotativa. Ela é geralmente aplicada a sinais captados de sensores de aceleração e processada no domínio da frequência. Ainda que outras transformadas possam levar a ganhos particulares ou incrementais em relação ao uso da Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* — FFT), todos os trabalhos se baseiam ou partem de análises e conceitos nos domínios de Fourier e do tempo. Em face disso, neste trabalho é proposto um estudo sobre análise de vibração em rolamentos de motores de indução, nos domínios de Fourier e do tempo, através da análise espectral e temporal. Uma revisão sobre os fundamentos dessa técnica é apresentada, incluindo o comportamento mecânico de motores de indução, no que se refere a vibrações, e algumas técnicas de análise. Sendo assim, o método estudado é verificado através da análise de sinais de vibração adquiridos em experimentos com motores elétricos nos quais foram simulados defeitos de diferentes tipos, comprovando a eficiência do método proposto, através dos dados obtidos tanto do domínio do tempo quanto da frequência.

**Palavras-chave:** Motores, manutenção preditiva, análise espectral, análise de vibrações.

## ABSTRACT

Vibration analysis is a tool used to detect and diagnose problems with the operation of a rotating machine. It is generally applied to signals picked up by acceleration sensors and processed in the frequency domain. Although other transformations can lead to particular or incremental gains in relation to the use of the Fast Fourier Transform (FFT), all works are based on or depart from analyzes and concepts in the Fourier and time domains. In view of this, this work proposes a study on vibration analysis in induction motor bearings, in the Fourier and time domains, through spectral and temporal analysis. A review of the fundamentals of this technique is presented, including the mechanical behavior of induction motors, with respect to vibrations, and some analysis techniques. Thus, the studied method is verified through the analysis of vibration signals acquired in experiments with electric motors in which defects of different types were simulated, proving the efficiency of the proposed method, through data obtained both from the time and frequency domains.

**Keywords:** Induction motors, spectral analysis, Fast Fourier Transform.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Princípios de um rolamento . . . . .	13
Figura 2 – Ponto de contato nos rolamentos de esferas e rolos . . . . .	14
Figura 3 – Elementos de um rolamento axial cilíndrico . . . . .	15
Figura 4 – Vista explodida motor elétrico radial . . . . .	16
Figura 5 – Aumento do dano de pulso . . . . .	18
Figura 6 – Valor RMS, de pico e médio . . . . .	19
Figura 7 – Aplicação do fator de crista . . . . .	19
Figura 8 – Variação do fator K . . . . .	20
Figura 9 – Processamento do sinal bruto . . . . .	21
Figura 10 – Diâmetros do rolamento . . . . .	21
Figura 11 – Sustentação eixo motor . . . . .	22
Figura 12 – Tabela de modelos dos sensores IFM . . . . .	26
Figura 13 – Instalação do sensor de vibração . . . . .	26
Figura 14 – Tipos de sensores . . . . .	27
Figura 15 – Cartão para amostragem dos dados . . . . .	28
Figura 16 – Filtros de hardware embarcados . . . . .	28
Figura 17 – Comparação entre as amostragens para um dano leve . . . . .	31
Figura 18 – Comparação entre parâmetros estatísticos dano leve . . . . .	32
Figura 19 – Comparação entre as amostragens para um dano severo . . . . .	33
Figura 20 – Comparação entre parâmetros estatísticos dano severo . . . . .	33
Figura 21 – Comparação entre os espectros para um dano leve . . . . .	34
Figura 22 – Comparação entre os espectros para um dano severo . . . . .	35

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FFT	<i>Fast Fourier transform</i>
DWT	<i>Discrete Wavelet Transform</i>
HT	<i>Hilbert Transform</i>
FK	<i>Fator K</i>
FC	<i>Fator de crista</i>
de	<i>Diâmetro da esfera</i>
dpe	<i>Diâmetro pista externa</i>
dpi	<i>Diâmetro pista interna</i>
dp	<i>Diâmetro primitivo</i>
ne	<i>Número de esferas</i>
mm	<i>Milímetros</i>
RPM	<i>Rotações por minuto</i>
Hz	<i>Hertz</i>
kW	<i>Quilowatt</i>
CV	<i>Cavalo Vapor</i>

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO . . . . .	10
1.1	Objetivo Geral . . . . .	12
1.2	Objetivos Específicos . . . . .	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . . .	13
2.1	Os tipos de rolamentos e suas formas construtivas . . . . .	13
2.2	Vibração em rolamentos de motores de indução . . . . .	15
2.3	Técnicas para identificação de falhas . . . . .	17
2.3.1	Análise no domínio do tempo . . . . .	17
2.3.2	Análise no domínio da frequência . . . . .	20
3	MATERIAL E MÉTODOS . . . . .	25
3.1	Sensor de aceleração . . . . .	25
3.2	Amostragem do sinal de aceleração . . . . .	27
3.3	Processamento de sinais . . . . .	29
4	RESULTADOS . . . . .	31
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS . . . . .	36
	REFERÊNCIAS . . . . .	37

## 1 INTRODUÇÃO

Os equipamentos rotativos em geral são componentes fundamentais em plantas industriais. Tais equipamentos são empregados de maneira significativa em processos industriais, em bombas, compressores, turbinas, expansores, motores, geradores, ventiladores, sopradores e em caixas de engrenagens. Esse emprego em larga escala, o alto valor agregado e os prejuízos decorrentes da perda de produtividade em face a eventuais falhas nesses equipamentos faz crescer a importância de um monitoramento constante da saúde deles.

O setor industrial, visando obter um bom resultado em termos de produtividade, tem investido significativamente em métodos de manutenção. A manutenção é comumente classificada como corretiva, quando o equipamento já apresenta sinais de falha, preventiva, quando há uma parada programada do equipamento para troca de peças, independentemente de qualquer indício de falha, e preditiva, quando se busca prever a falha do equipamento e efetuar a manutenção imediatamente antes da provável ocorrência dessa falha. O método de manutenção preditiva, mais recente que os demais, visa, portanto, definir o instante correto da intervenção, com o máximo de aproveitamento do equipamento (COSTA, 2013).

É comum que a manutenção seja entendida como um custo adicional necessário para que se evite prejuízo maior, e frequentemente a equipe de manutenção é considerada tão somente para manutenções corretivas. Entretanto, um estudo detalhado do problema mostra que os custos de manutenção, quando há uma boa manutenção preditiva, são reduzidos substancialmente (NEPOMUCENO, 1989).

Em (DUROCHER; FELDMIEIER, 2004) a manutenção preditiva é tratada como manutenção baseada em condições (*condition-based maintenance* — CBM). Com essa estratégia a manutenção que hoje é baseada em um cronograma rotineiro para os equipamentos rotativos pode ser substituída por uma abordagem baseada em diagnóstico do funcionamento do sistema. Essa abordagem pode ser baseada no monitoramento dos equipamentos rotativos para relatar a condição da saúde de seus elementos e assim permitir a intervenção da equipe de manutenção pouco antes que ocorra uma falha. Na atualidade, existem diversas técnicas e abordagens para análises preditivas da saúde dos equipamentos rotativos, sendo, naturalmente, algumas mais eficientes e assertivas que outras. Com as técnicas preditivas é possível avaliar as condições de saúde através da inspeção de temperatura (termografia), de sistemas de alinhamento de eixos a LASER e balanceamento, da análise da corrente elétrica, e/ou da análise de vibração.

A abordagem pela análise de temperatura, também chamada de termografia, é uma técnica que permite a medição e visualização, com precisão, da distribuição da temperatura

de uma superfície (PICAZO-RÓDENAS R. ROYO, 2012). Como vantagem, essa abordagem não demanda contato entre o sensor e o equipamento rotativo e permite detectar padrões anormais de temperatura de trabalho e possíveis falhas de alinhamento em acoplamentos.

O alinhamento de eixos a LASER e balanceamento é uma das técnicas utilizadas para a identificação de possíveis desalinhamentos entre a parte motora e a movida. Segundo (SZYMON; PIETA, 2011), essa técnica consiste na utilização de duas unidades (emissora e receptora) que por meio de um sistema computacional realiza os cálculos e a orientação para correção do desalinhamento.

Já as análises pela corrente elétrica e pela vibração são as mais abrangentes e eficazes para a atuação na manutenção preditiva em equipamentos rotativos (DEVANEY; EREN, 2004). A análise pela corrente elétrica é abordada na literatura como análise de assinatura de corrente do motor (*Motor Current Signature Analysis — MCSA*) e é a técnica menos invasiva para detectar as condições mecânicas e anormalidades elétricas nos equipamentos rotativos (DEVANEY; EREN, 2004). Existem modelos teóricos que relacionam matematicamente as condições mecânicas do equipamento com o espectro de corrente no estator, recaindo em uma equação que modela a excentricidade dinâmica<sup>1</sup>. Esses cálculos mostram que a geometria do rolamento e a velocidade do rotor têm reflexos no espectro da corrente, ou seja, assinaturas particulares para cada caso.

Estudos relacionados à análise de vibrações em equipamentos rotativos (BEZERRA, 2004) buscam, de forma similar à MCSA, encontrar assinaturas no espectro de frequência da vibração, que tem, na sua característica intrínseca, diversas harmônicas. Essa assinatura da harmônica fundamental de um motor, que aparece em baixas frequências, se caracteriza pela razão entre a velocidade de rotação, em rotações por minuto — RPM, e a frequência da tensão de alimentação aplicada ao equipamento rotativo. Por exemplo, um motor com especificações nominais de 1780 RPM quando acionado a uma frequência de 60 Hz gera uma frequência fundamental de  $1780 / 60 = 29,66$  Hz no espectro de frequência. Logo, as demais assinaturas (harmônicas) serão sempre múltiplas desse valor.

A análise de vibração é utilizada como uma ferramenta para detectar e diagnosticar problemas de funcionamento da máquina (DIARRASSOUBA, 2017). A operação das máquinas gera forças que frequentemente causam as falhas subsequentes (rotação, turbulência, choques, desalinhamentos). As forças, por sua vez, causam vibrações que danificam as estruturas e componentes das máquinas. A análise dessas vibrações possibilita que se identifique as forças assim que elas aparecem, antes de causarem danos irreversíveis. Também possibilita deduzir a origem e estimar os riscos de falha devido a uma assinatura para cada uma das forças.

