



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"



**GUILHERME BERARDI LUCAS**

**UM NOVO MÉTODO DE DIAGNÓSTICO DE DANOS INCIPIENTES EM  
ROLAMENTOS DE MOTORES DE INDUÇÃO POR MEIO DA INJEÇÃO  
ATIVA DE SINAIS MULTIFREQUÊNCIA E MONITORAMENTO DE  
IMPEDÂNCIA**

**BAURU  
2025**

**GUILHERME BERARDI LUCAS**

**UM NOVO MÉTODO DE DIAGNÓSTICO DE DANOS INCIPIENTES EM  
ROLAMENTOS DE MOTORES DE INDUÇÃO POR MEIO DA INJEÇÃO  
ATIVA DE SINAIS MULTIFREQUÊNCIA E MONITORAMENTO DE  
IMPEDÂNCIA**

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Andreoli

**BAURU  
2025**

Lucas, Guilherme Beraldi

Um novo método de diagnóstico de danos incipientes em rolamentos de motores de indução por meio da injeção ativa de sinais multifrequência e monitoramento de impedância/ Guilherme Beraldi Lucas. - Bauru, 2025

76 f. : il.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp). Faculdade de Engenharia de Bauru, Bauru, 2025.

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Andreoli

1. Diagnóstico de falhas. 2. Motor de indução. 3. Análise de impedância. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Bauru. II. Título

## **IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA**

Este trabalho propõe um novo método para detectar falhas em motores de indução trifásicos, que são equipamentos amplamente utilizados na indústria. Os potenciais desdobramentos desta pesquisa colaborariam para o desenvolvimento de manutenções mais econômicas e representariam menor desperdício de matéria-prima. Desta forma, o dispositivo aqui apresentado está intrinsecamente ligado a temas como eficiência energética e meio ambiente. Considerando que as indústrias são estabelecimentos capilarizados e que estão presentes a nível regional, nacional e internacional, o possível impacto social e ambiental deste trabalho é bastante abrangente. Além disso, também foi depositada uma patente junto à AUIN para proteger o invento.

## **POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH**

This study proposes a novel method for detecting faults in three-phase induction motors, which are widely employed across various industrial sectors. The potential outcomes of this research could facilitate the development of more cost-effective maintenance strategies, thereby reducing raw material waste. Consequently, the device presented herein is intrinsically linked to topics such as energy efficiency and environmental sustainability. Given that industries are extensive and operate at regional, national, and international levels, the possible social and environmental impact of this work is considerably far-reaching. Furthermore, a patent application has been filed with AUIN to safeguard the invention.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE GUILHERME BERARDI LUCAS, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.**

Aos 14 dias do mês de fevereiro do ano de 2025, às 10h, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de GUILHERME BERARDI LUCAS, intitulada **UM NOVO MÉTODO DE DIAGNÓSTICO DE DANOS INCIPIENTES EM ROLAMENTOS DE MOTORES DE INDUÇÃO POR MEIO DA INJEÇÃO ATIVA DE SINAIS MULTIFREQUÊNCIA E MONITORAMENTO DE IMPEDÂNCIA**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. ANDRE LUIZ ANDREOLI (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP, Prof. Dr. PAULO JOSÉ AMARAL SERNI (Participação Virtual) do(a) Engenharia de Controle e Automação (aposentado) / Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba - UNESP, Prof. Dr. ALESSANDRO GOEDEL (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal Tecnológica do Paraná - UTFPR - Campus Cornélio Procópio, Prof. Dr. ATILA MADUREIRA BUENO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Telecomunicações e Controle / Escola Politécnica - USP, Prof. Dr. BRUNO ALBUQUERQUE DE CASTRO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP. Após a exposição pelo doutorando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: **APROVADO**.

Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. ANDRE LUIZ ANDREOLI



# AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a minha família. Aos meus pais, Maria Aparecida e Evaldo, e minhas irmãs, Cássia e Marina, pelo suporte incondicional à minha formação pessoal e acadêmica e que, sem o qual, nada disso poderia ser realizado e nem faria sentido.

À Marina, minha namorada, por enfrentar os seus próprios desafios de maneira tão inabalável que me inspira a cada dia a seguir em frente.

Ao Professor Dr. André Luiz Andreoli pelos tantos anos de crescimento e ensinamentos desde que me acolheu em seu grupo de pesquisa. Pelo referencial não só teórico, mas pelo raro conhecimento prático que tanto engrandece seus trabalhos. E, por fim, a amizade e os conselhos que levarei sempre comigo.

A todos os demais professores, aos técnicos de laboratório, que auxiliaram grandemente na montagem dos experimentos, e aos amigos que, de alguma maneira, contribuíram nessa jornada acadêmica e pessoal.

À FAPESP pelo auxílio fornecido através da bolsa de estudos e reserva técnica (#2021/09685-2).

## RESUMO

No campo da manutenção industrial, os métodos de monitorização automatizados são utilizados para fornecer diagnósticos aprofundados e evitar perdas através da análise de falhas. Consequentemente, os motores de indução trifásicos (MITs) têm sido objeto de muitos estudos nessa área, uma vez que acionam a maioria das cargas industriais. Apesar dos avanços nas técnicas de diagnóstico de MITs, ainda existem algumas lacunas de pesquisa na área de monitoramento, como, por exemplo, na filtragem de ruídos durante a amostragem e na detecção de falhas em seus primeiros estágios. Atualmente, o maior desafio das técnicas tradicionais (análise de vibração, acústica e corrente) tem sido identificar os sinais não estacionários e transientes, que são característicos das falhas incipientes, pois encontram-se mascarados por sinais complexos e ruidosos. Por outro lado, há abordagens que nunca foram amplamente exploradas na literatura quando comparadas com outras técnicas, como os métodos de diagnóstico por análise de impedância. Dessa forma, foi proposto um novo sistema de detecção de danos incipientes em rolamentos, baseado na injeção de sinais no enrolamento do MIT e leitura dos valores de impedância com a máquina em pleno funcionamento. Por sua vez, a injeção e a posterior leitura foram realizadas por um dispositivo minimamente invasivo, desenvolvido no escopo deste trabalho. A capacidade para filtragem de ruído e a eficácia do dispositivo para indicar danos incipientes foram testadas em rolamentos defeituosos e sob diferentes condições de funcionamento operacional. Além disso, foi desenvolvida uma nova metodologia de desgaste de rolamentos para simular danos em níveis abaixo dos encontrados na bibliografia atual. Os sinais teóricos de impedância do MIT com rolamentos defeituosos também foram simulados utilizando um modelo matemático no software Simulink e comparados com experimentos reais. Adicionalmente, a sensibilidade do equipamento foi comparada com a análise tradicional de vibração. Por fim, os resultados demonstraram a confiabilidade do sistema desenvolvido para a classificação de danos incipientes em rolamentos.

**Palavras-chave:** Diagnóstico de falhas; Motor de indução; Análise de impedância; Falha incipiente;

# ABSTRACT

In the field of industrial maintenance, automated monitoring methods are employed to provide in-depth diagnostics and prevent losses through failure analysis. Consequently, three-phase induction motors (TIMs) have been the focus of numerous studies in this area, as they drive the majority of industrial loads. Despite advances in TIM diagnostic techniques, there remain research gaps in the monitoring domain, such as noise filtering during the sampling and incipient fault detection. Currently, the main challenge of traditional techniques (vibration, acoustic, and current analysis) lies in identifying non-stationary and transient signals characteristic of incipient faults, as these are often masked by complex and noisy signals. On the other hand, some approaches have not been widely explored in the literature when compared to other techniques, such as impedance analysis-based diagnostic methods. Therefore, a novel system for detecting incipient bearing damage was proposed, based on injecting signals into the TIM winding and reading impedance values while the machine is fully operational. The signal injection and subsequent readings were performed using a minimally invasive device developed within the scope of this work. The device's noise filtering capability and effectiveness in detecting incipient damage were tested on defective bearings under various operational conditions. Additionally, a new bearing wear methodology was developed to simulate damage at levels below those reported in the current literature. Theoretical impedance signals of TIMs with defective bearings were also simulated using a mathematical model in Simulink software and compared with real experiments. Furthermore, the sensitivity of the equipment was compared to traditional vibration analysis. Finally, the results demonstrated the reliability of the developed system for classifying incipient bearing damage.

**Keywords:** fault diagnosis, induction motor, impedance analysis, incipient fault

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Elementos de um rolamento . . . . .	20
Figura 2 – Representação de excentricidade causada por falhas nas pistas dos rolamentos. a) rolamento saudável. b) rolamento com falha . . . . .	21
Figura 3 – Variação do entreferro . . . . .	23
Figura 4 – Circuito utilizado no analisador de impedância . . . . .	26
Figura 5 – Esquemático do circuito do protótipo. . . . .	27
Figura 6 – Arquivo de roteamento do circuito. . . . .	28
Figura 7 – Projeto de caixa de montagem para impressora 3D. . . . .	28
Figura 8 – Analisador de impedância . . . . .	29
Figura 9 – Analisador de impedância (foto interna) . . . . .	30
Figura 10 – Modelo utilizado no Simulink . . . . .	32
Figura 11 – Espectros de frequência de: a) Simulação de rolamento saudável. b) Simulação de rolamento com defeito. c) Dados reais de rolamento saudável. d) Dados reais de rolamento com defeito. . . . .	33
Figura 12 – Ilustração do equipamento de desgaste . . . . .	36
Figura 13 – Foto do equipamento de desgaste . . . . .	36
Figura 14 – Ilustração do equipamento de desgaste (força aplicada ao rolamento)	37
Figura 15 – Ilustração do equipamento de medição de falha. . . . .	38
Figura 16 – Ilustração do equipamento de medição de falha. . . . .	41
Figura 17 – Ilustração do equipamento de medição de falha. . . . .	42
Figura 18 – Sinal injetado. . . . .	45
Figura 19 – Interface de Usuário no Software Matlab. . . . .	46
Figura 20 – Foto dos sensores de vibração colados no MIT. . . . .	46
Figura 21 – Foto geral do experimento. . . . .	47
Figura 22 – Circuito para cálculo da impedância da máquina . . . . .	48
Figura 23 – Comparação de espectro entre condições de falha e sem falha. . . . .	49
Figura 24 – Sinais adquiridos pelo osciloscópio . . . . .	50
Figura 25 – Curvas de impedância. . . . .	51
Figura 26 – Fluxograma de obtenção dos resultados . . . . .	53
Figura 27 – Valores de distância entre centroides . . . . .	54

Figura 28 – Valores do índice Silhouette . . . . .	55
Figura 29 – Mapa de classificação 3D para 8, 6, 2 kHz. . . . .	56
Figura 30 – Mapa de classificação para 9, 7, 1 kHz. . . . .	57
Figura 31 – Mapa de classificação para 7, 3, 1 kHz. . . . .	58
Figura 32 – Valores médios de impedância de cada agrupamento (centroides) - Exemplo utilizando a combinação 1 . . . . .	59
Figura 33 – Valores de $R^2$ para as combinações de frequência. . . . .	59
Figura 34 – Mapa 3D do sinal sem filtro. . . . .	61
Figura 35 – Matriz de confusão de classificação de falha de rolamento (melhor caso) . . . . .	62
Figura 36 – Matriz de confusão da classificação de falhas de rolamento (valores médios) . . . . .	63
Figura 37 – Implementação matemática da modelagem para rolamentos defeituo- sos (circuito do analisador). . . . .	74
Figura 38 – Implementação matemática da modelagem para rolamentos defeituo- sos (variações de impedância) . . . . .	75
Figura 39 – Implementação matemática da modelagem para rolamentos defeituo- sos (MIT). . . . .	76

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
<b>1.1</b>	<b>Considerações iniciais</b>	<b>12</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos e motivação</b>	<b>13</b>
<b>1.3</b>	<b>Relevância Científica e Contribuição</b>	<b>14</b>
<b>1.4</b>	<b>Estrutura da Tese</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>FALHAS EM ROLAMENTOS</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Introdução as falhas em rolamentos</b>	<b>19</b>
<b>2.2</b>	<b>Modelagem de Falhas em Rolamentos</b>	<b>20</b>
<b>3</b>	<b>NOVO ANALISADOR DE IMPEDÂNCIA MULTIFREQUÊNCIAS</b>	<b>25</b>
<b>4</b>	<b>SIMULAÇÃO E COMPARAÇÃO DOS SINAIS DE IMPEDÂNCIA</b>	<b>31</b>
<b>5</b>	<b>ENSAIOS EXPERIMENTAIS</b>	<b>35</b>
<b>5.1</b>	<b>Método de desgaste de rolamentos</b>	<b>35</b>
<b>5.2</b>	<b>Configuração das máquinas elétricas</b>	<b>39</b>
<b>5.3</b>	<b>Aquisição de dados</b>	<b>43</b>
<b>5.4</b>	<b>Processamento de Sinais</b>	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>51</b>
<b>6.1</b>	<b>Curvas de impedância</b>	<b>51</b>
<b>6.2</b>	<b>Mapas 3D e Clusterização</b>	<b>52</b>
<b>6.3</b>	<b>Análise de mitigação de ruídos</b>	<b>61</b>
<b>6.4</b>	<b>Testes</b>	<b>62</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>65</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>67</b>
<b>APÊNDICE A</b>	<b>LISTA DE PUBLICAÇÕES REALIZADAS DURANTE O DOUTORADO</b>	<b>71</b>
<b>APÊNDICE B</b>	<b>IMPLEMENTAÇÃO EM BLOCOS DO SIMULINK</b>	<b>74</b>

## Capítulo 1

# Introdução

*Neste primeiro capítulo, expôs-se um panorama geral sobre o trabalho realizado. Aqui estão dispostas as discussões que explicitam o contexto no qual esta tese está contida. Além disso, foi descrito o objetivo principal deste trabalho, bem como suas motivações. Por fim, foi evidenciada a relevância científica presente no escopo da Tese.*

### 1.1 Considerações iniciais

Muitos processos industriais são acionados por motores de indução trifásicos (MITs), e os indicadores de eficiência estão intimamente ligados ao seu bom funcionamento. Por isso, os planos de manutenção são considerados ferramentas cruciais para a prevenção de perdas, o que estimulou a criação de equipes dedicadas à manutenção nas indústrias (DRIF; CARDOSO, 2014; LUCAS *et al.*, 2023). Recentemente, diferentes sensores, como acelerômetros, sensores de corrente e transdutores acústicos, foram usados para inspeções e ajudam os seres humanos a detectar falhas nos MITs. No entanto, apesar dos avanços nas técnicas de monitoramento de motores de indução trifásicos, ainda há muitas lacunas na teoria e na aplicação prática. Isso pode ser evidenciado por trabalhos publicados recentemente que buscam superar os obstáculos remanescentes nesse campo (YATSUGI *et al.*, 2023; SHABBIR; LIANG; CHAKRABARTI, 2021; LUCAS *et al.*, 2021).

Dentro dessa perspectiva, muitos estudos foram motivados pelo fato de que 40% das falhas em motores de indução estão relacionadas a rolamentos (ZHENG *et al.*, 2021; KONG *et al.*, 2021). Por exemplo, um rolamento defeituoso pode levar a perdas financeiras e de produção muito além de seu próprio valor se este vier a causar uma parada não programada em um MIT, pois toda a cadeia produtiva a jusante deste equipamento pode ser prejudicada. Como consequência, diferentes sistemas de diagnóstico, métodos de classificação e técnicas de processamento de

sinais foram introduzidos nos últimos anos (KANG; KIM; KIM, 2015; DALVAND *et al.*, 2018; ZHAI; FU; KANG, 2023). No entanto, as características que são frequentemente investigadas para a detecção de falhas podem ser mascaradas por ruídos ou podem não estar presentes nos estágios iniciais da falha (DARONG *et al.*, 2018; XIA *et al.*, 2020). Portanto, a detecção de danos incipientes nos rolamentos continua sendo uma tendência de pesquisa atual (ZHAI; FU; KANG, 2023; WEI *et al.*, 2021), pois eles são os componentes com maior sujeição a desgaste nos MITs.

## 1.2 Objetivos e motivação

Nesse sentido, este trabalho propõe um sensor de impedância para detectar falhas incipientes em rolamentos de MITs durante a operação normal da máquina. Além disso, a motivação para o desenvolvimento do dispositivo apresentado neste trabalho são as lacunas observadas durante a revisão bibliográfica. As características embarcadas no método com o intuito de preencher essas lacunas são apresentadas resumidamente a seguir, e foram detalhadas nos capítulos posteriores. Primeiro, o sistema é baseado em um dispositivo capaz de injetar sinais de diferentes frequências no enrolamento do motor e, ao mesmo tempo, fazer leituras de impedância. O sensor atua injetando os sinais de medição no enrolamento do motor sem interromper a operação da máquina, ou seja, de maneira minimamente invasiva. Com base nesses valores, pode detectar diferentes níveis de danos incipientes nos rolamentos. Durante os testes, foram aplicadas diferentes condições operacionais para confirmar a robustez do sistema frente às variações dos parâmetros de funcionamento, como de praxe nos trabalhos publicados em periódicos de alto fator de impacto. E, como visto posteriormente nos resultados, essas condições não afetaram a capacidade de diagnóstico do sistema. Adicionalmente, um modelo matemático foi usado para simular os sinais de impedância teóricos para rolamentos saudáveis e danificados, e os resultados foram comparados com os sinais adquiridos pelo novo sensor durante experimentos de bancada. Os sinais de impedância multifrequência também foram comparados com os dados adquiridos simultaneamente por um transdutor de vibração para comparação de sensibilidade a este tipo de falha. Adicionalmente, a metodologia de desgaste convencional foi aprimorada para garantir uma emulação de defeitos incipientes nos rolamentos.

As técnicas tradicionais usam brocas ou usinagem por eletroerosão (KANG *et al.*, 2015; DARONG *et al.*, 2018; CHEN *et al.*, 2021; LIU; WANG; GOLNARAGHI, 2008). Embora essas sejam alternativas consolidadas, foi projetado um novo equipamento de teste objetivando emular danos mensuráveis e consideravelmente menores dos que os da literatura (aproximadamente 53%). O diagnóstico final foi obtido por meio de curvas de impedância e mapas de agrupamento 3D. As taxas de acerto foram calculadas com amostragens adicionais e apresentadas através de matrizes de confusão.

Ainda, de acordo com a posterior revisão da literatura, a análise de impedância é uma abordagem pouco explorada. Na verdade, como será visto, poucos estudos desenvolveram sistemas de monitoramento baseados em impedância. E, embora alguns tenham diagnosticado diferentes tipos de falhas elétricas, nunca foram usados para diagnosticar falhas mecânicas em MITs e nem adaptados para funcionar com a máquina em pleno funcionamento. Entretanto, conforme demonstrado neste trabalho, esse método indicou ser resistente a ruídos e altamente adequado para estudar sinais impulsivos e estocásticos. Também apresentou maior sensibilidade e menor complexidade computacional no processamento de dados em relação às alternativas tradicionais.

### 1.3 Relevância Científica e Contribuição

Conforme mencionado, poucos autores usaram medições de impedância para o monitoramento de falhas de MITs. Desta forma, foi realizada uma revisão com quase a totalidade dos trabalhos publicados em periódicos nos últimos anos e que utilizam essa análise. Por exemplo, Xia *et al.* (XIA *et al.*, 2020) investigaram falhas em enrolamentos *hairpin*. Os autores diagnosticaram falhas de soldagem e falhas de isolamento em dez estatores diferentes usando injeção de sinal. No entanto, os estatores foram removidos da carcaça do motor durante os experimentos. Além disso, embora algumas das falhas pudessem ser detectadas usando técnicas de processamento simples, como distâncias euclidianas, foram necessários algoritmos de PCA (*Principal Component Analysis*) e aprendizado de máquina para o diagnóstico completo. As medidas de impedância foram tomadas de 20 kHz a 1 MHz usando um analisador Gamry. Os dados de alta dimensionalidade foram mapeados para duas

dimensões usando t-SNE (*t-Distributed Stochastic Neighbor Embedding*). Por fim, os resultados obtidos com a SVM (*Support Vector Machine*), apesar de invasivos, mostram que as medidas de impedância podem fornecer dados relevantes para classificação entre diferentes tipos de falha. Os autores de (HU *et al.*, 2021) também desenvolveram um método de injeção de sinal para detectar falhas entre espiras do estator. No entanto, nesse caso, foi escolhido apenas um valor de frequência (1666 Hz). Uma informação importante é de que os autores constataram que o diagnóstico fica comprometido se a frequência do sinal injetado estiver próxima da frequência da fonte de alimentação da máquina. Berzoy *et. al* (BERZOY; ELDEEB; MOHAMMED, 2019) propuseram uma estimativa de curtos-circuitos entre espiras usando os *off-diagonal terms* da matriz de impedância dos componentes de sequência da máquina. Os autores desenvolveram um índice para classificar oito níveis de falha. Além disso, não foi aplicado nenhum tipo de injeção de sinal. Os resultados revelaram o potencial da análise de impedância para o monitoramento de falhas, que detectou níveis de falha tão baixos quanto 1%. Entretanto, embora a análise de componentes simétricas seja uma alternativa eficiente para detectar correntes desequilibradas causadas por curtos-circuitos, ela pode não ser adequada para analisar sinais impulsivos. Portanto, esse método pode ser suscetível aos altos níveis de ruído relacionados a falhas mecânicas. Mas, principalmente, ele negligencia dados relevantes contidos em outras faixas de frequência além da fundamental e suas harmônicas por não utilizar a injeção de sinais.

No próximo trabalho revisado (GU, 2018), Bon-Gwan mediu seis componentes de impedância no plano d-q estacionário para identificar falhas entre espiras. De acordo com o autor, as falhas no enrolamento afetam parcialmente os eixos d e q. Esse método baseia-se na injeção de tensão de 'alta frequência e curta duração' (50 a 500 Hz), e o autor enfatiza a importância de diferentes frequências para a classificação de falhas. Com essa técnica, foi possível detectar o nível e a fase da falha. Finalmente, o método FRA, do inglês, *Frequency Response Analysis*, ou Análise de Resposta em Frequência, já foi aplicada para diagnóstico de motores de indução não só em artigos científicos, como em Alameri *et al.*, 2023 e Alawady *et al.*, 2020, mas também em equipamentos comerciais. No entanto, as aplicações de FRA em MITs foram, impreterivelmente, realizadas com a máquina fora de funcionamento e, muitas vezes, até desmontada (ALAMERI *et al.*, 2023; ALAWADY *et al.*, 2020). Em resumo, a revisão da literatura revelou

que as abordagens baseadas em impedância, apesar de nunca terem sido aplicadas para a detecção de falhas mecânicas, apresentam pontos fortes como a classificação de falhas proporcionada pela injeção de sinal multifrequência e a alta sensibilidade a anomalias no motor. No entanto, uma sólida teoria matemática já comprovou que as falhas nos rolamentos alteram o comprimento do entreferro a ponto de modificar as características eletromagnéticas do MIT (ZHANG *et al.*, 2020; BLODT *et al.*, 2008). Portanto, ao combinar as capacidades apresentadas pela análise de impedância a uma nova técnica de injeção de sinais e processamento de dados, uma lacuna de pesquisa pôde ser preenchida pelo novo equipamento proposto, que foi utilizado para diagnosticar danos incipientes em rolamentos sem prejuízo ao funcionamento normal do MIT.

