

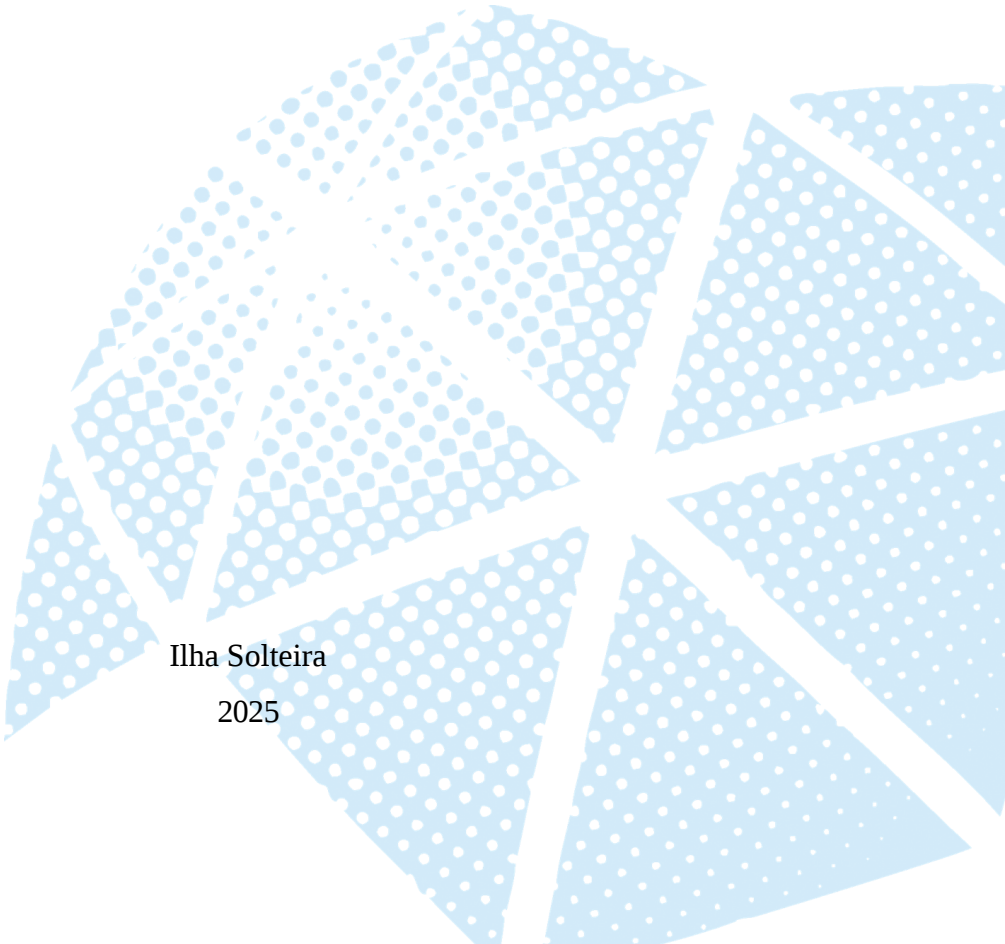
**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP**  
**Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - Campus de Ilha Solteira**

VINICIUS ALVARES CARDOSO

**DIAGNÓSTICO DE MOTORES DE INDUÇÃO À PARTIR DA TÉCNICA DE  
ASSINATURA ELÉTRICA DE CORRENTE**

Ilha Solteira

2025



VINCIUS ALVARES CARDOSO

**DIAGNÓSTICO DE MOTORES DE INDUÇÃO À PARTIR DA TÉCNICA DE  
ASSINATURA ELÉTRICA DE CORRENTE**

Trabalho de Graduação apresentado à  
Universidade Estadual Paulista (UNESP),  
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira para  
obtenção do título de Grau acadêmico Bacharel  
em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Bertequini Leão

Ilha Solteira  
2025

#### FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

C268d      Cardoso, Vinicius Alvares.  
Diagnóstico de motores de indução à partir da técnica de assinatura elétrica de corrente / Vinicius Alvares Cardoso. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024  
28 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -  
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira,  
2024

Orientador: Fabio Bertequini Leão

Inclui bibliografia

1. Assinatura elétrica. 2. Análise espectral. 3. Transformada rápida de Fourier. 4. Diagnóstico de falhas. 5. Relé inteligente.

## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos vinte e oito dias do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e cinco, o discente Vinicius Alvares Cardoso, matriculado sob o nº 181051044, tendo como banca examinadora seu orientador, o Prof. Dr. Fábio Bertequini Leão, o Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro e o Prof. Dr. Carlos Antonio Alves, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "DIAGNÓSTICO DE MOTORES DE INDUÇÃO À PARTIR DA TÉCNICA DE ASSINATURA ELÉTRICA DE CORRENTE" obtendo a nota 9,0 (~~NOVE~~) e conceito APROVADO.

Fábio Bertequini Leão

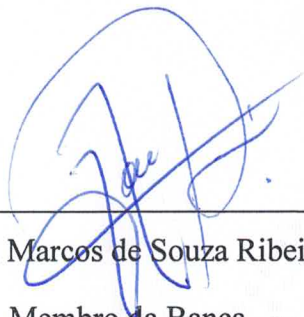
Fábio Bertequini Leão

- Orientador -

Vinicius Alvares Cardoso

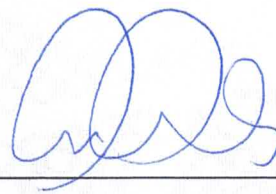
Vinicius Alvares Cardoso

- Discente -



Jean Marcos de Souza Ribeiro

- Membro da Banca -



Carlos Antonio Alves

- Membro da Banca -

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus pais, que sempre estiveram ao meu lado com apoio e carinho. Suas presenças constantes e incentivo foram fundamentais em cada etapa da minha jornada, e sou eternamente grato por tudo que fizeram por mim. Agradeço também aos meus avós, cuja sabedoria e apoio incondicional foram essenciais durante toda a minha trajetória. Seu auxílio e carinho foram fundamentais para que eu pudesse superar os desafios, e sou muito grato por tê-los em minha vida.

A minha namorada merece um agradecimento especial, pois ela tem sido uma fonte constante de amor e apoio. Sua presença nos momentos bons e ruins fez toda a diferença e me proporcionou a força necessária para seguir em frente. Sou muito grato por tê-la ao meu lado.

Agradeço ao meu professor orientador, Fábio Bertequini Leão, por todo suporte e auxílio durante a execução deste trabalho. Suas orientações e o conhecimento que me foi transmitido foram cruciais para o desenvolvimento deste projeto.

Gostaria também de agradecer à empresa TDM, que me ofereceu todos os dispositivos e suporte necessário para que este trabalho fosse possível. Sua colaboração foi essencial para a realização deste projeto.

Por último, mas não menos importante, agradeço a todos os amigos que fiz durante todo esse tempo na universidade. As trocas de conhecimento e a união que construímos foram muito válidas e enriqueceram a minha experiência acadêmica.

## RESUMO

Este trabalho investiga a aplicação de análise espectral de assinaturas elétricas para diagnóstico de falhas mecânicas em um motor simulado, utilizando o relé inteligente GE 869. A metodologia baseia-se na Transformada Rápida de Fourier (TRF) dos sinais de corrente para detectar variações associadas a falhas mecânicas de diferentes amplitudes. Os resultados mostraram que, mesmo com o uso de uma mala de testes para simulação do motor, foi possível observar alterações significativas na assinatura elétrica com o aumento da falha, indicando o potencial dessa abordagem. A análise evidenciou o surgimento de novos picos de frequência, cuja intensidade e largura aumentaram conforme a falha progrediu, validando a eficácia do método para monitoramento de motores. Embora o relé GE 869 não tenha identificado automaticamente todas as falhas, devido à natureza simulada do experimento, a metodologia apresenta uma alternativa viável e promissora para diagnósticos mais automatizados e precisos em motores reais. Estudos futuros devem explorar essa técnica em motores de maior potência para otimizar a detecção e caracterização de falhas em cenários industriais.

**Palavras-chave:** Assinatura elétrica, análise espectral, Transformada Rápida de Fourier, diagnóstico de falhas, relé inteligente.