<sup>1</sup> <Excentricidade num motor é uma folga desigual existente entre o estator e o rotor, e que é classificada como estática, dinâmica ou mista, sendo que na dinâmica o centro de rotação permanece na posição original, mas o eixo é deslocado (SANTOS; SILVA; SUETAKE, 2004)>

A análise de vibrações é geralmente realizada através de sinais captados de sensores de aceleração. O processamento desses sinais pode ser realizado no domínio do tempo, utilizando esses dados para detecção da ocorrência da falha, mas não para o diagnóstico, (BEZERRA, 2004), sendo, portanto, usualmente realizada no domínio da frequência. Dentre as ferramentas matemáticas disponíveis para efetuar a transformação do domínio do tempo para o domínio da frequência existem algumas que são mais comuns nesta aplicação, como a Transformada de Fourier, por via de regra implementada por algoritmos de Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* — FFT) (CHAUDHARI; GAIKWAD; KULKARNI, 2014), a Transformada Wavelet Discreta (*Discrete Wavelet Transform* — DWT) (BOLSHUNOVA; KOROLYOV, 2015) e a Transformada de Hilbert (*Hilbert Transform* — HT) (BEZERRA, 2004). Ainda que outras transformadas possam levar a ganhos particulares ou incrementais em relação ao uso da FFT, todos os trabalhos se baseiam ou partem de análises e conceitos no domínio de Fourier. Em (DIARRASSOUBA, 2017) e em (CHAUDHARI; GAIKWAD; KULKARNI, 2014) são apresentados estudos detalhados sobre análise de vibrações com base na Transformada de Fourier. Nesses trabalhos, um padrão de comportamento em frequência para rolamentos é estimado a partir de modelos teóricos. Essa estimativa serve de base para classificar como defeituosos os rolamentos que apresentam comportamento diferente do modelado.

Em face à relevância da análise no domínio de Fourier para a área e ao nível de detalhamento dos trabalhos propostos em (DIARRASSOUBA, 2017), (BEZERRA, 2004) e (CHAUDHARI; GAIKWAD; KULKARNI, 2014), neste trabalho é proposto um estudo sobre análise de vibração em rolamentos de motores de indução, no domínio de Fourier, através da análise espectral.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Estudar uma prova de conceito da análise temporal e espectral aplicada à vibração em motores de indução.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

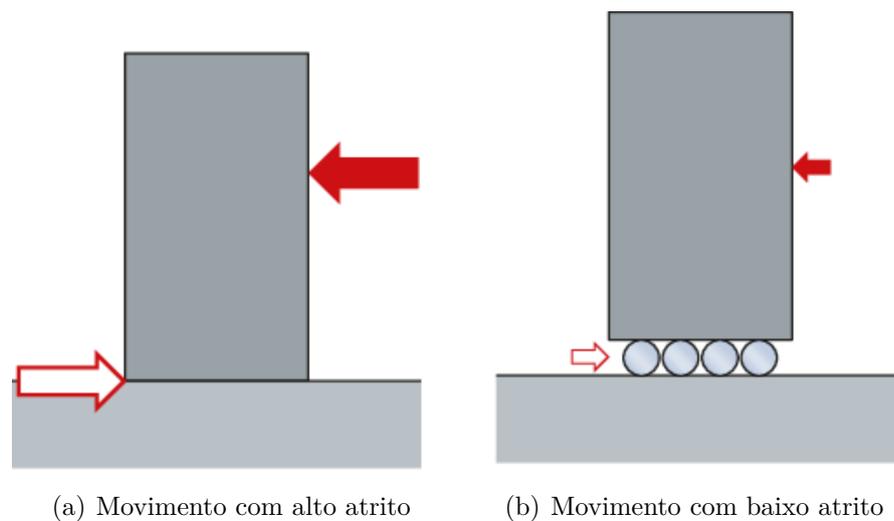
- Estudar os fundamentos de análise de vibração em motores elétricos;
- Implementar um sistema de aquisição de sinais de vibração aplicado a motores elétricos;
- Avaliar as frequências de vibração, função dos rolamentos, em um motor de indução através de técnicas no domínio do tempo e da frequência.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 OS TIPOS DE ROLAMENTOS E SUAS FORMAS CONSTRUTIVAS

Os rolamentos executam a função de suportar e guiar, com atrito reduzido, os elementos rotativos ou oscilantes, como eixos ou rodas, transferindo as cargas entre os componentes de uma máquina, justificando essa redução, a figura 1(a), está disposto um sistema sem esferas entre a parte fixa e a movida, exigindo assim um maior esforço para realizar um movimento, diferente do que é demonstrado na figura 1(b), que apresenta um atrito bem reduzido. Os rolamentos oferecem alta precisão e baixo atrito, por isso, permitem velocidades de rotação altas enquanto reduzem o ruído, o calor, o consumo de energia e o desgaste. Eles são elementos econômicos e substituíveis que geralmente seguem padrões de dimensão nacionais e internacionais.

Figura 1 – Princípios de um rolamento



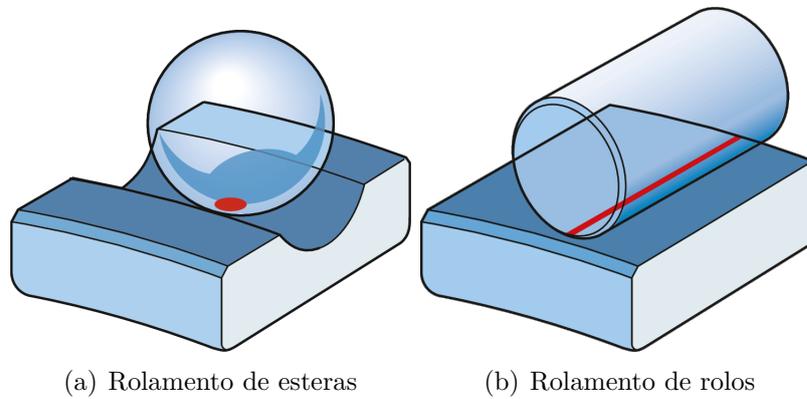
Fonte: Página da SKF <sup>1</sup>

Os rolamentos de esferas e/ou rolos se diferenciam na forma de contato com as pistas. As esferas, como demonstrado na figura 3(a), fazem contato de ponto com as pistas do anel. Com maior carga atuando sobre o rolamento, o ponto de contato torna-se uma área elíptica. A pequena área de contato proporciona baixo atrito rolante, permitindo que os rolamentos de esferas suportem velocidades altas, mas também limita a capacidade de carga. Já os de rolos, como demonstrado na 3(b), fazem contato linear com as pistas do anel. Com maior carga atuando sobre o rolamento, a linha de contato torna-se algo com uma forma retangular. Devido à maior área de contato e, conseqüentemente, maior atrito,

<sup>1</sup> <Disponível em: <<https://www.skf.com/br/products/rolling-bearings/>. Acesso em: 30 de ago. 2020.>

um rolamento de rolos pode suportar cargas mais pesadas, mas velocidades mais baixas, do que um rolamento de esferas de mesmo tamanho.

Figura 2 – Ponto de contato nos rolamentos de esferas e rolos



*Fonte: Página da SKF <sup>2</sup>*

Os rolamentos são classificados em dois grupos, com base na direção da carga que predominantemente acomodam:

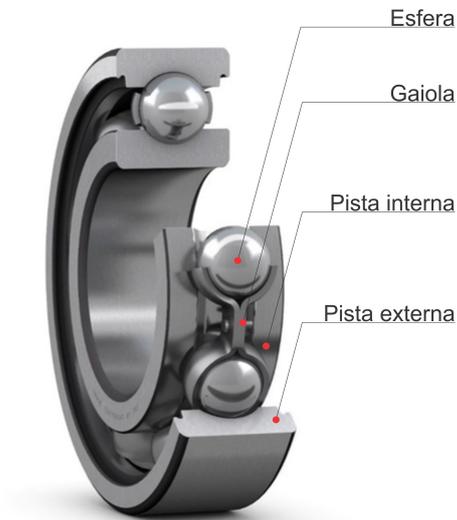
- Rolamentos radiais — acomodam cargas que são predominantemente perpendiculares em relação ao eixo. Alguns rolamentos radiais podem suportar apenas cargas puramente radiais, enquanto a maioria pode acomodar algumas cargas axiais em uma direção e, em alguns casos, em ambas as direções;
- Rolamentos axiais — suportam cargas que atuam predominantemente ao longo do eixo. Dependendo do projeto, os rolamentos axiais podem suportar cargas puramente axiais em uma ou em ambas as direções, e alguns podem também acomodar cargas radiais (cargas combinadas).

O ângulo de contato determina a qual grupo o rolamento pertence; caso tenha um ângulo de contato maior ou igual a  $45^\circ$ , é determinado como radial, caso contrário, será axial.

Existe uma diversidade de rolamentos, variando em modelos, formas e tamanhos. A aplicação abordada neste estudo utiliza como base motores de indução radiais, cuja aplicação utiliza como sustentação os rolamentos axiais. Esses rolamentos são constituídos de dois anéis também chamados de pistas (pista externa e interna), fabricados em aço especial, separados por fileiras de esferas que são espaçadas por um porta esferas ou porta rolos (gaiola) (GENEROSO, 2009).