Ao longo dos anos, os cientistas constataram que os acelerômetros podem obter informações relevantes sobre falhas mecânicas em MITs e são considerados o método ideal para diagnósticos. Considerando que as falhas nos rolamentos são a maioria absoluta das falhas mecânicas nos MITs, muitos estudos aplicaram acelerômetros como sensores de vibração (DUAN; LIAO; WANG, 2021). Por exemplo, Zheng *et al.* (ZHENG *et al.*, 2021) desenvolveram uma técnica de redução de ruído para isolar as respostas de impulso de falhas em rolamentos. Foi proposto o algoritmo *Sparse Elitist Group Lasso*, que se baseia em métodos de Representação Esparsa (RE). As REs podem extrair características de regularidade dos sinais de entrada, o que é uma vantagem para o mapeamento de impulsos repetitivos em meio a ruídos fortes. Em (CHEN *et al.*, 2021), Chen *et al.* também lidaram com a baixa energia e a natureza não estacionária dos sinais de falha. A solução consiste em três etapas diferentes de processamento de sinais. A primeira é um modelo matemático com pesos adaptáveis para otimizar a decomposição do espectro. Depois disso, o sinal foi decomposto em componentes de espectro e foi calculado um índice para selecionar o melhor componente. Por fim, o espectro selecionado foi demodulado usando o operador de energia diferencial simétrica para supressão de ruído. Assim, o espectro resultante apresentou dados relevantes sobre falhas em rolamentos. Já os autores HOU *et al.* propuseram um espectro de envelope quadrado otimizado para selecionar bandas de frequência significativas para a detecção de falhas em rolamentos. Como alternativa ao kurtograma usual, seu método é orientado por dados para evitar a interferência de

ruídos. Após o processamento do sinal, os autores puderam selecionar uma banda adequada para o diagnóstico. Entretanto, eles também afirmam que podem existir outras bandas relevantes, dependendo do tipo de falha.

Nesse sentido, depois de examinar os trabalhos mencionados acima e muitos outros artigos relacionados (ZHAI; FU; KANG, 2023; WEI *et al.*, 2021; DARONG *et al.*, 2018; XIA *et al.*, 2020), é coerente afirmar que o principal desafio no monitoramento de rolamentos é identificar os sinais impulsivos em contraste com o forte ruído não relacionado. Portanto, o novo sistema baseado em impedância foi projetado como um método de filtragem de ruído, que também isola as frequências relacionadas à falha por meio de injeção de sinal e modulação de frequência. Sua construção aprimora o processo de extração de características por meio da injeção ativa de sinais multifrequências de baixa amplitude nos enrolamentos do estator, o que elimina a necessidade de redes neurais, processos de treinamento e filtragem complexa. Ao contrário dos acelerômetros, que são expostos às mesmas condições adversas que o motor, o design do sensor permite que ele seja instalado diretamente dentro dos centros de controle de motores (CCMs). Desta forma, no contexto da Indústria 4.0, a largura de banda da rede usada pelos acelerômetros sem fio distribuídos pela linha de produção poderia ser alocada para outros dispositivos que realmente precisam operar pela rede móvel.

Em suma, as principais contribuições deste trabalho podem ser destacadas da seguinte forma:

- Um novo sistema de detecção baseado em impedância que pode detectar diferentes níveis de danos incipientes em rolamentos. Lembrando que, embora algumas poucas abordagens baseadas em impedância tenham sido usadas para diagnosticar falhas elétricas, elas nunca foram capazes de diagnosticar falhas mecânicas em MITs ou mesmo em pleno funcionamento do motor.
- Um processo de extração de características que injeta ativamente sinais multifrequências de baixa amplitude nos enrolamentos do estator, o que simplifica o processamento de sinais através da filtragem de ruídos resultante do método desenvolvido.

- Um dispositivo com alta sensibilidade a falhas incipientes, pois a magnitude das falhas detectadas é ainda menor do que a dos conjuntos de dados mais comumente usados em publicações anteriores (até 53% menor, como será demonstrado).
- Um sistema baseado em impedância imune a variações de carga e tensão que atende às necessidades de aplicações industriais.

## 1.4 Estrutura da Tese

O Capítulo 2 traz uma revisão da modelagem matemática das falhas em rolamentos.

O Capítulo 3 aborda como foi proposto o design do novo sistema de monitoramento de falhas baseado nas variações de impedância da máquina.

O Capítulo 4 trata das simulações baseadas na modelagem matemática e a comparação desses resultados com os sinais reais obtidos pelo sensor.

O Capítulo 5 descreve com detalhes a metodologia e os conceitos utilizados especificamente neste trabalho. O desenvolvimento do novo método, a montagem experimental das máquinas elétricas e do sistema de aquisição de dados também serão detalhados.

Os resultados obtidos através do método proposto e as conclusões finais do trabalho são apresentados, respectivamente, no Capítulo 6 e no Capítulo 7.

No Apêndice A, está disposta uma lista com as publicações realizadas durante o período de Mestrado.

Finalmente, no Apêndice B, encontram-se capturas de tela da modelagem computacional desenvolvida através do software Simulink.

## Capítulo 2

# Falhas em Rolamentos

*Os motores de indução são máquinas altamente confiáveis e sua aplicação na indústria revolucionou as linhas de produção. No entanto, os MITs não estão livres de uma ampla sorte de falhas elétricas e mecânicas que os acometem frequentemente. Dentre elas, as falhas nos rolamentos são exemplos de falhas amplamente estudadas. Desta forma, esta seção apresenta quais são as consequências dessas falhas e a modelagem matemática que motivou e fundamentou o desenvolvimento do sistema.*

## 2.1 Introdução as falhas em rolamentos

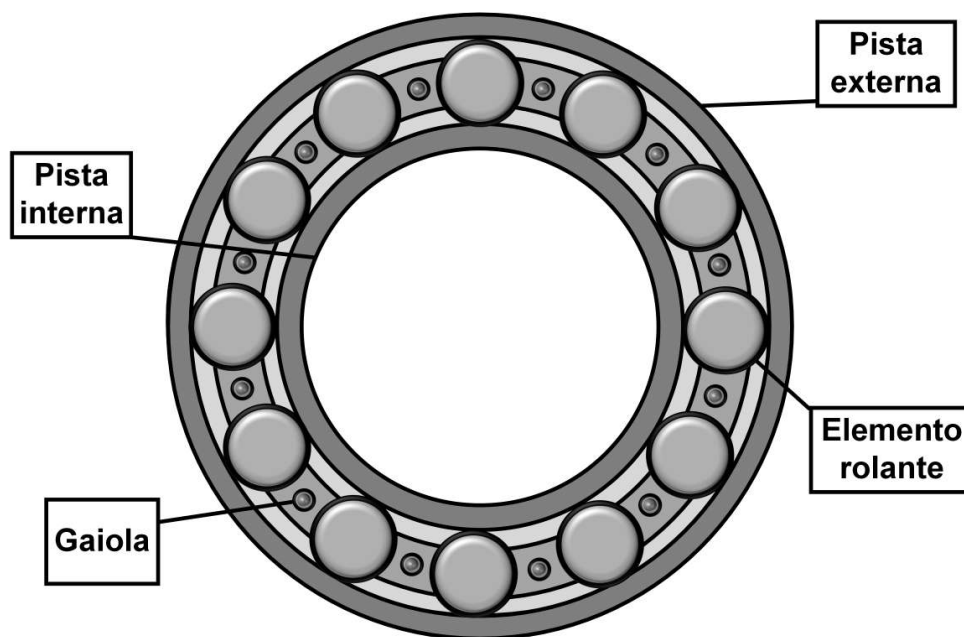
Os danos nos rolamentos de motores de indução aparecem em muitos levantamentos como a maior fonte de problemas que atingem estes equipamentos. Além disso, é sabido que dentre as possíveis causas de falhas nos rolamentos, as esferas são a sua fonte mais comum. A falta de lubrificação e a carga mecânica excessiva prejudicam esses componentes, levando ao excesso de atrito e danos físicos ao conjunto (TRIGEASSOU, 2011; OJAGHI; SABOURI; FAIZ, 2018).

Os rolamentos têm o papel de diminuir o atrito mecânico durante o movimento rotativo dos MITs. Portanto, a dissipação de energia resultante da fricção desse dispositivo se torna relevante nos parâmetros de eficiência do motor. Além disso, dependendo do nível de desgaste, essa falha pode gerar um movimento vibracional de grande proporção, resultando em outros tipos de falha, ruídos sonoros e diminuição da vida útil do equipamento. Em casos extremos, esse fenômeno pode acarretar na parada total de um motor e em paradas não planejadas para manutenção forçada, gerando prejuízos financeiros (HASAN; ISLAM; KIM, 2019; SONG; WANG; HU, 2019; OJAGHI; SABOURI; FAIZ, 2018).

A importância dos rolamentos para os MITs se traduz nas diversas pesquisas já realizadas a respeito da detecção precoce de seus defeitos. Nesse contexto, os

elementos dos rolamentos são costumeiramente divididos entre pista externa, pista interna, elemento rolante e gaiola (Figura 1). Esse tema já foi amplamente abordado e as frequências associadas às falhas de cada elemento dos rolamentos já são conhecidas (NIVSRANGSAN; JANTARAJIROJKUL, 2018; VIITALA; WIDMAIER; KUOSMANEN, 2018). Esse conhecimento prévio deu origem a diferentes equipamentos comerciais que são largamente aplicados nas rotinas de manutenção das indústrias. No entanto, ainda existe uma significativa lacuna no estudo da detecção incipiente dessas falhas. Dentre as causas associadas ao desgaste dos rolamentos, pode-se destacar a carga excessiva no eixo, lubrificação incorreta, tensões induzidas, vedação defeituosa e desalinhamento no eixo (TRIGEASSOU, 2011).

Figura 1 – Elementos de um rolamento



Fonte: Próprio autor

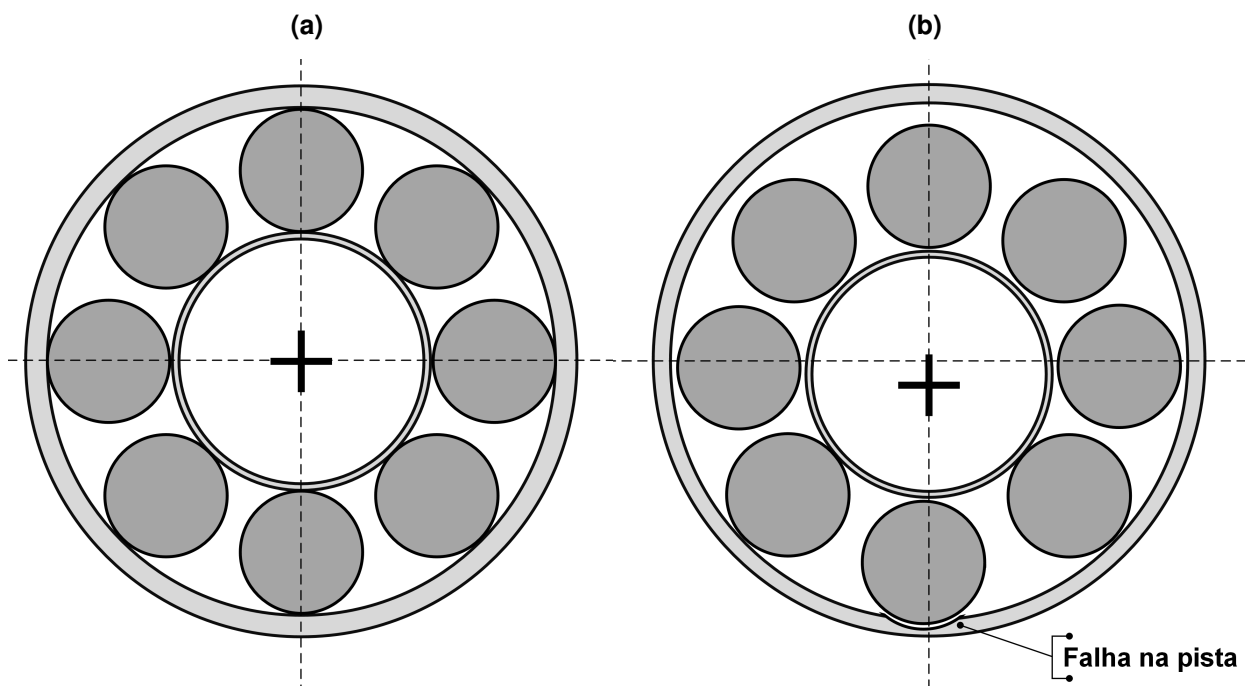
## 2.2 Modelagem de Falhas em Rolamentos

As frequências características das falhas de rolamento para sinais de vibração são bem conhecidas (OJAGHI; SABOURI; FAIZ, 2018), e a maioria dos estudos baseados em vibração propõe métodos diferentes para analisar essas frequências. No entanto, os MITs são máquinas complexas, e até mesmo um pequeno dano a um

componente mecânico tem um impacto em outras variáveis. Por exemplo, quando os rolamentos são danificados em algum ponto de sua estrutura, observa-se uma excentricidade transitória do eixo. Conseqüentemente, o comprimento do entreferro, o fluxo do entreferro, o conjugado, a indutância mútua, as correntes do estator, etc. são modificados, como já demonstrado por estudos anteriores (DI *et al.*, 2015). Portanto, alguns autores apresentaram equações para calcular os valores dessas variáveis em relação às falhas de rolamentos (ZHANG *et al.*, 2020; BLODT *et al.*, 2008).

De acordo com os estudos, a modelagem do *air gap* é útil, pois essa variável é o principal elo entre a falha do rolamento e suas conseqüências na estrutura eletromagnética do MIT. A variação no comprimento do entreferro é crucial para o sistema de detecção de falhas baseado em impedância proposto, pois está diretamente relacionada à indutância equivalente do motor (FAIZ; OJAGHI, 2011). Foi comprovado que o comprimento do entreferro pode ser alterado por uma falha no rolamento quando as esferas colidem com rachaduras e amassados, deslocando o centro do rotor (ZHANG *et al.*, 2020; OJAGHI; SABOURI; FAIZ, 2018; BLODT *et al.*, 2008). Uma representação extrapolada desse fenômeno está disposta na Figura 2.

Figura 2 – Representação de excentricidade causada por falhas nas pistas dos rolamentos. a) rolamento saudável. b) rolamento com falha



Fonte: Próprio autor (adaptado de (BLODT *et al.*, 2008))

Em Zhang et. al, (2020) os autores conseguiram detectar variações no entreferro tão pequenas quanto  $1 \mu\text{m}$  (ZHANG *et al.*, 2020). Uma variação periódica do entreferro pode ser aproximada por  $g_0 [1 - d_e \cos(\theta)]$ , em que  $g_0$  é o valor do comprimento padrão,  $\theta$  é a posição angular do rotor e  $d_e$  é um coeficiente de magnitude de falha. No entanto, o valor do *air gap* mudará somente no instante em que as esferas estiverem em contato com um dano. Caso contrário, quando elas não estiverem em contato, ele manterá o comprimento padrão  $g_0$ . Portanto, o entreferro  $g(t, \theta)$  pode ser descrito como uma função do tempo  $t$  e da posição angular  $\theta$  com ajuda da função Delta de Dirac (BLODT *et al.*, 2008):

$$g(t, \theta) = g_0 \left[ 1 - d_e \cos(\theta) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta \left( t - \frac{k}{f_b} \right) \right] \quad (2.1)$$

A série de Dirac garante que as mudanças no entreferro ocorram somente em  $k/f_b$ , em que  $f_b$  é a frequência de falha característica do rolamento e  $k$  é um número inteiro.

No entanto, algumas falhas de rolamento não são apenas periódicas, mas também se repetem em intervalos específicos de posição angular porque o local da falha também está se movendo (por exemplo, falha na pista interna). Nesse caso, a equação  $g(t, \theta)$  deve ser ajustada. Primeiro, o  $\Delta\theta_f$  é calculado (BLODT *et al.*, 2008):

$$\Delta\theta_f = \omega_r \Delta t = \frac{\omega_r}{f_b} \quad (2.2)$$

Em seguida, a Equação (2.1) pode ser ajustada para:

$$g(t, \theta) = g_0 \left[ 1 - d_e \cos(\theta + k\Delta\theta_f) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta \left( t - \frac{k}{f_b} \right) \right] \quad (2.3)$$

No entanto  $\delta(t - k/f_b)$  é sempre igual a zero, exceto para  $t = k/f_b$ . Portanto,

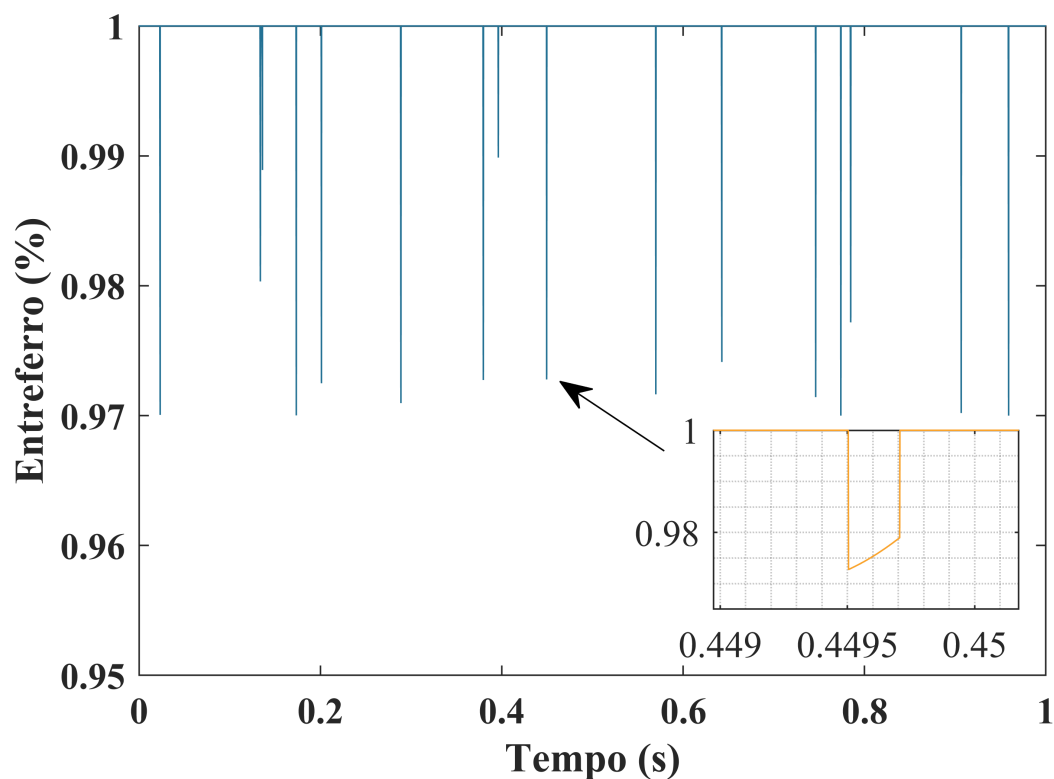
$$\cos(\theta + k\Delta\theta_f) = \cos(\theta + f_b \Delta\theta_f t)$$

dessa forma, considerando a Equação (2.2), a Equação (2.3) pode ser atualizada para:

$$g(t, \theta) = g_0 \left[ 1 - d_e \cos(\theta + \omega_r t) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta \left( t - \frac{k}{f_b} \right) \right] \quad (2.4)$$

Ainda, para visualização do efeito das falhas de rolamento no comprimento de entreferro, foi criado um gráfico utilizando a Equação 2.4 e o software Matlab. O resultado pode ser visto na Figura 3. O parâmetro  $d_e$  foi limitado a uma amplitude de falha de 3%, porém, com algumas variações aleatórias para simular danos incipientes, que nem sempre ocasionam desvios de valores exatamente iguais. O momento de ocorrência da falha também foi gerado aleatoriamente, mais uma vez, para simular o caráter não-estacionário das falhas incipientes, que por algumas vezes podem apresentar nenhum efeito quando uma esfera passa pelo local da falha, devido a inércia. Como visto, no período de 1 segundo (30 voltas), o entrefero variou entre 100 e 97% de seu valor nominal em momentos específicos. Esse comportamento será retomado e é importante para compreensão da simulação feita no Capítulo 4.

Figura 3 – Variação do entreferro



Fonte: Próprio autor

Em conclusão, as equações descrevem as variações no comprimento do entreferro devido a um rolamento defeituoso. Essas variações são conhecidamente responsáveis por alterações nos valores de impedância da máquina (FAIZ; OJAGHI,

2011), uma vez que a permeância ( $\Lambda$ ) é inversamente proporcional ao valor de entreferro:

$$\Lambda = \frac{\mu}{g} \quad (2.5)$$

Portanto, foi proposto um método para explorar esse comportamento e detectar falhas de rolamento em MITs. Além disso, essas equações também foram aplicadas para simular os sinais de impedância usando o Simulink.

## Capítulo 3

# Novo Analisador de Impedância Multifrequências

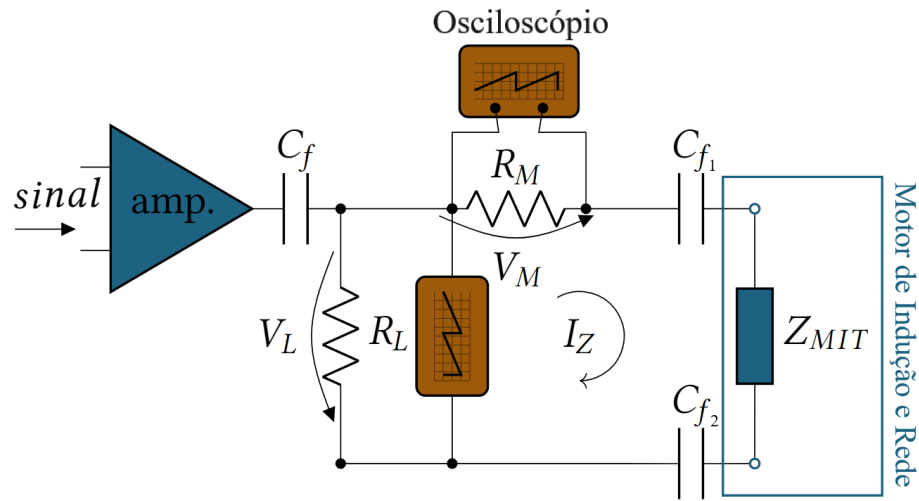
*Esse capítulo introduz os fundamentos teóricos e a descrição física do novo dispositivo de leitura de impedância multifrequência. É importante notar que algumas informações referentes à aplicação do dispositivo durante os experimentos (frequência de injeção, período de injeção, etc) encontram-se no capítulo reservado à metodologia.*

---

De acordo com a revisão da literatura, autores anteriores utilizaram a injeção de sinais multifrequências para o monitoramento de falhas. Como visto na revisão, por diversificar o volume de dados adquiridos, abordagens multifrequências se destacam na extração de características, levando a melhores resultados, filtrando ruídos e obtendo informações relevantes sobre um tipo específico de falha. Além disso, como visto na última seção, trabalhos publicados anteriormente modelaram como o circuito magnético e elétrico do motor é afetado por falhas nos rolamentos. Portanto, foi desenvolvido um novo sistema que injeta sinais multifrequência no enrolamento e, ao mesmo tempo, mede as alterações na impedância equivalente do MIT causadas por rolamentos defeituosos.

O circuito é conectado ao motor por duas das fases, e a corrente da fonte de alimentação é isolada do circuito de medição por um filtro capacitivo. O sinal multifrequência de baixa amplitude é injetado no circuito usando um amplificador e um filtro capacitivo para eliminar qualquer valor de *offset*. A amplitude e a fase para medição da impedância são obtidas pela aquisição simultânea do sinal injetado e da tensão em um resistor de medição. O circuito é melhor detalhado na Figura 4, onde  $C_f$  são os filtros capacitivos,  $R_M$  é um resistor de medição da corrente  $I_Z$ ,  $R_L$  é um resistor de carga e  $Z_{MIT}$  é a impedância equivalente do motor em paralelo com a rede.

