



**GUSTAVO PEREIRA BRUNO**

**CARACTERIZAÇÃO DE DEFEITOS NO ROLAMENTO EM UM MOTOR DE  
INDUÇÃO TRIFÁSICO UTILIZANDO A EMISSÃO ACÚSTICA**

**João Pessoa, PB  
Novembro de 2020**



**GUSTAVO PEREIRA BRUNO**

**CARACTERIZAÇÃO DE DEFEITOS NO ROLAMENTO EM UM MOTOR DE  
INDUÇÃO TRIFÁSICO UTILIZANDO A EMISSÃO ACÚSTICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Telecomunicações

Linha de Pesquisa: Processamento de Sinais

Silvana Luciene do Nascimento Cunha Costa, Dra.  
Orientadora

André Fellipe Cavalcante Silva, Dr.  
Coorientador

João Pessoa - PB, Novembro de 2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP  
Biblioteca Nilo Peçanha – IFPB, *campus* João Pessoa

B898c Bruno, Gustavo Pereira..  
Caracterização de defeitos no rolamento em um motor de indução trifásico utilizando a emissão acústica / Gustavo Pereira Bruno. – 2020.  
48 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba – IFPB / Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2019.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Silvana Luciene do N. C. Costa.  
Coorientador: Prof. Dr. André Fellipe C. Silva.

1. Emissão acústica. 2. Motor de indução trifásico. 3. Manutenção preditiva. 4. Processamento digital de sinais. 5. Rolamentos. I. Título.

CDU 534

Gustavo Pereira Bruno

## CARACTERIZAÇÃO DE DEFEITOS NO ROLAMENTO EM UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO UTILIZANDO A EMISSÃO ACÚSTICA

Dissertação apresentada à banca examinadora do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências da engenharia Elétrica.

Dissertação aprovada pela banca examinadora em: 06/11/2020

### BANCA EXAMINADORA

SILVANA LUCIENE DO  
NASCIMENTO CUNHA  
COSTA:51185342400

Assinado de forma digital por SILVANA  
LUCIENE DO NASCIMENTO CUNHA  
COSTA:51185342400  
Dados: 2021.01.27 16:45:00 -03'00'

---

Silvana Luciene do Nascimento Cunha Costa, Dra. – IFPB  
Orientadora

ANDRE FELLIPE CAVALCANTE  
SILVA:04784805478

Assinado de forma digital por ANDRE  
FELLIPE CAVALCANTE  
SILVA:04784805478  
Dados: 2021.01.07 20:57:14 -03'00'

---

André Fellipe Cavalcante Silva, Dr. - IFPB  
Coorientador



---

Suzete Élide Nobrega Correia, Dra. – IFPB  
Examinadora Externa



Documento assinado digitalmente  
Carlos Alberto Nobrega Sobrinho  
Data: 28/01/2021 21:09:55-0300  
CPF: 052.232.194-14

---

Carlos Alberto Nobrega Sobrinho, Dr. – IFPB  
Examinador Externo

Joao Pessoa – PB  
Novembro de 2020

## RESUMO

Os motores de indução trifásicos (MIT) são responsáveis por 90% da fonte primária de energia mecânica que é utilizada nas indústrias. Para garantir o desempenho desejado destes equipamentos, sem que haja interrupções na linha de produção, faz-se necessária a elaboração e a implementação de um plano de manutenção. Dentre as técnicas de manutenção aplicáveis nessas situações, destaca-se a manutenção preditiva. Neste trabalho foi estudado uma ferramenta de monitoramento preditivo dos rolamentos de um MIT por meio da técnica de Emissão Acústica (EA) em conjunto com o processamento digital de imagens. A classificação dos rolamentos foi realizada em duas etapas, que consistem em identificar a presença do defeito e o tipo do defeito, respectivamente. Todo o procedimento para diagnosticar o rolamento foi realizado a partir do processamento digital do espectrograma do sinal acústico gerado pelo motor. Para viabilizar a aquisição dos dados em campo, foi desenvolvido um protótipo portátil que realiza a aquisição do sinal acústico e encaminha o mesmo para um servidor *online*, onde fica salvo o sinal original, ao mesmo tempo que envia este mesmo áudio para uma *workstation* local, onde ocorre todo o processamento. A execução do processamento do áudio é realizada de forma sequencial e automática. Com isto, para diagnosticar o rolamento, o usuário tem a função única de iniciar o sistema e aguardar o resultado. Para identificar o tipo do defeito, dentre os estudados, foi utilizada uma Rede Neural Convolutiva (RNC), que ao final do treinamento, obteve uma acurácia de 93,02%.

**Palavras-chave:** Emissão Acústica; Motor de Indução Trifásico; Análise de defeito; Rolamentos; Rede Neural Convolutiva.

## ABSTRACT

Three-phase induction motors (TIM) are responsible for 90% of the primary source of mechanical energy that is used in industries. To guarantee the desired performance of this equipment, without interruptions in the production line, it is necessary to develop and implement a maintenance plan. Among the maintenance techniques applicable in these situations, predictive maintenance stands out. In this work, a predictive monitoring tool for the bearings of an TIM was studied using the Acoustic Emission (EA) technique in conjunction with digital image processing. The classification of the bearings was carried out in two stages, which consist of identifying the presence of the defect and the type of defect, respectively. The entire procedure to diagnose the bearing was performed from the digital processing of the spectrogram of the acoustic signal generated by the motor. In order to enable the acquisition of data in the field, a portable prototype was developed that performs the acquisition of the acoustic signal and forwards it to an online server, where the original signal is saved, while sending this same audio to a local workstation, where all processing takes place. The audio processing is performed sequentially and automatically. With this, to diagnose the bearing, the user has the unique function of starting the system and waiting for the result. To identify the type of defect, among those studied, a Convolutional Neural Network (RNC) was used, which at the end of the training, obtained an accuracy of 93.02%.

**Keywords:** Acoustic Emission; Three-phase induction motor; Failure Analysis; Bearings; Rede Convolutional Neural Network.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Motor de indução trifásico em gaiola de esquilo	16
Figura 02 - Geometria de um rolamento	21
Figura 03 - Fluxograma do sistema proposto	22
Figura 04 - Dispositivo de captura do sinal acústico	25
Figura 05 - Interface de áudio	26
Figura 06 - Bancada de teste	27
Figura 07 - Motor elétrico de indução trifásico	27
Figura 08 - Circuito de acionamento do motor CC	28
Figura 09 - Motor/gerador CC	28
Figura 10 - Torquímetro digital	29
Figura 11 - Tacômetro	29
Figura 12 - Fluxograma do processamento de imagem digital	30
Figura 13 - Etapa 1 do processamento do sinal	31
Figura 14 - Etapa 2 - Binarização da imagem	32
Figura 15 - Etapa 3 - Filtragem	33
Figura 16 - Etapa 4 - Identificação das frequências de defeito	34
Figura 17 - Defeito na pista interna	36
Figura 18 - Detecção da velocidade	37
Figura 19 - Resultado do classificador 1	38
Figura 20 - Diagnóstico de um rolamento com defeito na pista interna	39
Figura 21 - Diagnóstico de um rolamento saudável	40
Figura 22 - Diagnóstico de um rolamento com defeito na pista interna	41
Figura 23 - Diagnóstico de um rolamento com defeito na pista externa	42
Figura 24 - <i>Loss</i> e acurácia da RNC no treinamento	43

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

EA – Emissão Acústica

MIT – Motor de Indução

A/D – Analógico/Digital

DAQ – Aquisição de dados (*Data Acquisition*)

NBR – Norma Brasileira

F<sub>pi</sub> – Frequência de Defeito na Pista Interna

F<sub>pe</sub> – Frequência de Defeito na Pista Externa

PDS – Processamento Digital de Sinais

UFPB – Universidade Federal da Paraíba

GPICEEMA – Grupo de Instrumentação, Controle e Estudo em Energia e Meio Ambiente

I/O – Entradas/Saídas (*Input/Output*)

USB – Porta universal serial (*Universal Serial Bus*)

WAV – Formato de arquivo de áudio

RNC – Rede Neural Convolutacional

Hz – Hertz

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1 Formulação do problema	10
1.2 Justificativa	10
1.3 Estado da arte	11
1.4 Objetivos	14
1.4.1 Geral	14
1.4.2 Específicos	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1 Motor de Indução Trifásico (MIT)	15
2.2 Detecção de falhas	16
2.2.1 Falha	16
2.2.2 Falhas em rolamentos	17
2.3 Manutenção: definição	17
2.3.1 Manutenção: tipologia	17
2.3.1.1 Manutenção corretiva	17
2.3.1.2 Manutenção preventiva	18
2.3.1.3 Manutenção preditiva	19
2.4 Emissão Acústica	19
2.5 Estudo de defeitos em rolamentos	20
2.5.1 Cálculo da frequência de defeito no rolamento	20
3. MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1 Componentes para aquisição do sinal de Emissão Acústica	23
3.1.1 Microfone	23
3.1.2 Interface de Áudio	25
3.1.3 Banco de dados	25
3.2 Bancada de ensaios	26
3.2.1 Motor de Indução Trifásico (MIT)	26
3.2.2 Máquina CC (gerador)	27
3.2.3 Torquímetro digital	28
3.2.4 Tacômetro	28
3.3 Método para aquisição do sinal	29
3.4 Caracterização do defeito (pista interna e externa)	29

3.4.1	Processamento digital da imagem	30
3.4.1.1	Segmentação do áudio	30
3.4.1.2	Imagem Original	30
3.4.1.3	Binarização da imagem	31
3.4.1.4	Filtragem (Erosão e Dilatação)	32
3.4.1.5	Identificação das frequências de defeito	33
3.4.2	Rede Neural Convolutiva	34
4.	RESULTADOS	36
4.1	Processamento digital de imagem	36
4.2	Classificador RNC	39
5.	CONCLUSÃO	44

## 1. INTRODUÇÃO

Os motores de indução trifásicos (MIT) consomem cerca de 40% a 50% de toda energia elétrica no setor industrial, sendo responsáveis por mais de 90% de todo acionamento das principais nações industrializadas. Apesar dessas máquinas serem extremamente confiáveis e possuem poucas partes móveis, ainda assim requerem a elaboração e implementação de planos de manutenção adequados, com vistas a garantir sua integridade e bom desempenho (AHAMED et al., 2010).

Frente a esta realidade, a racionalização das técnicas de manutenção, a antecipação aos incidentes e a minimização das paradas originadas por falhas ou defeitos assumem peso significativo nos impactos sobre a produtividade e nos consequentes custos de produção. Neste contexto, novos conceitos têm sido utilizados, na manutenção e produção industriais. Dentre os conceitos atuais, o que mais se destaca é o da chamada manutenção preditiva, que objetiva reduzir os custos associados à manutenção e aumentar a disponibilidade dos equipamentos, fundamentando-se na análise da condição atual dos componentes (FUJIMOTO, 2005).

A principal diferença entre a manutenção preditiva e os demais tipos de manutenção é o uso da prática de monitoramento constante de componentes do equipamento, com vistas a detectar e acompanhar o surgimento e o desenvolvimento de um determinado defeito ou falha. Em manutenção, considera-se defeito a situação na qual o equipamento esteja trabalhando em condição diferente, daquela para a qual foi projetado. Não é necessariamente exigível que ocorra a situação que impede o funcionamento pleno do equipamento. Por outro lado, considera-se falha qualquer situação que se apresente impeditiva à utilização do equipamento (FUJIMOTO, 2005).

Dentro das práticas de manutenção preditiva, as técnicas de monitoramento não invasivas são tidas como as mais adequadas, em virtude tanto da facilidade de operação, quanto do baixo custo de implementação, uma vez que, na quase totalidade dos casos, estas técnicas não exigem a necessidade de interromper a linha de produção ou de desmontar ou alterar o equipamento, para realizar a captura de sinais ou a coleta de dados (REIS, 2010).

A análise por vibrações tem sido a metodologia mais utilizada, para predição de avarias em elementos mecânicos (ABDULLAH e AL-HAMD, 2006). Entretanto, o uso

da emissão acústica, para identificação e estimação de defeitos em rolamentos, se mostrou mais sensível, quando comparada ao método tradicional de análise, por vibração. Devido a essa vantagem, o método de análise por emissão acústica vem ganhando importante espaço (CHOUDHURY e TANDON, 2000).

Neste contexto, este trabalho visa o desenvolvimento de um algoritmo, simples e eficiente, para caracterizar a ocorrência de defeitos em um MIT (pista interna e pista externa), por meio dos sinais capturados pelo método de emissão acústica. Os sinais foram tratados, empregando-se técnicas de processamento digital de imagens para extrair informações do espectrograma do sinal de áudio emitido pelo MIT.

### **1.1 Formulação do problema**

Diversos métodos de análise das condições do rolamento foram desenvolvidos, para monitorar suas condições, a fim de evitar a falha do motor. Dentre essas técnicas, a mais difundida é a análise por vibrações, por ser de alta confiabilidade. Contudo, esse método de análise de defeitos tem limitações na aquisição do sinal, uma vez que a instalação do acelerômetro pode ser inviável em determinadas ocasiões. Além disto, o custo do equipamento para realizar a análise é muito elevado. Dessa forma, faz-se necessário o desenvolvimento de um dispositivo que realize a predição de avarias em rolamentos de forma não invasiva, com alta confiabilidade em uma ampla faixa velocidade de funcionamento e baixo custo.