<sup>2</sup> <Disponível em: <<https://www.skf.com/br/products/rolling-bearings/>. Acesso em: 30 de ago. 2020.>

Figura 3 – Elementos de um rolamento axial cilíndrico



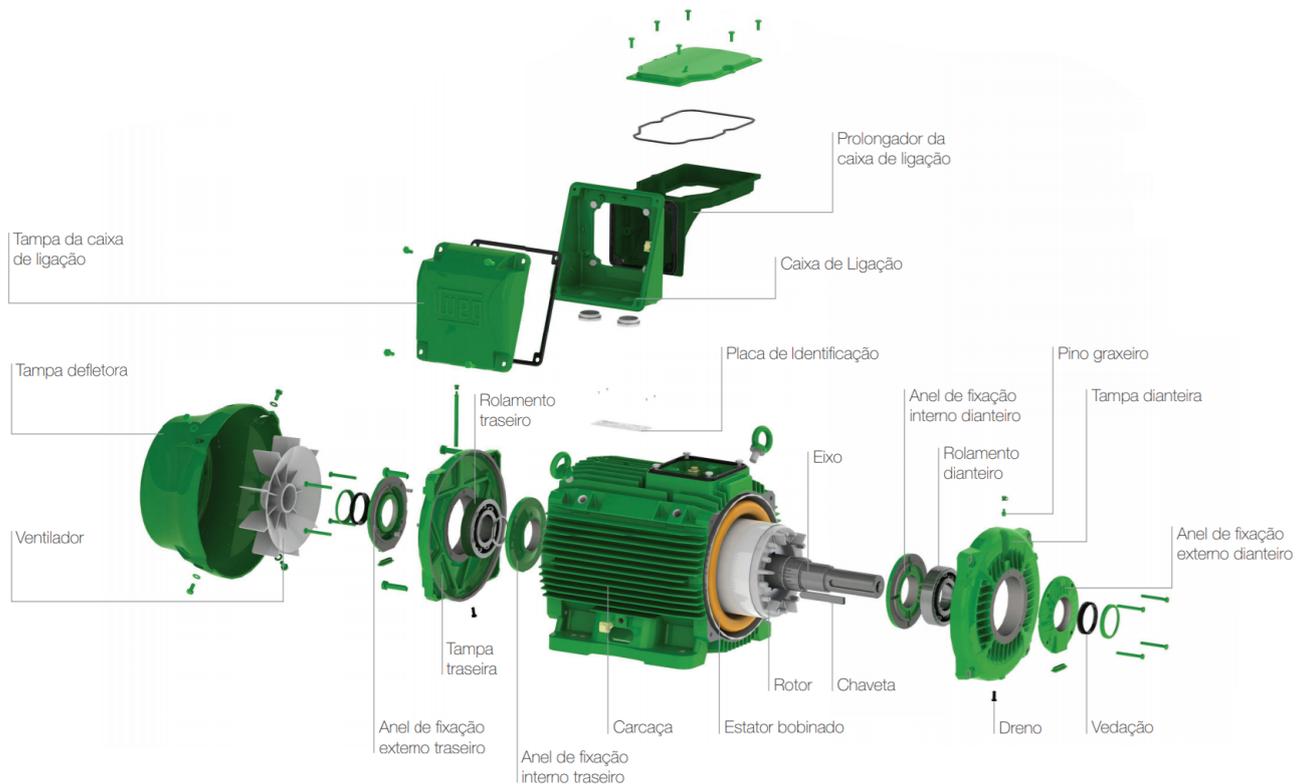
Fonte: Página da SKF <sup>3</sup>

## 2.2 VIBRAÇÃO EM ROLAMENTOS DE MOTORES DE INDUÇÃO

A maioria dos motores de indução utiliza rolamentos como sistema de sustentação do seu eixo. Os rolamentos, geralmente dois, sendo um posicionado na tampa frontal e outro na tampa traseira (conforme ilustrado na figura 4), desenvolvem a função de suportar o eixo (radial), permitindo-o realizar movimentos rotacionais com facilidade, minimizando assim a fricção entre as peças móveis. Neste caso, a função dos rolamentos é garantir que o rotor fique suspenso de tal forma que possa girar livremente, evitando contatos físicos entre o rotor e o estator.

<sup>3</sup> <Disponível em: <<https://www.skf.com/br/products/rolling-bearings/>. Acesso em: 30 de ago. 2020.>

Figura 4 – Vista explodida motor elétrico radial



Fonte: Pagina da WEG <sup>4</sup>

Alguns autores descrevem que a vida útil de um rolamento que está em operação e sob carga é determinada pela fadiga do material e pelo desgaste nas superfícies (MENNA, 2007). Já as falhas prematuras podem ser causadas por diversos motivos, sendo os mais frequentes:

- Fadiga — É a causa “natural”, que está relacionada à fadiga do material devido às altas tensões que ocorrem entre as pistas e as esferas durante a operação. Depois de certo tempo, essa fadiga gera rachaduras no material e rompimentos nas pistas. Defeitos que, durante a operação do motor elétrico, vão aumentar substancialmente podendo chegar à quebra do rolamento que, dependendo da aplicação, podem até queimar o motor;
- Má lubrificação — A tensão nos corpos rolantes e nas superfícies de rolamento é significativamente aumentada pela lubrificação incorreta, uma vez que o lubrificante distribui parte da tensão, reduzindo o atrito entre as partes rolantes e também impede que o rolamento superaqueça;

<sup>4</sup> <Disponível em: <[https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-Elétricos/c/BR\\_MT](https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-Elétricos/c/BR_MT). Acesso em : 8deset.2020. >

- Contaminação — A contaminação, por exemplo, por aparas de metal, pode ocorrer devido a vedações defeituosas. A penetração da água também pode levar à falha da lubrificação, pois mesmo pequenas quantidades de água podem gerar algum tipo de oxidação e/ou tornar os lubrificantes inutilizáveis, bem como o surgimento de oxidações;
- Instalação incorreta — Ocorre em casos que no ato da instalação do rolamento, pode ocorrer imprecisões no alinhamento, ou tensões prejudiciais (pista interna instalada de forma a ficar sob força não linear em sua extensão);
- Deformação plástica — Tensões excessivas aplicadas ao rolamento, levam a deformações plásticas da pista.
- Corrosão — Pode ser uma das causas de dano inicial nas pistas, considerando que, para o perfeito funcionamento dos rolamentos, o sistema de esferas e pistas devem estar apenas com desgastes naturais, já previstos pelo fabricante. Caso ocorra a corrosão, o atrito entre as esferas e as pistas pode crescer gradativamente, podendo levar à quebra do rolamento e possivelmente a queima do motor.

Existe ainda a possibilidade de uma falha ocorrer por mais de um motivo, bem como uma falha pode levar a outra (DIARRASSOUBA, 2017). Os rolamentos, mais especificamente os utilizados em motores elétricos, dependendo das suas condições na operação, podem apresentar falhas diversas, as quais vão reduzir sua eficiência. Diante disso, falhas produzem influência na vibração resultante, podendo até levar o rolamento à quebra, parando a máquina e possivelmente a linha de produção.

## 2.3 TÉCNICAS PARA IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS

As abordagens para identificação de falhas em motores elétricos podem ser classificadas pelo domínio de processamento, ou seja, em abordagens no domínio do tempo e abordagens no domínio da frequência. A seguir, algumas dessas abordagens serão discutidas.

### 2.3.1 ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO

A análise no domínio do tempo se dá através de algumas figuras de mérito como, por exemplo, valor RMS (valor eficaz ou raiz do valor quadrático médio, do inglês, *Root Mean Square*), valor de pico, valor médio, fator de crista e o fator  $k$ . Essas figuras são geralmente aplicadas a sinais oriundos de sensores de vibração e possibilitam identificar ou não a ocorrência de falha no equipamento em análise. Normas vigentes estipulam padrões de valores para tais figuras de mérito, para aplicações específicas. Entretanto estes métodos, em geral, indicam a iminência de falha, porém não permitem a identificação do tipo da falha. (BEZERRA, 2004). Algumas das principais métricas utilizadas são:

- **Valor RMS**

O valor eficaz (ou RMS) de um sinal de vibração mede a potência contida nesse sinal de vibração. O valor RMS é muito efetivo na detecção do nível de vibração no rolamento (faixa de banda de 10 Hz a 10 KHz) quando o valor medido é comparado com os padrões de referência estabelecidos para rolamentos em bom estado. O valor RMS é conhecido como uma medida de severidade vibração. O valor eficaz de um sinal de vibração pode ser definido por:

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k^2} \quad (2.1)$$

em que  $x_k$  é a  $k$ -ésima amostra do sinal de vibração e  $N$  é o número de amostras desse sinal.

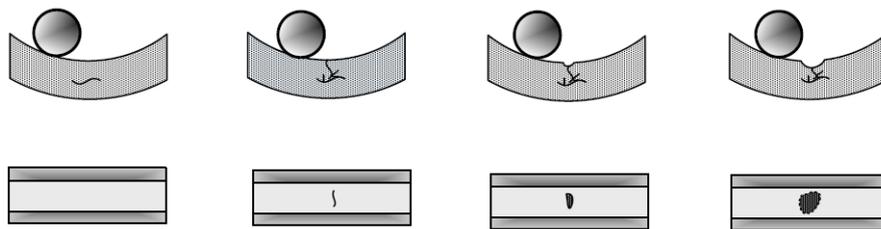
- **Valor de pico**

É o valor máximo registrado no sinal de vibração. O valor de pico é definido por:

$$X_{Pico} = \max(|x_{kn}|) \quad , \quad (1 < k \leq N) \quad (2.2)$$

O valor pico-a-pico também é normalmente considerado. Ambas figuras de mérito são particularmente úteis para monitorar mudanças na quantidade de impulsividade do sinal de vibração, possivelmente devido ao aumento do dano de pulso, ilustrado pela figura 5. Esse recurso não é 100% confiável, já que existem outros efeitos que podem aumentar a amplitude do sinal, como movimentos bruscos do sensor ou interferências.

Figura 5 – Aumento do dano de pulso



Fonte: (BEZERRA, 2004)

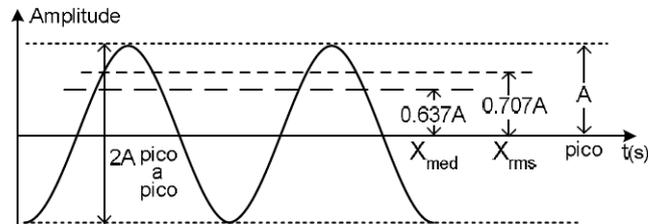
- **Valor médio**

O valor médio retrata uma estatística amostral de primeira ordem e é definido por

$$X_{med} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |x_k| \quad (2.3)$$

Na figura 6 é ilustrada a relação entre valor RMS, de pico e médio de um sinal senoidal.