Figura 4 – Circuito utilizado no analisador de impedância



Fonte: Próprio autor

Um ponto que deve ser discutido nesse contexto é a influência da rede nos resultados do método proposto, uma vez que se caracteriza como uma impedância adicional ao sistema. Dentro do escopo deste trabalho, não foi verificada a imunidade do método a variações de impedância da rede durante os experimentos. No entanto, este fato não descaracteriza os resultados ou a viabilidade do método, mas se coloca apenas como mais um tópico que pode ser estudado futuramente, como proposto na Conclusão. Por fim, considerando a malha vista na Figura 4, pode-se calcular o módulo da impedância equivalente do MIT//rede em função das variáveis já conhecidas.

$$Z_{\text{total}} = R_M + Z_{Cf1} + Z_{Cf2} + Z_{MIT} \quad (3.1)$$

$$Z_{\text{total}} = \frac{V_L}{I_Z} \quad (3.2)$$

$$Z_{Cf1} = \frac{1}{j\omega C_{f1}} \quad (3.3)$$

$$Z_{Cf2} = \frac{1}{j\omega C_{f2}} \quad (3.4)$$

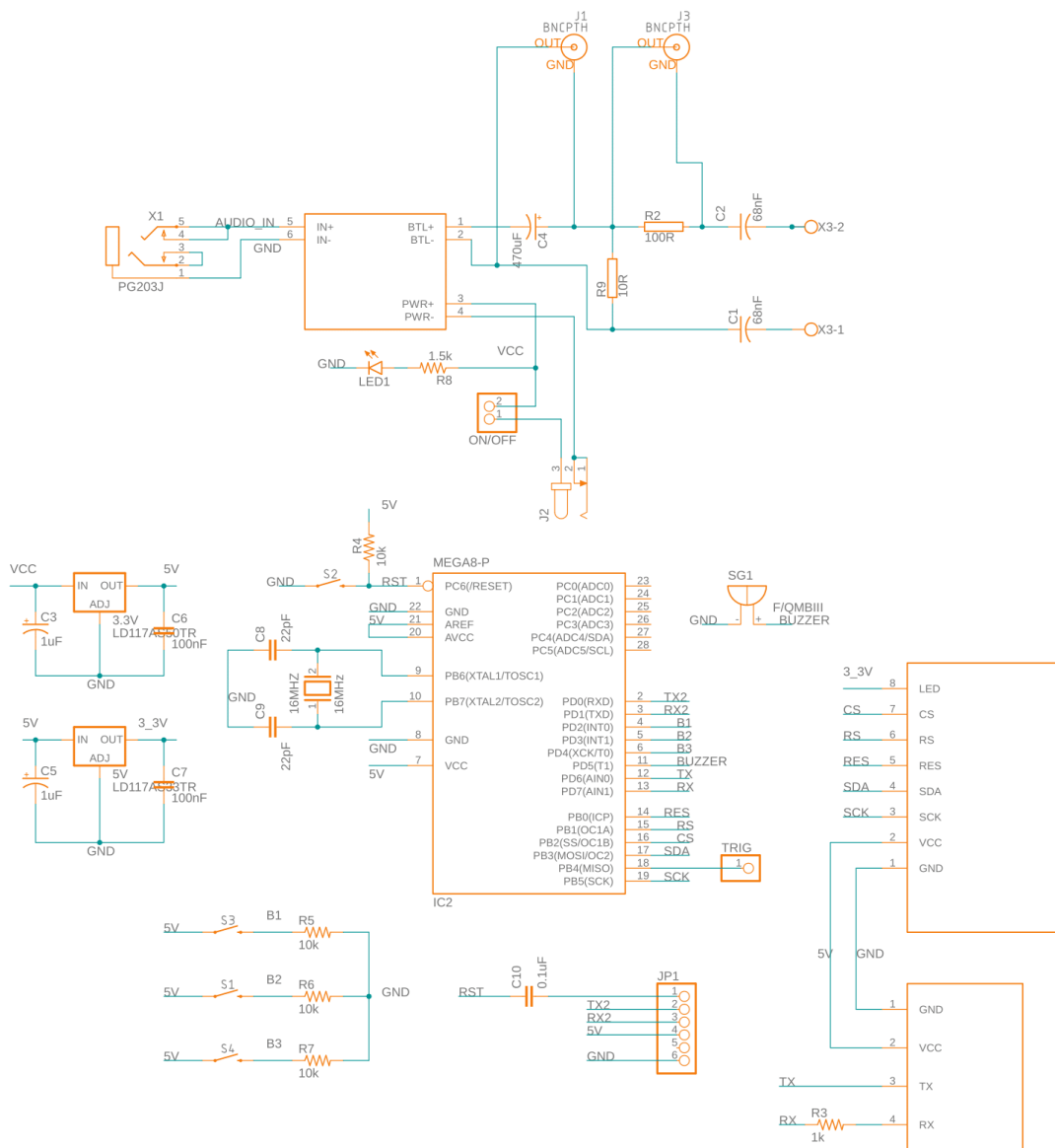
$$Z_{MIT} = Z_{\text{total}} - R_M - Z_{Cf1} - Z_{Cf2} \quad (3.5)$$

$$Z_{MIT} = \frac{V_L}{I_Z} - R_M - \frac{1}{j\omega C_{f1}} - \frac{1}{j\omega C_{f2}} \quad (3.6)$$

A fase da corrente pode ser calculada computacionalmente através da aquisição das tensões  $V_M$  e  $V_L$  obtidas pelos dois canais do osciloscópio.

No entanto, para funcionamento prático, diversos componentes adicionais foram necessários. Portanto, utilizando o software Fusion 360, da Autodesk, foi projetado o circuito completo para o protótipo. Foram adicionados recursos extras como uma tela, botões, módulo MP3 com cartão de memória (para armazenar diferentes tipos de sinais para injeção), saídas e entradas do tipo P2, interface de comunicação com o osciloscópio e um microcontrolador para gerenciar os periféricos. O esquemático final pode ser visto na Figura 5.

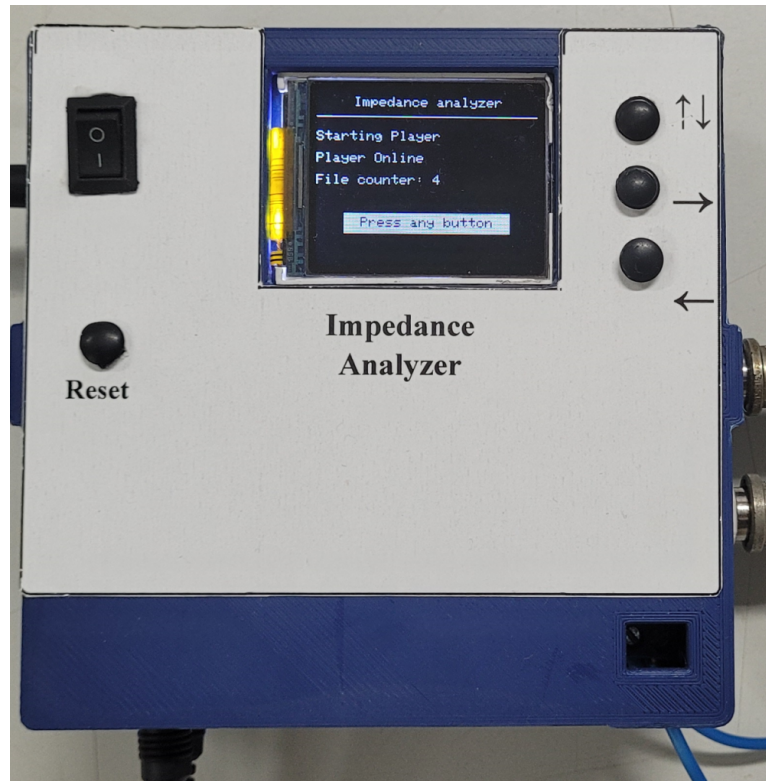
Figura 5 – Esquemático do circuito do protótipo.



Fonte: Próprio autor



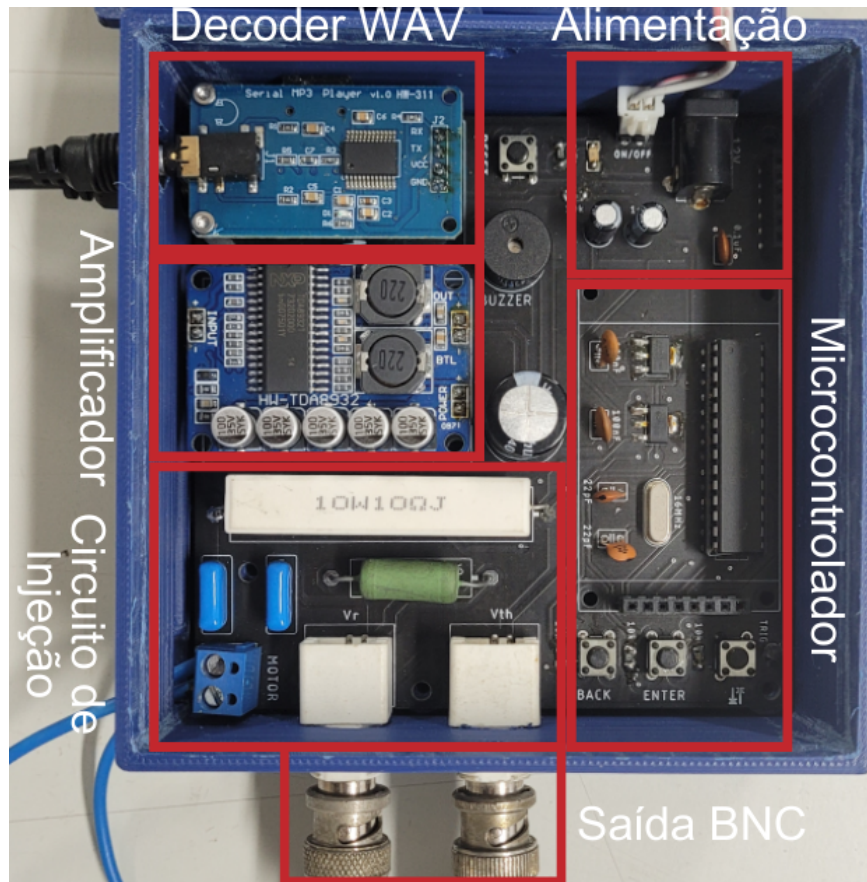
Figura 8 – Analisador de impedância



Fonte: Próprio autor

Internamente, como visto na Figura 9, é possível observar melhor os componentes utilizados para confecção do protótipo. O sinal de injeção é gerado por um *decoder* de áudio a partir de um arquivo WAV armazenado em um cartão de memória. Essa abordagem foi escolhida pois o arquivo do tipo *waveform* oferece uma senoide bem definida e sem distorções, uma vez que foi gerada através do software Matlab com a amostragem apropriada (1 MHz). O sinal pré-amplificado pelo *decoder* é aplicado na entrada de um módulo baseado no circuito integrado TDA8932. A saída do amplificador é aplicada em um resistor de carga e alimenta o circuito de injeção. Um microcontrolador ATMEGA328p foi utilizado para controle de tela, botões e para definir parâmetros básicos, como: tempo de injeção, frequência de injeção, tipo de sinal, ganho, atrasos etc. A alimentação dos módulos e microcontrolador foi realizada por fonte CC externa com filtragem de ruído. O protótipo também conta com saída do tipo BNC para aquisição das tensões de interesse e um conector AK300 com parafusos para acoplamento do circuito de injeção às fases do motor. Maiores detalhes, como, por exemplo, os formatos de onda, foram apresentados na seção de metodologia e resultados.

Figura 9 – Analisador de impedância (foto interna)



Fonte: Próprio autor

Por fim, uma vez que os valores dos componentes do circuito são conhecidos, os valores aquisitados pelos osciloscópios podem ser utilizados para o cálculo da impedância equivalente do MIT através da análise da malha percorrida pela corrente  $I_Z$ , como visto nas equações no início do Capítulo.

Aqui, algumas ressalvas devem ser destacadas. Esse é um dispositivo totalmente inédito na literatura. Portanto, apesar de resultados relevantes obtidos através de uma metodologia robusta, com embasamento teórico e clara indicação de viabilidade, este não é um produto final. Ou seja, ainda há análises que poderão ser feitas tais como: melhorias no circuito do equipamento, diferentes frequências de injeção, testes com diferentes métodos de acionamento (inversores de frequência, *soft starters*), etc), entre outras.

No próximo Capítulo, a teoria, a simulação e os dados reais demonstraram como a injeção ativa de sinal é capaz de filtrar o ruído e permitir a detecção de características de baixa amplitude relacionadas às falhas incipientes nos rolamentos.

## Capítulo 4

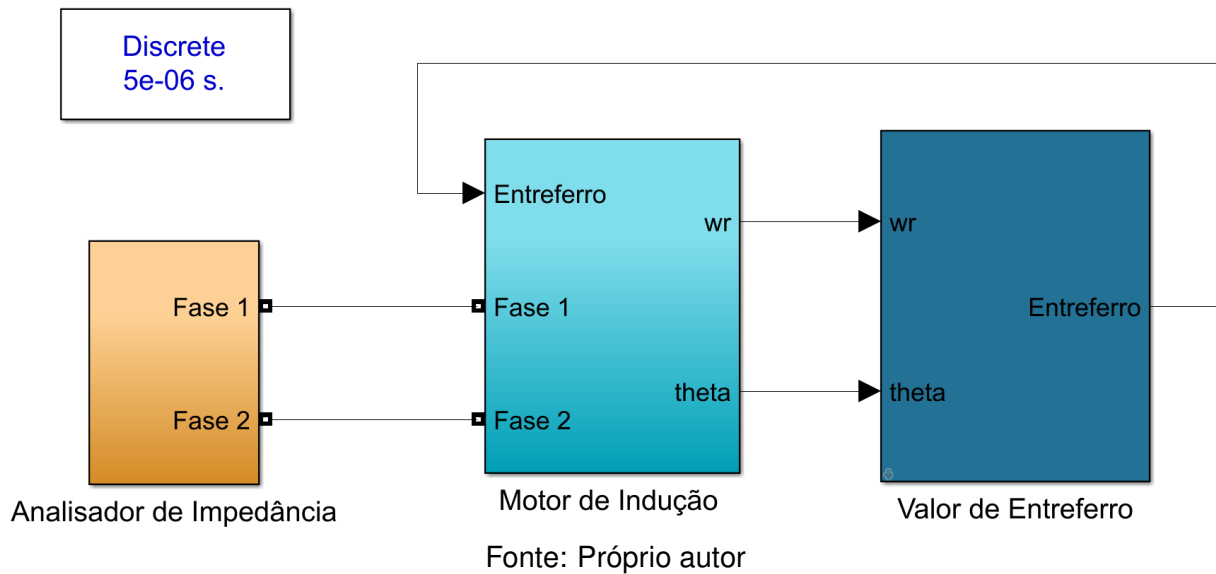
# Simulação e Comparação dos Sinais de Impedância

*O objetivo da simulação apresentada neste capítulo é de verificar as modelagens apresentadas no Capítulo 2 e compará-las com sinais reais. Os resultados aqui obtidos são relevantes pois certificam que os efeitos das falhas nos rolamentos sobre a impedância do MIT estabelecidos pela teoria são de fato observados nas simulações e na prática.*

---

Uma vez obtidos os modelos matemáticos do comprimento do entreferro e do dispositivo analisador de impedância, é possível implementá-los em software e comparar os resultados teóricos com os sinais adquiridos. Primeiro, a equação do comprimento do entreferro (2.4) foi implementada no software Simulink, e os valores de *air gap* resultantes foram usados como entradas para um modelo de MIT. O circuito do analisador de impedância multifrequência também foi modelado e os sinais de medição foram injetados nos enrolamentos desse mesmo modelo de MIT. A modelagem do dispositivo resume-se na replicação do circuito com componentes da biblioteca *Specialized Power Systems*. Já a variação do entreferro foi implementada utilizando-se blocos lógicos e matemáticos. Ainda, a modelagem da impedância do motor pôde ser simplificada de acordo com o trabalho de (FAIZ; OJAGHI, 2011), que mostra que a indutância mútua das fases varia proporcionalmente ao nível de excentricidade. Dessa forma, a impedância equivalente do motor pode ser representada por uma impedância de valor variável proporcional ao comprimento do entreferro já descrito anteriormente. O modelo utilizado foi representado na Figura 10 e, com mais detalhes, no Apêndice B. Por fim, as leituras teóricas dos sinais de impedância foram obtidas usando osciloscópios virtuais.

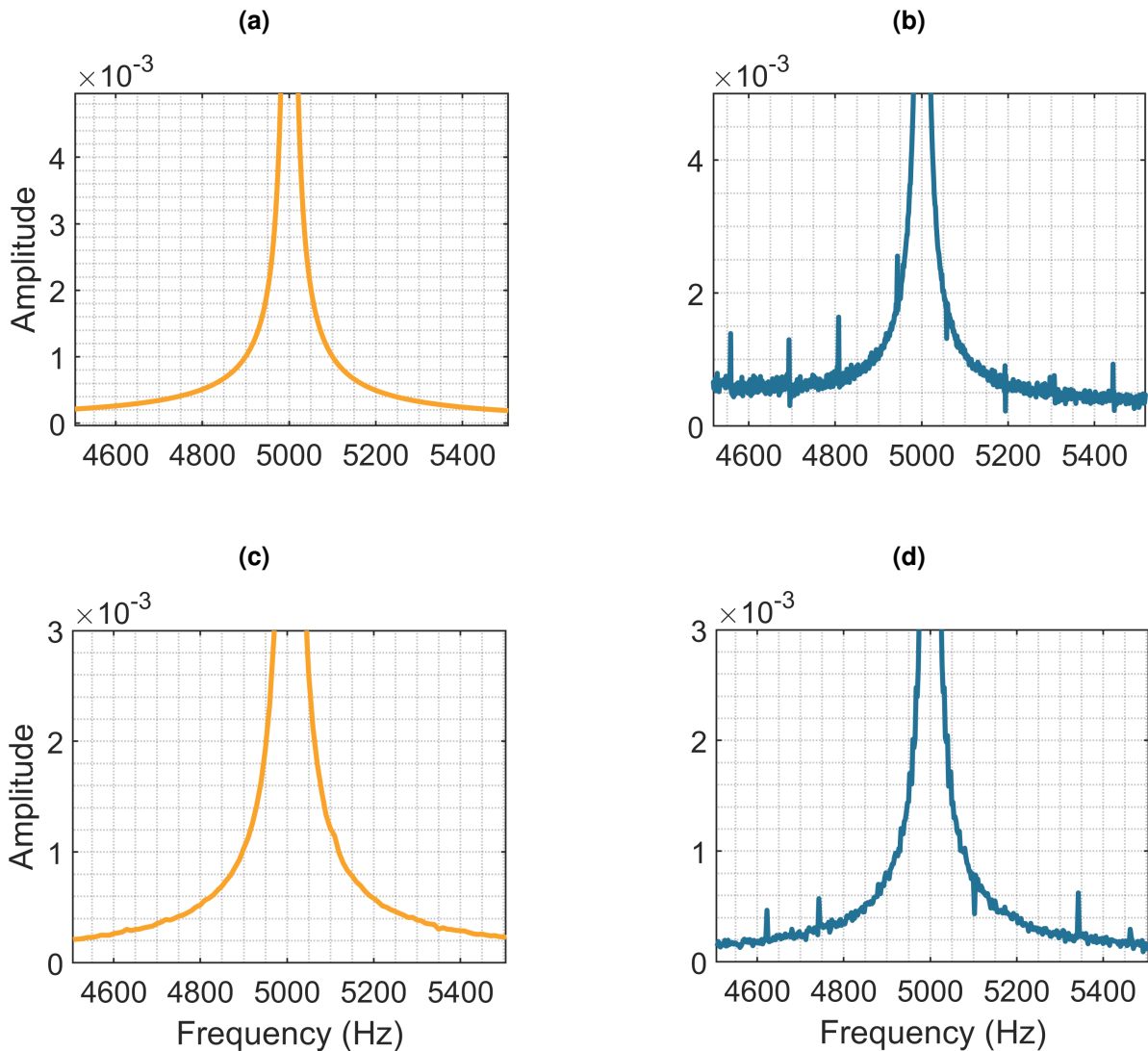
Figura 10 – Modelo utilizado no Simulink



Depois disso, foi realizado o procedimento experimental para a aquisição de dados reais de impedância usando o novo sensor. A metodologia utilizada foi detalhada na Seção 5. No entanto, para fins de comparação, a Figura 11 mostra tanto o espectro de frequência dos sinais de impedância simulados, quanto o espectro dos sinais adquiridos. Ambos para condição de rolamento saudável (entreferro nominal e constante) e um rolamento com defeito. Tanto na simulação quanto nos valores adquiridos em bancada, foi medida a impedância da máquina injetando-se apenas um sinal com frequência de 5 kHz.

Como o *range* de frequências utilizado nos experimentos foi de 1 à 10 kHz, foi escolhida a frequência de 5 kHz para a simulação (a escolha dos valores de frequência dos sinais injetados foi justificada na metodologia). Além disso, foi aplicado apenas um valor de frequência pois o objetivo foi apenas comparar o efeito teórico da variação de entreferro nos sinais de impedância com os resultados práticos. Portanto, isto não representa o método de diagnóstico completo, que será apresentado posteriormente. Assim, ainda na Figura 11, é nítida a semelhança entre os espectros dos sinais simulados e dos sinais amostrados tanto para a condição saudável quanto para condição de falha. Demonstrando que o modelo matemático está coerente com a realidade e que os danos incipientes nos rolamentos realmente afetaram a impedância da máquina.

Figura 11 – Espectros de frequência de: a) Simulação de rolamento saudável. b) Simulação de rolamento com defeito. c) Dados reais de rolamento saudável. d) Dados reais de rolamento com defeito.



Fonte: Próprio autor

Embora a simulação seja uma ferramenta de verificação fundamental, os resultados já eram esperados de acordo com a teoria de processamento de sinais e a teoria dos circuitos elétricos, pois, em termos simplificados, uma corrente de frequência mais alta (5 kHz) está percorrendo uma impedância que varia em uma frequência mais baixa (as frequências relevantes de falha em rolamentos geralmente não passam de 1 kHz, perdendo consideravelmente sua amplitude após este valor (DUAN; LIAO; WANG, 2021)). Portanto, espera-se que a frequência da falha seja modulada pela frequência fundamental do sinal injetado, ou seja, exatamente o que foi observado para os resultados onde havia falha (Figura 11b e 11d).

É importante ressaltar que o valor exato de impedância e de suas variações não são necessariamente o objetivo da simulação, mas sim o comportamento dos sinais de impedância nas duas condições propostas (com e sem falha nos rolamentos). Por fim, é imprescindível destacar que o modelo utilizado no software Simulink, baseado na literatura citada, não contempla tensões desbalanceadas. No entanto, neste trabalho, durante os experimentos, as tensões desbalanceadas foram aplicadas como simulação de condições industriais, como explicado anteriormente. Contudo, este fato não desabona os resultados comparativos desta simulação, pois os sinais comparados foram aquisitados com alimentação balanceada. Além disso, como será apresentado nos resultados, as tensões desbalanceadas não afetaram a classificação da falha. Não obstante, a simulação computacional do MIT sob tensão desbalanceada e seus efeitos poderão, sim, ser objetos de estudos futuros.