### **1.2. Justificativa**

A predição de avaria em rolamentos por meio da emissão acústica (EA) tem se popularizado nas últimas décadas, devido ao avanço dos microprocessadores e a redução dos custos dos equipamentos. Esse método permite o aumento da confiabilidade, quando comparado aos métodos convencionais (análise por vibrações) para analisar motores em baixa velocidade, já que as alterações audíveis são identificadas precocemente (OLIVEIRA, 2018). Entretanto, Sobrinho (2015) e Othman, Nuawi e Mohamed (2015) apontam a ineficácia da técnica de EA para diagnosticar alguns tipos de defeitos em rolamentos.

Com isto, esta pesquisa propõe um método para analisar os sinais acústicos provenientes do motor utilizando técnicas de processamento digital das imagens dos

espectrogramas dos sinais gerados pelo motor. Este método permite uma análise simultânea em três variáveis diferentes (tempo, frequência e amplitude).

A seguir, é apresentado um resumo do estado da arte, apresentando alguns dos trabalhos relacionados ao uso da EA em MITs, utilizados como principais referências para este trabalho.

### **1.3 Estado da arte**

A utilização da EA para identificação de defeitos em rolamentos é amplamente estudada por diferentes pesquisadores. O que diferencia os trabalhos entre si é método no qual o sinal acústico é tratado e o defeito estudado. Para grande parte das pesquisas realizadas nesta área, o defeito no rolamento é fabricado artificialmente por um processo de usinagem, simulando assim um defeito usual (escamamento na pista) de forma pontual.

Choudhury e Tandon (2000) utilizaram a técnica de emissão acústica para detectar defeitos em mancais. Os pesquisadores simularam dois tipos de defeitos: defeitos na pista interna e no elemento rolante. Para isto, os pesquisadores utilizaram cinco rolamentos de tamanhos diferentes (NJ 202, 204, 205, 206 e 207) com defeito fabricado. Cada defeito foi produzido isoladamente por eletroerosão (defeito pontual com 1mm de largura perpendicular ao elemento rolante/pista interna). Após a fabricação do defeito, os rolamentos foram devidamente higienizados e lubrificados. Segundo os autores, a técnica de análise por Emissão Acústica foi utilizada em conjunto com distribuição estatística de eventos por contagem de *ringdown*, proporcionando bons resultados para detecção dos defeitos analisados. Neste trabalho, os autores realizaram a aquisição do sinal acústico em um laboratório, utilizaram o transdutor AET AC 175L, com frequência de ressonância de 175 kHz e um filtro passa-faixa de 125 kHz a 2 MHz.

Othman, Nuawi e Mohamed (2015) realizaram um estudo comparativo entre as técnicas de análise por vibrações e EA para identificação de defeitos em rolamentos (defeito na pista interna e na pista externa) em duas situações de funcionamento do motor: com velocidade de 1450 e 2900 rpm (sem carga). O defeito estudado pelos autores foi fabricado artificialmente com uma perfuração axial de 1mm de diâmetro. Para ambas as técnicas, foram analisados três métodos: inspeção visual da forma de onda no domínio do tempo, análise estatística no domínio do tempo e verificação da existência de frequências de defeito no espectro do sinal. Para aquisição do sinal, os autores utilizaram um transdutor DeCI SE1000H com frequência de amostragem de 12 kHz. Ao final da

pesquisa, os autores concluíram que os métodos propostos por eles foram aceitáveis, contudo eram métodos que exigiam alto conhecimento por parte do usuário.

Sobrinho (2015) também fez um estudo comparativo entre diferentes técnicas (EA, vibrações e assinatura elétrica) para identificar defeitos estruturais e no rolamento de um MIT, em diferentes situações de funcionamento do motor: carga de 0Nm, 5Nm, 10Nm, 15Nm, 20Nm e 25Nm. Dentre os diferentes defeitos estudados pelo autor, seu estudo contemplou a identificação de defeitos na pista externa do rolamento. Para simular o defeito, foi fabricado artificialmente um furo radial na pista externa do rolamento, com diâmetro de 5.8mm. A técnica de análise do defeito utilizando EA foi semelhante às técnicas utilizadas por Othman, Nuawi e Mohamed (2015): análise espectral utilizando a transformada de Fourier e Wavelet. O equipamento de aquisição utilizado foi um *Smartphone* genérico. O autor apontou a técnica de análise por EA como insatisfatória para detectar defeitos com cargas acima de 5Nm. Segundo o autor, a ineficácia da técnica de EA pode ter sido ocasionada pelo pré-processamento digital do áudio realizado automaticamente pelo *Smartphone*.

Delgado-Arredondo et al. (2016) propuseram uma metodologia diferente das citadas anteriormente para identificar defeito na pista externa do rolamento em um MIT. Este defeito foi fabricado artificialmente com um furo radial (diâmetro de 1.191mm) na pista externa. A metodologia proposta pelo autor utiliza uma decomposição completa do modo intrínseco do conjunto para minimizar o ruído no espectro do sinal. Após esse tratamento do sinal, o autor relata ter identificado de forma satisfatória o defeito na 3ª, 4ª e 5ª harmônica da frequência de defeito. Foi utilizado um microfone condensador polar cardioide da marca JST modelo CX-509, além de um amplificador, um conversor A/D com resolução de 12 Bits e uma taxa de amostragem de 2 kHz.

Greebrik et al. (2016) realizaram um estudo comparativo entre a técnica de vibrações e EA para identificar defeitos em rolamentos. Os pesquisadores utilizaram três tipos de defeitos em suas pesquisas: defeito na pista interna (fabricado artificialmente), defeito na pista externa (fabricado artificialmente) e rolamento oxidado (defeito causado por mal-uso). Nos ensaios, o motor foi submetido a velocidade e carga variáveis. O diferencial desta pesquisa, segundo os autores, foi a utilização de uma máquina de vetores de suporte para classificar os dados extraídos do espectro do sinal. Neste trabalho, os pesquisadores utilizaram um microfone condensador polar cardioide da Audio-Technica modelo AT2020 USB (amplificador e conversor A/D integrado) com uma frequência de

amostragem de 48 kHz. Com a utilização do classificador, os autores afirmam que o sinal acústico possui informação suficiente para classificar os tipos de defeito em todas as situações de carga, diferente do sinal de vibração, que apresentou resultados insatisfatórios para baixa carga.

Oliveira, Sena e Fernandes (2018) fizeram um estudo comparativo com dados coletados por sensores de corrente elétrica e emissão acústica, para o diagnóstico de defeitos incipientes na pista externa do rolamento de um MIT. O defeito estudado pelos pesquisadores foi fabricado artificialmente, através de um furo radial. Para simular as diferentes condições de funcionamento do MIT, os autores realizaram os ensaios variando a carga mecânica imposta ao rotor (carga em vazio, 50% e nominal). Em geral, a emissão acústica apresentou as melhores visualizações da avaria quando comparada a corrente, isto ocorreu para todos os acionamentos e métodos de análise. Para aquisição do sinal, os pesquisadores utilizaram um módulo de som KY-038 que possui um microfone condensador e a (DAQ), NI USB-6289 como conversor A/D.

Hasan, Islam e Kim (2019) utilizaram a imagem espectral do sinal acústico para identificar defeitos em rolamentos, mesmo que esses estejam sob diferentes velocidades de funcionamento. Nesta pesquisa, os autores utilizaram o rolamento de rolo cilíndrico (modelo FAG-NJ206-E-TVP2) com três tipos de defeitos: defeito na pista interna, no elemento rolante e pista externa, sendo estes defeitos fabricados artificialmente com tamanho de 6mm. O rolamento estudado estava acoplado em uma caixa de redução, permitindo assim o estudo em baixas velocidades (abaixo de 350 rpm), que segundo o autor, é uma faixa de velocidade na qual a técnica de análise por vibrações se torna ineficaz, uma vez que a energia do sinal é baixa demais para ser analisada pelos transdutores convencionais. De forma elementar, o defeito é identificado utilizando um conjunto de segmentos no domínio da frequência para criar uma matriz de duas dimensões com 80 amostras, que por sua vez é combinada para montar a imagem espectral. Essa imagem é processada em uma RNC (Rede Neural Convolutacional) que forneceu uma acurácia de 94,67%. Os pesquisadores concluíram que esta pesquisa é um marco para a identificação de defeitos em rolamentos, uma vez que a velocidade do eixo interfere na identificação do defeito, além da implementação da rede neural viabilizar o diagnóstico sem que o usuário necessite de um elevado conhecimento no assunto.

A partir do estudo dos diversos autores apresentados, com as mais variadas técnicas de análise de defeitos em MIT, envolvendo EA, observa-se a relevância e a

aplicabilidade da análise da emissão acústica para análise e detecção de defeitos em motores. Na seção que se segue, será apresentado o objetivo deste trabalho, que mostra uma nova abordagem da análise da EA em MITs, para detecção de defeitos em seus rolamentos, com o uso de processamento de imagens dos espectrogramas dos sinais acústicos emitidos pelos motores.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1 Geral**

Caracterizar os dois principais tipos de defeito de um rolamento (defeito na pista interna e pista externa) por meio da Emissão Acústica (EA) e utilizando técnicas de processamento digital de imagens.

### **1.4.2 Específicos**

- Desenvolver um dispositivo para captura do sinal acústico;
- Coletar o sinal acústico de cada rolamento;
- Investigar a forma que o defeito se manifesta sob diferentes condições de carga;
- Estudar e caracterizar os defeitos através do espectrograma dos sinais de áudio emitidos pelo rolamento;
- Classificar um sinal acústico entre três classes: Rolamento saudável; Rolamento com defeito na pista interna; Rolamento com defeito na pista externa.

O texto está organizado da seguinte forma: No Capítulo 2 é apresentada a Fundamentação Teórica, com os conceitos necessários para o desenvolvimento da pesquisa. No Capítulo 3 são apresentados os Materiais e Métodos, descrevendo a metodologia utilizada na pesquisa. No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos, seguidos das Conclusões no Capítulo 5.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Neste capítulo serão apresentados os aspectos teóricos sobre o método empregado nesta pesquisa para diagnosticar defeitos em rolamentos. A teoria da análise pela emissão acústica é abordada confluindo para análise no domínio da frequência.

### **2.1 Motor de Indução Trifásico (MIT)**

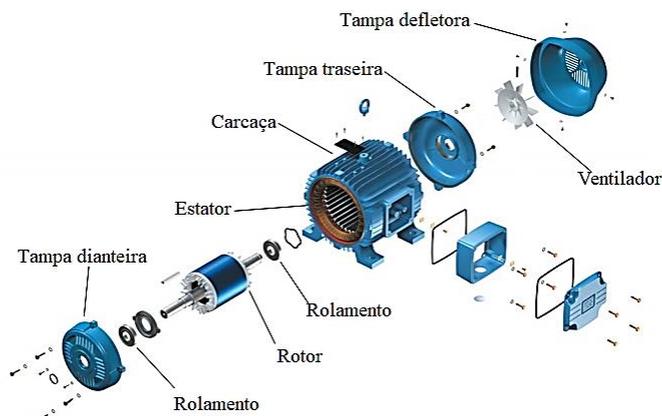
Os motores de indução trifásicos (MIT) têm sido amplamente utilizados em diversos segmentos do setor industrial, para efetuar a conversão de energia elétrica em energia mecânica. Na atualidade, tem se constituído na melhor solução para realização de acionamentos controlados, em face das diversas vantagens que costumam apresentar em relação aos motores de corrente contínua como, por exemplo, menor consumo de energia, maior velocidade (maior potência) e menor custo de aquisição.

Conforme Santos et al. (2014), o MIT é o elemento conversor de energia elétrica em energia motriz mais utilizado, sendo indispensável aos processos produtivos industriais, porque, além do baixo custo apresentam adaptabilidade às diferentes exigências de cargas mecânicas e resistência para operação em ambientes agressivos.

As características construtivas deste tipo de motor estão associadas à sua frequente utilização. Conforme Oliveira, Sena e Fernandes (2018), os MIT's são, em sua maioria, robustos, de fácil manutenção e podem ser adaptados a variadas situações de demanda de carga. Comparados aos motores de corrente contínua, o MIT apresenta menor peso, menor custo, maior durabilidade e, se estiver bem dimensionado, também propiciará considerável economia, nos custos de energia elétrica.

O motor de indução trifásico gaiola de esquilo é o modelo de motor mais utilizado no setor industrial. A preferência por este tipo de motor ocorre por sua simplicidade e alta confiabilidade. Na Figura 1 estão apresentadas as peças que compõem um motor desse tipo.

**Figura 1:** Motor de indução trifásico em gaiola de esquilo.



Fonte: WEG, 2020 [adaptado].