Figura 6 – Valor RMS, de pico e médio



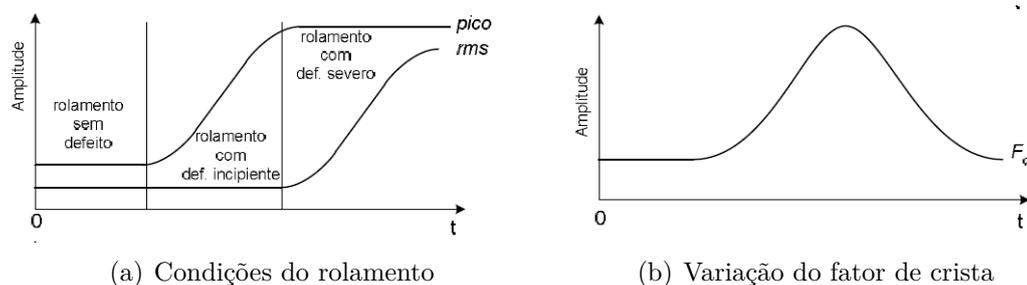
Fonte: (BEZERRA, 2004)

- **Fator de crista**

Talvez a forma mais intuitiva de identificar alterações em padrões de vibração no domínio do tempo seja pelo valor RMS. Porém, o valor RMS não apresenta mudanças significativas em estágios iniciais de danos em engrenagens e mancais de rolamentos. O fator de crista ( $F_C$ ), que é definido como a relação do valor de pico do sinal em relação ao valor RMS pode ser um estimador mais adequado para este tipo de aplicação. Na figura 7(a), são mostrados o valor de pico e o valor RMS para diferentes condições de um rolamento. A Figura 7(b) apresenta a variação do  $F_C$  para as mesmas condições. Observa-se que, enquanto o defeito é incipiente, o valor de pico e o  $F_C$  conseguem indicar de forma clara o surgimento de uma falha na pista ou esfera do rolamento. Por outro lado, à medida que o defeito se espalha pela superfície do rolamento o nível de ruído aumenta, elevando o valor RMS mais rápido que o valor de pico. Logo, o  $F_C$  sofre uma diminuição em seu valor, o que demonstra que o  $F_C$  não é um bom indicador de falhas em um estágio de falha severa, então, definido por:

$$F_C = \frac{X_{Pico}}{X_{RMS}} \quad (2.4)$$

Figura 7 – Aplicação do fator de crista



(a) Condições do rolamento

(b) Variação do fator de crista

Fonte: (BEZERRA, 2004)

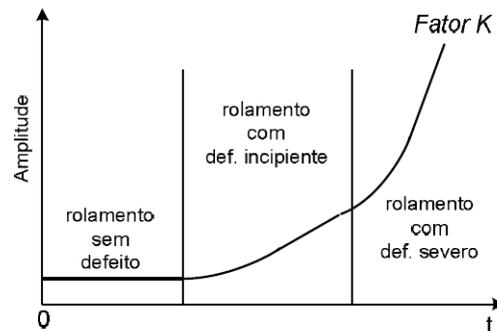
- **Fator  $K$**

O Fator  $K$  ( $F_K$ ) é o produto entre o valor RMS e o valor de pico, ou seja:

$$F_K = X_{Pico} X_{RMS} \quad (2.5)$$

O Fator  $K$  foi proposto como sendo uma solução para o problema que surgiu no fator de crista, no caso de falhas severas. Este parâmetro leva em conta o fato de que quando se desenvolve uma falha (fissura), e durante seu agravamento, ocorre uma elevação do valor RMS, elevando também o valor do  $F_K$ , que ao contrário do  $F_C$ , ocorre a redução, logo, tanto o aumento do valor RMS ou do valor do pico o Fator  $K$  aumenta, conforme demonstrado na figura 8.

Figura 8 – Variação do fator  $K$



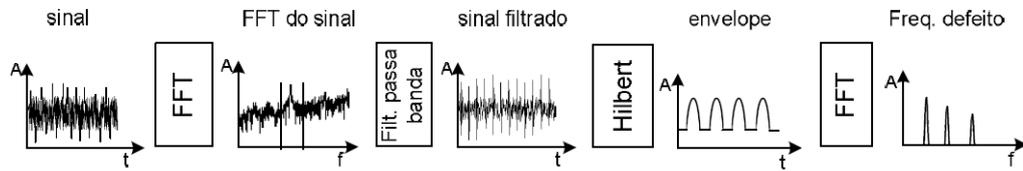
Fonte: (BEZERRA, 2004)

### 2.3.2 ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Os métodos apresentados na seção anterior permitem a detecção porém não a identificação de falhas (BEZERRA, 2004). A análise no domínio da frequência evidencia as informações sobre as falhas do rolamento, sendo possível relacionar frequências específicas a cada tipo de falha ou componente de um rolamento. Por essa razão, o domínio da frequência tem sido mais utilizado na análise de vibração de rolamentos (SANTANDER, 2014).

Dentre as diversas técnicas aplicadas para processamento de sinais no domínio da frequência para o diagnóstico de falhas em rolamentos, alguns trabalhos como (BEZERRA, 2004) e (SANTANDER, 2014), demonstram através de modelos teóricos as frequências características de cada peça do rolamento. No processamento do sinal de aceleração de um sensor de vibração, são geralmente consideradas quatro etapas, ilustradas na figura 9: a aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT — *Fast Fourier Transform*) no sinal; a aplicação de um filtro passa-banda no sinal resultante da FFT; a aplicação de um método do envelope no sinal filtrado; e finalmente a aplicação de uma segunda FFT no sinal de envelope.

Figura 9 – Processamento do sinal bruto



Fonte: (BEZERRA, 2004)

Existe uma diversidade de métodos teóricos (BEZERRA, 2004) para identificação e predição de falhas em rolamentos a partir da análise de vibrações. Utilizando como base os estudos realizados em (DIARRASSOUBA, 2017), (BEZERRA, 2004), (SANTANDER, 2014) e (CHAUDHARI; GAIKWAD; KULKARNI, 2014), é possível identificar seis características fundamentais usadas para descrever a dinâmica dos movimentos de um rolamento, sendo elas: o diâmetro primitivo ( $D_p$ ), diâmetro da pista externa ( $D_{pe}$ ) e interna ( $D_{pi}$ ), o ângulo de incidência ( $\alpha$ ), a quantidade ( $N_e$ ) e o diâmetro das esferas ( $D_e$ ), ilustradas na figura 10.

Figura 10 – Diâmetros do rolamento

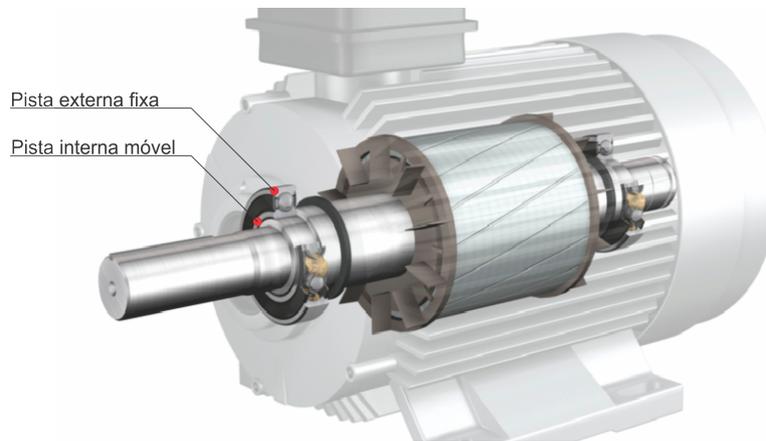


Fonte: Pagina da SKF <sup>5</sup>

<sup>5</sup> <Disponível em: <<https://www.skf.com/br/products/rolling-bearings/>. Acesso em: 30 de ago. 2020.>

Cada uma das características mencionadas gera uma frequência característica. Por fins de simplicidade, a partir deste ponto, será considerado um modelo de motor em que apenas a pista interna do rolamento é móvel, como ilustra a figura 11.

Figura 11 – Sustentação eixo motor



Fonte: Página da SKF <sup>6</sup>

A caracterização das vibrações nos rolamentos é geralmente tratada com precisões de 1 a 2 %, e pode ser modelada por:

- Frequência rotacional do eixo ( $f_{RE}$ ) — é, na verdade, definida pela razão entre a frequência de rotação do eixo,  $r$ , em *rotações por minuto* (RPM), e a frequência da tensão de alimentação, sendo, portanto,

$$f_{RE} = \frac{r}{60} \quad (2.6)$$

A frequência do eixo do motor caracteriza a frequência fundamental de vibração do motor. As demais frequências podem chegar até a décima harmônica, ou seja, dez vezes a frequência fundamental;

- Frequência de vibração na pista interna ( $f_{VPI}$ ) — é caracterizada por:

$$f_{VPI} = \frac{N_E}{2} \left[ 1 + \left( \frac{D_e}{D_p} \right) \cos(\alpha) \right] f_{RE} \quad (2.7)$$

em que  $N_e$  é o número de esferas do rolamento,  $D_e$  é o diâmetro das esferas,  $D_p$  corresponde ao diâmetro primitivo e  $\alpha$  é o ângulo de incidência.

- Frequência de vibração na pista externa ( $f_{VPE}$ ) — assume valores múltiplos de três em três vezes a frequência fundamental e caracterizada por:

$$f_{VPE} = \frac{n_e}{2} \left[ 1 - \left( \frac{d_e}{d_p} \right) \cos(\alpha) \right] f_{RE} \quad (2.8)$$

<sup>6</sup> <Disponível em: <<https://www.skf.com/br/products/rolling-bearings/>. Acesso em: 30 de ago. 2020.>

em que  $N_e$  é o número de esferas do rolamento,  $D_e$  é o diâmetro das esferas,  $D_p$  corresponde ao diâmetro primitivo e  $\alpha$  é o ângulo de incidência.

- Frequência de vibração na esfera ( $f_{VE}$ ) — assume valores múltiplos de quatro em quatro vezes a frequência fundamental e caracterizada por:

$$f_{VE} = \frac{d_P}{2d_E} \left[ 1 - \left( \frac{d_E}{d_P} \right)^2 \cos^2(\alpha) \right] f_{RE} \quad (2.9)$$

em que  $N_e$  é o número de esferas do rolamento,  $D_e$  é o diâmetro das esferas,  $D_p$  corresponde ao diâmetro primitivo e  $\alpha$  é o ângulo de incidência.

- Frequência fundamental da gaiola ( $f_{FG}$ ) — frequência de vibração, analisada no espectro de frequência e caracterizada por:

$$f_{FG} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{d_E}{d_P} \right) \cos(\alpha) \right] f_{RE} \quad (2.10)$$

em que  $N_e$  é o número de esferas do rolamento,  $D_e$  é o diâmetro das esferas,  $D_p$  corresponde ao diâmetro primitivo e  $\alpha$  é o ângulo de incidência.