Finalmente, algumas considerações devem ser feitas com relação aos resultados. As falhas incipientes nos rolamentos são conhecidas como fontes de sinais não estacionários e transitórios devido à inércia mecânica e à complexidade da construção do rolamento (GAO; YAN, 2006). Além disso, conforme mencionado na revisão da literatura, essas falhas têm uma natureza impulsiva, o que aumenta o número de harmônicas de frequência — fenômeno que é representado na Equação (2.4) pela função Delta de Dirac. Portanto, espera-se observar valores de frequência irregularmente espaçados em torno da componente fundamental de 5 kHz do sinal injetado. Adicionalmente, a posição das harmônicas também podem variar dependendo da velocidade do rotor (STACK; HABETLER; HARLEY, 2003) e número de polos (FAIZ; OJAGHI, 2011). Entretanto, isso é, na verdade, uma vantagem do sistema proposto pois, nesse caso, a modulação do sinal evita a laboriosa busca por frequências específicas para realizar um diagnóstico e, além disso, atua como um filtro por dois motivos. Em primeiro lugar, a faixa de alta frequência não é afetada pelo ruído produzido por fontes de alimentação (quando estas forem senoidais, trifásicas e em 60 Hz) e nem pelas vibrações mecânicas que não afetem a impedância da máquina, pois estas apresentam frequências de menor escala, mesmo considerando suas harmônicas. Em segundo lugar, o ruído proveniente de fontes quaisquer que não modifiquem a impedância equivalente do motor não será modulado pelo sinal injetado.

## Capítulo 5

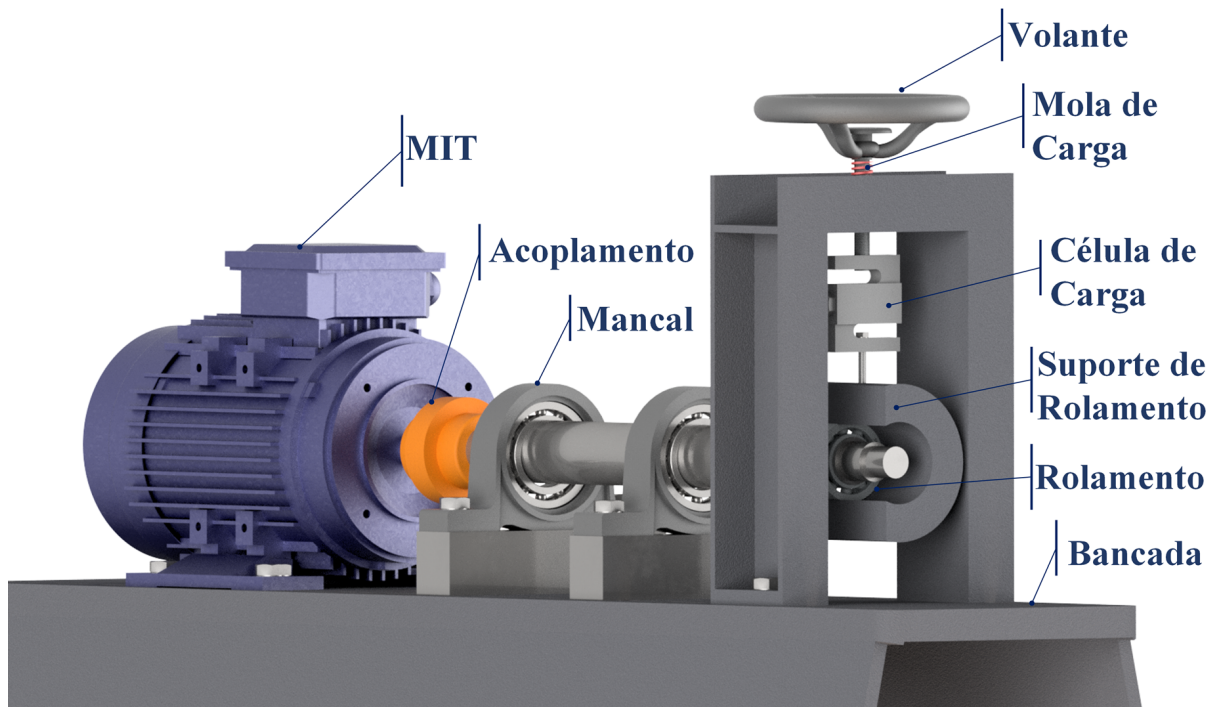
# Ensaio Experimentais

*Neste trabalho, todos os experimentos e aquisições de dados foram realizados com foco na confiabilidade e no controle do ambiente, com o objetivo de padronizar os resultados experimentais e garantir a repetibilidade das medições. Este capítulo descreve como a metodologia experimental foi cuidadosamente projetada para garantir a solidez científica dos resultados. Além disso, ele foi dividido em três subseções. Primeiro, foi descrito o equipamento usado para danificar os rolamentos. Em seguida, a montagem do MIT e de outras máquinas auxiliares foi introduzida. Por fim, foi apresentada a metodologia experimental para a medição da impedância.*

## 5.1 Método de desgaste de rolamentos

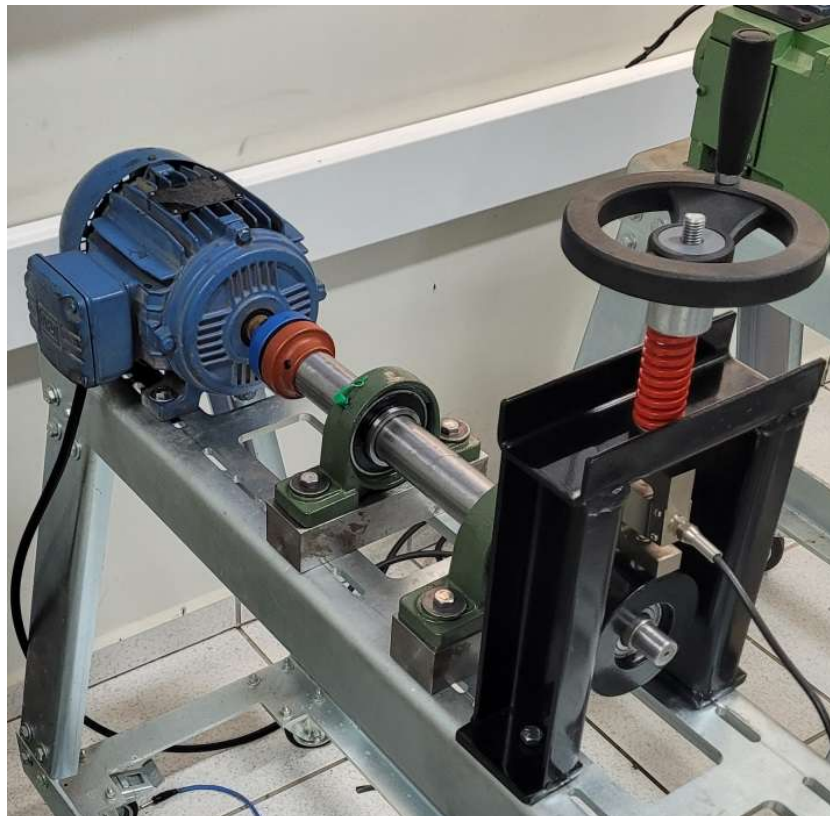
Um novo equipamento experimental foi proposto para o desgaste de rolamentos. Nas indústrias, os rolamentos estão sujeitos a fortes estresses mecânicos, cargas radiais e perda de lubrificação, o que leva a um desgaste severo por atrito. Portanto, essas condições foram reproduzidas pelo equipamento de desgaste. Primeiro, um MIT auxiliar foi conectado ao rolamento por meio de um eixo. Esse eixo foi fixado por dois mancais e o rolamento de teste foi encaixado em um suporte. Essa montagem está detalhada na Figura 12 e uma foto real na Figura 13. Além disso, uma haste com uma mola de carga foi fixada no suporte do rolamento para simular uma carga radial. Um volante foi usado para controlar o comprimento da mola, e uma célula de carga foi usada para medir a força aplicada ao rolamento, como visto na Figura 14. Um dispositivo de aquisição de dados (NI-USB-6211) com conectividade ao software Matlab foi usado para monitorar a força de tração em tempo real por meio de uma interface de usuário (IU) especialmente projetada (mais detalhes sobre a IU foram apresentados na próxima seção).

Figura 12 – Ilustração do equipamento de desgaste



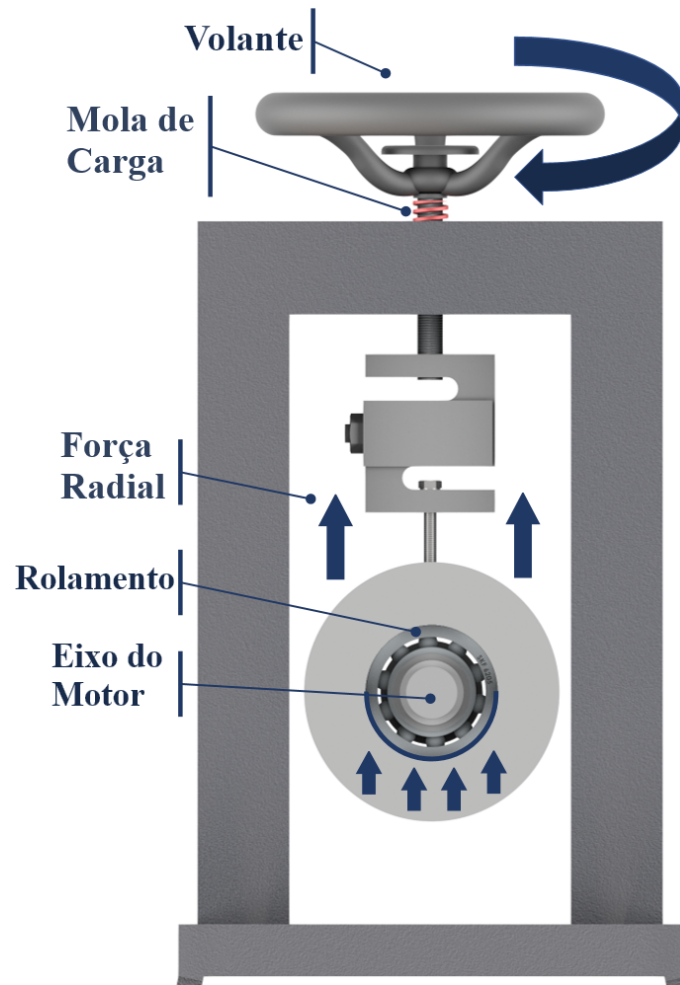
Fonte: Próprio autor

Figura 13 – Foto do equipamento de desgaste



Fonte: Próprio autor

Figura 14 – Ilustração do equipamento de desgaste (força aplicada ao rolamento)



Fonte: Próprio autor

O procedimento tomado para a aplicação dos danos nos rolamentos pode ser resumido nas etapas a seguir:

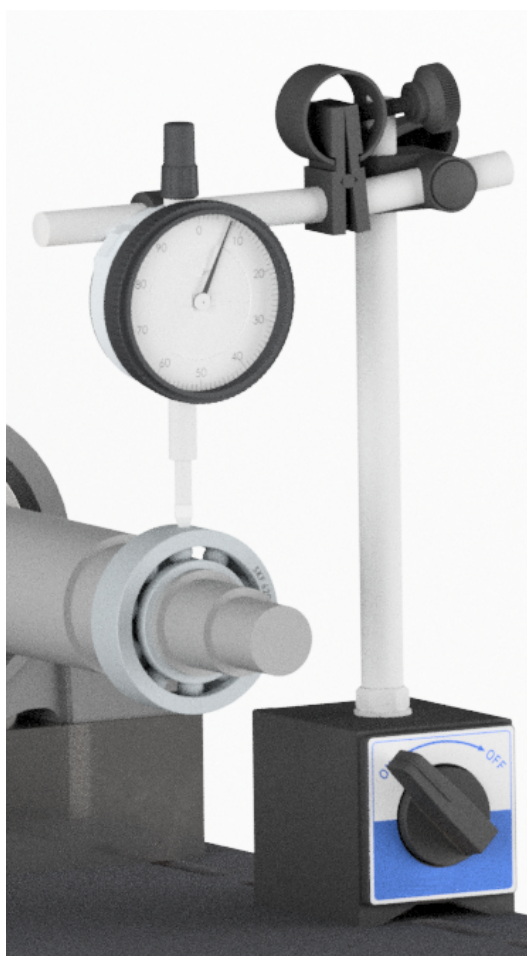
- Para simular a perda de lubrificação, a graxa de fábrica foi substituída por uma quantidade padrão de pasta abrasiva antes de os rolamentos serem colocados no suporte;
- Os rolamentos foram vedados novamente;
- O volante foi ajustado para atingir 80 kg de carga radial (escolhida para estar dentro da capacidade máxima do rolamento). Este valor foi acompanhado através da célula de carga e uma IU;
- O motor auxiliar foi ativado em intervalos de 30 minutos até atingir o nível

de dano pré-estabelecido, que foi medido por um relógio comparador com passo de  $10\ \mu\text{m}$ ;

- Todos os rolamentos defeituosos foram limpos e lubrificados novamente antes dos experimentos de detecção de falhas, que foram descritos na próxima seção. A pasta abrasiva foi substituída após os danos pois sua função era apenas de acelerar o processo de deterioração do material.

O relógio comparador foi montado como visto na Figura 15.

Figura 15 – Ilustração do equipamento de medição de falha.



Fonte: Próprio autor

Antes do procedimento, os rolamentos apresentavam uma folga máxima de 10 a  $20\ \mu\text{m}$  entre as esferas e as pistas em qualquer ponto da circunferência, o que corresponde à tolerância especificada pelo fabricante (SKF-6205). Entretanto, após o teste de desgaste, foram observados valores consideravelmente mais altos em pontos específicos, o que caracteriza uma falha no rolamento. Todas as medições foram feitas

quando os rolamentos atingiram a temperatura ambiente. Portanto, foram obtidas três classes diferentes de condições de rolamento: um rolamento novo e saudável (6205, SKF), falha de 150  $\mu\text{m}$  (6205, SKF) e falha de 250  $\mu\text{m}$  (6205, SKF). Esses valores foram escolhidos com base em um dos conjuntos de dados de falha de rolamentos amplamente utilizados em publicações de alto fator de impacto (Western Reserve University, 2023), no qual a menor profundidade de falha é de 279  $\mu\text{m}$ . Portanto, as falhas neste trabalho podem ser definidas, de forma confiável, como incipientes. Por fim, quando as três classes de rolamentos estavam prontos, foram realizados os experimentos com o novo sensor.

Em conclusão, é importante notar que, mesmo sem determinar qual componente específico do rolamento foi avariado, é fato que as falhas geradas produziram comprovadamente uma excentricidade, mesmo que transitória, no eixo do motor. Portanto, isto é suficiente para afirmar que esse comportamento modificará a impedância do MIT, como visto na seção anterior através de simulações e resultados práticos.

## 5.2 Configuração das máquinas elétricas

A principal bancada consiste em um MIT de 5 cv acoplado a um gerador CC por meio de um medidor de torque. Esses dispositivos foram devidamente alinhados e firmemente parafusados em uma bancada de metal. O gerador CC foi aplicado como uma carga mecânica e controlado por sua tensão de campo usando uma fonte CA ajustável juntamente com uma ponte retificadora. Além disso, seu circuito de armadura foi conectado a uma carga resistiva. O motor de indução foi alimentado em delta por uma fonte de alimentação trifásica controlada por software, o que permite ajustar um amplo conjunto de parâmetros elétricos, especificamente as tensões de fase. Por fim, a velocidade do rotor foi monitorada por meio de um *encoder* óptico, a temperatura da carcaça por um termopar e medições auxiliares por multímetros. Algumas informações sobre os equipamentos foram disponibilizadas a seguir. Um ponto importante para se ressaltar é que o método desenvolvido só foi testado para motores conectados em ligação delta.

**Motor de indução**

- Carcaça: L100L;
- Potência: 3.7 kW (5 HP-cv);
- Número de polos: 4;
- Frequência: 60 Hz;
- Rotação nominal: 1740 rpm;
- Escorregamento: 3.33 %;
- Tensão nominal: 220/380 V;
- Corrente nominal: 14.1/8.15 A;
- Corrente de partida: 120/69.3 A;
- $I_p/I_n$ : 8.5;
- Corrente a vazio: 8.60/4.98 A;
- Conjugado nominal: 2.07 kgfm;
- Conjugado de partida: 440 %;
- Conjugado máximo: 400 %;
- Categoria: N;
- Classe de isolamento: F;
- Fator de serviço: 1.25;
- Regime de serviço: S1;
- Método de partida: Partida direta;
- Temperatura: -20 °C a +40 °C;
- Grau de proteção: IP55;
- Massa aproximada: 39.6 kg.

**Gerador CC**

- Potência nominal: 10 kW
- Tensão de campo: 400 V;
- Tensão de armadura: 380 V;
- Frequência: 60 Hz;
- Corrente de armadura: 26 A;
- Corrente de campo: 0,75 A.

**DAQ 6211 - NI**

- Resolução ADC: 16 bits;
- Taxa de aquisição: Canal único - 250 kS/s;
- Taxa de aquisição: Canais múltiplos - 250 kS/s;
- Tensão de entrada: ranges -  $\pm 0.2$  V,  $\pm 1$  V,  $\pm 5$  V,  $\pm 10$  V.

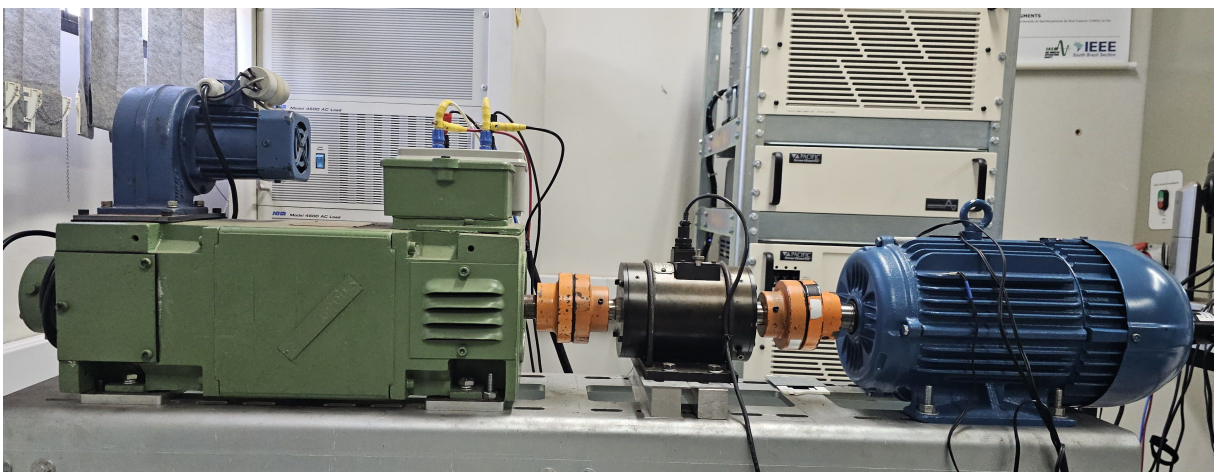
**Fonte Trifásica Programável Pacific Power 360AMX:** potência nominal 12 kW.

**Variac monofásico:** tensão de operação: 0 - 220 V.

**Carga resistiva:** 4 resistores individuais de 1,5 kW - 220 V.

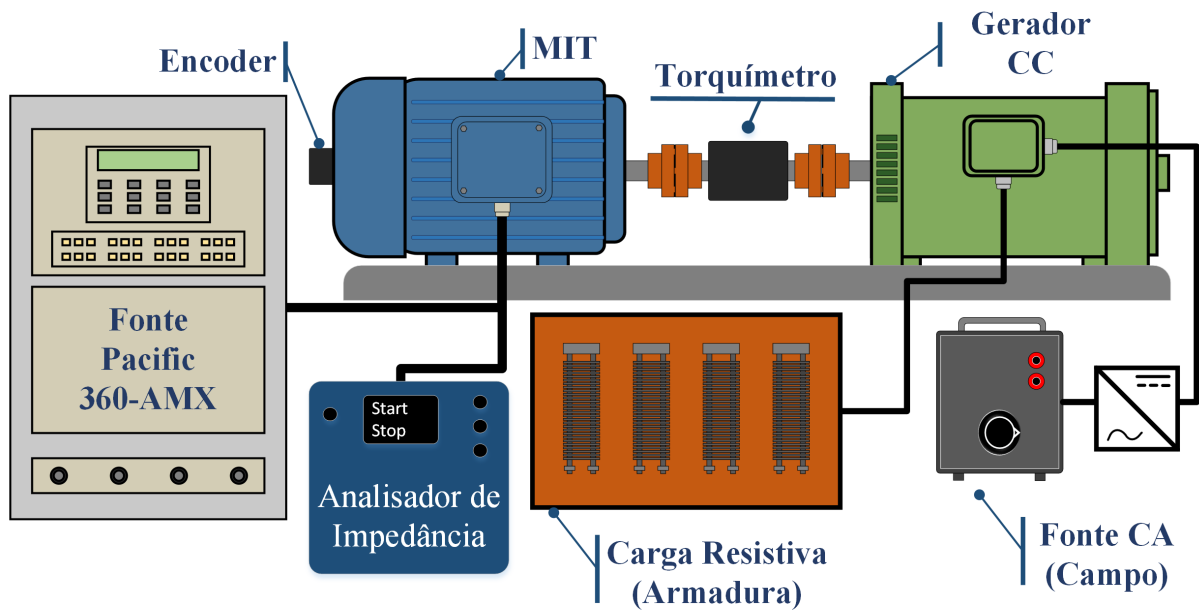
Uma foto das máquinas é mostrada na Figura 16. Além disso, um diagrama com todos os equipamentos foi disposto na Figura 17. O dispositivo de medição de impedâncias foi adicionado à figura para melhor entendimento. No entanto, sua aplicação nos experimentos foi abordada na próxima seção.

Figura 16 – Ilustração do equipamento de medição de falha.



Fonte: Próprio autor

Figura 17 – Ilustração do equipamento de medição de falha.



Fonte: Próprio autor

Nesta seção, foram apresentadas somente as descrições dos equipamentos, suas funcionalidades, capacidades e como foram conectados elétrica e mecanicamente entre si. Na próxima seção, a dinâmica dos experimentos de aquisição de dados foi melhor apresentada.