Ainda que o MIT seja uma máquina elétrica extremamente robusta, com o decorrer do tempo irão surgir defeitos impedindo seu funcionamento. Estes defeitos podem ocorrer em diferentes partes do MIT e serão retratadas na Seção 2.2.

A melhor forma de postergar o surgimento de um defeito, é através da manutenção. Os diferentes tipos de manutenção serão abordados na Seção 2.3.

## 2.2 Detecção de falhas

Apesar das características de confiabilidade e a robustez que os MIT apresentam, estes motores, como qualquer equipamento, também estão sujeitos a falhas elétricas e/ou mecânicas, principalmente devidas ao tempo de utilização, modo de operação e condições ambientais dos locais onde estão instalados. Defeitos incipientes (falhas potenciais) podem ser detectados, antes de se tornarem falhas significativas (falhas funcionais). Quando uma falha potencial não é detectada, o processo natural de evolução da falha levará à instalação de uma falha potencial, a qual acarretará, necessariamente, prejuízos ao processo industrial.

### 2.2.1 Falha

Segundo a Norma Técnica NBR 5462, considera-se como falha quando há o término da capacidade de um item desempenhar a função para qual foi designado. Um exemplo deste evento é quando ocorre a quebra do eixo de um motor em uma máquina de lavar roupas, impossibilitando assim que a mesma seja utilizada para a função que foi projetada.

### **2.2.2 Falhas em rolamentos**

Um rolamento perde sua funcionalidade quando instalado ou mantido inadequadamente. Nesta situação, o rolamento apresentará uma falha prematura, totalmente diferente de uma falha por fadiga do aço (escamamento). Entretanto, todo tipo de defeito que ocorra no rolamento terá um ruído acústico característico (NSK, 2008).

## **2.3 Manutenção: definição**

Existe uma grande variedade de definições e conceitos, relacionados à manutenção. De forma geral, ressaltam-se as características de prevenção, conservação ou correção das ações, nesta área.

Pode-se definir manutenção como um conjunto de atividades que visam assegurar a disponibilidade das funcionalidades dos equipamentos e das instalações, atendendo aos processos de produção e à preservação do meio ambiente, com confiabilidade, segurança e custos adequados (KARDEC e NASCIF, 2013).

Segundo Branco Filho (2008), entende-se por manutenção como o conjunto das ações e técnicas administrativas, que têm por objetivo preservar o estado ou recolocar em operação qualquer equipamento ou sistema.

### **2.3.1 Manutenção: tipologia**

De acordo com a Norma Técnica NBR 5462, são três os tipos de manutenção existentes (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994):

- Manutenção Corretiva
- Manutenção Preventiva
- Manutenção Preditiva

#### **2.3.1.1 Manutenção corretiva**

Segundo a NBR 5462, a Manutenção Corretiva é aquela efetuada após a ocorrência de uma pane, destinando-se a recolocar um item em condições de executar uma função requerida. Ou seja, é uma ação de manutenção cuja finalidade visa corrigir algo no equipamento, a fim de que ele possa realizar a sua função, dentro do processo de

produção, conforme as definições de projeto (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994).

Caracteriza-se por ser reativa, ou seja, o conserto somente ocorrerá após a ocorrência da falha, estando condicionada tanto a disponibilidade de mão-de-obra quanto a de peças e materiais necessários para o conserto. Caracteriza-se também pela ausência de planejamento, pelos custos envolvidos e pelos impactos negativos na produção (PEREIRA, 2011).

### **2.3.1.2 Manutenção preventiva**

De acordo com a norma NBR-5462, é a manutenção realizada em intervalos predeterminados, conforme critérios anteriormente prescritos e destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994).

A manutenção preventiva visa à melhoria do desempenho das máquinas e equipamentos, com a consequente redução da indisponibilidade e o aumento da produtividade, dentro de uma perspectiva de melhoria contínua. Um plano de manutenção preventiva objetivará assegurar o perfeito estado operacional do equipamento, minimizando os riscos de falhas e quebras e aumentando, assim, a confiabilidade e a regularidade operacional do sistema produtivo (PEREIRA, 2011).

Uma das principais vantagens da manutenção preventiva está no fato de se evitar a falha do equipamento e, conseqüentemente, sua parada inesperada. Desta maneira, este tipo de manutenção é financeiramente melhor do que a manutenção corretiva.

Entretanto, neste tipo de manutenção pode ocorrer dois cenários: o primeiro é quando há uma subutilização do componente, uma vez que o componente é substituído com base no tempo de uso; e a segunda quando há uma parada não planejada, ocasionado por uma estimativa extrapolada da vida útil do componente. Ambos os cenários decorrem de um único problema: a vida útil do componente é estipulada e não monitorada (GUIMARÃES, NOGUEIRA e SILVA, 2012).

### **2.3.1.3 Manutenção preditiva**

A manutenção preditiva, utilizando-se de técnicas sistematizadas de análise, supervisão e amostragem de dados, visa reduzir ações de manutenção preventiva e corretiva permitindo praticar níveis mais elevados de qualidade produtiva e disponibilidade operacional. Possibilita acompanhar o grau de degradação indicando quando este se aproxima ou atinge um determinado limite, previamente estabelecido, indicando assim o momento de uma intervenção. Esse tipo de acompanhamento, via de regra, possibilita o prévio planejamento do serviço, além da tomada de outras decisões relacionadas ao processo produtivo (KARDEC e NASCIF, 2013).

Em outras palavras, este tipo de manutenção contempla inspeções periódicas de um determinado parâmetro (temperatura, ruído, vibração), para estabelecer um tempo de troca pouco antes que haja a falha, para assim aproveitar ao máximo a vida útil do equipamento.

O principal objetivo da manutenção preditiva seria determinar, com eficiência, o momento e a necessidade da intervenção mantenedora, evitando a desmontagem para inspeção, e permitindo a utilização do componente até o limite máximo de sua vida útil (VIANA, 2002).

Para viabilizar a implementação da manutenção preditiva, é necessário um sistema de sensoriamento eficaz, uma vez que, através deste, o fenômeno físico será analisado. Tradicionalmente, a manutenção preditiva em motores MIT utiliza a vibração mecânica para determinar o estado do rolamento. Contudo, outras técnicas têm sido estudadas a fim de proporcionar melhores resultados para diversas situações. Uma destas técnicas é a análise por Emissão Acústica, que será descrita em detalhes na Seção 2.4.

## **2.4 Emissão Acústica**

Conforme Silva (2018), existem sinais acústicos quando há alguma variação na pressão do ar, em relação à pressão média do ambiente, ao longo de um determinado tempo, podendo a propagação ocorrer em diferentes ambientes.

O diagnóstico por Emissão Acústica (EA) é uma técnica que está ganhando espaço no cenário atual. Isto se dá por meio de trabalhos que vem sendo desenvolvidos nesta área. Poddar e Tandon (2019) ressaltam que apesar dos trabalhos realizados não dispõem de resultados contundentes, esta técnica permite um diagnóstico para detecção de defeitos em motores na fase inicial.

Jeevanand e Abraham (2008) demonstraram como o estado de um MIT pode ser monitorado, por meio da análise do sinal acústico, que representa dados de sinais não estacionários.

Para realizar o diagnóstico do MIT utilizando a emissão acústica, é calculado a frequência com que o elemento rolante (esfera) passa sobre um determinado ponto. Este método é amplamente difundido na literatura será detalhado na Seção 2.5, a seguir.

## 2.5 Estudo de defeitos em rolamentos

Um rolamento elementar é constituído por três partes: pista externa, pista interna e elemento rolante. Considerando uma velocidade fixa e conhecida, é possível calcular a frequência com que o elemento rolante passa sobre um determinado ponto.

### 2.5.1 Cálculo da frequência de defeito no rolamento

O rolamento está sujeito a diferentes tipos de defeitos, que por sua vez, geram diferentes tipos de ruídos acústicos. Nesta pesquisa foi abordado o defeito na pista interna e defeito na pista externa. Esses dois tipos de defeitos ocorrem naturalmente com o decorrer do tempo, pela fadiga do aço. Para fins acadêmicos, os defeitos são fabricados individualmente no rolamento, viabilizando assim o seu estudo.

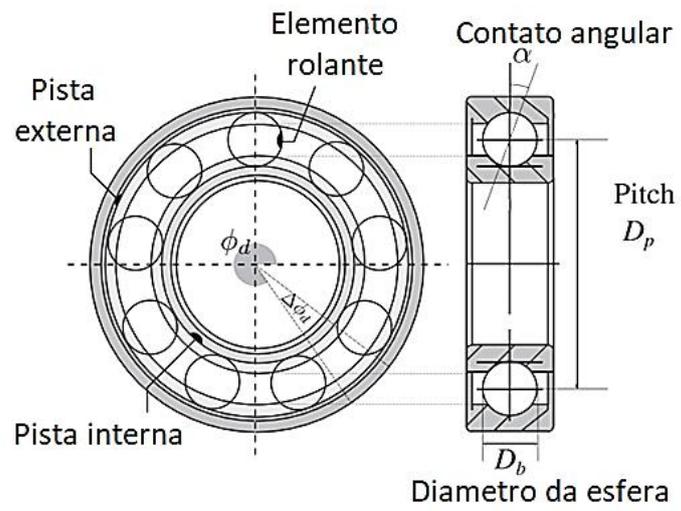
Desta forma, um defeito genérico (um furo, por exemplo) gera componentes em uma frequência determinável. Estas frequências podem ser calculadas pelas Equações 1 e 2 (OLIVEIRA, SENA e FERNANDES, 2018),

$$F_{pi} = \frac{nF_r}{2} \left[ 1 + \frac{d}{D} \cos \cos (\varphi) \right] \quad (1)$$

$$F_{po} = \frac{nF_r}{2} \left[ 1 - \frac{d}{D} \cos \cos (\varphi) \right] \quad (2)$$

em que  $F_{pi}$ , é a frequência de defeito na pista interna e  $F_{po}$  é a frequência de defeito na pista externa,  $d$  é o diâmetro do elemento rolante,  $D$  a distância entre centros das esferas (*Pitch*),  $n$  o número de elementos rolantes,  $\varphi$  o contato angular da esfera e  $F_r$  a frequência de rotação do eixo. Essas variáveis são parâmetros inerentes à construção do rolamento e podem ser observados na Figura 2.

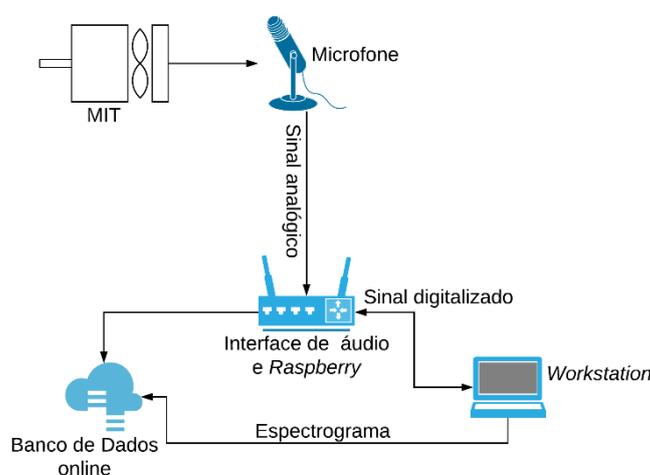
Figura 2 – Geometria de um rolamento.

Fonte: Dolenc *et al.* (2015) [adaptado]

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são discriminados os materiais utilizados, bem como as técnicas de processamento digital de sinais (PDS) e processamento digital de imagens (PDI) utilizadas, para o desenvolvimento da pesquisa. O fluxograma, ilustrado pela Figura 3, representa o método empregado, nesta pesquisa, para realizar a aquisição e o processamento do sinal.

Figura 3 – Fluxograma do sistema proposto.



Fonte: Autoria própria (2019)

Inicialmente o sinal acústico do MIT é capturado pelo microfone, que é processado pela interface de áudio. Neste ponto, o áudio é digitalizado e enviado para a *Raspberry Pi*, que direciona o áudio para um servidor online, onde é mantido um banco de dados com os áudios originais e para uma *workstation*, onde de fato é realizado todo o processamento. Na *workstation*, inicialmente é calculado o espectrograma do sinal acústico, que por sua vez é processado para realizar a primeira classificação quanto a defeituoso ou não. Caso o rolamento esteja sem defeito, o processamento é encerrado e os resultados são retornados para a *Raspberry*. Caso o rolamento esteja defeituoso, o espectrograma processado é apresentado a RNC para a segunda classificação, onde é classificado quanto ao tipo do defeito. O resultado deste procedimento também é retornado para a *Raspberry*. O diagnóstico do rolamento é exibido ao operador em um display e encaminhado também para o servidor, para ser armazenado. O microfone utilizado para aquisição do sinal gerado pelo MIT está ligado à placa de áudio (conversor

AD + amplificador) por cabo (padrão XLR blindado). A placa de áudio está isolada eletricamente de outros dispositivos (exceto o microfone) e da rede elétrica, evitando assim ruído externo de origem eletromagnética. Além disto, esta configuração facilita o manuseio do equipamento, uma vez que o mesmo pode ser acionado remotamente, através de uma conexão sem fio (*Wi-Fi*).