## **ABSTRACT**

This study investigates the application of electrical signature spectral analysis for diagnosing mechanical faults in a simulated motor using the intelligent relay GE 869. The methodology employs the Fast Fourier Transform (FFT) of current signals to detect variations associated with mechanical faults of different amplitudes. Results showed that even with the use of a test case to simulate the motor, significant changes in the electrical signature were observed as the fault amplitude increased, demonstrating the potential of this approach. The analysis revealed the emergence of new frequency peaks, whose intensity and width increased with fault progression, validating the method's effectiveness for motor monitoring. Although the GE 869 relay did not automatically identify all faults due to the simulated nature of the experiment, the methodology presents a viable and promising alternative for more automated and precise diagnostics in real motors. Future studies should explore this technique on high power motors to optimize fault detection and characterization in industrial settings.

**Keywords:** Electrical signature, spectral analysis, Fast Fourier Transform, fault diagnosis, intelligent relay.

## SUMÁRIO

|       |                                                            |    |
|-------|------------------------------------------------------------|----|
| 1     | INTRODUÇÃO .....                                           | 7  |
| 1.1   | Motores trifásicos de indução.....                         | 7  |
| 1.2   | Análise de sinais no domínio da frequência.....            | 9  |
| 1.2.1 | Transformada de Fourier .....                              | 9  |
| 1.3   | Análise da assinatura elétrica de corrente de motores..... | 9  |
| 1.3.1 | Barras quebradas.....                                      | 10 |
| 1.3.2 | Excêntricidade no entreferro .....                         | 11 |
| 1.3.3 | Falhas de origem mecânica.....                             | 11 |
| 2     | METODOLOGIA .....                                          | 13 |
| 3     | RESULTADOS E DISCUSSÃO.....                                | 18 |
| 3.1   | <i>Baseline</i> do motor simulado.....                     | 19 |
| 3.2   | Funcionamento com falhas do motor simulado .....           | 19 |
|       | CONCLUSÃO.....                                             | 27 |
|       | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                           | 28 |

## **1 INTRODUÇÃO**

Nos processos industriais, a realização de manutenções em máquinas e dispositivos é essencial, principalmente aquelas equipadas com motores de indução. Falhas e anomalias podem resultar em perdas de produção e redução do ritmo produtivo, acarretando prejuízos financeiros. Portanto, é fundamental compreender as possíveis causas de falhas e problemas em máquinas rotativas, a fim de planejar e executar a manutenção de forma proativa, mitigando potenciais perdas (MARQUES, 2016).

A utilização de técnicas baseadas em manutenção preditiva são necessárias neste contexto, pois permitem o monitoramento periódico e preditivo do parque industrial, e portanto, possibilitam a identificação precoce de possíveis anomalias antes que se tornem críticas evitando parada de processos e perdas de faturamento. Uma das técnicas promissoras e não invasivas é baseada na análise da assinatura elétrica de corrente do motor e que permite identificar falhas elétricas ou mecânicas com base na corrente do estator ou rotor. Os dados necessários para a análise são obtidos durante o funcionamento em operação normal do motor (SILVA FONTES, 2017). Neste trabalho de graduação o objetivo é analisar de forma teórica e prática empregando o método de assinatura elétrica de corrente em motores funcionando de um motor de indução em condições normais e em falta.

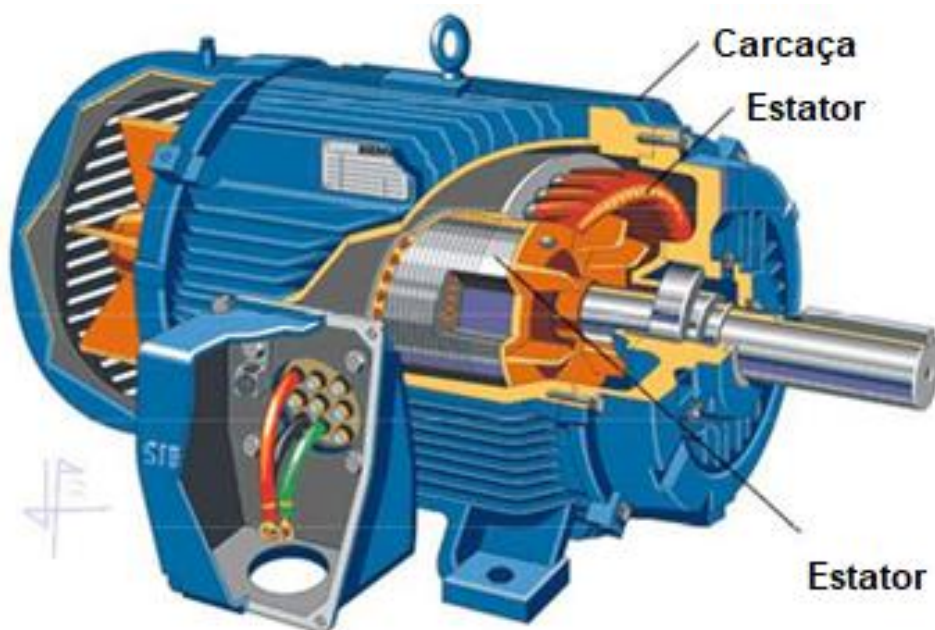
### **1.1 Motores trifásicos de indução**