### 5.3 Aquisição de dados

Para melhor compreensão da dinâmica dos experimentos, as etapas de aquisição de dados foram enumeradas a seguir:

1. Três rolamentos foram danificados, conforme descrito na seção anterior;
  2. As máquinas elétricas foram montadas conforme descrito na seção anterior;
  3. O rolamento traseiro saudável foi instalado no MIT;
- obs.** A fonte de alimentação foi configurada para que o MIT trabalhasse em uma das condições estudadas neste trabalho (ver Tabela 1). Em cada uma delas, aguardou-se até a constatação de que o motor estivesse em regime permanente, para que os parâmetros fossem os mesmos em todas as condições (temperatura, torque, carregamento, velocidade, etc). Para esse monitoramento, foram utilizados os transdutores descritos na seção anterior, além de uma interface especialmente projetada no software Matlab (será apresentada posteriormente nesta seção);
4. Foi ativado o equipamento de medição de impedância para realizar 960 leituras (cada leitura corresponde ao valor de impedância média relativa a 1 segundo aplicando 1 frequência específica) para o rolamento saudável (sempre observando os cuidados já descritos), conforme condições descritas na Tabela 1.
  5. O rolamento traseiro defeituoso de 250  $\mu\text{m}$  foi instalado no TIM;
  6. Repetição do item 4;
  7. Foi ativado o equipamento de medição de impedância para realizar 960 leituras para o rolamento defeituoso (sempre observando os cuidados já descritos), conforme descrito na Tabela 1;
  8. O rolamento traseiro defeituoso de 150  $\mu\text{m}$  foi instalado no TIM;
  9. Repetição do item 4;

10. Foi ativado o equipamento de medição de impedância para realizar 960 leituras para o rolamento defeituoso (sempre observando os cuidados já descritos), conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1 – Condições de Teste e quantidade de experimentos

<b>Rolamento Saudável</b>			
<b>Carregamento</b>	<b>Desbalanço de tensão</b>		
	<b>0%</b>	<b>3%</b>	<b>5%</b>
<b>80%</b>	160	160	160
<b>100%</b>	160	160	160

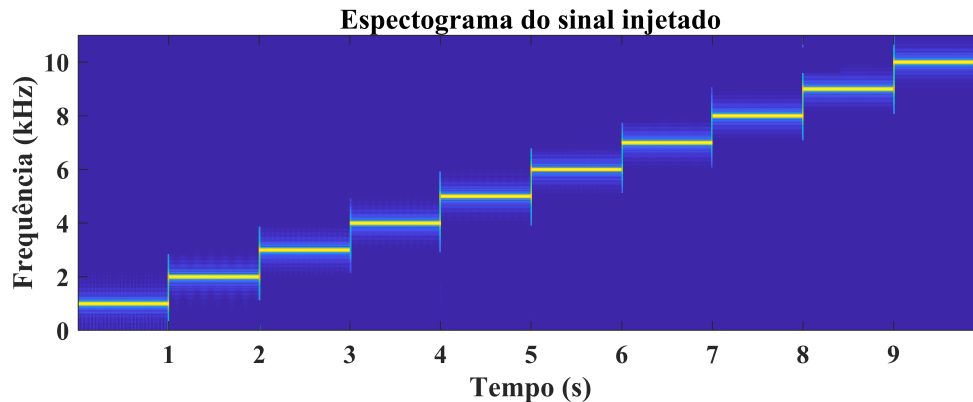
<b>Falha: 150 <math>\mu\text{m}</math></b>			
<b>Carregamento</b>	<b>Desbalanço de tensão</b>		
	<b>0%</b>	<b>3%</b>	<b>5%</b>
<b>80%</b>	160	160	160
<b>100%</b>	160	160	160

<b>Falha: 250 <math>\mu\text{m}</math></b>			
<b>Carregamento</b>	<b>Desbalanço de tensão</b>		
	<b>0%</b>	<b>3%</b>	<b>5%</b>
<b>80%</b>	160	160	160
<b>100%</b>	160	160	160

Para viabilizar o experimento, o dispositivo injetou uma onda de 10 segundos composta de senoides que variam de 1 kHz a 10 kHz, com um passo de frequência de 1 kHz por segundo (Figura 18) e, ao mesmo tempo, leu a impedância por meio do sensor resistivo. Isso foi repetido 96 vezes para cada condição, gerando assim as 960 leituras com período de 1 segundo. Deve-se observar que, embora 10 frequências diferentes tenham sido usadas nos experimentos, o diagnóstico é baseado em apenas 3, como será visto na próxima seção. O *range* de frequências foi escolhido baseado na literatura, visando evitar ruídos comumente observados em estudos de diagnóstico de máquinas elétricas. Operando nessa faixa, as vibrações mecânicas, apesar de possíveis, possuem baixa amplitude. Além disso, buscou-se uma distância segura da frequência de alimentação da máquina, para que os capacitores de filtragem fossem capazes de garantir a operação correta do dispositivo.

Figura 18 – Sinal injetado.

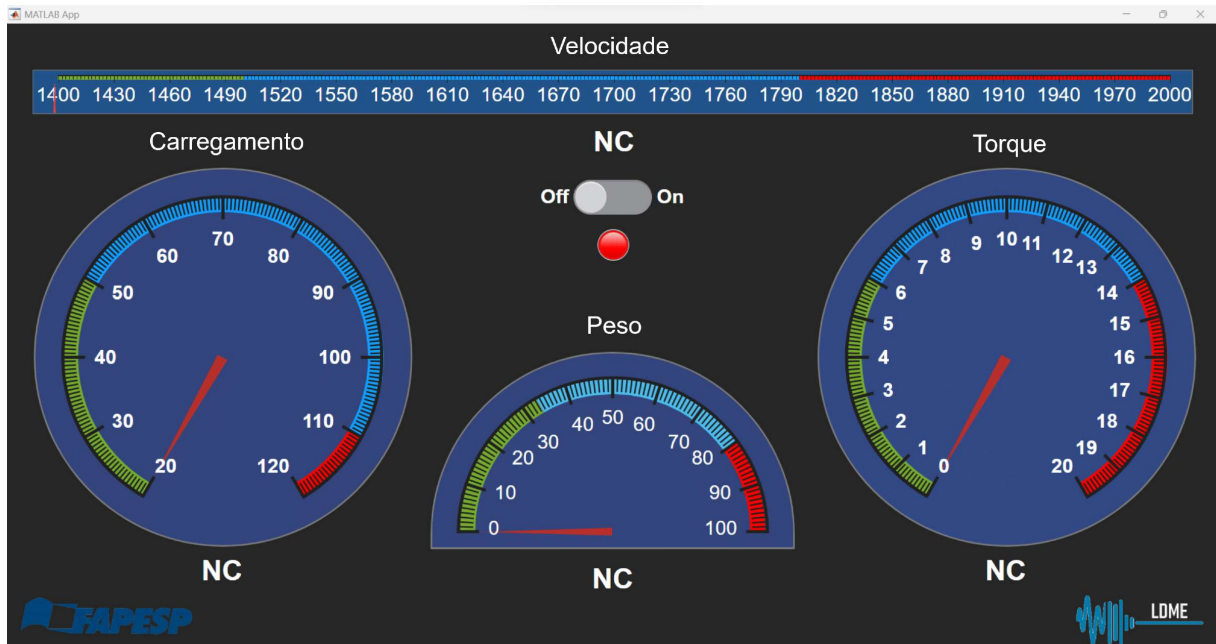


Por fim, optou-se por dez valores diferentes de frequência para que o volume de dados fosse a maior possível e posteriormente, na fase de processamento de sinais, fossem estudadas as frequências com maior eficiência para o monitoramento proposto.

Como já descrito no passo a passo, durante a aquisição de dados, as leituras de impedância foram feitas em 18 condições operacionais: 3 rolamentos diferentes (saudável, 150  $\mu\text{m}$  e 250  $\mu\text{m}$ ), 3 níveis de desequilíbrio de tensão (0, 3 e 5%) e 2 níveis de carga (80 e 100%). As condições e o número de medições dos experimentos são mostrados na Tabela 1. Essas condições de alimentação e carregamento foram aplicadas seguindo um padrão consolidado nos trabalhos de diagnóstico publicados em periódicos de alto fator de impacto. Isso se deve ao fato de que, mesmo que um sistema de monitoramento funcione em uma condição operacional específica, não significa que funcionará em outras condições, dado as interferências que os parâmetros de carregamento e alimentação podem exercer sobre os sinais adquiridos. Portanto, a boa prática rege que os experimentos devem incluir essas variações para garantir a solidez dos resultados.

Reitera-se aqui informações importantes sobre os experimentos, pois há procedimentos essenciais para garantir a confiabilidade dos dados. Primeiro, todas as medições foram feitas sob temperatura constante do MIT, após vários minutos em regime permanente, e monitoradas por um termopar. Além disso, os valores de carga, velocidade e tensão foram mantidos estritamente constantes, de acordo com os valores da Tabela 1. Para essa finalidade, foram usados um medidor de torque, um *encoder* óptico e o software da fonte de alimentação. Eles foram monitorados por uma interface especialmente projetada, que foi baseada em um DAQ e no software Matlab (Figura 19).

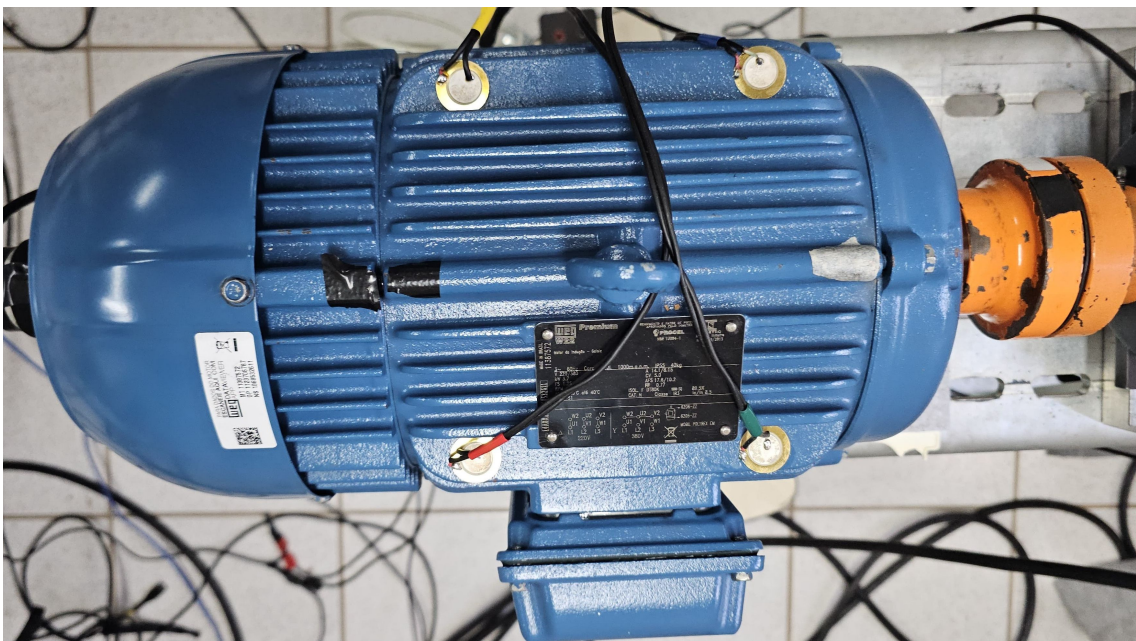
Figura 19 – Interface de Usuário no Software Matlab.



Fonte: Próprio autor

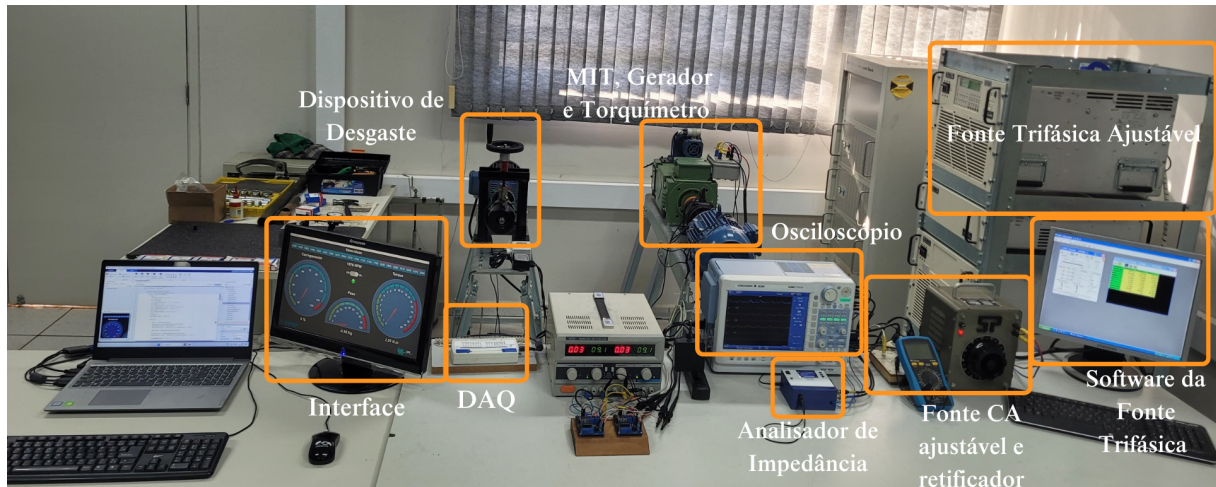
Além disso, quatro sensores de vibração piezoelétricos foram conectados ao motor (Figura 20). Seus sinais foram adquiridos usando o mesmo osciloscópio e simultaneamente com as medições de impedância para comparação posterior. Por fim, uma foto da configuração experimental completa é mostrada na Fig. 21.

Figura 20 – Foto dos sensores de vibração colados no MIT.



Fonte: Próprio autor

Figura 21 – Foto geral do experimento.

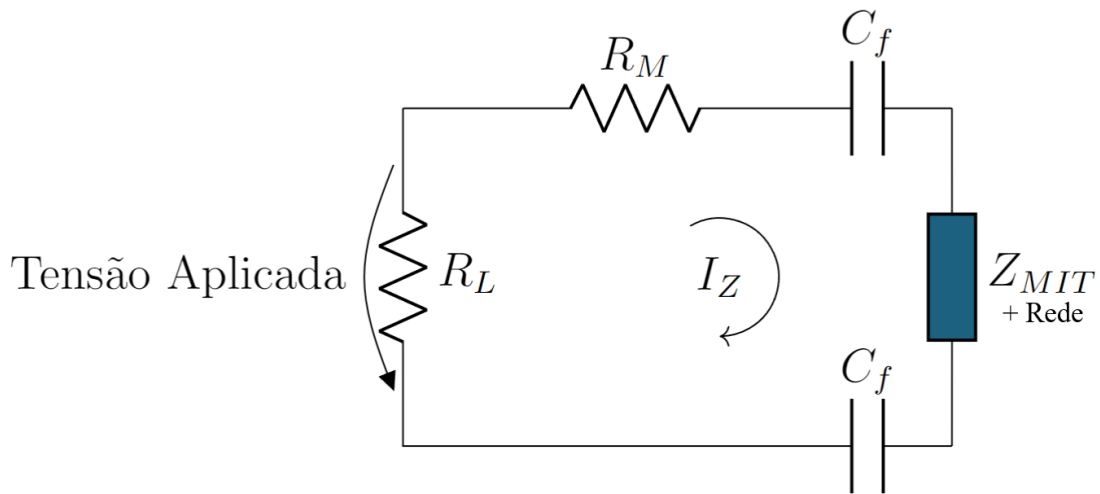


Fonte: Próprio autor

## 5.4 Processamento de Sinais

Conforme mostrado no Capítulo 2, os componentes de frequência introduzidos pelos danos no rolamento afetam diretamente a impedância do MIT. Portanto, o processamento do sinal foi desenvolvido baseado nos valores de impedância medidos. Desta forma, devido as componentes de frequência introduzidas pelas falhas incipientes no sinal de impedância, é esperado que os valores, principalmente de amplitude do sinal lido, varie de acordo com a evolução da falha. Como os componentes do circuito têm valores de impedância conhecidos, é possível calcular a magnitude da impedância equivalente do MIT analisando os dados de tensão e corrente em  $R_M$  e a malha percorrida pela corrente  $I_Z$ , como visto na Figura 22. Primeiro, obtém-se a corrente  $I_Z$  de uma dada amostra por meio da tensão lida sobre o resistor  $R_M$ . Sendo assim, é possível calcular a amplitude da corrente para essa amostra. Em seguida, como a tensão injetada também foi aquisitada, é possível compará-la com o sinal de corrente e calcular a fase entre elas. O software Matlab conta com uma função dedicada para esses cálculos. Desta forma, com os valores de magnitude da tensão aplicada sobre  $R_L$ , a amplitude e fase da corrente  $I_Z$  e os valores de todos os componentes do circuito, exceto a impedância equivalente da máquina, foi possível obter o valor final de  $Z_{MIT}$ . Assim sendo, o processamento de sinal resume-se pela análise da magnitude da impedância do MIT para diferentes frequências.

Figura 22 – Circuito para cálculo da impedância da máquina



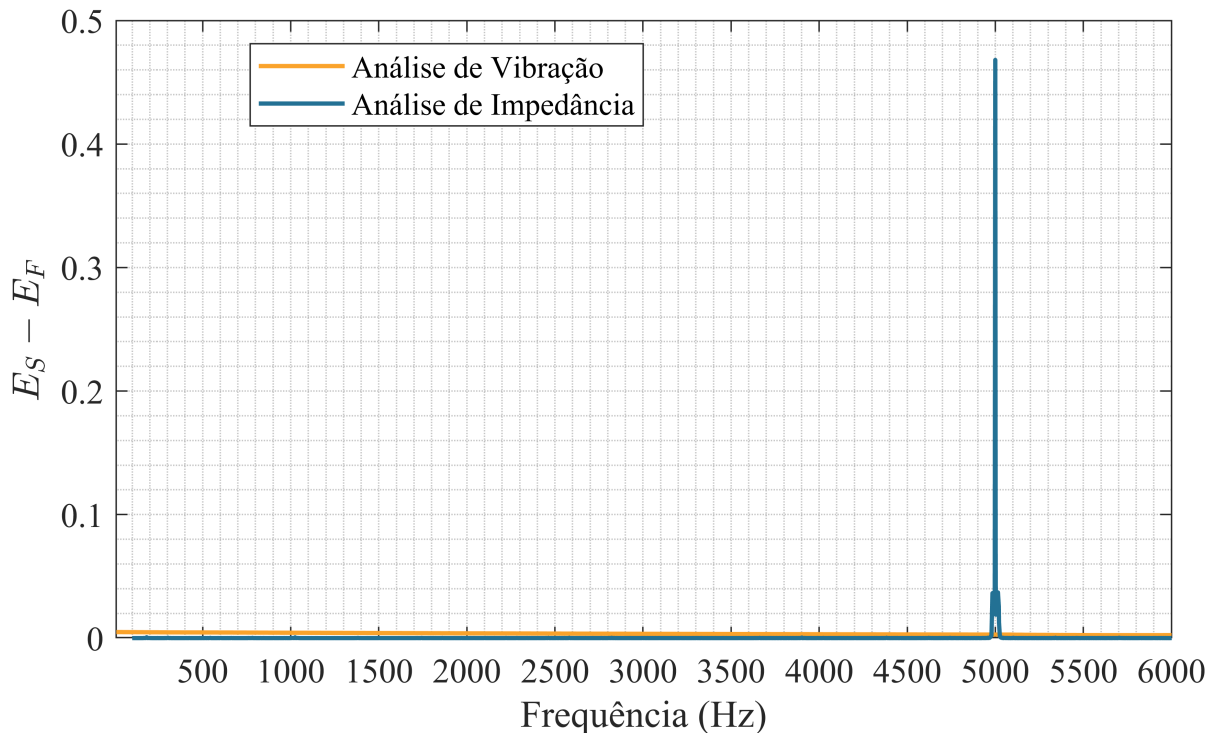
Fonte: Próprio autor

Conforme mencionado anteriormente, os valores de fase e módulo das impedância foram obtidos (através das tensões  $V_M$  e  $V_L$ ) para 10 frequências diferentes em 960 amostras para cada uma das 3 condições de rolamento (ver Tabela 1). Como este trabalho é o primeiro a usar um sistema baseado em impedância para identificar defeitos em rolamentos, foram estudadas várias frequências. No entanto, apenas 3 frequências diferentes foram necessárias para obter os mapas de separação 3D, que foram aplicados para a detecção de falhas. Por fim, 720 amostras adicionais (40 amostras para cada condição de rolamento) foram usadas para validar os resultados. Os resultados foram mostrados no Capítulo a seguir. É importante ressaltar que, para este trabalho, apenas o módulo da impedância foi utilizado nos para atingir os objetivos. No entanto, a fase da impedância também pode ser utilizada nos diagnósticos, o que será realizado em trabalhos futuros.

Como uma análise adicional e comparativa, a Figura 23 foi apresentada para ilustrar o impacto dos defeitos do rolamento nos valores de impedância. Ela mostra o resultado da subtração normalizada:  $|E_S - E_F|$ . Para os sinais obtidos pelo novo sensor,  $E_S$  é o espectro do sinal de impedância para uma condição saudável e  $E_F$  é o espectro da impedância para uma condição defeituosa, ambos referentes a um teste com injeção de sinal de 5 kHz. Para o sensor de vibração, a mesma análise foi apresentada para os dados que foram adquiridos simultaneamente. No caso da análise de vibração,  $E_S$  é o espectro do sinal de vibração para uma condição saudável e  $E_F$  é o espectro do sinal de vibração para uma condição defeituosa, ambos normalizados.

Em suma, quanto maior forem os valores apresentados no gráfico, maior a diferença entre o espectro do sinal saudável e o sinal de falha. Isso porque, quanto maior a diferença entre os valores para condição (saudável e de falha), maior será a sensibilidade, ou seja, a cor que apresentar maiores valores no gráfico comparativo, é correspondente ao transdutor mais sensível.

Figura 23 – Comparação de espectro entre condições de falha e sem falha.



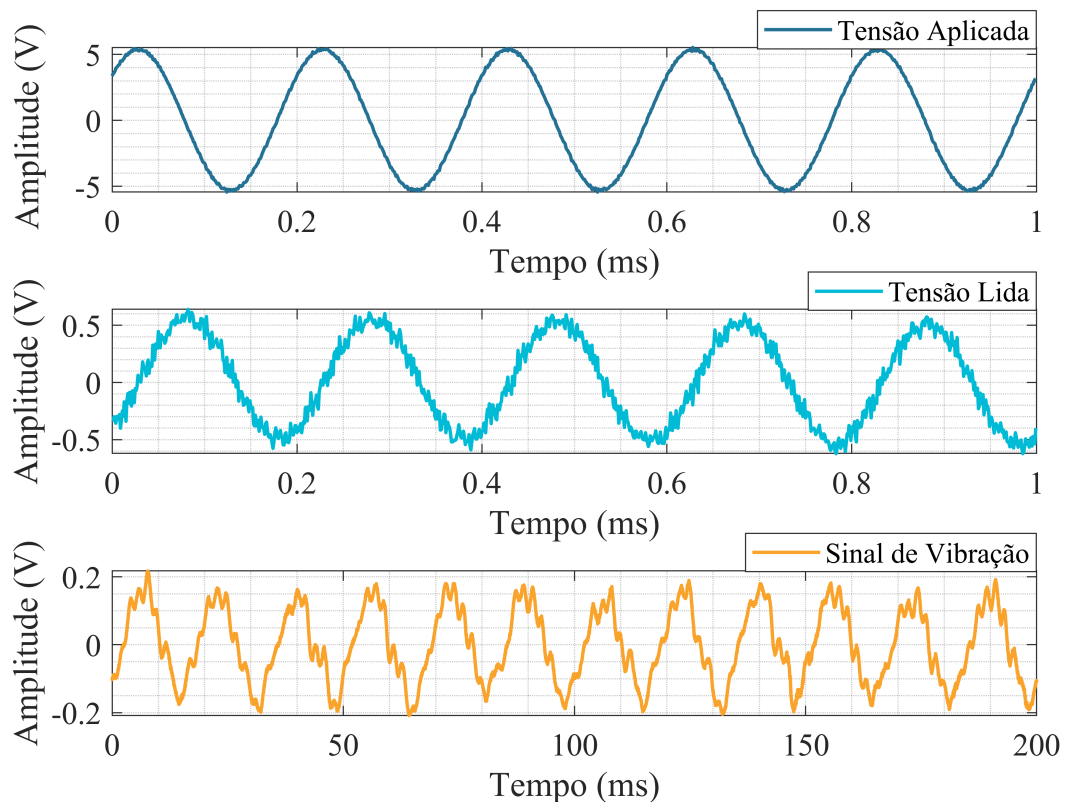
Fonte: Próprio autor

Na figura, destaca-se um pico em azul que pode ser observado na frequência de injeção do dispositivo analisador de impedância, mostrando a diferença nos valores de impedância entre as duas condições. Por outro lado, não foi observado nenhum pico significativo em nenhuma das frequências do espectro para o sensor de vibração. Como os valores de diferença são consideravelmente maiores para o sensor de impedância, fica claro que - dentro dessa métrica - o sensor proposto é mais sensível aos defeitos incipientes de rolamento do que o sensor de vibração. Isso pode ser explicado pois, de acordo com a literatura já apresentada, a detecção incipiente utilizando acelerômetro requer filtragem e processamento mais complexos do que uma análise de espectro, devido aos fortes ruídos e a característica impulsiva da falha. Desta forma, é reforçada a ideia de que no caso da análise de impedância o processamento de sinal pode ser uma

alternativa mais simples e direta. Importante ressaltar que, aqui, foi utilizado o valor de teste de 5 kHz apenas para efeitos comparativos de sensibilidade entre os sensores de vibração e impedância, semelhante ao que foi aplicado para a comparação apresentada no Capítulo 4. Portanto, foram estudadas as diferenças entre a sensibilidade dos transdutores e não métodos completos de monitoramento.