Foi desenvolvido um sistema *offline*, para análise dos sinais coletados, o qual permite o armazenamento dos dados originais coletados, tanto em dispositivos físicos como em cartões de memória, quanto em meios virtuais, como os serviços de armazenamento em nuvens.

Para a realização da pesquisa, foi utilizada a bancada de testes, projetada e construída pelo Grupo de Instrumentação, Controle e Estudo em Energia e Meio Ambiente (GPICEEMA), da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), *Campus* João Pessoa. Nesta bancada é possível substituir o rolamento do motor e submeter os mesmos a diferentes situações de funcionamento do MIT, como por exemplo, a alteração de cargas e de velocidade sobre o eixo do motor. A bancada possui um sistema de monitoramento embarcado, que inclui: tacômetro e célula de carga (torquímetro). A referida bancada está descrita, detalhadamente, na Seção 3.2.

### **3.1 Componentes para aquisição do sinal de Emissão Acústica**

Nesta seção é feita uma descrição dos dispositivos necessários para realização desta pesquisa.

#### **3.1.1 Microfone**

Em uma pesquisa deste tipo, que se propõe a utilizar o método da Emissão Acústica (EA), para detecção de defeitos, o dispositivo responsável pela aquisição das ondas sonoras assume um papel fundamental. O microfone exercerá a função do transdutor responsável por transformar o sinal mecânico, modulado nas ondas sonoras, em sinal elétrico, a fim de que, posteriormente, seja digitalizado e analisado. A escolha de um dispositivo adequado tem influência direta sobre os procedimentos de tratamento de dados, podendo impactar e até mesmo delimitar a eficácia do sistema.

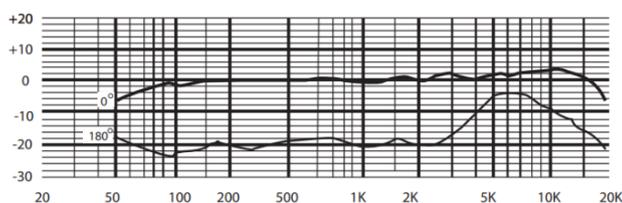
Conforme Silva (2018), existem diferentes tipos de microfones. Os que captam sons provenientes de todas as direções são chamados de omnidirecionais. Os que captam sons provenientes de uma única direção são chamados de direcionais. Os que captam sons

vindos de direções opostas são chamados de bidirecionais. Existem ainda os que captam, com precisão, os sons que vêm da frente para onde aponta o transdutor. Estes microfones especializados, que captam apenas os sons frontais, são chamados de cardioides ou hipercardioides.

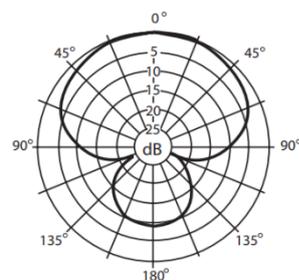
Visando a adequada captura da EA, proveniente dos componentes do rolamento do MIT, buscou-se utilizar um transdutor, cujo espectro de sensibilidade abrangesse as faixas de frequência de EA, dos itens analisados. Com base nestes parâmetros, verificou-se que o melhor transdutor indicado, para esta situação, seria um microfone do tipo condensador, que apresentasse um diafragma largo, proporcionando boa sensibilidade, com a característica de captar, com precisão, os sons provenientes da fonte emissora, para o qual o transdutor fosse apontado. Optou-se, então, por se utilizar o microfone condensador *Samson Co1*, com diafragma de 19 mm, sensibilidade de -33 dB/Pa, o qual é capaz de atuar em ampla faixa de frequências (20 Hz a 18 kHz) e de operar em uma zona de captação unidirecional (polar cardioide). Estas configurações, imprescindíveis para o desenvolvimento desta pesquisa são apresentadas na Figura 4, assim como o microfone utilizado.

Figura 4 – Dispositivo de captura do sinal acústico.

a) Resposta em frequência



b) ângulo de operação



c) Microfone Samson C01



Fonte: Samson (2020) [Adaptado]

### 3.1.2 Interface de Áudio

A onda sonora, captada pelo transdutor (microfone), foi transformada, por este, em um sinal elétrico analógico. A Interface de Áudio foi utilizada para realizar a conversão do sinal analógico proveniente da saída do microfone, para sinal digital. Ou seja, exerceu a funcionalidade de um conversor analógico digital (A/D), visando viabilizar o posterior processamento, classificação e armazenamento do sinal.

Na presente pesquisa, utilizou-se uma interface Behringer U-PHORIA UMC22, a qual possui uma taxa de amostragem máxima de 48 kHz, com resolução de 16 bits. Este dispositivo, por meio de portas *I/O* do tipo *USB* permitiu a gravação do áudio diretamente em um banco de dados na *Raspberry* de comunicação, de onde é automaticamente enviado, via *Wi-Fi*, para o computador (*workstation*).

Neste trabalho, o áudio foi gravado a uma taxa de amostragem de 44.100 amostras por segundo, o que permitiu a digitalização de sinais de até 22 kHz, com fidelidade. Este dispositivo está ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Interface de áudio.



Fonte: Autoria própria (2020).

### 3.1.3 Banco de dados

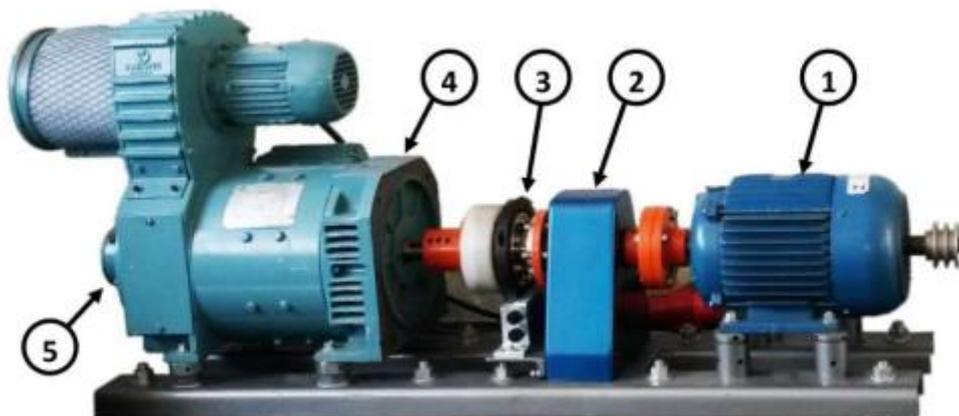
Como descrito anteriormente, o dispositivo (*Raspberry* + Interface de áudio) realiza a gravação dos áudios, após a solicitação do computador (*workstation*) e armazena esse áudio na memória interna da *Raspberry* para enviar o áudio gravado ao computador

(*workstation*) que solicitou o áudio. Todo áudio é gravado a 44 kHz com resolução de 16 Bits e duração de 60 segundos, totalizando um arquivo (WAV) de 1,2 MB (informação mais cabeçalho). Estes arquivos de áudio são armazenados também no computador (*workstation*), só que desta vez, organizado por pastas. Com esta configuração, foi criado um banco de dados na *Workstation*, onde fica disponível para realizar os devidos tratamentos e uma cópia de segurança na *Raspberry*, disponível apenas em cartão SD (16GB).

### 3.2 Bancada de ensaios

A bancada utilizada nesta pesquisa foi projetada e montada pelo Grupo de Instrumentação e Controle em Estudo e Energia e Meio Ambiente (GPICEEMA) para ensaiar diferentes tipos de falhas/defeitos em motores de indução trifásicos. A bancada pode ser vista na Figura 6. É composta por: motor de indução trifásico (1), mancal para apoio com dois rolamentos (2), torquímetro digital (3), motor Corrente Contínua (CC) para aplicar carga (4) e transdutor de velocidade (5).

Figura 6 - Bancada de teste.



Fonte: Sobrinho, 2015.

#### 3.2.1 Motor de Indução Trifásico (MIT)

Este é, especificamente, o objeto de estudo desta pesquisa (Figura 7). Neste elemento, a saúde do rolamento é monitorada. O acionamento foi por partida direta, uma vez que a carga imposta ao eixo do motor é baixa. Foi utilizado um motor da marca WEG

modelo W22 plus (5cv), sem o sistema de ventilação forçada, a fim de evitar ruídos de origem aerodinâmica.

Figura 7 - Motor elétrico de indução trifásico.

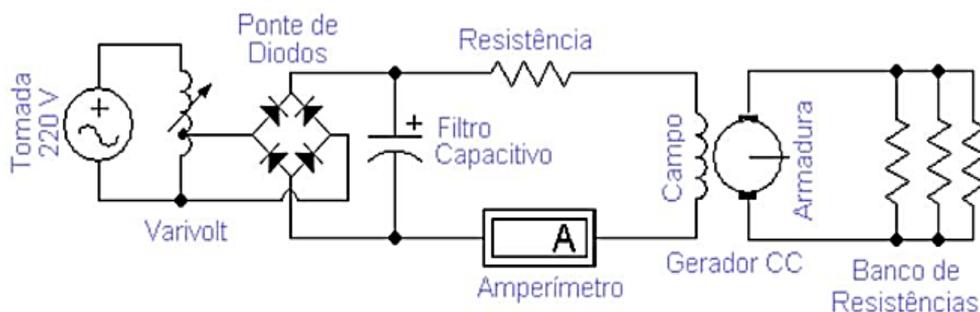


Fonte: WEG, 2019.

### 3.2.2 Máquina CC (gerador)

Uma máquina de corrente contínua é capaz de funcionar como motor ou gerador. Nesta pesquisa, esse motor foi utilizado como gerador elétrico, ligado mecanicamente ao eixo do motor de indução. Esta configuração permitiu variar a carga exercida no eixo do MIT. Esta variação de carga pode ser realizada de duas formas, neste tipo de máquina: manipulando a tensão de excitação do campo do motor CC ou alterando a carga na armadura do motor CC. Pela maior facilidade em controlar a tensão, ao invés da resistência, este gerador teve seu campo alimentado por um circuito CA/CA, tendo um banco de resistores ( $24 \Omega/2000 \text{ W}$ ) na armadura, conforme representado na Figura 8.

Figura 8 - Circuito de acionamento do motor CC.



Fonte: Sobrinho (2015).

O motor CC utilizado foi o modelo 132S, da fabricante Varimot. Este motor tem uma potência nominal de 7,5 CV e rotação nominal de 1800 rpm (Figura 9).

Figura 9 - Motor/gerador CC



Fonte: Varimot (2019).

### 3.2.3 Torquímetro digital

Este equipamento foi responsável por medir o torque imposto pelo gerador CC ao eixo do MIT. Para isto, foi utilizado o torquímetro de alta exatidão HBM T40B-200, com acoplamento por flange, precisão de 0,05% do fundo de escala, capacidade de torque nominal de 200 Nm e capacidade de medição para eixos com até 20.000 rpm. Este torquímetro está ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Torquímetro digital.



Fonte: HBM (2019).

### 3.2.4 Tacômetro

Este componente, que está demonstrado na Figura 11, foi responsável por monitorar a velocidade do eixo do motor de forma analógica. Seu funcionamento se baseia em um motor/gerador CC com especificações próprias e conhecidas. Desta forma, ao girar seu eixo uma diferença de potencial proporcional à velocidade do eixo é produzida em seus terminais, tornando assim possível o cálculo da velocidade.

Figura 11 – Tacômetro.



Fonte: Sobrinho (2015).

### 3.3 Método para aquisição do sinal

Foram utilizados quatro rolamentos do mesmo modelo/fabricante para esta pesquisa. Dentre estes quatro, três com defeitos e um saudável (controle). Os defeitos foram fabricados no laboratório da UFPB, pelo processo de eletro erosão (furo radial com 1 mm de diâmetro).

Para simular diferentes situações, a qual um rolamento é exposto, foi realizada a coleta dos dados em três situações diferentes para cada rolamento: com carga no eixo nula (0 Nm), carga nominal (12 Nm) e carga máxima (24 Nm). Todos os ensaios foram gravados com uma duração de 60 segundos nas configurações citadas na Seção 3.1.2. O microfone foi posicionado a uma distância de aproximadamente 120 mm, direcionado para a fonte emissora.