Os elementos primordiais que compõem um motor de indução são o rotor e o estator. O estator, como o termo sugere, representa a porção estacionária do motor, onde os enrolamentos são distribuídos de maneira a criar uma defasagem elétrica de  $120^\circ$ , alinhada com a defasagem elétrica da rede trifásica, garantindo assim a criação de um campo girante e a operação adequada do motor (FITZGERALD; KINGSLEY, 2003).

Existem dois tipos de rotor para uma máquina de indução trifásica: o rotor bobinado, que consiste em enrolamentos trifásicos semelhantes aos do estator e com a mesma quantidade de polos. Nos terminais dos enrolamentos do rotor, são conectados anéis deslizantes isolados, montados sobre o eixo. Para permitir o acesso externo ao motor, são conectadas escovas de carvão aos anéis deslizantes. Esse tipo de rotor não é comumente utilizado e é empregado em aplicações específicas. O rotor do tipo gaiola de esquilo destaca-se por sua simplicidade construtiva, composto essencialmente por um conjunto de barras

dispostas em ranhuras do ferro do rotor, as quais são curto-circuitadas por anéis condutores. Este tipo de rotor é amplamente empregado devido à sua simplicidade e robustez em comparação com o motor de rotor bobinado (FITZGERALD; KINGSLEY, 2003). Na Figura 1 é apresentado o esquema de um motor de indução tipo gaiola de esquilo.

Figura 1: Motor de Indução Trifásico



Fonte: (ELETROVAL, 2025)

A alimentação em corrente alternada para um motor de indução é fornecida pelos terminais do estator. Por sua vez, o rotor recebe a corrente por indução, semelhante ao funcionamento de um transformador. Quando a excitação é realizada por uma fonte polifásica equilibrada, um campo magnético girante é produzido no entreferro. Esse campo gira em velocidade síncrona, a qual é determinada pelo número de polos do estator e pela frequência da rede de alimentação fornecida ao estator (FITZGERALD; KINGSLEY, 2003).

A corrente no rotor geralmente é oposta ao sentido do campo magnético que o atravessa. Isso resulta na geração de um campo magnético no rotor. Esse vetor interage com o campo girante do estator, ocasionando o movimento rotacional no eixo do motor. Ao contrário do motor de corrente alternada síncrono, o rotor em um motor de indução não gira na mesma velocidade do campo girante do estator, gerando o fator de escorregamento. Este fator de escorregamento resulta em uma velocidade de rotação do rotor ligeiramente inferior à velocidade do campo girante. Essa distinção aumenta a complexidade do controle de velocidade de um motor assíncrono. No entanto, atualmente, existem técnicas bem

estabelecidas para o controle de velocidade de um motor assíncrono, que são largamente empregadas em inversores de frequência (MARQUES, 2016).

## **1.2 Análise de sinais no domínio da frequência**

Nesta seção, serão apresentados métodos de análise de sinais no domínio da frequência. Alguns sinais no domínio do tempo podem ser complexos para serem analisados diretamente. Ao se transformar esses sinais do domínio do tempo para o da frequência, é possível analisar o comportamento do sinal em termos de frequência e evidenciar os componentes harmônicos o que permite tirar conclusões interessantes em relação a operação do sistema analisado.