O processamento do sinal de vibração, que usualmente é captado através de um sensor de aceleração acoplado ao motor de indução, de forma a reduzir a influência de ruídos e enfatizar as frequências de interesse, pode ser realizado no domínio da frequência, em quatro etapas, conforme proposto por (SANTANDER, 2014):

- FFT do sinal de vibração — A transformada de Fourier do sinal de aceleração (captado pelo sensor acoplado ao motor) é a primeira etapa. Nesta etapa, é possível localizar com mais facilidade uma faixa de frequências com eventual elevação de energia em relação a medidas anteriores (amostragens passadas). Essa elevação ocorre devido à excitação de frequências naturais características do rolamento ou estrutura, devido à falha no rolamento. Em casos quando não há dados anteriores ou quando a quantidade de energia do sinal de falha é pequena, há uma certa dificuldade em localizar esta faixa. Uma alternativa é usar um filtro com uma banda de filtragem maior (BEZERRA, 2004);
- Filtro passa-banda — Nesta etapa, é aplicado ao sinal um filtro passa-banda, eliminando ruídos de alta frequência e baixas frequências de alta magnitude no espectro, que, em geral, estão relacionadas ao desalinhamento e ao desbalanceamento. Na aplicação do filtro, um dos problemas encontrados é a definição do tamanho da banda do filtro, pois alguns estudos apontam que a banda de corte tem de estar em torno de uma região em que ocorreu excitação de frequências naturais características excitadas devido à falha. Para falhas em situações iniciais, ou seja, quando apresentam uma

baixa magnitude nas componentes do espectro de frequência, a identificação da banda de filtragem se torna mais complexa, visto que desta forma não há uma elevação considerável na região de excitação de frequências naturais (frequências características dos rolamentos). Por outro lado, alguns estudos apontam que a região de filtragem pode ter uma banda maior, desde que a frequência inicial do filtro seja no mínimo dez vezes a frequência de rotação da pista girante (frequência fundamental). Pode-se observar que, se não há um conhecimento prévio das frequências de ressonância do rolamento ou estruturas (que serão excitadas pelo defeito), a escolha das bandas de filtragem passa a ser um método de tentativa e erro (BEZERRA, 2004);

- Método do envelope — Este método consiste na aplicação da transformada de Hilbert, desempenhando uma demodulação. O seu objetivo é a obtenção do envelope do sinal de defeito, que é um sinal de baixa frequência. Portanto, para cada tipo de defeito, o envelope traz informações características peculiares (BEZERRA, 2004);
- FFT do sinal de envelope — Com a aplicação da transformada de Fourier ao envelope do sinal, são evidenciadas as frequências dos diferentes defeitos. Exemplificando o resultado desta etapa, considere um motor de indução com eixo radial, ou seja, a pista externa fixa e a pista interna móvel, se a frequência obtida possuir bandas laterais múltiplas dela, conclui-se que a falha ocorreu na pista externa. Se as bandas laterais estiverem espaçadas com valores iguais à frequência de rotação do eixo ( $f_{RE}$ ), pode-se concluir que a falha está na pista interna. Se, por outro lado, a frequência principal tiver como bandas laterais, frequências com valores iguais à frequência da gaiola ( $f_{FG}$ ), pode-se concluir que o defeito é na esfera (BEZERRA, 2004).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

As técnicas aplicadas para realizar a predição de uma falha, como apresentado, podem ser realizadas no domínio do tempo ou da frequência. Com isso, se consegue antecipar uma quebra de um equipamento realizando o monitoramento através da vibração gerada em sua estrutura. O processo da aquisição até a análise do sinal, pode ser separado em quatro passos, detalhados a seguir: a especificação do sensor de vibração, instalação física e ligação elétrica do sensor, amostragens do sinal de aceleração, processamento de dados e análise dos resultados.

#### 3.1 SENSOR DE ACELERAÇÃO

Em um sistema de medição, o transdutor (acelerômetro) é o componente que está em contato com o objeto a ser medido (motor elétrico). Nesse caso, o transdutor pode ser considerado o sensor, o qual é sensibilizado diretamente pelo objeto, traduzindo os efeitos físicos em outros efeitos de natureza compatíveis com um sistema de medição. Neste trabalho, será utilizado um sensor, esse que realizará a medição da aceleração da vibração do motor elétrico a ser analisado.

No contexto desta aplicação, o sensor de aceleração deve possuir banda de operação que contemple a faixa de 10Hz a 10 KHz (SANTANDER, 2014). Adicionalmente, devem ser considerados o grau de proteção, a temperatura de trabalho, a sensibilidade de vibração e normativas referentes ao local e ao tipo de aplicação a que se destina. Como exemplo, alguns modelos de sensores do fabricante IFM são apresentados no quadro apresentado na Figura 12. Para o estudo proposto, será utilizado o modelo VSP003, que possui uma faixa de vibração da área de medição de até 50 g (em que g é a aceleração da gravidade), com a banda de frequências de leitura de 1,5 até 16000 Hz, para uma temperatura de trabalho de 30 a 125 °C, sendo seu grau de proteção IP67. Esse modelo possui certificação CE, cULus e EAC, e seu funcionamento ocorre através do princípio piezoelétrico, utilizando o princípio IEPE.

Figura 12 – Tabela de modelos dos sensores IFM

Produto	Vibração da área de medição	Faixa de frequência	Temperatura ambiente	Proteção	Aprovação
▶ <b>VSM101</b>	-40...40 g	0...4500 Hz	-30...85 °C	IP 67, IP 68, IP 69K	CE
▶ <b>VSA001</b>	-25...25 g	0...6000 Hz	-30...125 °C	IP 67, IP 68, IP 69K	CE, cULus, EAC
▶ <b>VSA005</b>	-25...25 g	1...10000 Hz	-20...80 °C	IP 67	CE, cULus, EAC
▶ <b>VSA004</b>	-25...25 g	1...10000 Hz	-20...80 °C	IP 67	CE, cULus, EAC
▶ <b>VSP001</b>	-50...50 g	2...10000 Hz	-55...125 °C	IP 67	CE, EAC
▶ <b>VSP01A</b>	-50...50 g	2...10000 Hz	-55...90 °C	IP 68	CE, IECEx, ATEX II 1D, ATEX II 1G
▶ <b>VNA001</b>	-25...25 g	0...6000 Hz	-30...125 °C	IP 67, IP 68, IP 69K	CE, cULus, EAC
▶ <b>VSP003</b>	50 g	1,5...16000 Hz	-55...130 °C	IP 67	CE, EAC
▶ <b>VSA201</b>	-250...250 g	0...6000 Hz	-30...125 °C	IP 67, IP 68, IP 69K	CE, cULus, EAC
▶ <b>VSA101</b>	-3,3...3,3 g	0...1000 Hz	-30...125 °C	IP 67, IP 68, IP 69K	CE, cULus, EAC
▶ <b>VSP02A</b>	-50...50 g	2...10000 Hz	-55...90 °C	IP 68	CE, IECEx, ATEX I M1
▶ <b>VSA006</b>	-25...25 g	0...10000 Hz	-30...85 °C	IP 67	CE, cULus, EAC
▶ <b>VSA002</b>	-25...25 g	0...10000 Hz	-30...85 °C	IP 67	CE, cULus, EAC

Fonte: Página da IFM <sup>1</sup>

A instalação física e a ligação elétrica do sensor, a fim de melhorar a leitura dos dados de vibração e de eliminar leituras indesejadas (ruídos), devem estar alinhadas com o rolamento a ser inspecionado, conforme ilustrado na figura 15.

Figura 13 – Instalação do sensor de vibração



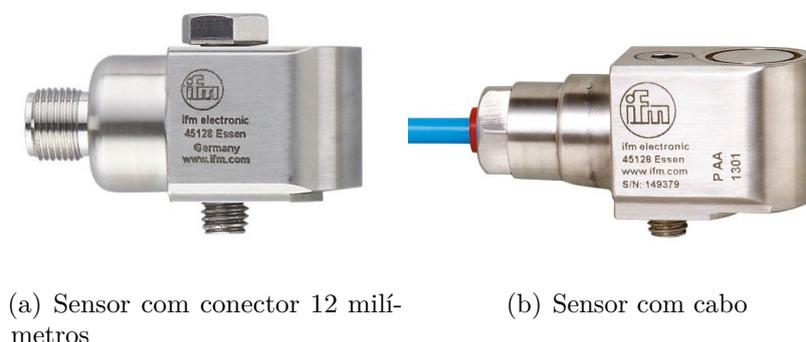
Fonte: Compilação do autor <sup>2</sup>

<sup>1</sup> <Disponível em: <<https://www.ifm.com/br/pt/category>>. Acesso em: 27 de jun. 2020.>

<sup>2</sup> <Montagem a partir e imagens coletadas nos sites dos fabricantes SKF e IFM via Corel Draw>

Já a ligação elétrica, é utilizada como referência, os padrões sensores do fabricante IFM (Pino 2 / Fio branco - Sinal, Pino 4 / Fio preto - referência), esta pela qual, é realizada através de duas opções: com conector de 12 milímetros ou diretamente com cabo, conforme ilustra a figura 14. O sinal que é disponibilizado pelo sensor comentado, se da através de um nível de tensão proporcional a vibração que está sofrendo o elemento piezoelétrico, ou seja, para cada 1g aplicado ao sensor, ele responde com uma tensão de 100 mV, logo, em fundo de escala com 50g, será disponibilizado uma tensão de 5V.

Figura 14 – Tipos de sensores



(a) Sensor com conector 12 milímetros

(b) Sensor com cabo

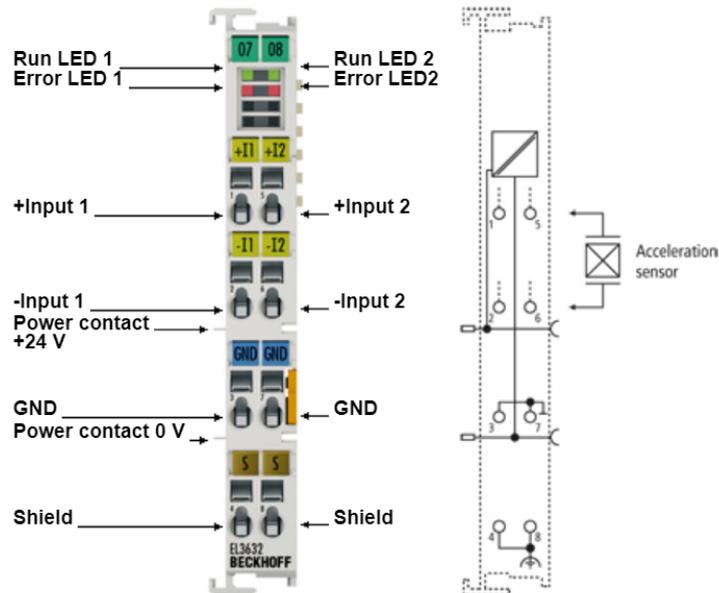
Fonte: Página da IFM <sup>3</sup>

### 3.2 AMOSTRAGEM DO SINAL DE ACELERAÇÃO

A amostragem dos dados do acelerômetro, será realizada por um cartão de um controlador lógico programável (CLP), do fabricante Beckhoff, modelo EL3632. Esse cartão é capaz de fazer amostragens de até 25 KHz. A amostragem será feita por um período de 10 segundos com a máxima frequência de amostragem do A/D (25 KHz), o que resulta na aquisição de um vetor com 250 mil amostras. Considerando a taxa de Nyquist, tem-se assim, a possibilidade de adquirir sem recobrimento espectral sinais de até 12,5 KHz, o que atende os requisitos de faixa de frequência da aplicação em questão. O cartão EL3632 possui dois canais independentes, cada um com fonte de corrente configurável separadamente, filtro passa-baixa implementado em hardware, filtro analógico parametrizável separadamente para processamento de sinal e taxa de amostragem parametrizável / fator de sobre-amostragem.