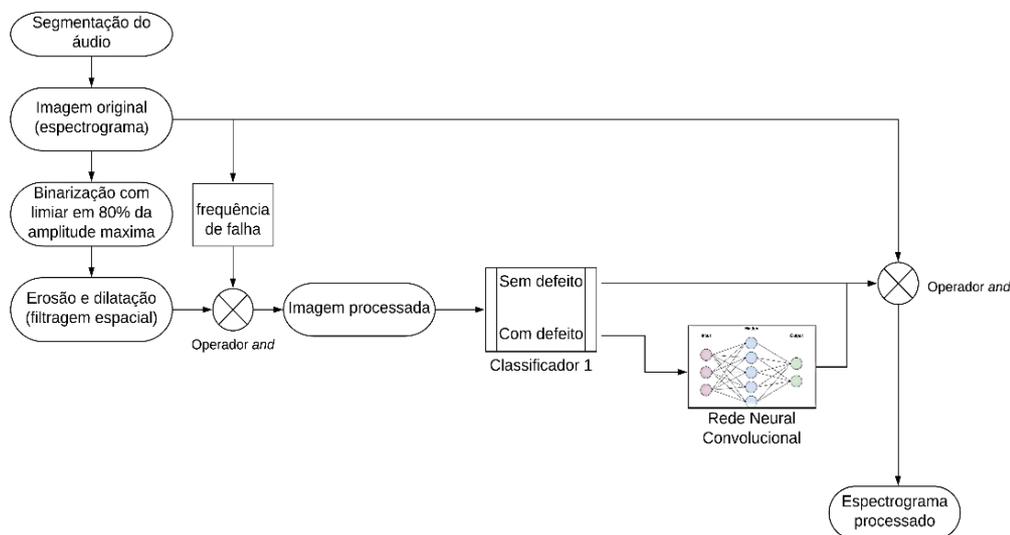
### 3.4 Caracterização do defeito (pista interna e externa)

A análise do espectrograma permite avaliar a amplitude da frequência em função do tempo. Para esta pesquisa, esse tipo de análise permite acompanhar a frequência de defeito e suas harmônicas (Equações 1 e 2) em toda extensão do sinal, assegurando uma maior confiabilidade na análise, visto que ruídos de curta duração no tempo podem ser isolados para não interferir no diagnóstico. Além disto, por meio desta análise, é possível obter resultados confiáveis mesmo em velocidades baixas (menor que 200 rpm), diferente das técnicas convencionais que são ineficazes para análise em baixas velocidades (HASAN, ISLAM e KIM, 2019).

### 3.4.1 Processamento digital da imagem

Para realizar o diagnóstico do rolamento, o sinal acústico foi processado utilizando uma cadeia de técnicas, que são ilustradas na Figura 12 e particularizadas nos tópicos seguintes.

Figura 12 – Fluxograma do processamento de imagem digital.



Fonte: Autoria própria (2020).

#### 3.4.1.1 Segmentação do áudio

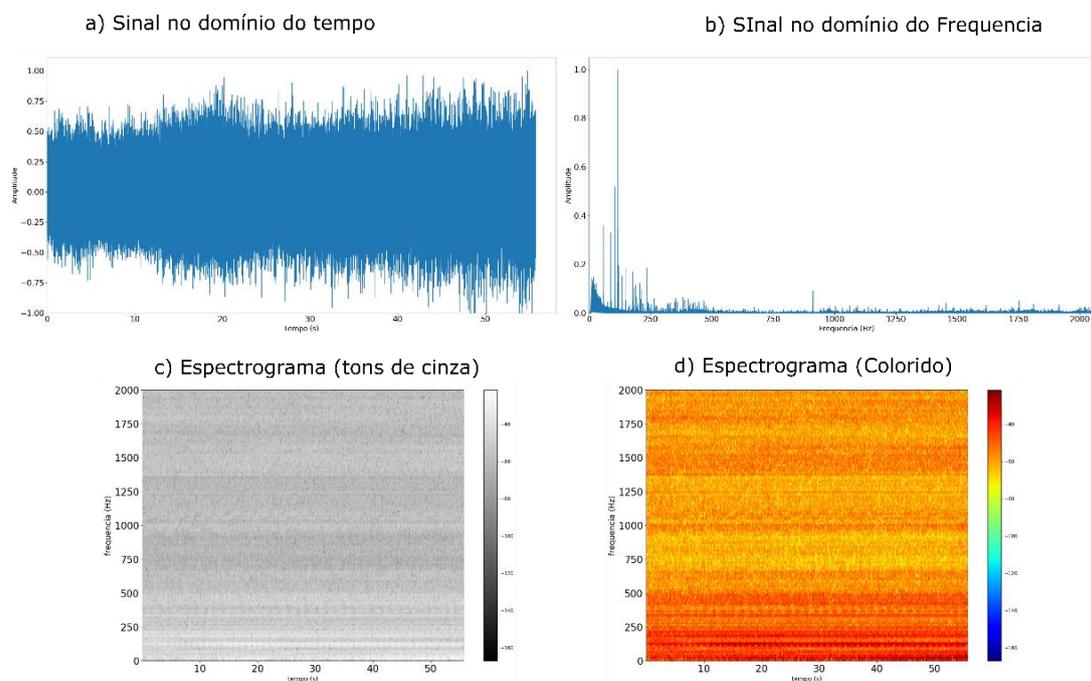
Inicialmente o áudio é segmentado com sobreposição de 50%, transformando assim um áudio de 60s em cinco áudios com 20s de duração. Este procedimento foi importante para aumentar a quantidade de amostras no treinamento da rede neural convolucional. Além disso, esta técnica permite que um único áudio seja processado cinco vezes de forma independente. Caso haja algum tipo de ruído externo de curta duração no tempo, que comprometa totalmente o diagnóstico, o segmento correspondente a este ruído será descartado.

#### 3.4.1.2 Imagem Original

Nesta etapa é calculada a transformada rápida de Fourier (FFT) e o espectrograma do sinal. Para isto, foi utilizada a janela de Hammig com 4096 amostras. A imagem resultante é salva em formato PNG sem compactação em duas cópias: uma colorida para melhorar a experiência visual do usuário e outra em tons de cinza para otimizar o processamento. Já o espectro do sinal é utilizado para estimar a velocidade do motor e as

frequências de defeito, as quais são calculadas conforme as Equações 1 e 2. Estas frequências são armazenadas para serem utilizadas nas etapas posteriores. Esta etapa é ilustrada pela Figura 13.

Figura 13 – Etapa 1 do processamento do sinal.



Fonte: Autoria própria (2020).

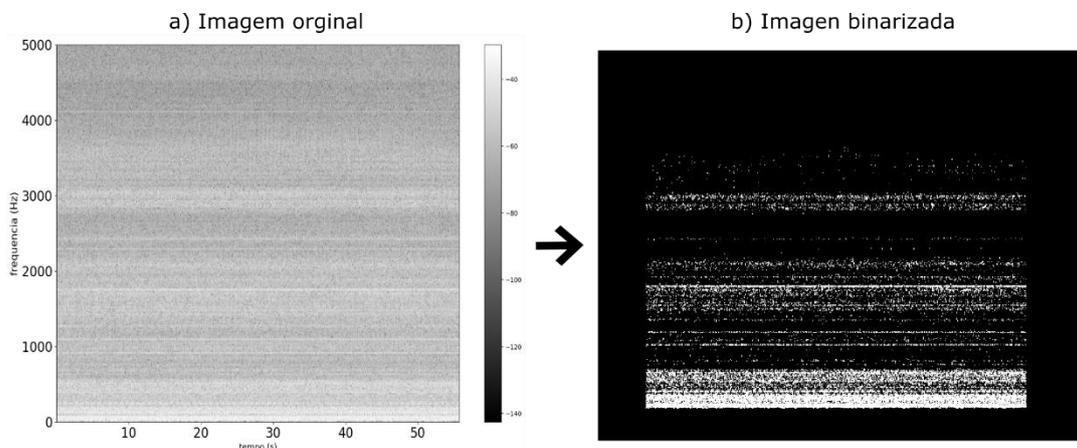
### 3.4.1.3 Binarização da imagem

Esta é uma técnica convencionalmente utilizada no processamento digital de imagens para realizar a segmentação de uma imagem. Nesta pesquisa, esta técnica foi utilizada para extrair da imagem original as frequências de alta magnitude. Na imagem, estas frequências são proporcionais ao valor do pixel onde ocorrem, ou seja, quanto mais perto do branco (255) maior a magnitude da frequência. De forma experimental, foi estipulado um limiar de 210 para realizar a binarização, conforme a Equação 3.

$$g(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{se } f(x, y) \leq 210 \\ 255 & \text{se } f(x, y) > 210 \end{cases} \quad (3)$$

O resultado desta operação é ilustrado na Figura 14, onde o sinal de um rolamento genérico é processado com as técnicas descritas anteriormente.

Figura 14 – Etapa 2 – Binarização da imagem.



Fonte: Autoria própria (2020).

#### 3.4.1.4 Filtragem (Erosão e Dilatação)

O resultado da operação anterior é submetido a mais duas técnicas em conjunto, para atenuar os ruídos que possam existir e realçar as componentes de alta magnitude que ocorrem no decorrer do tempo. Pra isto, primeiro é realizado o processo de erosão com três interações, seguido do processo de dilatação com cinco interações. Foi utilizado um elemento estruturante (*Kernel*) em forma de linha horizontal nos dois procedimentos. Este foi um diferencial importante para esta pesquisa, pois permitiu realçar as componentes de alta magnitude que se estendem no tempo (componentes de frequências importantes para esta pesquisa) e atenuar componentes de alta magnitude com curta duração do tempo (característico de ruídos externos). Matematicamente, essas duas operações são translações de um dado conjunto numérico sobre outro, e são representadas conforme as Equações 4 e 5, respectivamente.

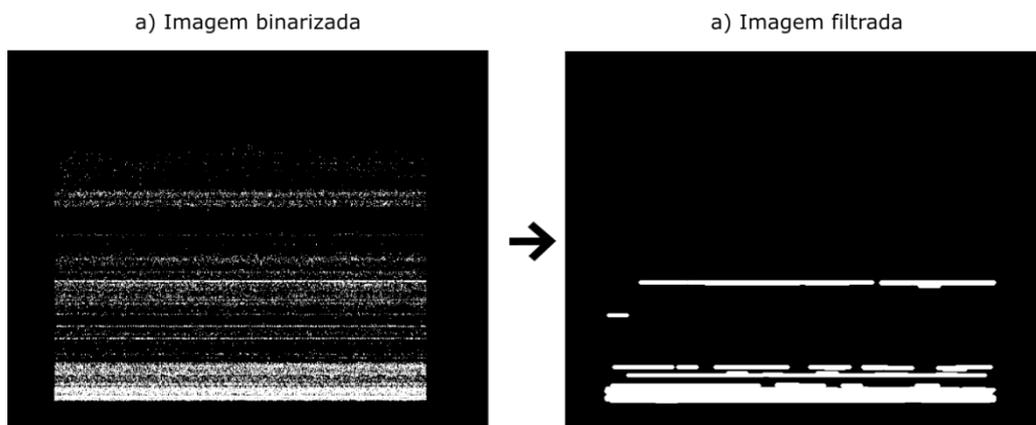
$$A \ominus B = \{x | (B)_x \subseteq A\} \quad (4)$$

$$A \oplus B = \{x | (B)_x \subseteq A\} \quad (5)$$

Onde  $A$  representa a imagem binarizada e  $B$  o kernel.

Esta sequência de operações morfológicas é conhecida como abertura e são ilustradas pela Figura 15.

Figura 15 – Etapa 3 - Filtragem.

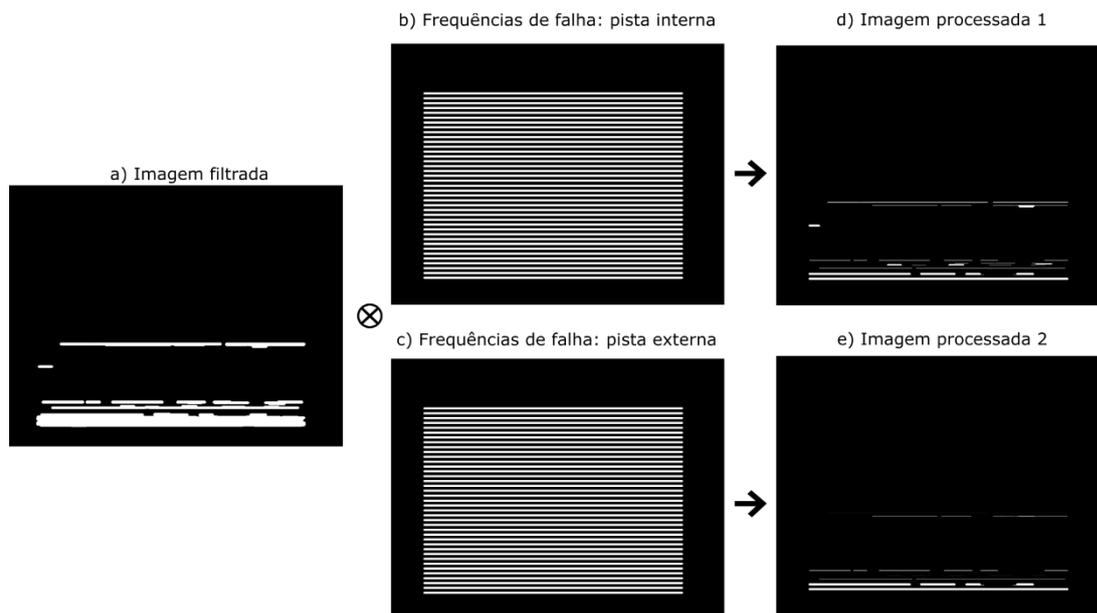


Fonte: Autoria própria (2020).