Por fim, para apresentar os sinais adquiridos durante os experimentos, foi inserida a Figura 24. Pode-se observar o sinal injetado nos enrolamentos do MIT, a tensão lida sobre o resistor de medição e o sinal fornecido por um sensor de vibração. A diferença na escala do eixo x (tempo) deve-se as diferentes frequências dos sinais em questão. Enquanto a frequência injetada foi de 5 kHz (escolha da frequência apenas para exemplificação), o sinal de vibração é formado por frequências consideravelmente mais baixas. Portanto, se fossem representadas em intervalos de tempo iguais, a visualização de um dos dois sempre seria comprometida.

Figura 24 – Sinais adquiridos pelo osciloscópio



Fonte: Próprio autor

## Capítulo 6

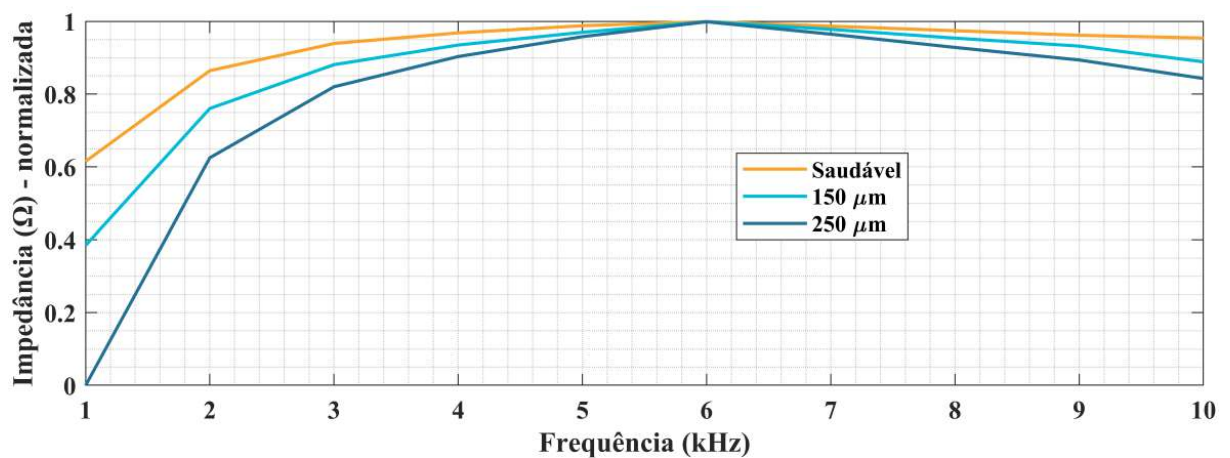
# Análise dos resultados

*Neste Capítulo, os resultados dos experimentos e da aplicação das técnicas de processamento serão apresentados. Por fim, os gráficos e valores resultantes da aplicação do novo dispositivo analisador de impedância foram analisados e discutidos.*

### 6.1 Curvas de impedância

Como forma de análise preliminar dos dados obtidos através dos experimentos, foram traçadas as curvas de impedância abrangendo todas as frequências injetadas durante os testes. Cada valor observado no eixo y é a média de todos os valores de impedância calculados para cada frequência e para cada uma das três condições (ver Tabela 1). O resultado foi apresentado na Figura 25.

Figura 25 – Curvas de impedância.



Fonte: Próprio autor

As curvas resultantes podem ser interpretadas como a constatação da sensibilidade do transdutor proposto às variações no entreferro causadas pelos danos

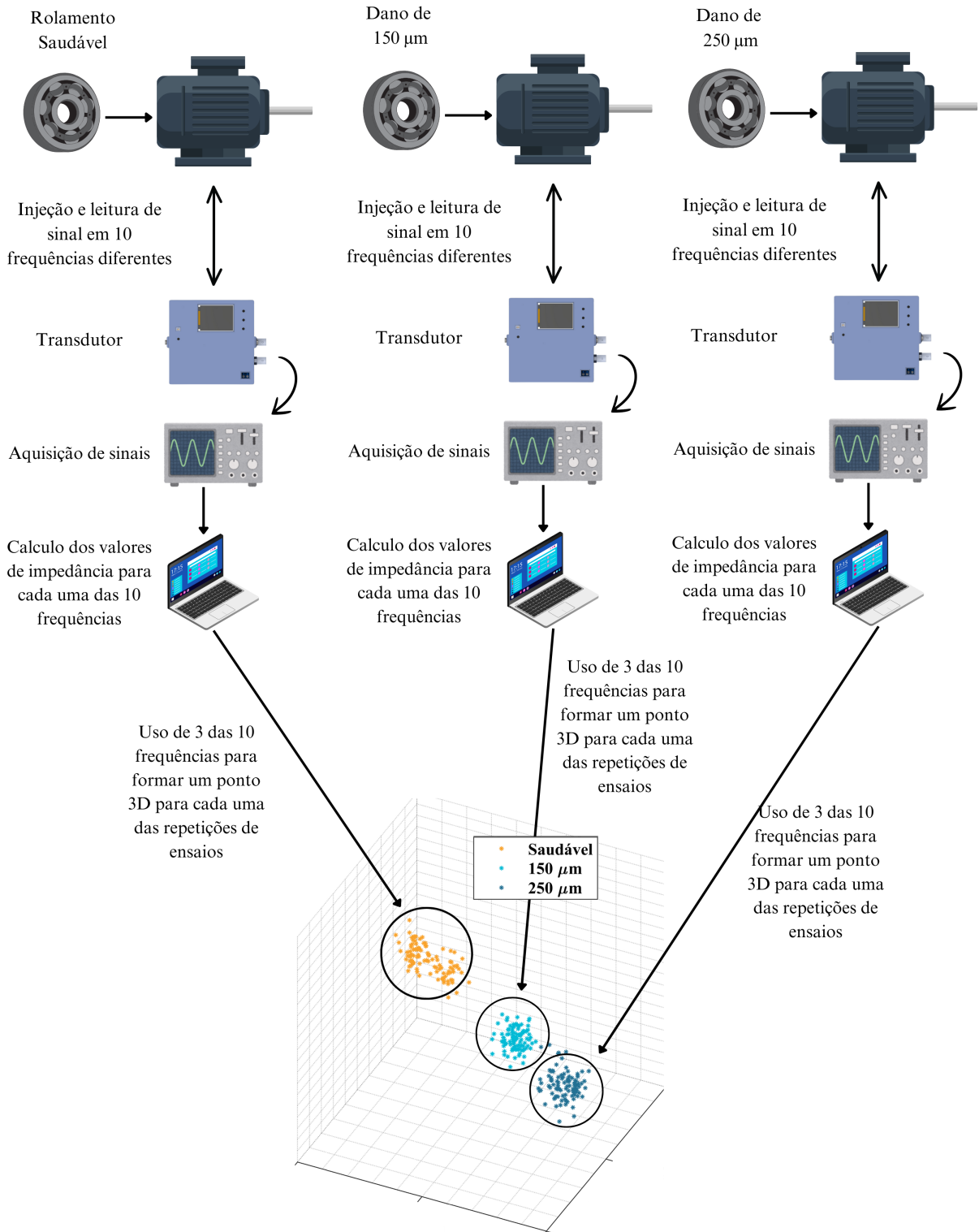
incipientes nos rolamentos. Isso porque é nítida a diferença entre as curvas relativas ao rolamento saudável, com dano de  $150 \mu\text{m}$  e  $250 \mu\text{m}$ . Assim, ficou demonstrada a variação média dos valores do módulo da impedância para cada uma das condições.

No entanto, devido aos valores serem resultado da média de toda amostragem, trata-se de uma análise mais genérica, que requer uma análise mais aprofundada. A partir deste ponto, poderiam ser utilizadas algumas métricas já conhecidas como, por exemplo, utilizar valores individuais de amostras para geração de diversas curvas de impedância e aplicar as métricas CCDM e RMSD entre elas (CAMPOS *et al.*, 2023) ou, também, métodos de mapeamento geométrico, como mapas 3D. Este último foi escolhido devido a representação visual simplificada e a capacidade de avaliação de cada uma das amostras em relação ao todo.

## 6.2 Mapas 3D e Clusterização

Os mapas 3D são amplamente utilizados para classificação de falhas. O método de diagnóstico é simplificado e dispensa o uso de redes neurais (ALHAWARAT; HEGAZI, 2018; QIN *et al.*, 2017). Ele se baseia na representação 3D de todos os pontos amostrados para cada condição de falha, a fim de observar se há uma distribuição geométrica formando grupos bem definidos relativos a cada uma dessas condições. Um grupo de pontos relacionado à mesma condição é chamado de cluster e o centro geométrico do cluster é chamado de centroide. Quanto mais distantes os pontos de condições diferentes estiverem entre si e quanto mais perto os pontos da mesma condição se encontrarem, maior é a qualidade do mapa. Essa característica pode ser mensurada pela métrica Silhouette, que varia entre -1 e 1. Quanto mais próximo a métrica Silhouette se aproximar de 1, maior será a taxa de acerto. Isso se deve ao método de diagnóstico através do mapa 3D, que consiste em calcular a distância entre uma amostra desconhecida e todos os centroides definidos por experimentos anteriores. A amostra pode ser relacionada à condição que possui o centroide mais próximo ao seu ponto cartesiano. Neste trabalho, as métricas Silhouette e a distância entre centroides foram utilizadas para avaliação dos resultados. Para a formação do mapa 3D, os eixos foram associados aos valores de impedância para três frequências. Um fluxograma de como os resultados foram obtidos se encontra na Figura 26.

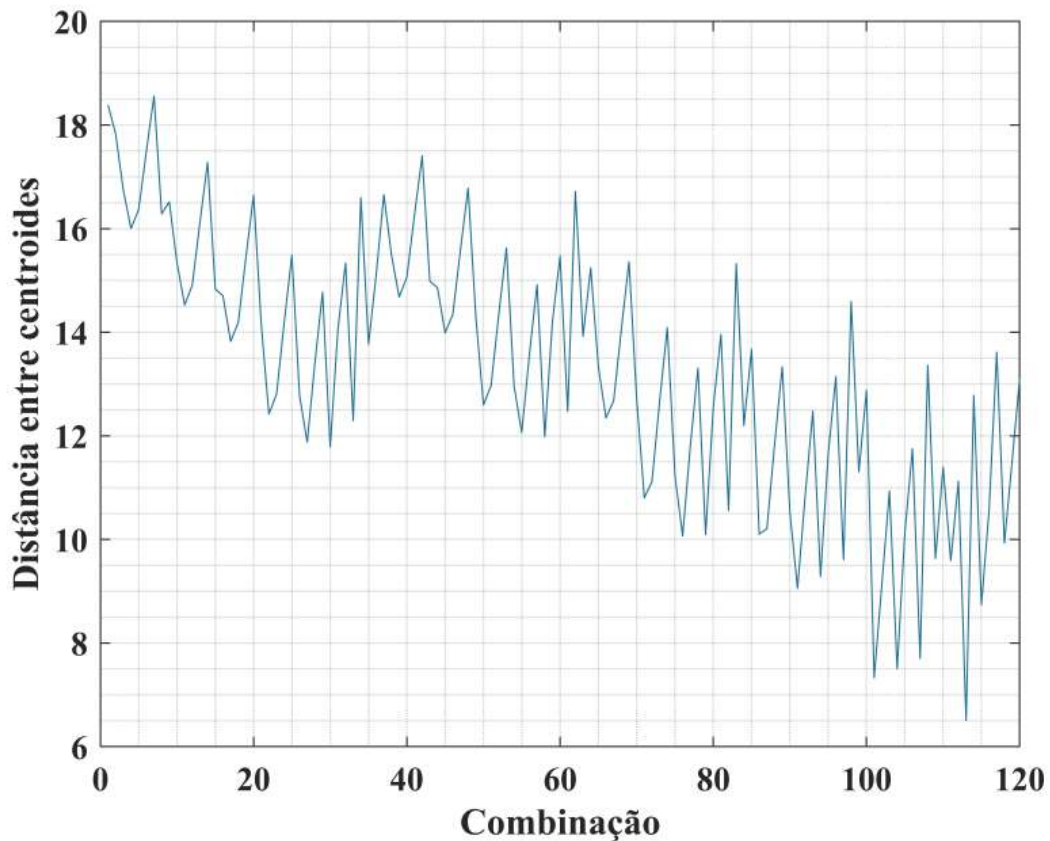
Figura 26 – Fluxograma de obtenção dos resultados



Fonte: Próprio autor

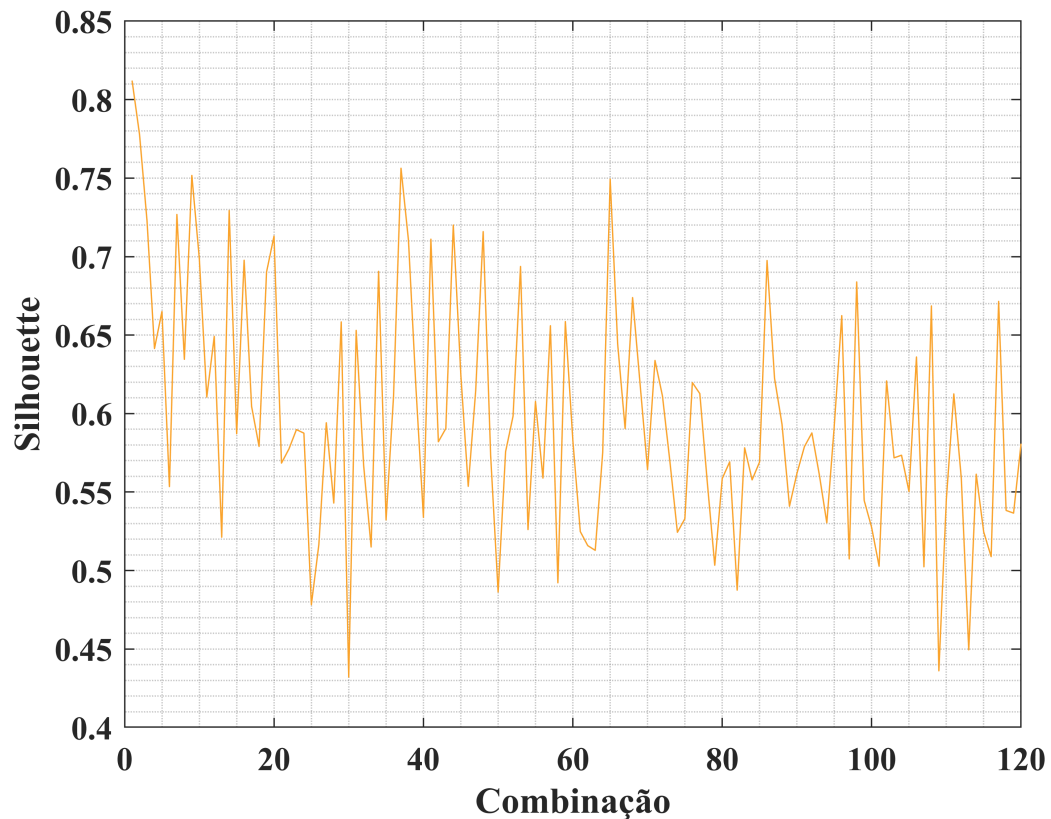
Assim, conforme mencionado acima, os gráficos 3D normalizados permitiram a classificação da falha atribuindo os valores de amplitude de impedância de 3 frequências diferentes aos eixos x, y e z. Como foram aplicadas 10 frequências diferentes, havia 120 combinações de 10 frequências tomadas de 3 em 3. Apesar da eficácia em geral de todas as combinações, para evitar o prolongamento desnecessário do documento, os resultados a seguir são referentes às combinações de eixos com melhores resultados. Para analisar os melhores resultados, foram calculadas as distâncias entre os centroides do agrupamento de cada condição e o índice Silhouette para todas as 120 combinações de frequências. Os resultados estão dispostos na Figura 27 e 28.

Figura 27 – Valores de distância entre centroides



Fonte: Próprio autor

Figura 28 – Valores do índice Silhouette

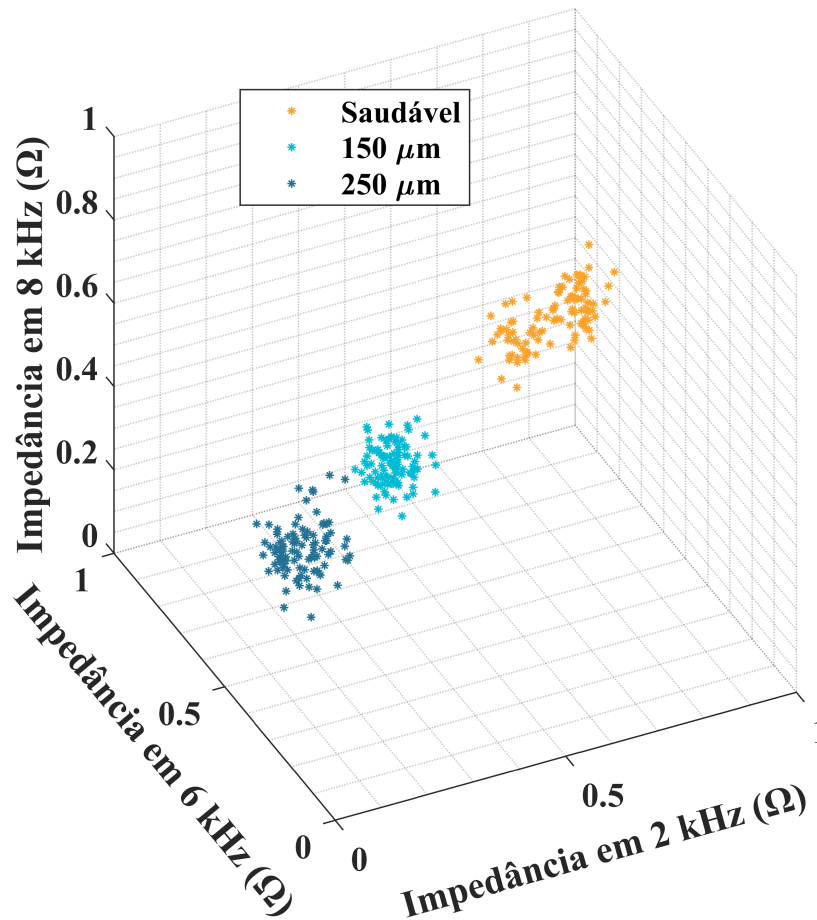


Fonte: Próprio autor

Os valores de distância entre os centroides, por serem meramente comparativos entre as combinações de frequência, indicam apenas em quais combinações os centroides de cada condição estão mais distantes entre si, o que é uma vantagem sob a óptica do processamento de sinais, pois facilita a classificação da falha. No entanto, mesmo com centroides distantes, os agrupamentos podem apresentar pontos dispersos e com intersecções entre si. Por esta razão também foi apresentada a métrica Silhouette, que, para algumas combinações, apresentou valores próximos do ideal (1). Portanto, os gráficos apresentados nas próximas páginas foram escolhidos levando em consideração os dois índices.

Primeiramente, o gráfico da Figura 29 revela um comportamento de agrupamento claro com relação a cada nível de dano. Isso prova que as falhas nos rolamentos podem alterar os valores de impedância do MIT e também demonstra o potencial dos dados multifrequência para obter um diagnóstico. Cada mapa 3D contém 288 pontos (96 para cada condição). Além disso, a qualidade dos agrupamentos demonstrou que as diferentes condições operacionais aplicadas durante os experimentos não prejudicaram a eficiência do diagnóstico.

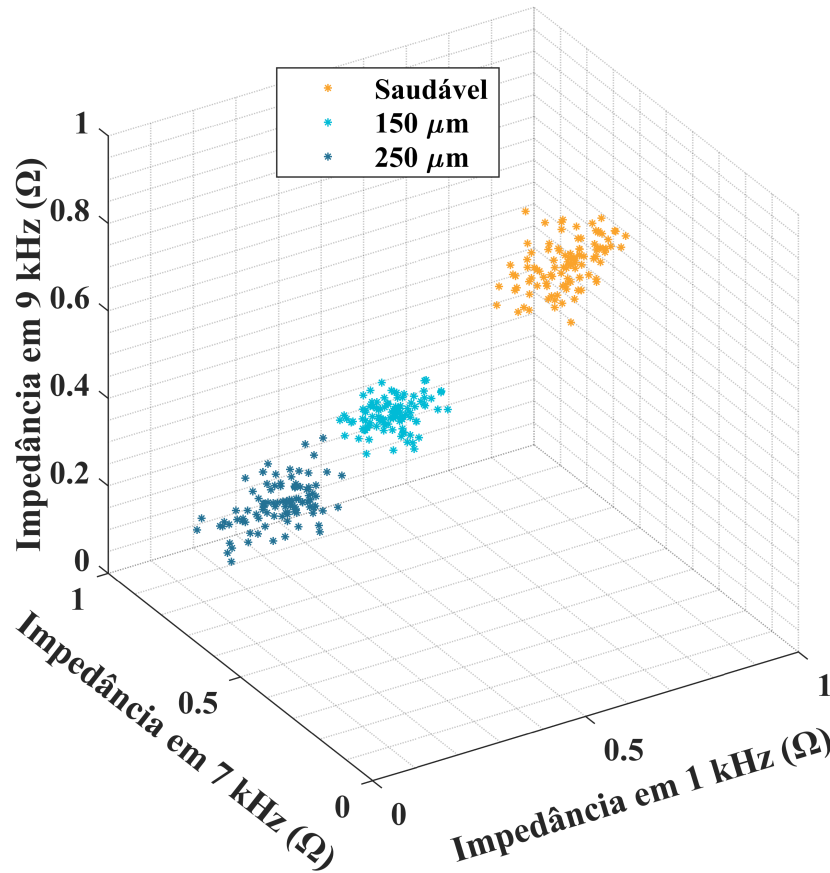
Figura 29 – Mapa de classificação 3D para 8, 6, 2 kHz.



Fonte: Próprio autor

Em seguida, são apresentados mapas de classificação gerados a partir de outras combinações de frequência que também apresentaram resultados com agrupamentos bem definidos. Como, por exemplo, a Figura 30. Em relação aos gráficos apresentados, observa-se uma característica importante. A distância entre o agrupamento referente ao rolamento sem danos e os outros agrupamentos é maior em relação às distâncias dos agrupamentos referentes aos rolamentos com danos entre si. Esse comportamento pode ser considerado vantajoso pois, operacionalmente, confundir um rolamento danificado com um saudável (ou vice-versa) é mais prejudicial do que uma possível má classificação de falhas de  $150 \mu\text{m}$  e  $250 \mu\text{m}$  entre si, justamente pois os dois valores ainda representam danos incipientes.