### **1.2.1 Transformada de Fourier**

Sinais periódicos podem ser representados por exponenciais complexas que estão relacionadas de forma harmônica. Já para sinais aperiódicos, essas exponenciais estão muito próximas em frequência. Em vez de uma simples soma, sua representação requer uma integral, que é chamada de transformada de Fourier. Essa transformada descreve o espectro de coeficientes resultante (WILLSKY; OPPENHEIM, 2010).

Matematicamente a transformada de Fourier de um sinal  $f(t)$ , é descrita pela Equação (1):

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

Sendo  $\omega$  é a variável independente que representa a frequência,  $f(t)$  é o sinal de interesse a ser calculado a transformada de Fourier e  $t$  é a variável do tempo.

Através de algoritmos computacionais, é possível calcular aproximações da Transformada de Fourier para sinais arbitrários, mesmo sem o conhecimento da formulação analítica. Este método é conhecido como Transformada Rápida de Fourier (TRF), permitindo a análise do espectro de sinais medidos em situações reais.

## **1.3 Análise da assinatura elétrica de corrente de motores**

O princípio fundamental da técnica de assinatura de corrente em motores baseia-se na capacidade das falhas, sejam elas elétricas ou mecânicas, de provocar alterações no fluxo

magnético presente no entreferro do motor. Devido a essa característica, aliada à natureza não invasiva da técnica, torna-se interessante utilizá-la na manutenção preditiva, visando diagnosticar falhas em motores elétricos de indução. Os procedimentos para a aplicação da técnica consistem na coleta, em tempo real, dos valores da corrente estatórica de uma das fases do motor, na transformação do sinal para o domínio da frequência e na análise dos harmônicos presentes no espectro (SILVA FONTES, 2017).

Com o auxílio da técnica, é viável avaliar a integridade dos enrolamentos do estator, identificar excentricidades estáticas e dinâmicas no entreferro, realizar uma avaliação abrangente da carga do sistema, bem como verificar a eficiência e a integridade do acoplamento. Considerando que essa técnica é empregada para o monitoramento em tempo real da condição dos sinais de corrente durante a operação do motor, é imprescindível contar com a instrumentação adequada para o registro desses sinais. Portanto, são necessários os seguintes componentes: um transformador de corrente para a detecção dos sinais de corrente, uma derivação resistiva na saída do transformador de corrente e um analisador de espectro para a geração da assinatura de corrente (THAKUR; WADHWANI; WADHWANI, 2015).

### **1.3.1 Barras quebradas**

A presença de falhas nas barras do rotor resulta em assimetrias que provocam a geração de campos magnéticos tanto na direção avançada quanto na reversa em relação ao rotor. Esses campos induzem correntes e forças eletromotrizes no enrolamento estatórico, gerando desequilíbrios e componentes harmônicos. Essas anomalias causam variações periódicas na corrente, picos de torque e flutuações na velocidade de rotação. Como resultado, o desempenho do motor é comprometido, levando a ruído adicional e distorção no sistema elétrico. Conforme os autores (THAKUR; WADHWANI; WADHWANI, 2015), a detecção de barras quebradas pode ser realizada quando houver o surgimento ou crescimento de picos de amplitude na frequência obtida a partir da diferença entre a frequência fundamental da rede e o dobro da frequência de escorregamento (2):

$$f_{sb} = f_1(1 \pm 2s) \quad (2)$$

O termo  $f_{sb}$  representa as frequências das bandas laterais,  $f_1$  é a frequência fundamental da rede de alimentação, e  $s$  é o escorregamento.

### 1.3.2 Excêntricidade no entreferro

De acordo com Thakur (2015), a excentricidade estática e dinâmica no entreferro de motores elétricos induzem perturbações devido à alteração na simetria do campo magnético. Na excentricidade estática, o deslocamento do eixo de rotação resulta em um entreferro desigual entre o estator e o rotor, levando a uma distribuição assimétrica do campo magnético. Isso gera uma força magnética desequilibrada (FMD), que atua na direção do entreferro mínimo, resultando em vibrações e ruídos indesejados. Por outro lado, na excentricidade dinâmica, o entreferro variável entre o estator e o rotor devido ao desgaste dos rolamentos causa um movimento irregular do entreferro mínimo. Isso resulta em variações periódicas no campo magnético e na força magnética desequilibrada, contribuindo para oscilações adicionais e maior desgaste mecânico. Ambas as formas de excentricidade introduzem desequilíbrios nas características operacionais do motor, afetando negativamente sua eficiência, desempenho e vida útil.