#### 3.4.1.5 Identificação das frequências de defeito

Esta etapa utiliza as frequências de defeito, que foram calculadas na segunda etapa, onde foi estimada a velocidade do motor, para ressaltar as frequências de alta magnitude que ocorrem na frequência de defeito e em suas harmônicas. Para isto, é criada uma máscara com linhas em branco no local correspondendo às frequências que estas representam. Por sua vez, esta máscara é multiplicada com a imagem filtrada na etapa anterior. Devido a esta pesquisa estudar dois tipos de defeitos, neste procedimento são criadas duas imagens, sendo a primeira o resultado da multiplicação da imagem filtrada com a máscara contendo as frequências de defeito da pista interna e a segunda utiliza a mesma imagem filtrada multiplicada com a máscara com as frequências de defeito da pista externa. Além das frequências de defeito, ambas as máscaras contêm um retângulo preto no inferior, no local correspondente as frequências de zero a 500 Hz. Este artifício é utilizado para realizar uma filtragem no domínio da frequência, uma vez que esta faixa de frequência não contém informações relevantes para o diagnóstico do rolamento com esta técnica. Na Figura 16 está ilustrado este procedimento.

Figura 16 – Etapa 4 - Identificação das frequências de defeito.



Fonte: Autoria própria (2020).

Ainda nesta etapa do processamento é calculada a porcentagem de ocorrência de cada defeito. Este cálculo é a somatória dos *pixels* das duas imagens processadas dividido pela somatória dos *pixels* da imagem filtrada, logo tem-se dois índices: porcentagem de ocorrência na pista interna e pista externa. Esses dois índices são utilizados para identificar se um dado rolamento possui defeito ou não. Para realizar este primeiro diagnóstico, foi estabelecido experimentalmente um limiar de 10%. Portanto, se a somatória dos dois índices for superior a 10% indica que o rolamento está com algum tipo de defeito.

Se for detectado defeito no rolamento, as duas imagens processadas são combinadas em uma única imagem com dois canais para serem apresentadas à rede neural convolucional.

### 3.4.2 Rede Neural Convolucional

A RNC (Rede Neural Convolucional) é uma variação das redes neurais de múltiplas camadas adaptada para ser utilizada em imagens. Este tipo de rede neural é amplamente utilizado para reconhecimento em imagens por ser capaz de aplicar diferentes filtros mantendo a disposição dos *pixels*, ou seja, além do valor que o *pixel*

assume é considerado também o espaço que este se encontra, de acordo com sua vizinhança. Diferente da rede neural perceptron, na rede utilizada nesta pesquisa apenas um conjunto de entradas é conectada a cada neurônio para realizar a análise de campos receptivos locais.

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foi utilizado o *framework* Keras para criar a rede neural convolucional. Esta aplicação utiliza o TensorFlow como *backend engine* para realizar o treinamento da rede. Com estas ferramentas, foi utilizada a arquitetura AlexNET, que consiste em uma sequência de camadas convolucionais intercaladas por camadas de *pooling*. As camadas convolucionais tem uma dimensão de 5x5. Foi utilizada a função de ativação Relu (Equação 6) nas camadas densas, para otimizar o processamento (Krizhevsky et al. 2012). Já na camada de saída, foi utilizada a função de ativação sigmóide (função logística, Equação 7).

$$ReLU(x) = \max\{0, x\} \quad ReLU'(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \geq 0 \\ 0, & \text{c. c.} \end{cases} \quad (6)$$

$$o(x) = \frac{1}{1+e^x} \quad o'(x) = o(x)(1 - o(x)) \quad (7)$$

Esta arquitetura de rede foi treinada com supervisionamento e validação cruzada, utilizando um conjunto de 180 imagens, sendo estas organizadas em duas classes: rolamento com defeito na pista interna e rolamento com defeito na pista externa. Este conjunto de imagem foi dividido em subconjuntos: um com 36 imagens, para validação; e o segundo com 144 imagens para o treino.

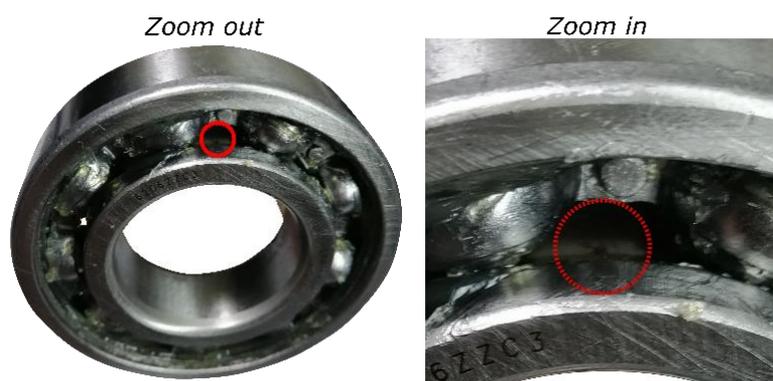
## 4. RESULTADOS

Neste tópico são apresentados os resultados obtidos ao utilizar o classificador para diagnosticar 10 áudios de diferentes rolamentos, sendo estes com defeito ou não. Ao realizar a aquisição do sinal, o motor estava funcionando na velocidade da rede (60 Hz), com três situações de carga mecânica imposta ao eixo: 0 Nm, 12 Nm e 24 Nm.

Já na Seção 4.1 será apresentado os resultados pertinentes ao processamento digital de imagem, ao passo que na Seção 4.2 serão expostos os resultados da RNC.

Para simular o defeito de forma genérica no rolamento foi retirada uma pequena quantidade de material utilizando uma descarga elétrica. Com este método, foi possível fabricar o defeito de forma pontual com 1mm de diâmetro, como apresentado pela Figura 17.

Figura 17 – Defeito na pista interna.



Fonte: Autoria própria (2020).

Este método foi utilizado tanto para fabricar defeito na pista interna como na pista externa, contudo, em um único rolamento só foi fabricado um tipo de defeito. Para assegurar que o rolamento só possuía o defeito que havia sido fabricado, foram utilizados rolamentos novos lubrificadas conforme as especificações do fornecedor.

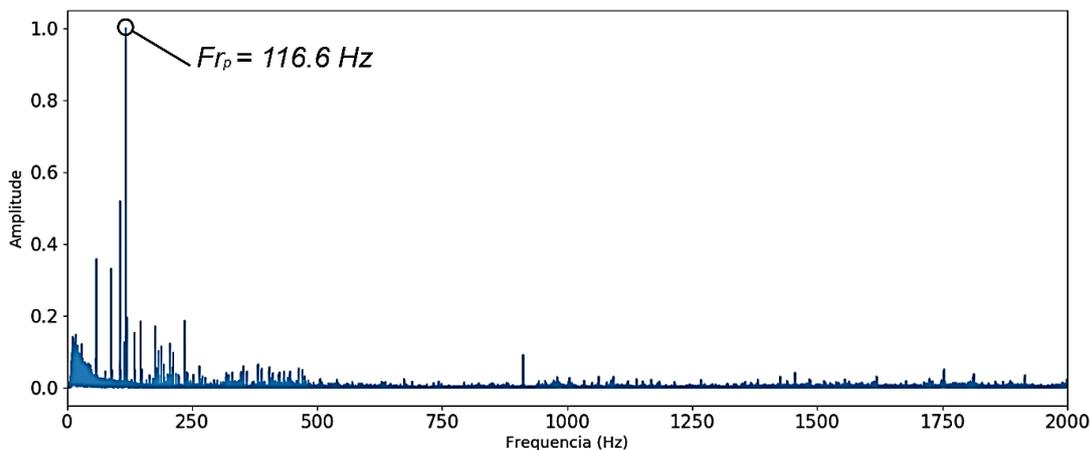
Para simplificar o relato dos resultados, os dados apresentados a seguir são de um rolamento com defeito na pista interna, comparado com um rolamento saudável.

### 4.1 Processamento digital de imagem

Uma etapa fundamental para o correto funcionamento do PDI é a identificação da velocidade do eixo. Em um MIT, esta velocidade varia em função da carga que está sendo imposta ao eixo do motor, diferenciado assim de sua velocidade nominal. Para aferir a

velocidade real que o eixo está girando, foi realizada uma análise gráfica para determinar o maior pico no espectro do sinal, conforme a Figura 18.

Figura 18 – Detecção da velocidade.

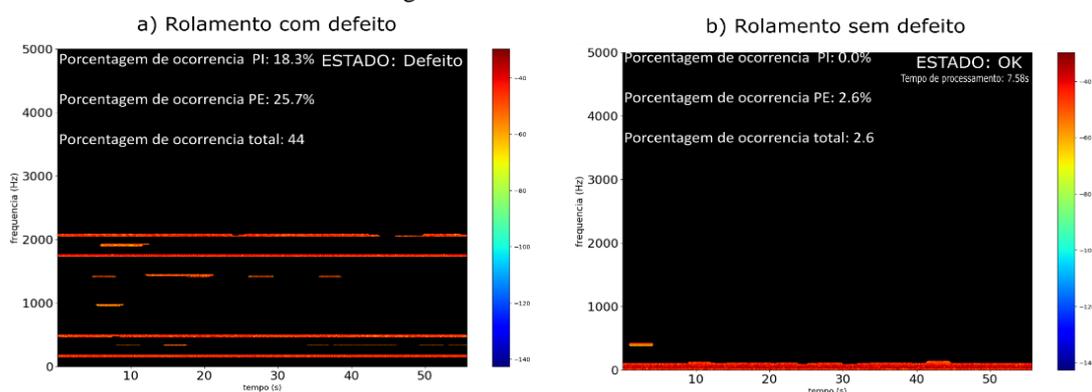


Fonte: Autoria própria (2020).

A velocidade é estimada utilizando o ruído eletromagnético. Logo, é necessário dividir o valor encontrado pelo número de polos do motor, que nesta pesquisa eram 4. Assim temos a velocidade do eixo em Hertz. Esta velocidade é utilizada posteriormente para calcular a frequência de defeito. Esta técnica foi constatada utilizando um tacômetro estroboscópico devidamente certificado, legitimando assim a técnica com erro máximo de 0.4%. Uma vez calculadas as frequências de defeito, é feito o processamento do espectrograma em tons de cinza para gerar os resultados quantificáveis e máscara para os resultados subjetivos. Entende-se por subjetivo os dados exibidos em figuras para melhorar a experiência visual.

Nesta etapa, ocorre a primeira classificação dos áudios em duas classes: rolamento saudável e rolamento defeituoso. Para isto, o *software* desenvolvido analisa a proporção em que as frequências de defeito se manifestam com alta magnitude no espectrograma do sinal. Essencialmente, esta análise é feita calculando a quantidade de *pixels* brancos que ocorrem na frequência de defeito sobre a quantidade total de *pixels* brancos. Por se tratar de uma análise considerando dois tipos de defeito, para cada imagem tem-se duas proporções de defeito. O resultado deste procedimento é ilustrado pela Figura 19.

Figura 19 – Resultado do classificador 1.



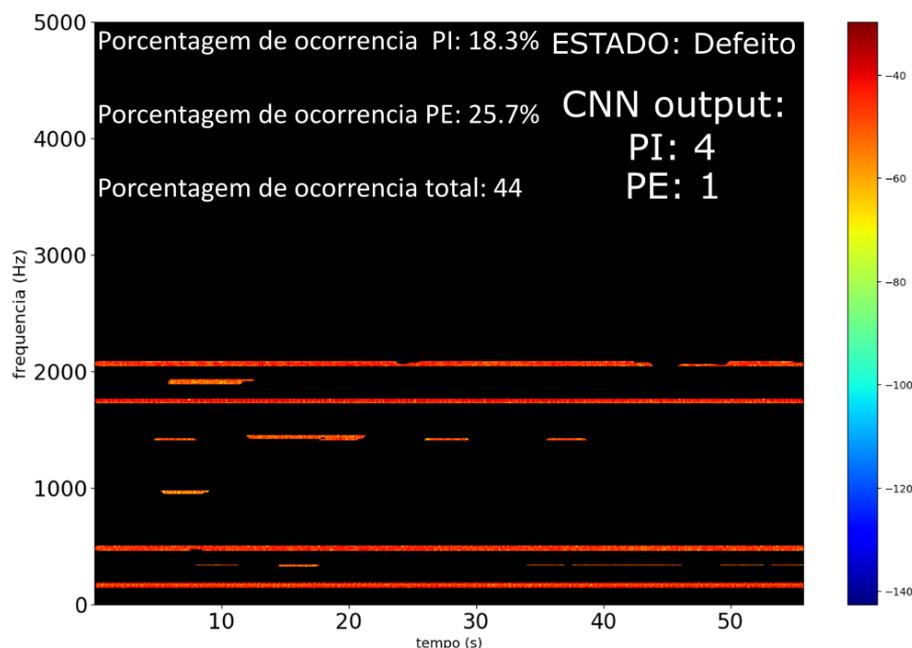
Fonte: Autoria própria (2020).

De forma experimental foi estabelecido um limiar de 10% para classificar o rolamento quanto a defeituoso ou não. Este limiar considera a somatória das duas porcentagens de ocorrência de defeito.