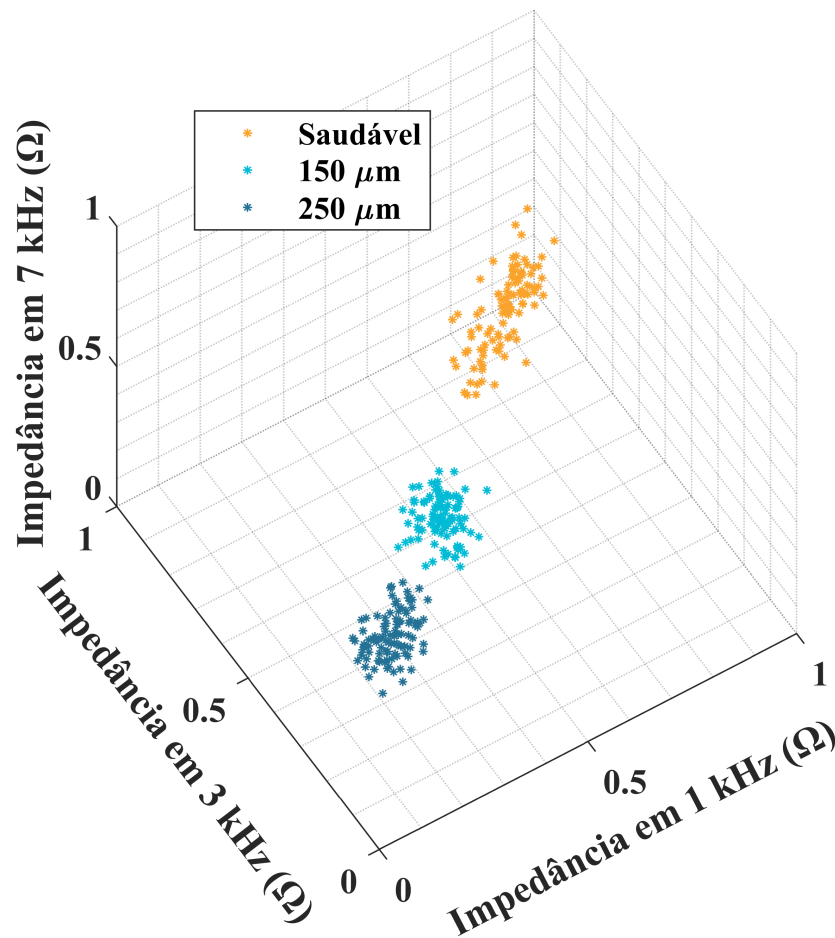
Figura 30 – Mapa de classificação para 9, 7, 1 kHz.



Fonte: Próprio autor

O exemplo da Figura 31 é mais uma combinação de frequências que apresenta uma separação clara entre os agrupamentos de cada condição. Novamente, o agrupamento relativo à condição saudável apresentou uma distância maior dos agrupamentos referentes aos rolamentos danificados do que estes entre si, reiterando este comportamento. Ao observar este gráfico (e os anteriores), inicialmente pensou-se em criar uma métrica para classificar a magnitude da falha utilizando uma média dos valores de cada agrupamento nas 3 dimensões (centroide), seguido da aplicação de uma regressão linear. Isto se deu pois há indicação visual de que os agrupamentos têm uma tendência de crescimento de acordo com a condição de dano.

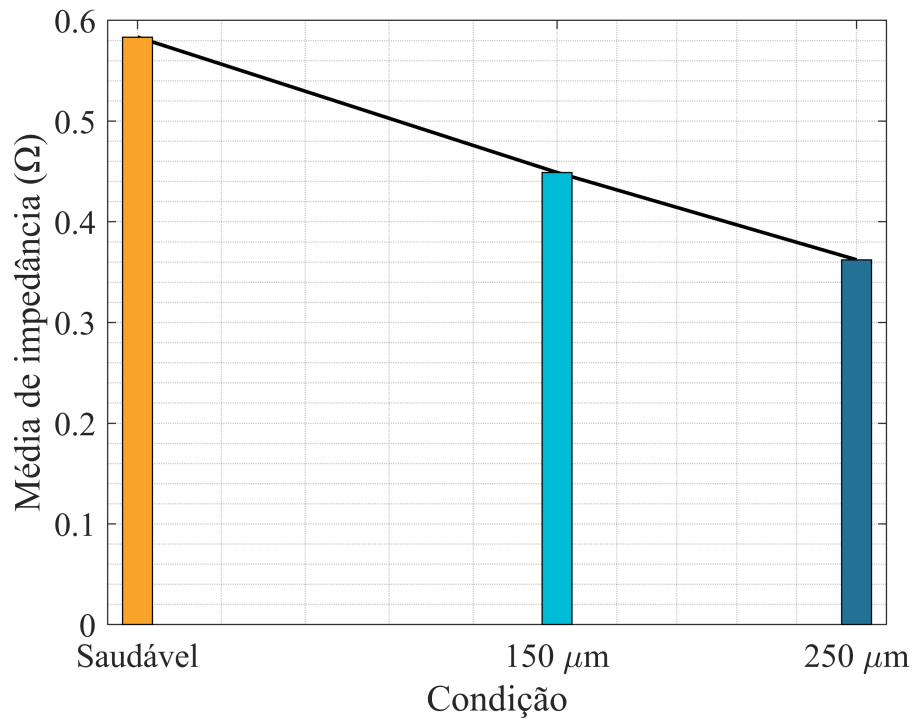
Figura 31 – Mapa de classificação para 7, 3, 1 kHz.



Fonte: Próprio autor

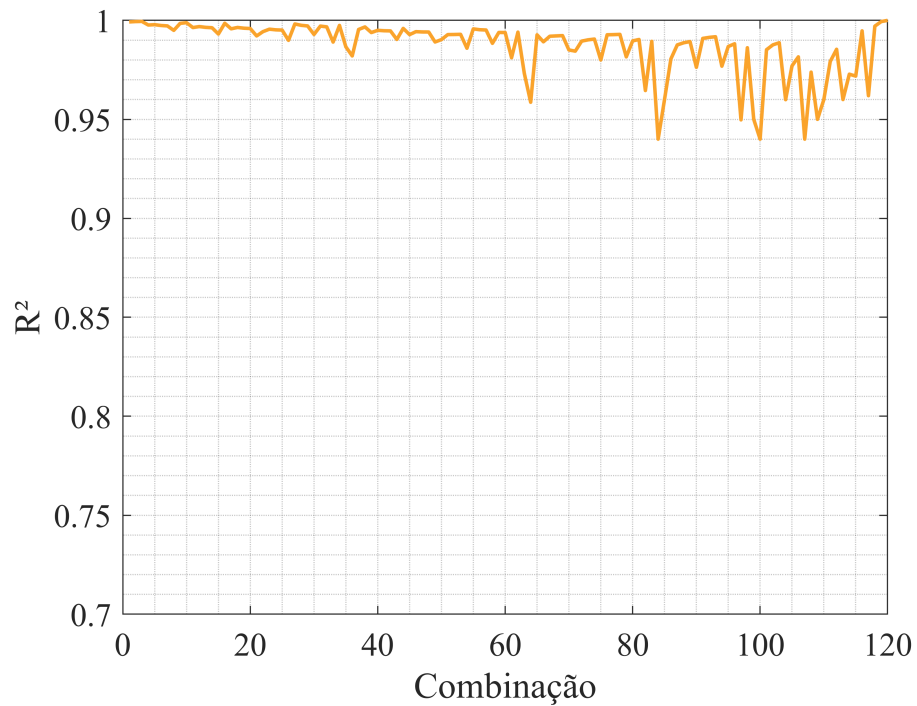
Apesar de ser bem sucedido, como exemplificado na Figura 32 (exemplo para 1 das combinações), entende-se necessárias maiores investigações pois o número de condições (eixo x) pode não ser adequado para uma extrapolação do comportamento para demais valores. No entanto, é importante notar que essa limitação não prejudica e nem desvaloriza os resultados já obtidos. Apenas abre mais uma linha de investigação na área da análise de impedância. Por fim, foram dispostos na Figura 33 os valores de  $R^2$  para todas as combinações de frequência. Este resultado demonstra que algumas frequências possuem diferentes resultados para a análise de impedância (apesar de todas apresentarem alta linearidade). Esse comportamento e as suas justificativas foram comentados mais amplamente ao final deste capítulo, dado que os resultados de eficiência foram ao encontro do que foi observado aqui.

Figura 32 – Valores médios de impedância de cada agrupamento (centroides) - Exemplo utilizando a combinação 1



Fonte: Próprio autor

Figura 33 – Valores de  $R^2$  para as combinações de frequência.



Fonte: Próprio autor

Por fim, para melhor compreensão dos resultados, as 120 combinações de frequência possíveis foram descritas na Tabela 2.

Tabela 2 – Combinações de Frequências

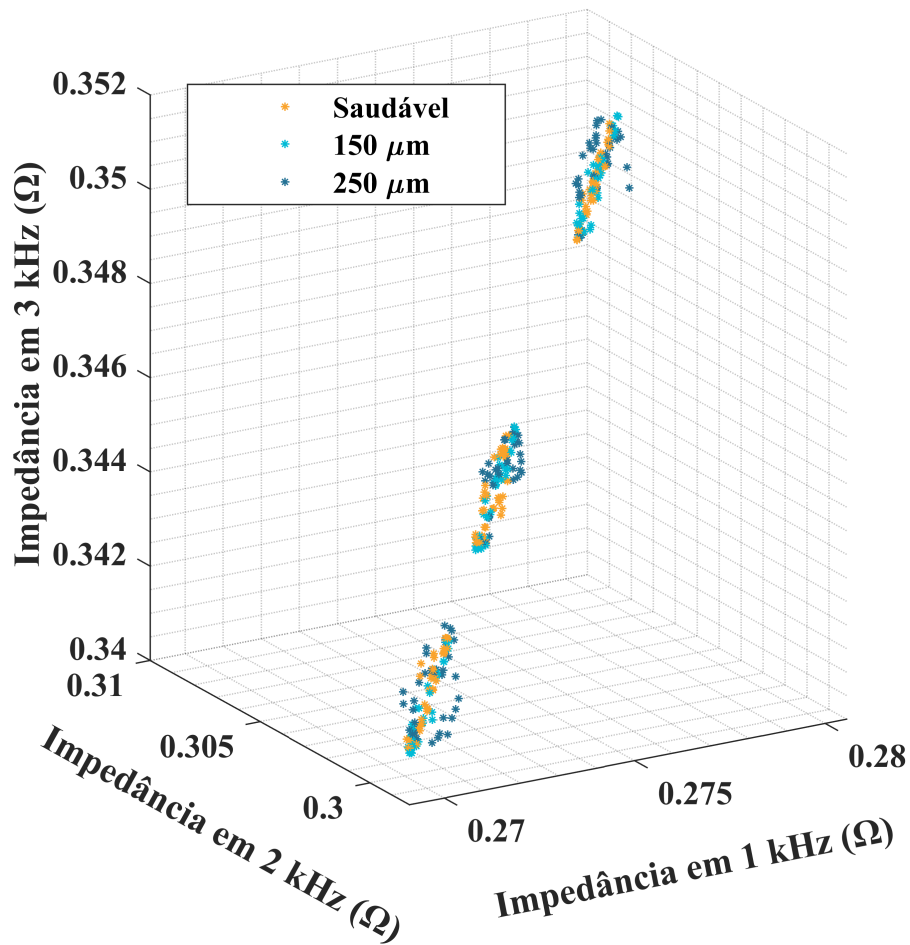
Combinações de Frequências em kHz (eixo x,y,z)

#	F1	F2	F3	#	F1	F2	F3	#	F1	F2	F3
1	1	2	3	41	2	3	8	81	3	7	9
2	1	2	4	42	2	3	9	82	3	7	10
3	1	2	5	43	2	3	10	83	3	8	9
4	1	2	6	44	2	4	5	84	3	8	10
5	1	2	7	45	2	4	6	85	3	9	10
6	1	2	8	46	2	4	7	86	4	5	6
7	1	2	9	47	2	4	8	87	4	5	7
8	1	2	10	48	2	4	9	88	4	5	8
9	1	3	4	49	2	4	10	89	4	5	9
10	1	3	5	50	2	5	6	90	4	5	10
11	1	3	6	51	2	5	7	91	4	6	7
12	1	3	7	52	2	5	8	92	4	6	8
13	1	3	8	53	2	5	9	93	4	6	9
14	1	3	9	54	2	5	10	94	4	6	10
15	1	3	10	55	2	6	7	95	4	7	8
16	1	4	5	56	2	6	8	96	4	7	9
17	1	4	6	57	2	6	9	97	4	7	10
18	1	4	7	58	2	6	10	98	4	8	9
19	1	4	8	59	2	7	8	99	4	8	10
20	1	4	9	60	2	7	9	100	4	9	10
21	1	4	10	61	2	7	10	101	5	6	7
22	1	5	6	62	2	8	9	102	5	6	8
23	1	5	7	63	2	8	10	103	5	6	9
24	1	5	8	64	2	9	10	104	5	6	10
25	1	5	9	65	3	4	5	105	5	7	8
26	1	5	10	66	3	4	6	106	5	7	9
27	1	6	7	67	3	4	7	107	5	7	10
28	1	6	8	68	3	4	8	108	5	8	9
29	1	6	9	69	3	4	9	109	5	8	10
30	1	6	10	70	3	4	10	110	5	9	10
31	1	7	8	71	3	5	6	111	6	7	8
32	1	7	9	72	3	5	7	112	6	7	9
33	1	7	10	73	3	5	8	113	6	7	10
34	1	8	9	74	3	5	9	114	6	8	9
35	1	8	10	75	3	5	10	115	6	8	10
36	1	9	10	76	3	6	7	116	6	9	10
37	2	3	4	77	3	6	8	117	7	8	9
38	2	3	5	78	3	6	9	118	7	8	10
39	2	3	6	79	3	6	10	119	7	9	10
40	2	3	7	80	3	7	8	120	8	9	10

### 6.3 Análise de mitigação de ruídos

Durante o processamento de sinais, um filtro passa-alta foi aplicado aos sinais aquisitados pois, mesmo com os capacitores de filtro, ainda eram presentes componentes relacionadas à alimentação do motor. Dessa forma, foi possível realizar teste para comprovar a capacidade de mitigação de ruídos da técnica de injeção de sinais multifrequência. O mapa visualizado na Figura 34 é o resultado deste teste, onde o sinal analisado não foi o modulado pelas frequências injetadas de forma isolada, mas sim os sinais não filtrados com interferência da frequência de alimentação do motor. Conseqüentemente, o resultado é influenciado pelo ruído na faixa de baixa frequência (as primeiras centenas de Hz), que é substancialmente maior do que na região dos sinais injetados.

Figura 34 – Mapa 3D do sinal sem filtro.



Fonte: Próprio autor

Dessa forma, os 3 grupos que podem ser vistos no gráfico são determinados pelas 3 tensões desequilibradas diferentes, o que descaracteriza e impossibilita a detecção de falhas, pois as condições estão completamente sobrepostas. Por fim, ainda é possível concluir que técnicas baseadas apenas na leitura passiva de corrente (sem injeção de sinal) necessitariam de processos de filtragem complexos para detecção de sinais incipientes e não estacionários.

## 6.4 Testes

A comprovação da eficiência da nova técnica foi realizada com um número de amostras de teste adicionais equivalente a 20% da população. O diagnóstico de uma amostra aleatória é realizado aplicando sinais de multifrequência ao motor, calculando os valores de impedância e criando um ponto 3D usando três frequências diferentes, como visto nos gráficos anteriores. Dessa forma, a classificação pode ser realizada simplesmente calculando a distância entre o ponto e os centroides já estabelecidos. Os resultados de classificação foram apresentados em uma matriz de confusão, como visto nas Figuras 35 e 36.

Figura 35 – Matriz de confusão de classificação de falha de rolamento (melhor caso)

**Matriz de Confusão**

Classe Real	150 um	94.1%	5.9%	
	250 um		100.0%	
	Saudável			100.0%
		150 um	250 um	Saudável
		Classe Prevista		

Fonte: Próprio autor

Figura 36 – Matriz de confusão da classificação de falhas de rolamento (valores médios)

**Matriz de confusão**

Classe Real	150 $\mu\text{m}$	99.8%	0.2%	
	250 $\mu\text{m}$	4.5%	95.5%	
	Saudável	2.7%	97.3%	
		150 $\mu\text{m}$	250 $\mu\text{m}$	Saudável
		Classe Prevista		

Fonte: Próprio autor

A primeira mostra os resultados da combinação de frequência com maior taxa de acerto e a segunda mostra os resultados médios de taxas de acerto de todas as combinações. O cálculo para classificar quais as melhores combinações de frequência é feito de maneira simples, ao se encontrar o valor médio da diagonal principal da matriz de confusão para cada uma das combinações. Embora a melhor combinação tenha apresentado um erro de classificação de 5,9% entre os danos de 150  $\mu\text{m}$  e 250  $\mu\text{m}$ , ela obteve 100% de sucesso na classificação saudável/não saudável. Esse resultado era esperado, pois os agrupamentos defeituosos estão mais próximos uns dos outros do que do agrupamento saudável. Resumindo, nenhum falso negativo foi registrado para a condição saudável e, como dito anteriormente: confundir um rolamento danificado com um saudável (ou vice-versa) é mais prejudicial do que uma possível má classificação de falhas de 150  $\mu\text{m}$  e 250  $\mu\text{m}$  entre si, justamente pois os dois valores ainda representam danos incipientes.

Os resultados da tabela de confusão para os valores médios entre todas as combinações de frequência permaneceram satisfatórios com 97,3% para a classificação saudável/não saudável. Apenas 0,2% de falsos negativos, onde foi prevista condição

saudável, mas, no entanto, o rolamento estava em falha de 150  $\mu\text{m}$ . Na condição de 150  $\mu\text{m}$  o acerto foi de 99,8% e para 250  $\mu\text{m}$  o acerto foi de 95,5%. As diferenças entre as combinações podem ser justificadas pois, para cada frequência, a impedância equivalente do MIT sofre alterações, e isso pode alterar a sensibilidade da técnica. No entanto, como já comentado, esta aplicação não tem precedentes e ainda não é um dispositivo comercial. E, apesar de ter demonstrado resultados sólidos, as melhores frequências ainda precisam ser investigadas. Inclusive, a utilização de três diferentes frequências pode ser exatamente uma vantagem quando outras falhas forem introduzidas no MIT, ou mesmo quando outros ruídos forem inseridos (por exemplo, outros tipos de acionamento).

## Capítulo 7

# Conclusão

Devido ao papel crucial nos processos industriais, qualquer paralisação dos MITs pode resultar em diversas perdas econômicas e de produtividade. Portanto, é fundamental desenvolver técnicas que sejam capazes de monitorar esses dispositivos. Além disso, são de grande vantagem as técnicas não destrutivas que permitam identificar e classificar as situações não ideais de trabalho sem que o funcionamento da máquina seja alterado. Dentro deste contexto, a falha nos rolamentos é claramente uma condição potencialmente prejudicial, não só por ser frequente, mas também porque leva ao desgaste mecânico da máquina, sobreaquecimento, ruído excessivo e resulta na redução do torque no MIT. Reiterando, desta forma, a relevância do desenvolvimento de sistemas para análise de danos nesses componentes essenciais.

Este trabalho apresentou um novo sistema para monitoramento de falhas incipientes em rolamentos. Apesar de ser totalmente novo, o sistema foi capaz de fornecer diagnósticos confiáveis de danos incipientes em diferentes condições de operação do MIT. Além disso, os principais obstáculos no estado da arte estão relacionados a sinais impulsivos ocultados pelo forte ruído dos sinais de vibração. Entretanto, o método baseado em impedância proposto forneceu um recurso de filtragem que permitiu o diagnóstico. Ainda, os sinais de impedância foram comparados com os dados de vibração adquiridos simultaneamente. Os resultados mostraram que as diferenças espectrais entre as condições saudáveis e não saudáveis foram maiores quando o novo método foi usado. Por fim, as simulações baseadas na modelagem do motor para falhas de rolamentos mostraram que o comportamento dos sinais de impedância medidos pelo dispositivo corresponde ao modelo teórico.

Além disso, devido à nova metodologia de desgaste, foi possível emular falhas incipientes com magnitude 53% menor quando em comparação com outros trabalhos. Os resultados médios de desempenho mostraram 97,3% de acerto para a classificação

saudável/não saudável, 95,5% para 250  $\mu\text{m}$  e 99,8% para 150  $\mu\text{m}$ .

Ao contrário de técnicas como a análise de vibração, deve-se observar que esta é a primeira vez que essa técnica foi introduzida. Portanto, ainda há lacunas que podem ser investigadas. Por exemplo, a influência de diferentes acionamentos de motor e diferentes tipos de falhas deve ser avaliada. Ainda, o estudo do modelo matemático do MIT para tensões desbalanceadas enquanto está sujeito às falhas de rolamento. Adicionalmente, a adição de falhas nos rolamentos dianteiros ou nos dois rolamentos simultaneamente também pode ser estudada. E, por fim, variações nos valores de impedância da rede de alimentação, que podem influenciar os resultados do método proposto. No entanto, este trabalho apresenta uma grande contribuição para o campo ao diagnosticar com sucesso danos incipientes nos rolamentos e provar que as abordagens baseadas em impedância são adequadas para o monitoramento de falhas.