<sup>3</sup> <Disponível em: <<https://www.ifm.com/br/pt/product/VSP003> .Acesso em: 15 de out. 2020.>

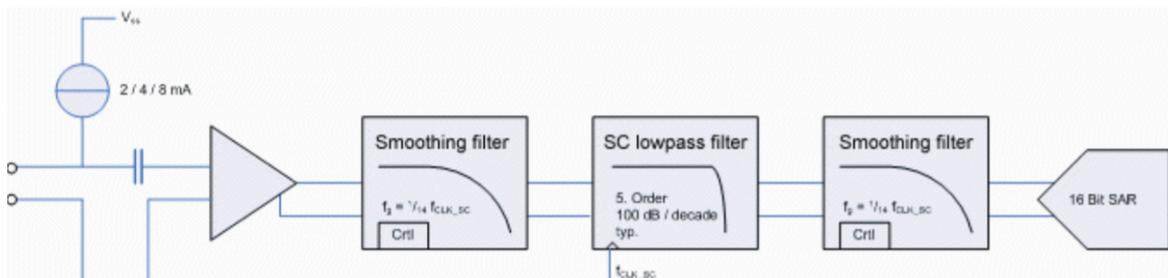
Figura 15 – Cartão para amostragem dos dados



Fonte: Compilação do autor <sup>4</sup>

Cada canal possui um filtro anti-recobrimento composto por uma cascata de três filtros analógicos, conforme ilustra a figura 16, sendo um deles um filtro de Butterworth de 5ª ordem (100dB/década) parametrizável.

Figura 16 – Filtros de hardware embarcados



Fonte: Compilação do autor <sup>5</sup>

Os acelerômetros com interface IEPE podem ser conectados diretamente ao cartão EL3632, que realizará a coleta de dados e que pode ser parametrizado por uma plataforma dedicada para configuração através do protocolo EtherCAT, com um CLP do fabricante e/ou computador. Os sinais de medição são analisados através da biblioteca do TwinCAT (software de programação, configuração e amostragem da Beckhoff). Isso permite todos os benefícios de uma plataforma em CLP ou computador, como desempenho e flexibilidade, para ser totalmente utilizada.

<sup>4</sup> <Montagem a partir e imagem coletada no site do fabricante BECKHOFF via Corel Draw>

O hardware conta com diversos parâmetros de configuração, para adequação do sinal amostrado, conforme a necessidade do usuário. Dentre os que possuem maior utilidade estão: frequência de amostragem e ganho do sinal de entrada; filtro passa-baixas configurável.

O software de configuração e amostragem Twincat da Beckhoff, na qual é realizada toda a parametrização dos coeficientes dos filtros e amostragem, também possibilita realizar a plotagem do sinal amostrado na frequência de amostragem desejada. O EL3632, é um cartão de 16 bits com faixa dinâmica de entrada de 0 a 5V, quantizando o sinal de entrada, por tanto, em 65536 níveis de amplitude. O sinal discreto é registrado por uma das ferramentas do Twincat, o Scope, onde é armazenada toda a leitura enviada pelo acelerômetro, possibilitando iniciar a coleta, realizando assim a amostragem do sinal até que seja interrompida a coleta. A figura ?? ilustra a interface de leitura e configuração da ferramenta Scope.

O processamento dos dados utilizando o método do envelope realiza, em sua primeira etapa, a FFT do sinal amostrado. Entretanto, para que com esse sinal se obtenha o resultado esperado, ele deve ser condicionado para a unidade de medida de aceleração, ou seja, em  $m/s^2$ . Esse condicionamento pode ser feito conforme.

$$a = \frac{sf_e}{2^r S} \quad (3.1)$$

em que  $a$  é a aceleração, em  $m/s^2$ ,  $s$  é amplitude lida pelo A/D, em bits,  $f_e$  é o fundo de escala de entrada do A/D, em Volts,  $r$  é a resolução do A/D em bits e  $S$  é a sensibilidade do sensor em  $mv/g$ .

Com a amostragem realizada através ferramenta Scope, é possível exportar os dados para um planilha de arquivo em excel, no formado .csv, possibilitando realizar a conversão do valor em bits do A/D para um valor de aceleração, através de 3.1. Os dados são então convertidos em uma planilha eletrônica e importados para o MATLAB®, no qual são realizadas as etapas de processamento, aplicando-se o método do envelope.

### 3.3 PROCESSAMENTO DE SINAIS

Após a obtenção dos valores de aceleração do sensor, esses dados serão processados nos domínios do tempo e da frequência. Os dados processados no domínio do tempo serão utilizados para distinguir uma condição de funcionamento em operação normal ou em falha. As figuras de mérito consideradas serão o fator de crista, fator  $K$  e valor RMS. Valores de referência serão obtidos de norma (BEZERRA, 2004), que define, para cada aplicação, limiares de operação em condições normais e anormais. O processamento no domínio da frequência será utilizado para identificar qual e onde está localizado o defeito, aplicando-se a técnica do envelope.

Serão gerados defeitos, propositais e conhecidos, a fim de aplicar a técnica do envelope, identificando e validando o diagnóstico da falha gerada. Desta forma, à medida que os elementos girantes se deslocam, passarão pela região defeituosa provocando tensões cíclicas de cisalhamento, agravando continuamente o defeito, aumentando assim sua energia.

Os testes realizados neste trabalho utilizarão um motor de indução trifásico, com rotação nominal de 860 RPM, com potência de 1,0 CV (0,75 KW), acionado com frequência da rede de 60 Hz em tensão de linha de 380 V<sub>CA</sub>. Sob tais condições, a frequência de vibração fundamental resulta entre 14 e 15 Hz. Esse motor é montado com dois rolamentos, sendo analisado apenas o rolamento dianteiro (o qual sofre maior incidência de cargas), com diâmetro externo de 47 mm e interno com 20 mm, com diâmetro primitivo de 33,5 mm e com 8 esferas com diâmetro de 7,94 mm e ângulo  $\alpha = 0^\circ$ .

O rolamento dianteiro, em perfeitas condições, será substituído por dois outros rolamentos defeituosos. No primeiro deles, será realizado um leve dano no rolamento, simulando um defeito inicial. O segundo conterà um dano severo no rolamento, simulando um defeito agravado.

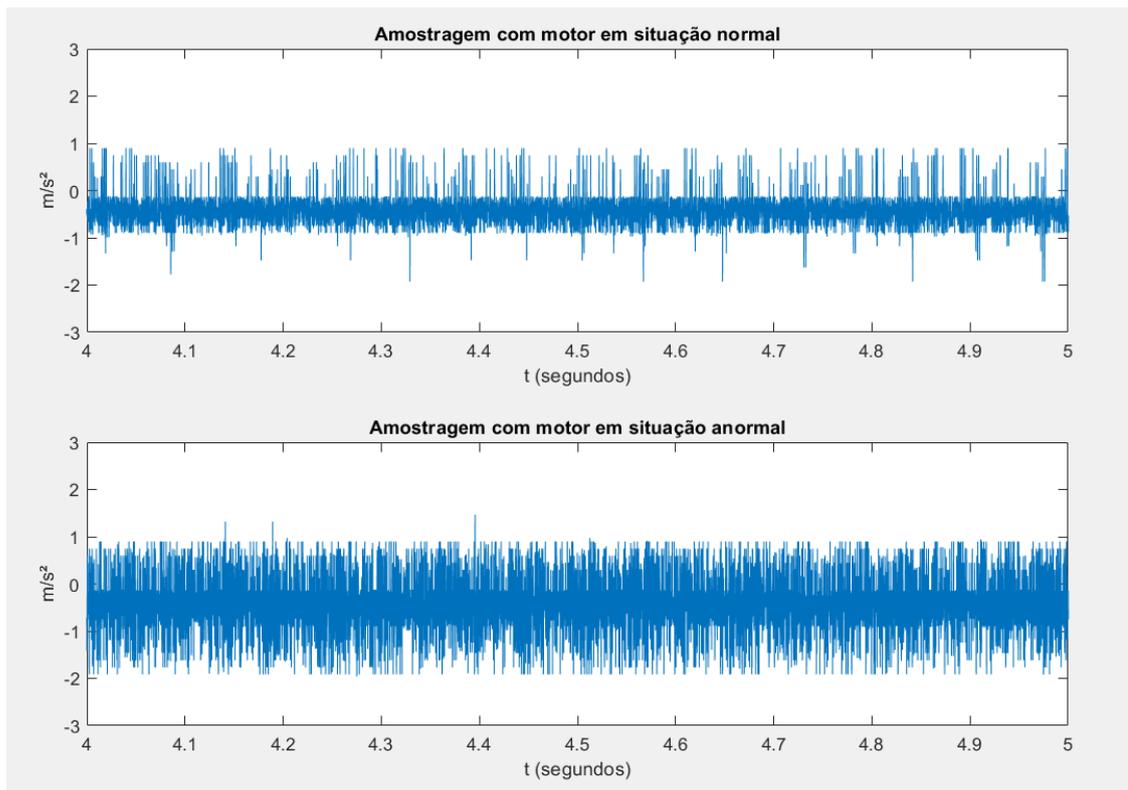
O experimento proposto consiste em instalar e fixar o motor (com o sensor de vibração já acoplado) em uma bancada para diagnósticos. Inicialmente, o motor será montado em condição normal de funcionamento (sem falhas), com o motor em funcionamento e sem carga. O sinal de vibração será adquirido e processado, no domínio do tempo e da frequência, extraindo assim os resultados desses conceitos e técnicas dos dois domínios, considerando um motor em condição normal de operação. Finalizada a primeira etapa do experimento, o rolamento sem falhas será substituído pelo que foi propositalmente danificado na pista externa, coletando novamente todos os dados e resultados da mesma forma que o procedimento anterior. Como o defeito criado para simulação é conhecido, conclui-se que as frequências de vibração que podem ter uma maior energia no espectro serão da pista externa ( $f_{VPE}$ ), sendo essas múltiplas de 51,77 Hz. O mesmo será implementado para os casos de danos na pista interna ( $f_{VPI}$ ) e também na esfera ( $f_{VE}$ ), sendo que as frequência esperadas serão, respectivamente, múltiplas de 66,89 e 30,93 Hz.