O espectrograma da Figura 19 (a) é de um rolamento com defeito e deve ser inserido no segundo classificador (RNC) para identificar qual o defeito, ao passo que o espectrograma da Figura 19 (b) corresponde a um rolamento saudável. Logo, não há necessidade de utilizar a rede, encerrando assim o processamento. Esta arquitetura de processamento objetiva a fidedignidade dos resultados, utilizando a rede apenas para classificar o tipo de defeito com uma acurácia de 93,02%, à medida que o primeiro classificador possui uma acurácia de 100%.

Além dos dois classificadores, há outro algoritmo para agregar confiabilidade ao sistema: a segmentação. Esta técnica segmenta o áudio de um rolamento defeituoso em cinco segmentos com sobreposição de 50% para gerar cinco imagens (espectrograma) e apresentar estes a rede. Desta forma, um único áudio é apresentado cinco vezes a rede de forma sequencial no tempo, isto é, cada segmento que é apresentado para rede corresponde a um determinado intervalo no áudio original. Isto permite desconsiderar até dois segmentos (caso estes tenham sido prejudicados com ruídos externos). Este mecanismo pode ser observado na Figura 20, onde o áudio de um rolamento defeituoso é inserido no *software*.

Figura 20 – Diagnóstico de um rolamento com defeito na pista interna.



Fonte: Autoria própria (2020).

É apresentado na Figura 20 o resultado gerado após a RNC classificar o áudio e o *software* renderizar a imagem com as informações do processamento. Todo este processo, desde a inserção do áudio no *software* até a renderização da imagem, levou 13.63s para ser concluído.

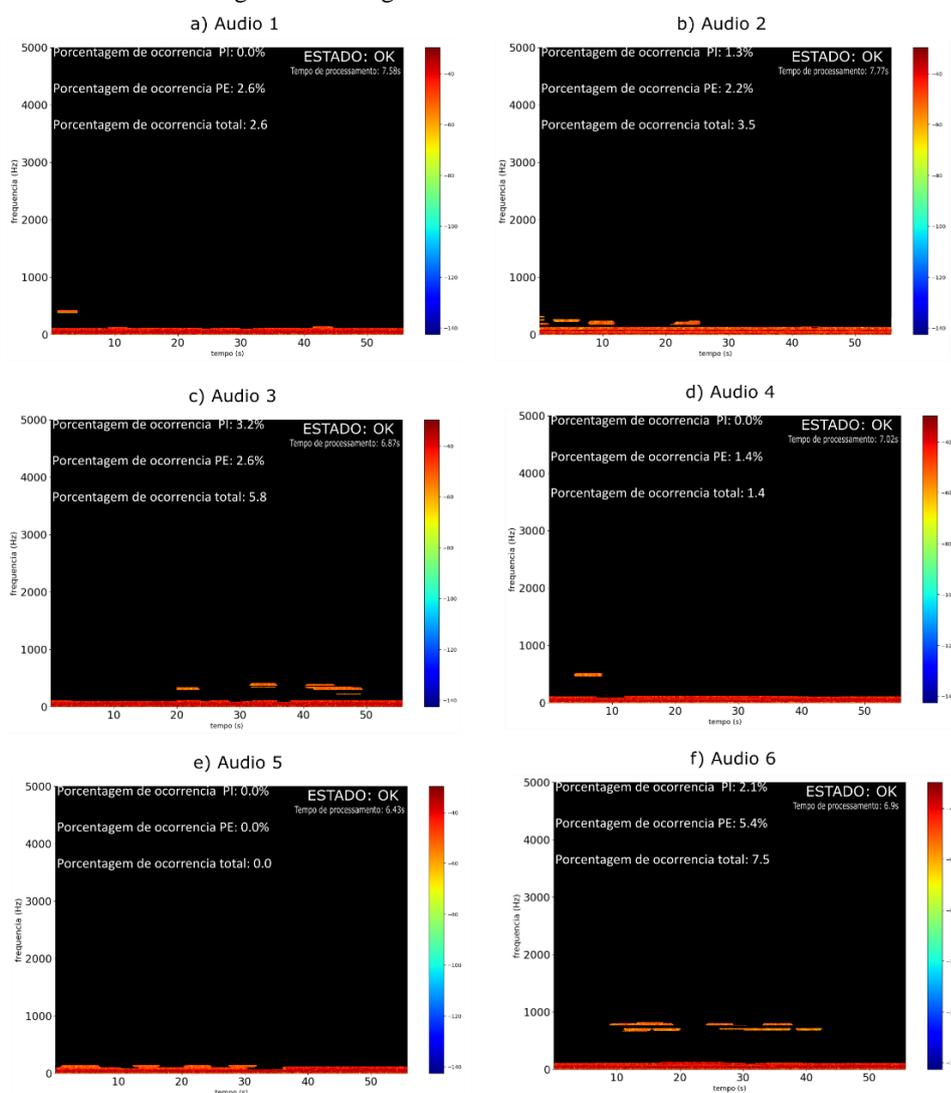
O diagnóstico do rolamento, apresentado na Figura 20, ilustra o conceito brevemente citado acima, onde em um dado segmento foi classificado erradamente (com defeito na pista externa), todavia, não impactou na assertividade do *software*. Para verificar a causa deste segmento ter sido erroneamente classificado, foi investigado o intervalo de tempo correspondente a este segmento (0 a 20s). Apesar deste intervalo possuir alguns componentes de frequências anormais, quando comparado aos outros segmentos deste mesmo áudio, não foi possível concretizar de fato a origem do erro. Contudo, comprovou-se a robustez da metodologia empregada nesta pesquisa contra ruídos de curta duração no tempo.

## 4.2 Classificador RNC

Para validar o *software* desenvolvido, foi utilizado um banco de dados contendo 36 áudios de rolamentos em funcionamento. A aquisição dos sinais deste banco de dados

se deu conforme descrito na Seção 3.3. Contudo, estes áudios não foram utilizados em nenhuma etapa do treinamento da rede. Os resultados desta etapa de validação serão apresentados de forma resumida pelas Figuras 21 a 23.

Figura 21 – Diagnóstico de um rolamento saudável.

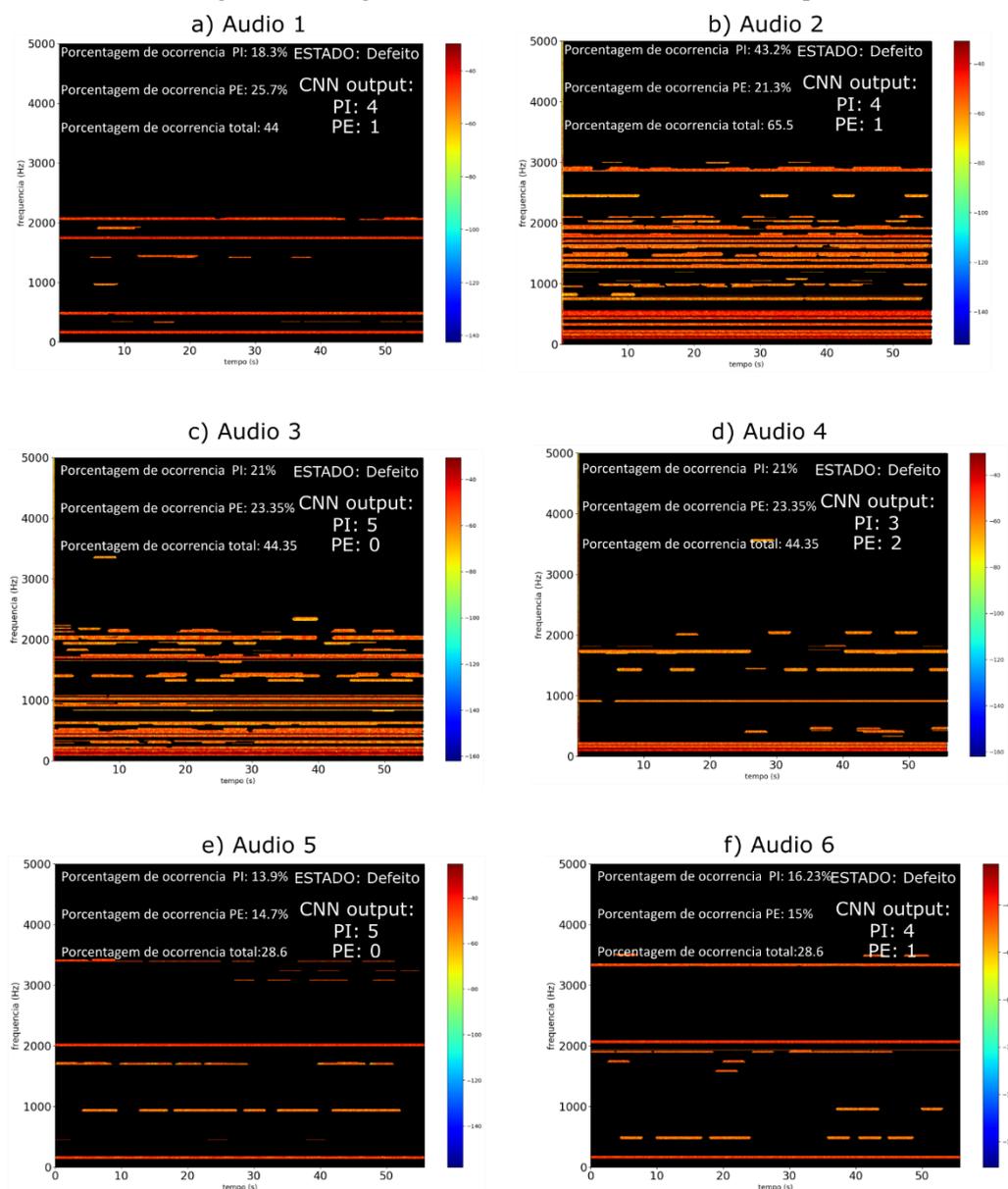


Fonte: Autoria própria (2020).

Todos os diagnósticos apresentados na Figura 21 são referentes a rolamentos novos sem defeito. O tempo para gerar estes resultados é inferior (mais de 50%) quando comparado ao tempo para gerar os resultados de um rolamento defeituoso, uma vez que não se utiliza a RNC para este diagnóstico. No momento da aquisição do sinal, foram impostas três situações de funcionamento do motor variando a carga mecânica sobre o eixo. Ainda assim, nas diversas situações impostas ao motor, 100% dos diagnósticos realizados foram corretos.

De forma semelhante, a Figura 22 demonstra o funcionamento do *software* para o diagnóstico de rolamentos com defeito na pista interna. Estes espectrogramas foram classificados pelo primeiro classificador com defeituoso e, conseqüentemente, foram apresentados a RNC para classificar qual o tipo de defeito (defeito na pista interna ou defeito na pista externa).

Figura 22 – Diagnóstico de um rolamento com defeito na pista interna.



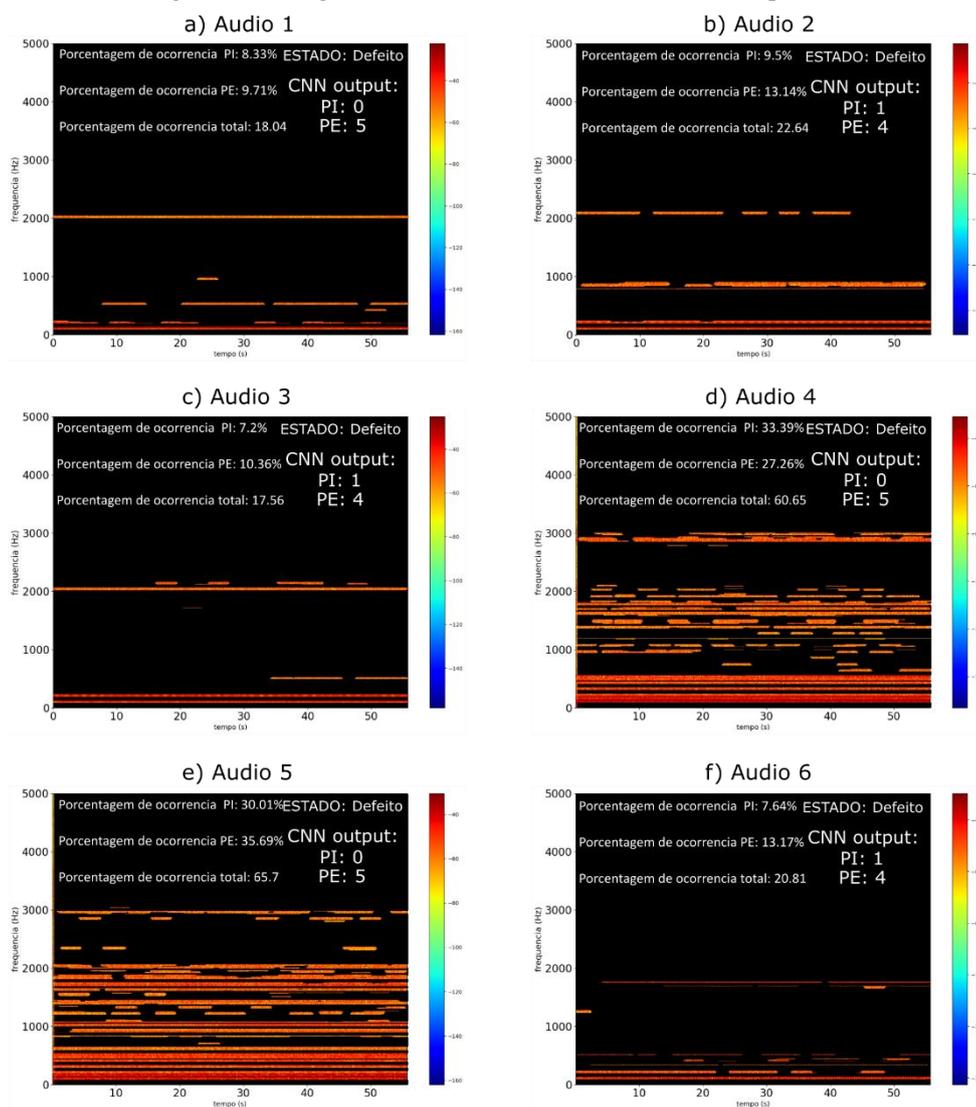
Fonte: Autoria própria (2020).