A detecção de excentricidades no entreferro pode resultar em perturbações de frequência. Essas irregularidades podem ser identificadas por meio da análise da corrente e, por conseguinte, afetam a análise do fluxo. Essas frequências associadas geralmente seguem o padrão descrito pela Equação (3):

$$f_{ec} = f_1 (R \pm nd) \left( 1 - \frac{s}{p} \right) \pm k_1 \quad (3)$$

O resultado da equação (3) representa os componentes de frequência dependentes da excentricidade do entreferro em Hertz e são influenciados por vários parâmetros. O número de ranhuras do rotor, representado por  $R$ , desempenha um papel importante nessa equação. Além disso,  $f_1$ , que indica a frequência de alimentação em Hertz, e  $nd$ , que pode ser  $\pm 1$ , também contribuem para determinar esses componentes de frequência. Os valores de  $k_1$  variam de 1, 3, 5 a 7 de acordo com a gravidade da falha. O escorregamento, denotado por  $s$ , e o número de pares de polos, representado por  $p$ , completam os fatores que afetam os componentes de frequência relacionados à excentricidade do entreferro.

### 1.3.3 Falhas de origem mecânica

A assinatura elétrica de corrente permite identificar falhas de origens mecânicas assim como elétricas, pois qualquer perturbação mecânica no rotor do motor de indução ocasiona variações na forma de onda do fluxo de ar no entreferro. Isso, por sua vez, pode induzir componentes de corrente no estator (THAKUR; WADHWANI; WADHWANI,

2015). Na equação (4) são apresentadas as componentes de frequência devido a falhas mecânicas.

$$f_e = f_1 \pm m \cdot f_{tr} \quad (4)$$

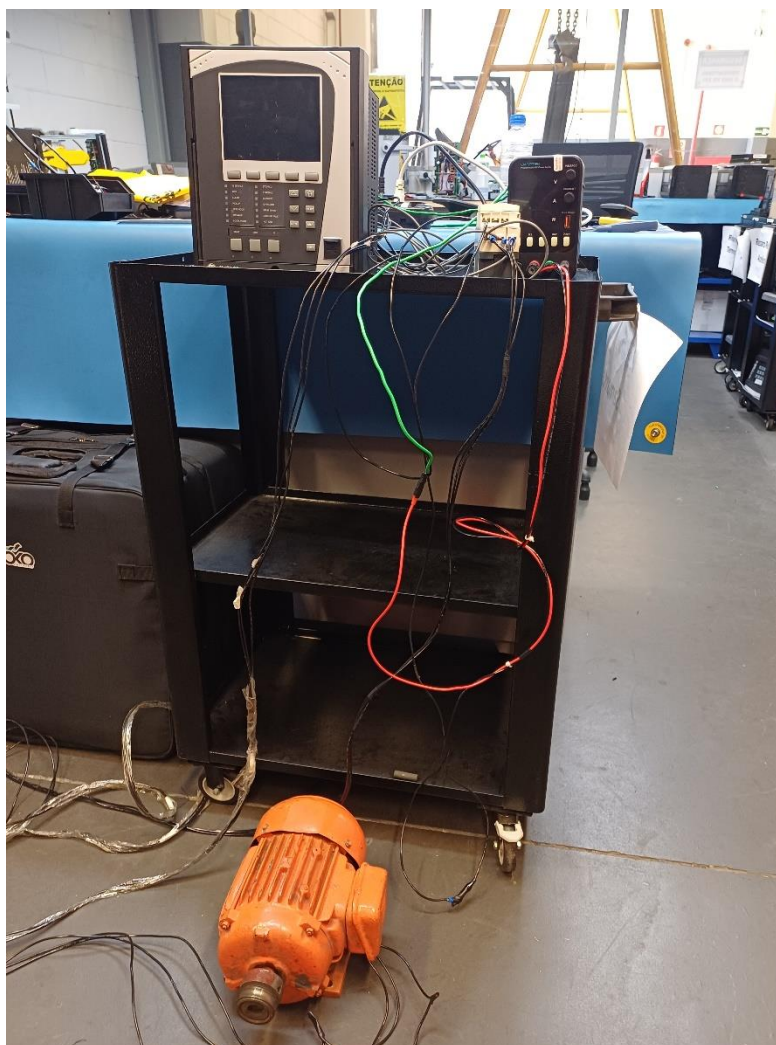
A Equação (4) representa a relação entre os componentes de corrente  $f_e$ , causados por perturbações no entreferro, em Hertz,  $f_1$  sendo a frequência base e  $m$  representando o número harmônico, podendo ser 1, 2, 3 e assim por diante.  $f_{tr}$  denota a frequência de rotação do rotor em Hertz.