## 4 RESULTADOS

A aplicação do método proposto, tanto para os teste no domínio do tempo quanto da frequência, como comentado nos capítulos anteriores, foi desenvolvida em MATLAB®, no qual são analisados os dados, a fim de comprovar o método de diagnóstico proposto.

Na figura 17 são mostrados os sinais de vibração do rolamento sem defeito (Rolamento  $R_{SD}$ ) e do rolamento com um leve dano (Rolamento  $R_{DL}$ ). A diferença entre os dois sinais é evidente, sendo que o sinal do rolamento com defeito apresenta uma maior amplitude e diversos picos proeminentes ao longo do tempo. A amplitude menor no gráfico da situação normal retrata uma menor vibração no sensor, resultado do movimento suave do rolamento sem defeito. Ao contrário, o gráfico da situação anormal retrata maior vibração, causada por imperfeições no rolamento.

Figura 17 – Comparação entre as amostragens para um dano leve

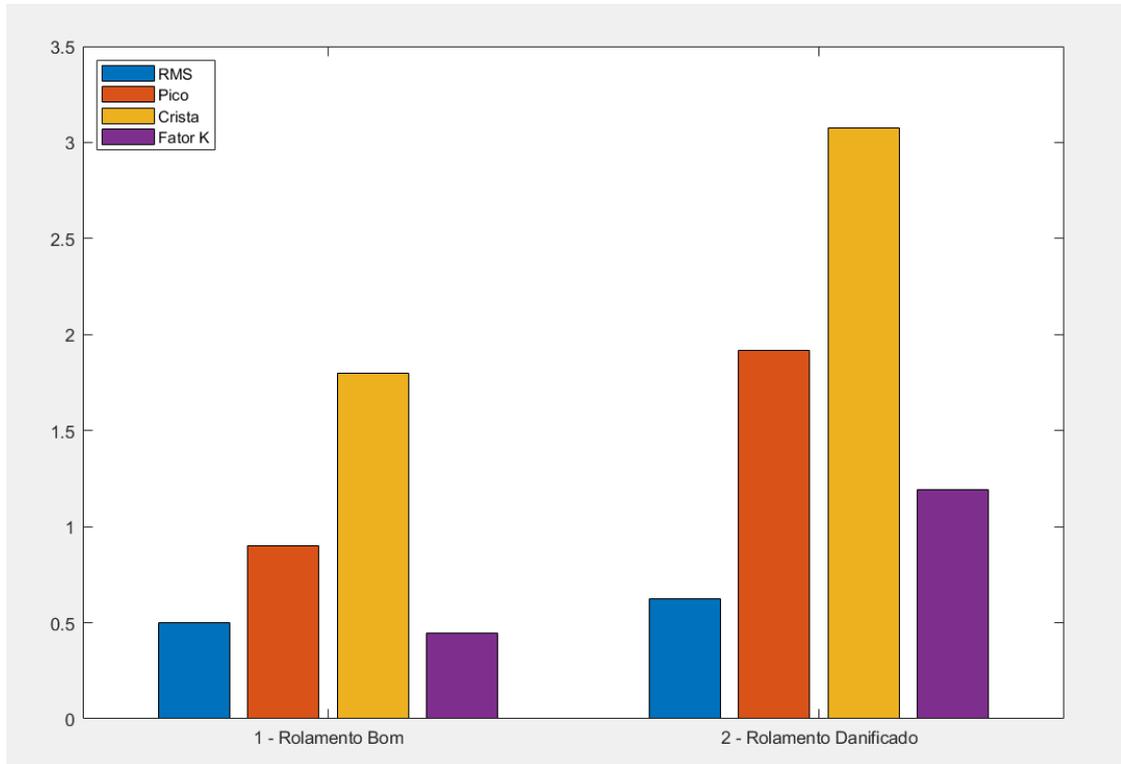


Fonte: Compilação do autor

A figura 18 mostra os parâmetros estatísticos calculados para os dois tipos de rolamentos, incluindo o valor RMS, valor de pico, fator  $K$  e fator de crista, todos determinados no domínio do tempo. A diferença entre as duas condições é perceptível, tendo ocorrido uma elevação em todos os parâmetros para o rolamento  $R_{DL}$ , o que indica que ele está operando em uma condição anômala. Os parâmetros estatísticos que mostram a maior

diferença entre os dois conjuntos são o valor de crista e o valor de pico. Eles demonstram de forma mais acentuada a discrepância entre os dois sinais amostrados, evidenciando assim a falha simulada no rolamento  $R_{DL}$ .

Figura 18 – Comparação entre parâmetros estatísticos dano leve



*Fonte: Compilação do autor*

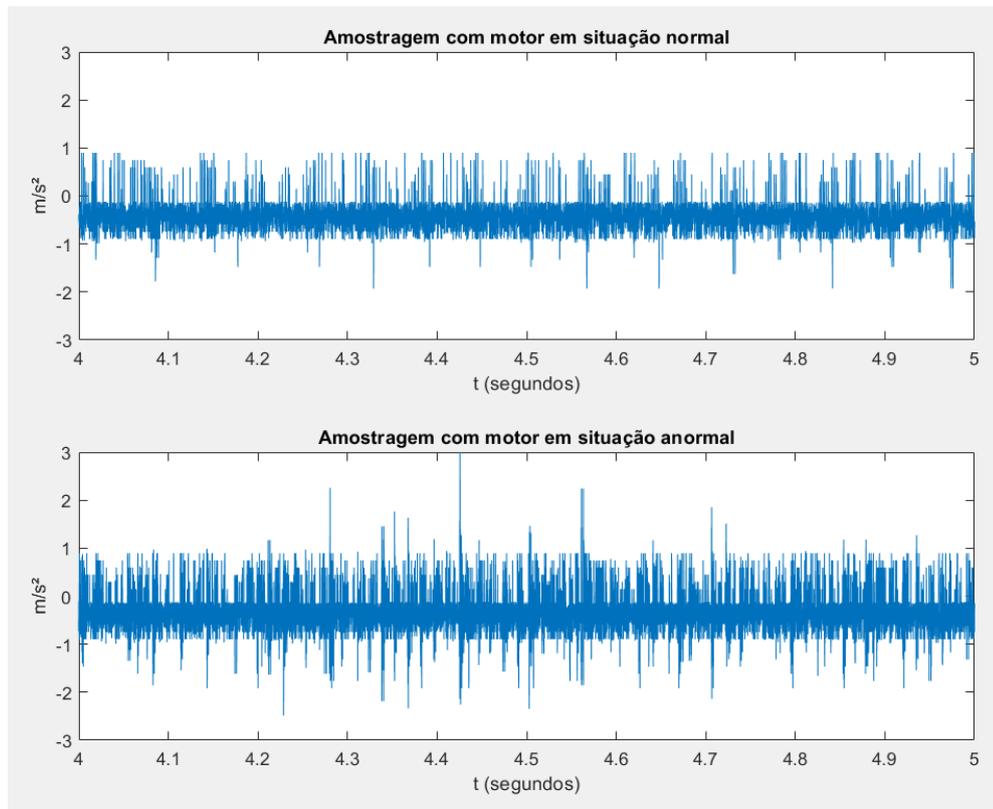
Além do indício visual que pode ser observado no gráfico da figura 17, é eminente a diferença dos sinais do fator  $K$  e fator de crista, quando comparados aos mesmos valores do rolamento  $R_{SD}$ , evidenciando assim que o rolamento analisado está apresentando algum desvio em seu funcionamento. Porém, com esses dados, é possível apenas relatar que existe uma irregularidade, ou seja, não é possível, ainda, prever onde está a causa do defeito.

Da mesma forma, com o rolamento que foi provocado um dano mais severo para as simulações, também é perceptível a diferença entre os sinais amostrados, ilustrado pela figura 19. Novamente, o rolamento com defeito apresenta uma maior amplitude e diversos picos proeminentes ao longo do tempo.

O dano gerado, também pode ser observado através dos parâmetros estatísticos ilustrados pela figura 20. Assim como já demonstrado com a anomalia leve, simulada no experimento anterior, o gráfico indica a presença de um dano mais severo quando comparado com a situação do rolamento em condição normal, identificando também que o rolamento com dano mais severo está operando em uma situação anômala.

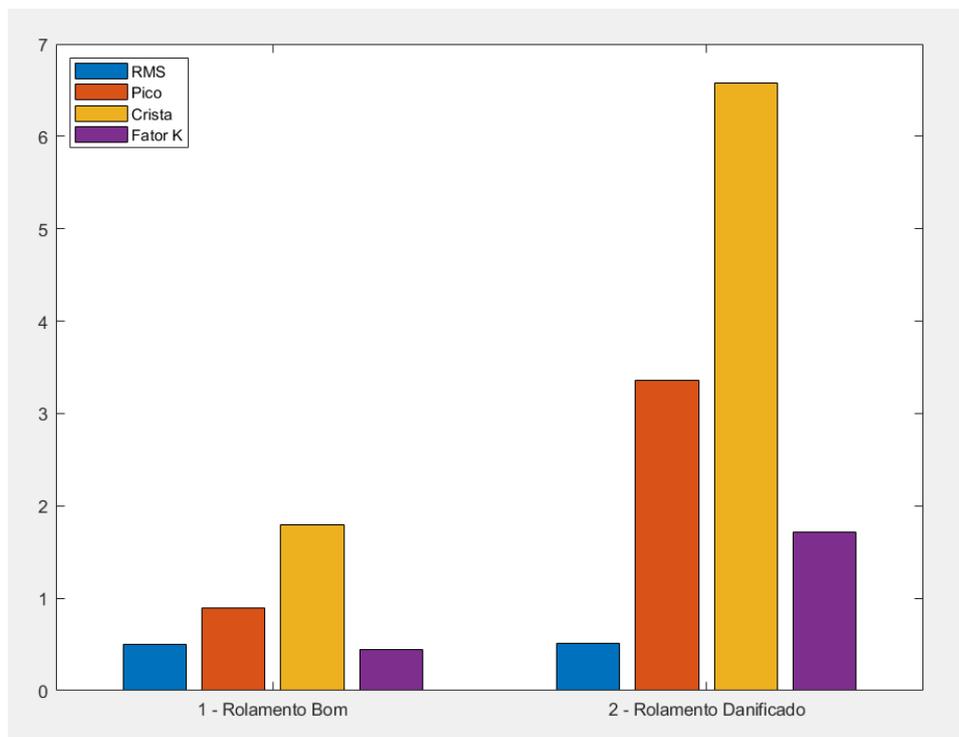
A identificação da existência ou não de uma anomalia, seja ela derivada de um dano leve ou severo no rolamento, pode ser mitigada com os parâmetros estatísticos demonstrados