O *software* implementado também obteve um desempenho satisfatório na classificação de rolamentos com defeito na pista interna. Apesar de algumas imagens

apresentarem um grau de certeza menor (menos segmentos classificados de forma certa) para todos os áudios correspondentes ao rolamento com defeito na pista interna, a classificação do mesmo foi realizada de forma correta.

Por fim, a Figura 23 apresenta os resultados que o *software* gerou ao inserir áudios de um rolamento com defeito na pista externa.

Figura 23 – Diagnóstico de um rolamento com defeito na pista externa.

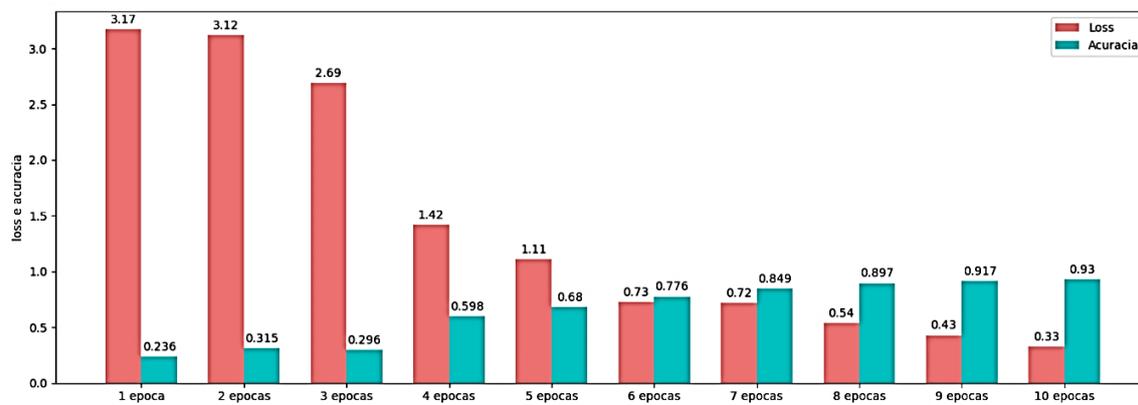


Fonte: Autoria própria (2020).

De forma semelhante, o *software* implementado classificou todos os áudios desta classe de forma correta, com um tempo de processamento aproximado de 14s.

O treinamento da rede ocorreu em um total de 10 épocas e atingiu uma acurácia de 93.02%, conforme a Figura 24.

Figura 24 – Loss e acurácia da RNC no treinamento



Fonte: Autoria própria (2020).

## 5. CONCLUSÃO

No estudo aqui apresentado foi desenvolvida uma ferramenta de suma importância para auxiliar o profissional responsável a diagnosticar de forma correta e rápida um rolamento em pleno funcionamento, independente da velocidade de funcionamento. Diferente das pesquisas realizadas tradicionalmente nesta área, o trabalho aqui desenvolvido utilizou um conjunto de técnicas para proporcionar um resultado objetivo, sem que haja necessidade de o operador deduzir informações. Com isto, além de facilitar a utilização da ferramenta, esta ferramenta confere maior confiabilidade no diagnóstico do rolamento.

O método de detecção de falhas utilizando o espectrograma, com as etapas de binarização e operação AND realizadas, é uma contribuição da pesquisa e que se mostrou bastante eficaz na detecção das frequências de falhas e na detecção da presença ou não de defeitos nos rolamentos. O tipo de defeito foi detectado por um refinamento realizado pela RNC, melhorando o desempenho na classificação. Apesar da análise espectrográfica simplificada adotada na etapa que antecede a RNC ser ineficaz para avaliar qual o defeito o rolamento apresenta, a implantação do classificador contornou o problema, uma vez que este pondera a quantidade de *pixels* com alta magnitude nas frequências de defeito e a posição que os mesmos ocupam, diferentes da análise simplificada que não considera a posição.

Além disto, outra contribuição de elevada importância que as técnicas aqui utilizadas proporcionaram foi a possibilidade do diagnóstico ser realizado em zonas de velocidade as quais as técnicas convencionais (análise por vibrações) não promovem resultados eficazes.

Inevitavelmente, o método de aquisição de sinal, aqui utilizado, está predisposto a ruídos externos, principalmente no âmbito industrial, onde há diferentes sistemas eletromecânicos em funcionamento contínuo. Com isto, faz-se necessário para pesquisas futuras o desenvolvimento de um cancelador de ruído, viabilizando assim a utilização desta ferramenta na esfera industrial.

Por fim, pode-se concluir que esta pesquisa possuiu uma relevância substancial, uma vez que foi capaz de diagnosticar os rolamentos de forma eficaz, mesmo utilizando componentes de baixo custo, quando comparado aos equipamentos convencionalmente utilizados para a mesma função.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULLAH, M. A.; DAVID M. A comparative experimental study on the use of acoustic emission and vibration analysis for bearing defect identification and estimation of defect size, **Mechanical Systems and Signal Processing**, Volume 20, 2006. p. 1537-1571.

AHAMED, S. K.; KARMAKAR, S.; MITRA, M.; SENGUPTA, S. Novel Diagnosis Technique of Mass Unbalance in Rotor of Induction Motor by the Analysis of Motor Starting Current at No Load Through Wavelet Transform. **6th International Conference on Electrical and Computer Engineering**, 2010. p. 474 – 477.

AHIRE, J. B. **Perceptron and Backpropagation**. 2018. Disponível em: <<https://medium.com/@jayeshbahire/perceptron-and-backpropagation-970d752f4e44>>. Acesso em 25 nov. 2020.

BRANCO F. G. **A organização, o planejamento e o controle da manutenção**. 17. ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2008. 257 p.

CHOUDHURY, A.; TANDON, N., Application of Acoustic Emission Technique for the Detection of Defects in Rolling Element Bearings. **Tribology International**, Vol.33, Jan. 2000. p. 39-45.

DELGADO-ARREDONDO, P. A.; MORINIGO-SOTELO, D.; OSORNIO-RIOS, R. A.; AVINA-CERVANTES, J. G., ROSTRO-GONZALEZ, H.; ROMERO-TRONCOSO, R. de J. Methodology for fault detection in induction motors via sound and vibration signals. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2016. p. 568–589.

DOLENC, B.; BOŠKOSKI, P.; JURIČIĆ, D. Distributed bearing fault diagnosis based on vibration analysis. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 66, 2016. p. 521-532.

ELMALEEH, M. A., Saad, N., & Awan, M. Condition monitoring of industrial process plant using acoustic emission techniques. **International Conference on Intelligent and Advanced Systems**, 2010, p. 1-6.

FUJIMOTO, R.Y. **Diagnóstico Automático de Defeitos em Rolamentos Baseado em Lógica Fuzzy**. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2005. 158 p.

GREEBNIK, J.; ZHANG, Y.; BINGHAM, C.; SRIVASTAVA, S. Roller element bearing acoustic fault detection using smartphone and consumer microphones comparing with vibration techniques. **Proceedings of the 2016 17th International Conference on Mechatronics - Mechatronika, ME 2016**. p. 1-7.

GUIMARÃES, L. M.; NOGUEIRA, C. F.; DA SILVA, Margarete Diniz Brás. **Manutenção industrial: implementação da manutenção produtiva total (tpm)**. e-xacta, v. 5, n. 1, 2012. p. 23.

HASAN, Md Junayed; ISLAM, MM Manjurul; KIM, Jong-Myon. Acoustic spectral

imaging and transfer learning for reliable bearing fault diagnosis under variable speed conditions. **Measurement**, v. 138, 2019. p. 620-631.

HBM, Torquimetro digital. Disponível em:

< <https://www.hbm.com/pt/5501/sensores/>>. Acesso em 01 out. 2019.

HEMMATI, F. W. O.; MOHAMED S. G. Roller bearing acoustic signature extraction by wavelet packet transform, applications in fault detection and size estimation, **Applied Acoustics**, Volume 104, 2016. p. 101-118.

JEEVANAND, S.; ABRAHAM, T. M. Condition Monitoring of Induction Motors Using Wavelet Based Analysis of Vibration Signals, **Second International Conference on Future Generation Communication and Networking Symposia**, 2008. p. 75-80.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: função estratégica**. 4 ed. rev. ampl. Rio de Janeiro, RJ: Qualitymark, 2013. 413 p.

Krizhevsky, A., Sutskever, I., and Hinton, G. E. Imagenet classification with deepconvolutional neural networks. **Advances in neural information processing systems**, 2012. p. 1097-1105.

MASCHERONI, Motor de indução trifásico em gaiola de esquilo. Disponível em: < <https://www.slideshare.net/regisnaldogurgel/arte-eletronica-depotencia-89852397> >. Acesso em 01 out. 2019.

NSK (org.). NSK Bearing Doctor: Diagnóstico Rápido de Ocorrências em Rolamentos, 2001. 36 p.

OLIVEIRA, C. A. **Plataforma para ensaios de motores de indução trifásicos e simulação de cargas mecânicas: acionamento, operação e monitoramento com auxílio de fonte programável**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. 114 p.

OLIVEIRA, E., A.; SENA, A., P., C.; FERNANDES, L., H., T., Detecção de avaria em rolamentos de motores de indução trifásico utilizando sinais de emissão acústica e corrente elétrica, **II Congresso internacional de gestão e tecnologias**, 2018. 12 p.

OTHMAN, M. S.; NUAWI, M. Z.; MOHAMED, R. Vibration and Acoustic Emission Signal Monitoring for Detection of Induction Motor Bearing Fault. **International Journal of Engineering Research & Technology**, 2015. P. 924–929.

PODDAR, S.; TANDON, N. Detection of particle contamination in journal bearing using acoustic emission and vibration monitoring techniques. **Tribology International**, v. 134, 2019. p. 154-164.

PEREIRA, M. J. **Engenharia de manutenção: teoria e prática**. 2 ed. rev. Rio de Janeiro, RJ: Ciência Moderna, 2011. 228 p.

RAI, A.; UPADHYAY, S. H. A review on signal processing techniques utilized in the fault diagnosis of rolling element bearings. **Tribology International**, v. 96, 2016. p. 289-306.

REIS, A. J. S., **Reconhecimento de Padrões de Falhas em Motores Trifásicos utilizando Redes Neurais**. Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN, Brasil. 2010. 73 p.

SANTOS, T. H.; GOEDDTEL, A.; SILVA, S. A. O.; SUETAKE, M. Scalar control of an induction motor using a neural sensorless technique. **Electric Power Systems Research**, Vol. 108, 2014. p. 322-330.

SAMSON, Microfone condensador. Disponível em:  
<<http://www.samsontech.com/samson/products/microphones/condenser-microphones/c01/>>. Acesso em 01 ago. 2020.

SALAZAR-VILLANUEVA, F.; IBARRA-MANZANO, O. G. Spectral analysis for identifying faults in induction motors by means of sound. **CONIELECOMP 2013, 23rd International Conference on Electronics, Communications and Computing. IEEE**, 2013. p. 149-153.

SILVA, J. C. **Sistema totalmente não-invasivo para determinação da velocidade de rotação do eixo, torque e rendimento em motores de indução em operação**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia (ct) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018. 111 p.

SOBRINHO, C. A. N. **Estudo comparativo de técnicas para Diagnóstico de falhas em motores de Indução trifásicos**. Tese de Doutorado submetida à Universidade Federal da Paraíba, 2015. 139 p.

VARIMOT, Motor/gerador CC. Disponível em:  
<<https://www.varimot.com.br/motores/>>. Acesso em 01 out. 2019.

VIANA, H. R. G. **PCM: planejamento e controle da manutenção**. 1 ed. Rio de Janeiro, RJ: Qualitymark, 2002. 167 p.

WEG, Motor elétrico de indução trifásico, Disponível em:  
<<https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores> >. Acesso em 01 out. 2019.