## 2 METODOLOGIA

Para a obtenção da assinatura elétrica, foi utilizado o Relé 869 da General Electric, um dispositivo projetado para proteção de motores que inclui funções de monitoramento, tendo como foco principal o diagnóstico da assinatura elétrica. Esse relé permite a análise das formas de onda de tensão e corrente, possibilitando a realização de análises espectrais do motor e a avaliação de suas condições operacionais. Inicialmente, é necessário realizar medições do motor durante um período mínimo de uma hora, assegurando seu funcionamento sem falhas, para estabelecer uma *baseline*, que corresponde à análise espectral padrão do motor em operação normal. A partir dessa *baseline*, as medições são efetuadas continuamente, possibilitando a detecção de falhas, de natureza mecânica nos enrolamentos e no estator do motor ao longo do tempo. Para mais detalhes sobre o funcionamento e as especificações do Relé 869, o manual completo pode ser acessado diretamente no site da GE Vernova (GE VERNOVA, 2025).

A proposta inicial do projeto consistia em utilizar um motor de pequeno porte, com potência estimada de três quartos de cavalo, como objeto de pesquisa para a obtenção da *baseline* e, em seguida, causar uma falha mecânica com o objetivo de registrar os dados referentes à falha. No entanto, durante a execução do projeto, diversos problemas foram identificados, impedindo a realização do experimento de maneira satisfatória. O motor utilizado não possuía dados de placa, como tensão nominal, corrente, quantidade de enrolamentos, quantidade de polos e, inclusive, a potência exata do motor gerava incertezas, com dúvidas se seria de 1/4 ou 3/4 de cavalo. Outros desafios também surgiram ao longo da execução: embora tenha sido possível obter a *baseline* do motor, as tentativas de induzir falhas mecânicas não apresentaram resultados satisfatórios. Como não era viável causar danos no motor para gerar falhas elétricas, a estratégia adotada foi tentar provocar falhas mecânicas, desbalanceando fisicamente o motor, como através da instalação de suportes instáveis para aumentar a vibração. Entretanto, essa abordagem não resultou em mudanças visíveis nas análises espectrais da *baseline* ou nas tentativas de inserção de falhas. A Figura 2 apresenta o esquema experimental utilizando o motor de indução de pequeno porte.

Figura 2: Esquema experimental com motor de indução



Fonte: Elaborado pelo autor.

Antes de se abandonar a ideia de utilizar o motor como objeto de pesquisa, diversas tentativas foram realizadas, empregando bases instáveis para desbalancear o motor e, assim, induzir falhas mecânicas. Contudo, essas abordagens não resultaram em dados que fossem considerados satisfatórios. Diante da falta de resultados relevantes nas análises espectrais, concluiu-se que a estratégia adotada deveria ser reconsiderada, exigindo uma abordagem diferente para o sucesso do experimento.

Considerando que a pesquisa foi realizada durante o período de estágio na empresa TDM GRID, especializada em proteção e controle de subestações de alta tensão, e que os materiais utilizados, tanto o relé quanto o motor, pertencem ao laboratório da empresa, a nova abordagem consistiu em explorar mais uma das ferramentas disponíveis. Dessa vez, optou-se por utilizar as malas de testes de proteção para simular o funcionamento de um motor de grande porte, o que facilitou a obtenção dos resultados. Essa simulação permitiu reproduzir com maior precisão as condições operacionais desejadas, oferecendo uma

alternativa mais eficiente à tentativa inicial com o motor de pequeno porte.

A mala utilizada foi a VEBKO AMT-105, um equipamento multifuncional para testes de proteção. O software da mala oferece diversos módulos prontos para testes, como sobrecorrente, sobrecorrente direcional e diferencial, nos quais é possível configurar alguns parâmetros e gerar curvas automáticas. Para detalhes completos sobre o funcionamento e instruções do equipamento, o manual pode ser acessado diretamente no site da VEBKO (VEBKO, 2025).