## REFERÊNCIAS

- AL-AMERI, S. M. *et al.* Frequency response analysis for three-phase star and delta induction motors: Pattern recognition and fault analysis using statistical indicators. **Machines**, MDPI AG, v. 11, n. 1, p. 106, jan. 2023. ISSN 2075-1702.
- ALAWADY, A. A. *et al.* Phase to phase fault detection of 3-phase induction motor using fra technique. **International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)**, Institute of Advanced Engineering and Science, v. 11, n. 3, p. 1241, set. 2020. ISSN 2088-8694.
- ALHAWARAT, M.; HEGAZI, M. Revisiting K-Means and Topic Modeling, a Comparison Study to Cluster Arabic Documents. **IEEE Access**, v. 6, p. 42740–42749, 2018. ISSN 2169-3536.
- BERZOY, A.; ELDEEB, H. H.; MOHAMMED, O. A. On-line detection of stator faults in DTC-driven IM using SC impedance matrix off-diagonal term. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 55, n. 6, p. 5906–5915, nov. 2019.
- BLODT, M. *et al.* Models for bearing damage detection in induction motors using stator current monitoring. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 55, n. 4, p. 1813–1822, abr. 2008.
- CAMPOS, F. de S. *et al.* Experimental assessment of impedance-based structural health monitoring in radioactive environment. **Measurement Science and Technology**, IOP Publishing, v. 34, n. 8, p. 085103, abr. 2023. ISSN 1361-6501.
- CHEN, Z. *et al.* Incipient fault feature extraction of rolling bearing based on optimized singular spectrum decomposition. **IEEE Sensors Journal**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 21, n. 18, p. 20362–20374, set. 2021.
- DALVAND, F. *et al.* Detection of generalized-roughness and single-point bearing faults using linear prediction-based current noise cancellation. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 65, n. 12, p. 9728–9738, dez. 2018.
- DARONG, H. *et al.* A new incipient fault diagnosis method combining improved RLS and LMD algorithm for rolling bearings with strong background noise. **IEEE Access**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 6, p. 26001–26010, 2018.
- DI, C. *et al.* Modeling and analysis of unbalanced magnetic pull in cage induction motors with curved dynamic eccentricity. **IEEE Transactions on Magnetics**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 51, n. 8, p. 1–7, ago. 2015.
- DRIF, M.; CARDOSO, A. J. M. Stator fault diagnostics in squirrel cage three-phase induction motor drives using the instantaneous active and reactive power signature

- analyses. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 10, n. 2, p. 1348–1360, maio 2014.
- DUAN, R.; LIAO, Y.; WANG, S. Adaptive morphological analysis method and its application for bearing fault diagnosis. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 70, p. 1–10, 2021.
- FAIZ, J.; OJAGHI, M. Stator inductance fluctuation of induction motor as an eccentricity fault index. **IEEE Transactions on Magnetics**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 47, n. 6, p. 1775–1785, jun. 2011.
- GAO, R.; YAN, R. Non-stationary signal processing for bearing health monitoring. **International Journal of Manufacturing Research**, Inderscience Publishers, v. 1, n. 1, p. 18, 2006.
- GU, B.-G. Offline interturn fault diagnosis method for induction motors by impedance analysis. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 65, n. 7, p. 5913–5920, jul. 2018.
- HASAN, M. J.; ISLAM, M. M.; KIM, J.-M. Acoustic spectral imaging and transfer learning for reliable bearing fault diagnosis under variable speed conditions. **Measurement**, Elsevier BV, v. 138, p. 620–631, maio 2019.
- HOU, B. *et al.* OSESgram: Data-aided method for selection of informative frequency bands for bearing fault diagnosis. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 71, p. 1–10, 2022.
- HU, R. *et al.* High-frequency voltage injection based stator interturn fault detection in permanent magnet machines. **IEEE Transactions on Power Electronics**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 36, n. 1, p. 785–794, jan. 2021.
- KANG, M.; KIM, J.; KIM, J.-M. An FPGA-based multicore system for real-time bearing fault diagnosis using ultrasampling rate AE signals. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 62, n. 4, p. 2319–2329, abr. 2015.
- KANG, M. *et al.* Time-varying and multiresolution envelope analysis and discriminative feature analysis for bearing fault diagnosis. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 62, n. 12, p. 7749–7761, dec 2015.
- KONG, X. *et al.* Wind turbine bearing incipient fault diagnosis based on adaptive exponential wavelet threshold function with improved CPSO. **IEEE Access**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 9, p. 122457–122473, 2021.
- LIU, J.; WANG, W.; GOLNARAGHI, F. An extended wavelet spectrum for bearing fault diagnostics. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 57, n. 12, p. 2801–2812, dez. 2008.

LUCAS, G. B. *et al.* A novel approach applied to transient short-circuit diagnosis in tims by piezoelectric sensors, pca, and wavelet transform. **IEEE Sensors Journal**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 23, n. 8, p. 8899–8908, abr. 2023. ISSN 2379-9153.

LUCAS, G. B. *et al.* A new acoustic emission-based approach for supply disturbances evaluation in three-phase induction motors. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 70, p. 1–10, 2021. ISSN 1557-9662.

NIVSRANGSAN, P.; JANTARAJIROJKUL, D. Bearing fault monitoring by comparison with main bearing frequency components using vibration signal. In: **2018 5th International Conference on Business and Industrial Research (ICBIR)**. [S.l.]: IEEE, 2018.

OJAGHI, M.; SABOURI, M.; FAIZ, J. Analytic model for induction motors under localized bearing faults. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 33, n. 2, p. 617–626, jun. 2018.

QIN, J. *et al.* Distributed  $k$ -Means Algorithm and Fuzzy  $c$ -Means Algorithm for Sensor Networks Based on Multiagent Consensus Theory. **IEEE Transactions on Cybernetics**, v. 47, n. 3, p. 772–783, mar. 2017. ISSN 2168-2275.

SHABBIR, M. N. S. K.; LIANG, X.; CHAKRABARTI, S. An ANOVA-based fault diagnosis approach for variable frequency drive-fed induction motors. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 36, n. 1, p. 500–512, mar. 2021.

SONG, X.; WANG, Z.; HU, J. Detection of bearing outer race fault in induction motors using motor current signature analysis. In: **2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)**. [S.l.]: IEEE, 2019.

STACK, J.; HABETLER, T.; HARLEY, R. Effects of machine speed on the development and detection of rolling element bearing faults. **IEEE Power Electronics Letters**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 1, n. 1, p. 19–21, mar. 2003.

TRIGEASSOU. **Electrical machines diagnosis**. London Hoboken, NJ: ISTE Wiley, 2011. ISBN 978-1-84821-263-3.

VIITALA, R.; WIDMAIER, T.; KUOSMANEN, P. Subcritical vibrations of a large flexible rotor efficiently reduced by modifying the bearing inner ring roundness profile. **Mechanical Systems and Signal Processing**, Elsevier BV, v. 110, p. 42–58, set. 2018.

WEI, S. *et al.* Time-varying envelope filtering for exhibiting space bearing cage fault features. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 70, p. 1–13, 2021.

Western Reserve University. **Case Western Reserve University Bearing Data Center**. [S.l.], 2023. Accessed: 2023-09-30.

XIA, P. *et al.* An improved underdamped asymmetric bistable stochastic resonance method and its application for spindle bearing fault diagnosis. **IEEE Access**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 8, p. 46824–46836, 2020.

YATSUGI, K. *et al.* Common diagnosis approach to three-class induction motor faults using stator current feature and support vector machine. **IEEE Access**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 11, p. 24945–24952, 2023.

ZHAI, Y.; FU, Y.; KANG, Y. Incipient bearing fault diagnosis based on the two-state theory for stochastic resonance systems. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 72, p. 1–11, 2023.

ZHANG, S. *et al.* Model-based analysis and quantification of bearing faults in induction machines. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 56, n. 3, p. 2158–2170, maio 2020.

ZHENG, K. *et al.* Sparse elitist group lasso denoising in frequency domain for bearing fault diagnosis. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 17, n. 7, p. 4681–4691, jul. 2021.

## APÊNDICE A

### Lista de publicações realizadas durante o Doutorado

#### - Artigos completos publicados em periódicos

LUCAS, GUILHERME BERARDI; et.al. *Fault diagnosis of electrical faults of three phase induction motors using acoustic analysis*. **Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences**, v. 24, p. x, 2024.

LUCAS, GUILHERME BERARDI; DE CASTRO, BRUNO ALBUQUERQUE ; ARDILAREY, JORGE ALFREDO ; GLOWACZ, ADAM ; LEAO, JOSE VITAL FERRAZ ; ANDREOLI, ANDRE LUIZ. *A Novel Approach Applied to Transient Short-Circuit Diagnosis in TIMs by Piezoelectric Sensors, PCA, and Wavelet Transform*. **IEEE SENSORS JOURNAL**, v. 24, p. 1-1, 2023.

DE CASTRO, BRUNO ALBUQUERQUE ; SANTOS, V. V. ; LUCAS, G. B. ; REY, J. A. A. ; RIEHL, R. R. ; ANDREOLI, ANDRE LUIZ. *A Comparative Analysis Applied to the Partial Discharges Identification in Dry-Type Transformers by Hall and Acoustic Emission Sensors*. **SENSORS**, v. 22, p. 1716, 2022.

#### - Patente Depositada

LUCAS, GUILHERME BERARDI; ANDREOLI, ANDRE LUIZ . *Equipamento e método para medição de impedância em múltiplas frequências através da injeção de sinais para análise de máquinas elétricas*, 2023.

#### - Autor de Livro

BALTHAZAR, J.M. et. al. *Sistemas dinâmicos e mecatrônicos - Vol. 2. Modelagem, análise e controle avançado de sistemas não lineares*. ISBN:9788521224815. Blucher. 2024.

#### - Artigos completos submetidos em periódicos

LUCAS, GUILHERME BERARDI; ANDREOLI, ANDRE LUIZ . *A Novel Multi-Frequency Impedance Method for Induction Motor Fault Monitoring*. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, 2024.

**- Trabalhos completos publicados em anais de congressos internacionais**

GODOY, M.; LUCAS, G.; ANDREOLI, A.L. *Fault diagnosis in induction motor installation using Discrete Wavelet Energy and low-cost sensors*, **In Proceedings of the 2nd International Electronic Conference on Machines and Applications**, 18–20 June 2024, MDPI: Basel, Switzerland,

LUCAS, G. B., DE CASTRO, B. A., CUESTA, J. L., ANDREOLI, A. L. *Assessment of Three-Phase induction Motor Voltages Using Smartphone Acoustic Data*. **In 2023 15th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)**, São Bernardo do Campo, 2023. (pp. 906-910). IEEE.

LUCAS, G.B; DE CASTRO, B. A., ALVES, B. ; GLOWACZ, A. ; ANDREOLI, L. . *Measurement of Unbalanced Voltages in Three-Phase Induction Motors Using Acoustic Transducers and Zero-Crossing-Weighted Energy*. **In: 2021 5th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT)**, 2021.

LUCAS, GUILHERME; CASTRO, B. A. ; SERNI, P. J. A. ; RIEHL, R. R. ; ANDREOLI, A. L. *Sensors Applied to Bearing Fault Detection in Three-Phase Induction Motors: a Review*. **In: 8th International Electronic Conference on Sensors and Applications**, 2021.

LUCAS, GUILHERME; ROCHA, MARCO ; DE CASTRO, BRUNO ; LEÃO, JOSÉ VITAL ; ANDREOLI, ANDRÉ . *Stator Winding Fault Phase Identification Using Piezoelectric Sensors in Three-Phase Induction Motors*. **In: 7th International Electronic Conference on Sensors and Applications**, 2020, Sciforum.net. Proceedings of 7th International Electronic Conference on Sensors and Applications, 2020. p. 8183.

GOUVÊA, J. P., DE CASTRO, B. A., ALVES, A. F., LUCAS, G. B., ARDILA-REY, J. A., SMITH, C. *Techniques for Failures Classification in Power Transformers by High-Frequency Current Transformers*. **In 2023 15th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)**, São Bernardo do Campo, 2023. (pp. 1219-1223). IEEE.

SCHIEWALDT, KARL ; INOUE BARRETO, GUILHERME KEITI ; BERARDI LUCAS, GUILHERME ; FERNANDES, GABRIEL SCOTA ; LUIZ ANDREOLI, ANDRE ; DE CASTRO, BRUNO ALBUQUERQUE . *New Approach Insulator Failure Differentiation based on Image Processing*. **In: 2022 6th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT)**, 2022, Porto Alegre. 2022. p. 1.

ALBUQUERQUE DE CASTRO, BRUNO ; INOUE BARRETO, GUILHERME KEITI ; SCHIEWALDT, KARL ; BINOTTO, A. ; LUCAS, GUILHERME ; ANDREOLI, A. L. *Pattern Recognition Tool to Assess Transformers Failures by Acoustic Emission Analysis*. **In: 14th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission**, 2022, Rio de Janeiro. Book of Abstracts and Proceedings of 14th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission: CLAGTEE 2022, 2022. p. 123-123.

ROCHA, MARCO ; LUCAS, GUILHERME ; SOUZA, WALLACE ; DE CASTRO, BRUNO ALBUQUERQUE ; ANDREOLI, ANDRE. *Detection and Phase Identification of Inter-Turn Short-Circuit Faults in Three-Phase Induction Motors Using MEMS Accelerometer and Hilbert Transform*. In: **2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)**, 2021, São Paulo, 2021. p. 955.

DE SOUZA, WALLACE GABRIEL ; ALBUQUERQUE DE CASTRO, BRUNO ; LUCAS, GUILHERME BERARDI ; AURELIO ROCHA, MARCO ; ANDREOLI, ANDRE LUIZ. *Identificação de Falhas em Rolamentos Aplicados em Motores de Indução por meio de Sensores de Corrente*. In: **2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)**, 2021, São Paulo. 2021. p. 753.

RIEHL, R. R. ; FRAGA, J. R. C. P. ; PUCCIA, V. ; BERARDI LUCAS, GUILHERME ; ANDREOLI, ANDRE. *Assessment of Rogowski Coils for Measurement Full Discharges in Power Transformers*. In: **8th International Electronic Conference on Sensors and Applications**, 2021.

CASTRO, B. A. ; BERARDI LUCAS, GUILHERME ; FERNANDES, G. S. ; FRAGA, J. R. C. P. ; RIEHL, R. R. ; ANDREOLI, A. L. *Assessment of Partial Discharges Evolution in Bushing by Infra-Red Analysis*. In: **8th International Electronic Conference on Sensors and Applications**, 2021.

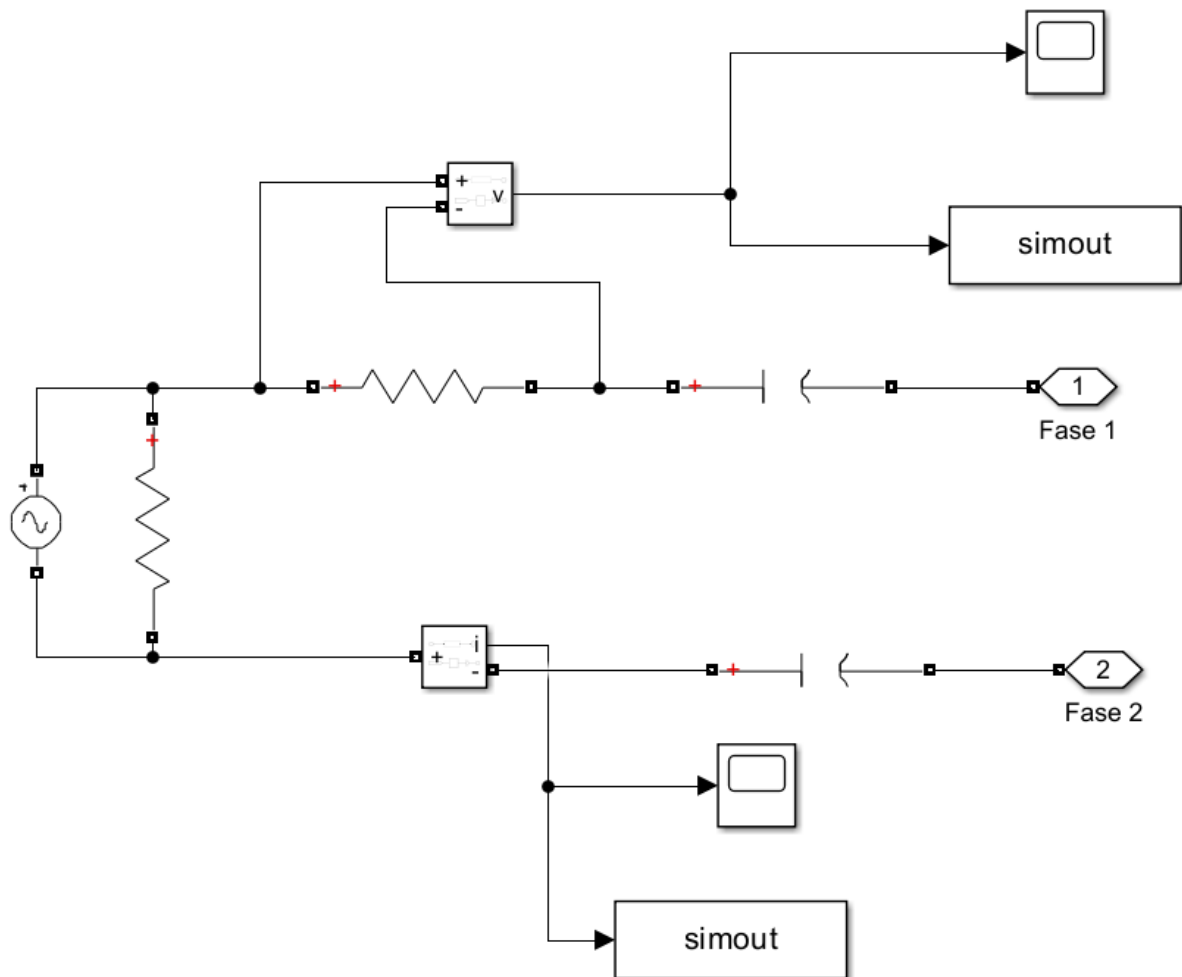
CASTRO, BRUNO ; DOS SANTOS, VITOR ; BINOTTO, AMANDA ; REY, JORGE ALFREDO ; LUCAS, GUILHERME ; ANDREOLI, ANDRÉ. *An application of wavelet analysis to assess discharge evolution by Acoustic Emission Sensor*. In: **7th International Electronic Conference on Sensors and Applications**, 2020, Sciforum.net. Proceedings of 7th International Electronic Conference on Sensors and Applications, 2020. p. 8244.

## APÊNDICE B

### Implementação em blocos do Simulink

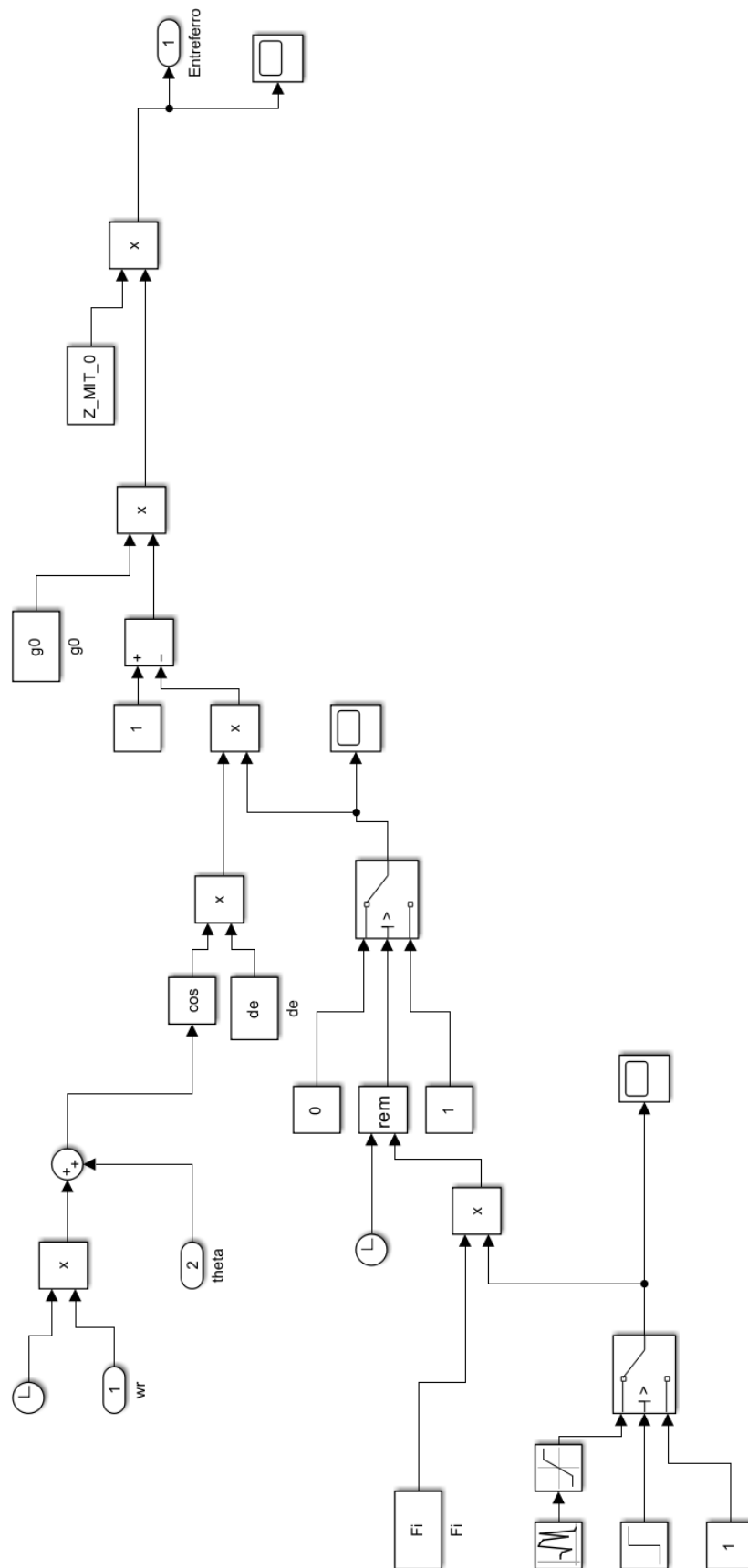
As variáveis apresentadas aqui são referenciadas à Equação (2.4) e ao circuito do analisador de impedância.

Figura 37 – Implementação matemática da modelagem para rolamentos defeituosos (circuito do analisador).



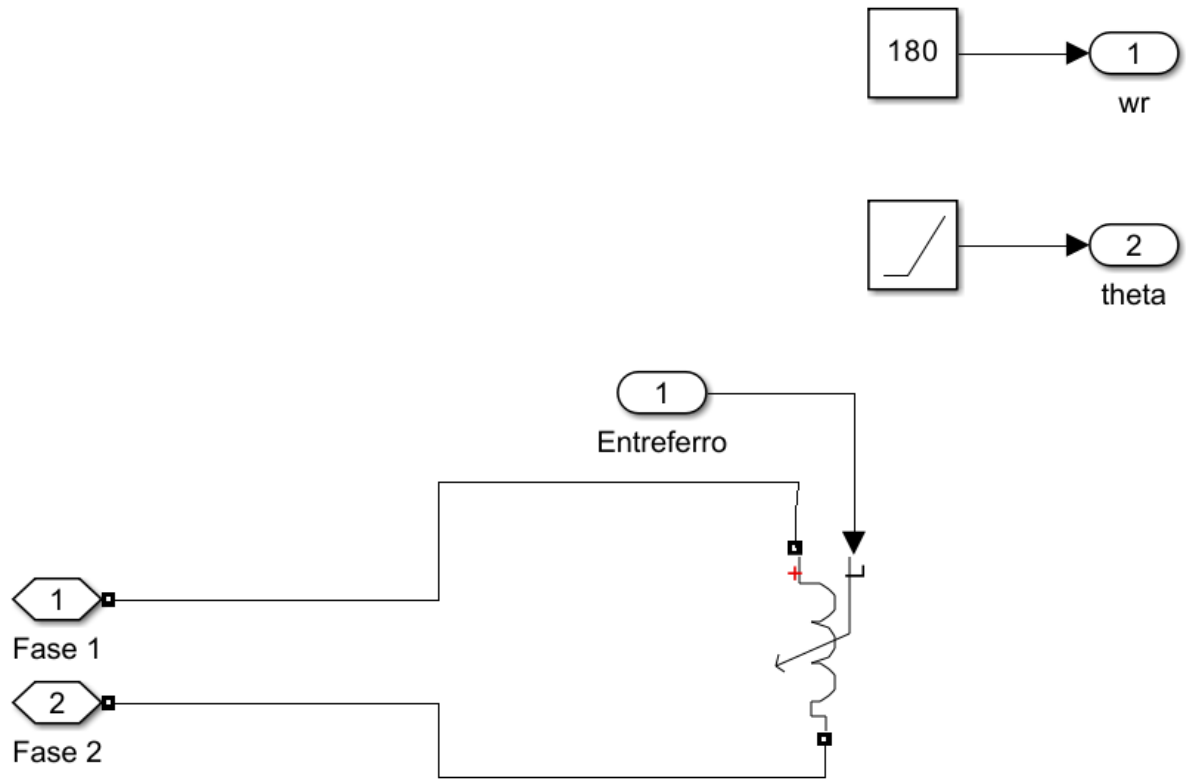
Fonte: Próprio autor

Figura 38 – Implementação matemática da modelagem para rolamentos defeituosos (variações de impedância)



Fonte: Próprio autor

Figura 39 – Implementação matemática da modelagem para rolamentos defeituosos (MIT).



Fonte: Próprio autor