Figura 19 – Comparação entre as amostragens para um dano severo



Fonte: Compilação do autor

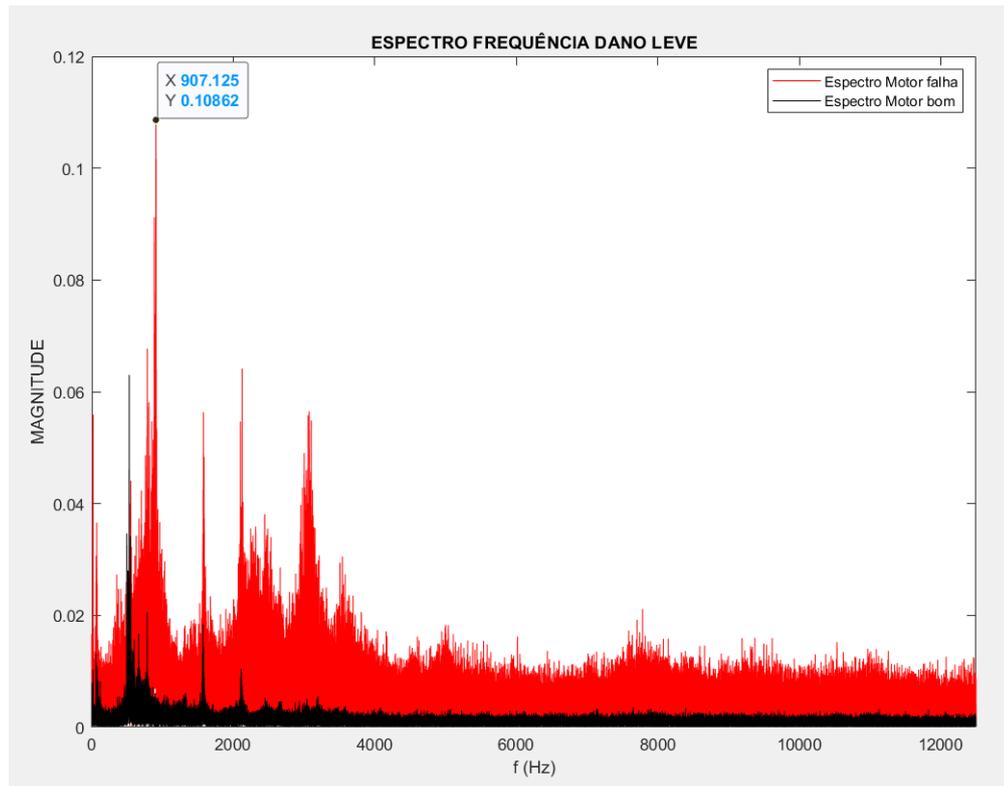
Figura 20 – Comparação entre parâmetros estatísticos dano severo



Fonte: Compilação do autor

anteriormente. Entretanto, se o objetivo for o diagnóstico da causa, esse pode ser realizado com o processamento dos sinais aplicando a técnica do envelope, realizada no domínio da frequência. A figura 21 demonstra no espectro do sinal de vibração do rolamento com dano leve, sendo  $907,15 \text{ Hz}$  a frequência com maior energia, a qual se aproxima de um múltiplo da frequência de vibração da gaiola,  $6,47 \text{ Hz}$  ( $905,8 \text{ Hz}$ ).

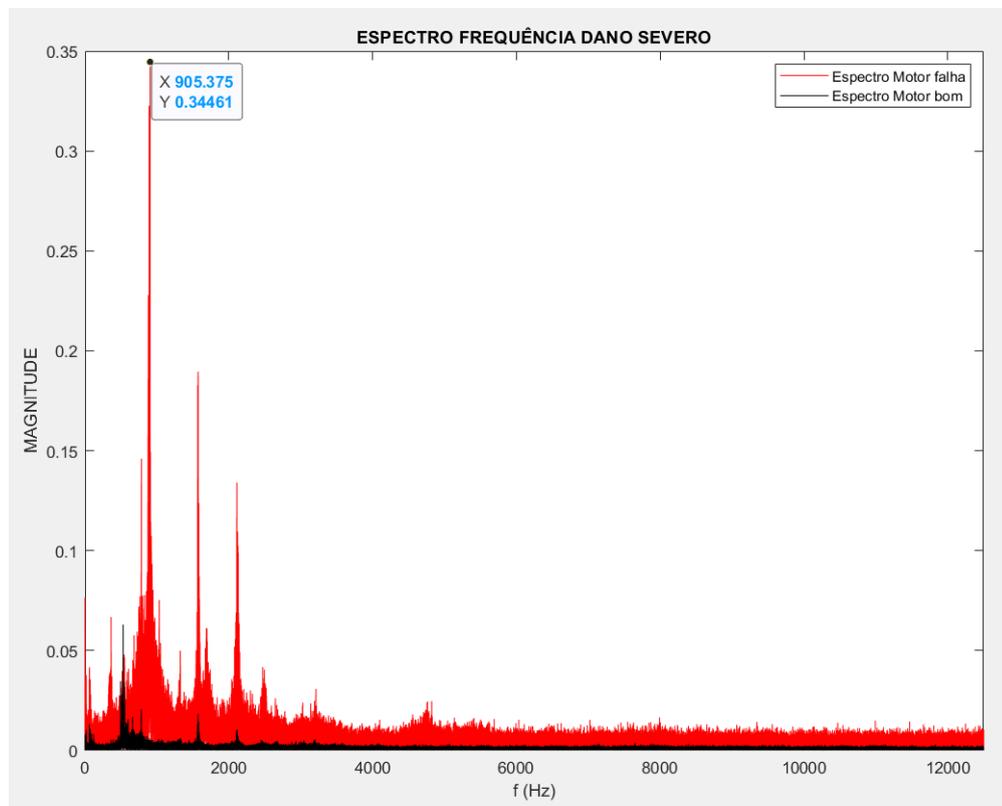
Figura 21 – Comparação entre os espectros para um dano leve



*Fonte: Compilação do autor*

A figura 22 mostra o espectro do sinal referente ao rolamento que contém um dano severo, sendo possível identificar a frequência de  $905,35 \text{ Hz}$ , relativa ao defeito provocado na gaiola, cujo valor teórico pode ser obtido a partir de um múltiplo da frequência de vibração da gaiola, de  $6,47 \text{ Hz}$  (portanto,  $905,8 \text{ Hz}$ ).

Figura 22 – Comparação entre os espectros para um dano severo



Fonte: Compilação do autor

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi apresentado o problema de análise de vibração em motores de indução, com vistas à manutenção preditiva. A fundamentação teórica que embasa esse tipo de técnica foi apresentada e um método de teste foi proposto. Foram apresentadas avaliações tanto no domínio do tempo quanto da frequência, ambas com a finalidade de detectar uma falha incipiente. Os dados foram processados no MATLAB<sup>®</sup>, verificando-se que é possível prever um acontecimento futuro, ou seja, a quebra de um equipamento, a partir de dados estatísticos como o fator de crista e o fator  $K$ , bem como a análise espectral, com a replicação das múltiplas frequências de vibração baseado nas suas assinaturas, validando assim a eficiência dos métodos propostos

Uma das dificuldades para a aplicação dos métodos e modelos matemáticos foi a amostragem do sinal, tendo em vista que demanda uma alta taxa de aquisição. Como trabalhos futuros, sugere-se a avaliação de uma maior diversidade de defeitos. Além disso, considerando-se a natureza aleatória dos sinais, sugere-se o uso de figuras de mérito estatísticas, como a avaliação da Densidade Espectral de Potência (transformada de Fourier da sequência de autocorrelação do sinal de vibração).

## REFERÊNCIAS

- BEZERRA, Roberto de A. Detecção de falhas em rolamentos por análise de vibração. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, 2004.
- BOLSHUNOVA, Olga M.; KOROLYOV, Igor A. Diagnostics of the technical state of electric motors using wavelet analysis. **2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)**, IEEE, 2015.
- CHAUDHARI, Yogita K.; GAIKWAD, Jitendra A.; KULKARNI, Jayant V. Vibration analysis for bearing fault detection in electrical motors. **International Conference on Networks and Soft Computing**, IEEE, p. 146–150, 2014.
- COSTA, Mariana de A. Gestão estratégica da manutenção: uma oportunidade para melhorar o resultado operacional. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2013.
- DEVANEY, Michael J.; EREN, Levent. Detecting motor bearing faults. **IEEE Instrumentation Measurement Magazine**, IEEE, 2004.
- DIARRASSOUBA, Karamoko. Health monitoring, fault detection and diagnosis in industrial rotating machinery by advanced vibration analysis. Università degli studi di Palermo, 2017.
- DUROCHER, David B.; FELDMEIERS, Gerry R. Predictive versus preventive maintenance. **IEEE industry applications magazine**, IEEE, 2004.
- GENEROSO, Daniel J. **Elementos Máquinas**. [S.l.]: IFSC, 2009. v. 1.
- MENNA, Alexandre R. Detecção de falhas em mancais de rolamento por análise de vibrações em banda larga: um caso prático de aplicação em uma população de equipamentos rotativos. Universidade federal do rio grande do sul, 2007.
- NEPOMUCENO, Lauro X. **Técnicas de manutenção preditiva**. [S.l.]: Blucher, 1989. v. 1.
- PICAZO-RÓDENAS R. ROYO, J. Antonino-Daviu J. Roger-Folch M.J. Use of infrared thermography for computation of heating curves and preliminary failure detection in induction motors. IEEE, 2012.
- SANTANDER, Elvis J. O. AplicaÇÃo de curtose espectral na identificaÇÃo de falhas em mancais de rolamentos. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.
- SANTOS, Fernanda M. da C.; SILVA, Ivan N.; SUETAKE, Marcelo. Sobre a aplicaÇÃo de sistemas inteligentes para diagnostico de falhas em máquinas de induÇÃo - uma visÃo geral. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2004.
- SZYMON, Alex A.; PIETA, Fábio. Bancada didática de alinhamento de máquinas rotativas. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011.