No entanto, para a simulação da corrente do motor, nenhum desses módulos específicos foi utilizado. Em vez disso, foi empregado o módulo *"State Sequencer"*, que permite selecionar valores de tensão, corrente e tempo para simular diferentes estados operacionais. Por meio desse módulo, foi possível simular tanto a partida do motor quanto seu funcionamento em plena carga. Além disso, o módulo permite a utilização de harmônicas e inter-harmônicas, o que possibilitou a simulação de falhas presentes em motores reais, tornando o processo mais próximo das condições de campo.

Para dar início ao processo e utilizar a mala como motor, foi necessário realizar uma pesquisa na internet em busca de um motor com potência de 100 HP. Essa etapa foi essencial para a configuração do relé, que deveria ser ajustado de acordo com os parâmetros especificados para o motor escolhido. Na Tabela 1 são apresentados os dados de placa do motor selecionado, além de informações adicionais sobre o relé GE 869.

Tabela 1 - Dados do Motor e Relé GE SR869

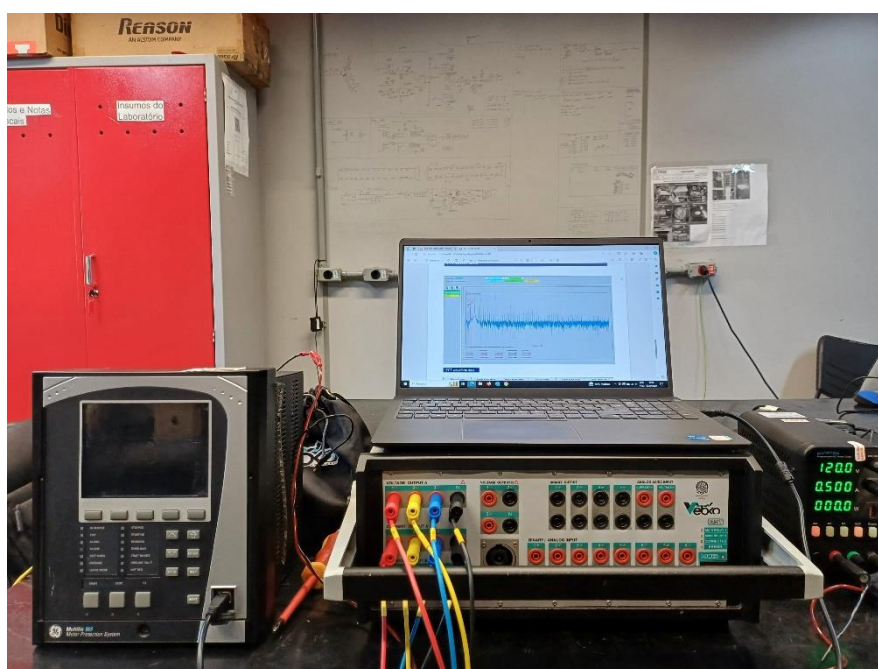
|                                 |                              |
|---------------------------------|------------------------------|
| Relatório criado por            | NT-1050                      |
| Nome do Motor                   | UPCD11                       |
| Numero de Pedido do Dispositivo | 869-EP5NNG5HRRALFGSPFE2ESWAN |
| Versão Firmware                 | 2.90                         |
| Corrente a Plena Carga do Motor | 240 A                        |
| Tensão Nominal                  | 220 V                        |
| Potência Nominal do Motor       | 100 Hp                       |
| Velocidade Nominal              | 1750 RPM                     |
| Numero de Pólos                 | 4                            |
| Eficiência Nominal do Motor     | 94,6%                        |
| Frequência Nominal do Motor     | 60 Hz                        |
| Tempo de Funcionamento do Motor | 2 dias e 6 horas             |
| Gerado em                       | 03 de Jul de 2024, 14:36     |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além dos ajustes dos dados de placa do motor no relé, foi necessário configurar as relações de transformação dos transformadores de corrente (TCs) e dos transformadores de potencial (TPs). Os TPs foram configurados com a relação 1:1, tendo em vista que, com a

mala, é possível injetar 220 V de linha, ou seja, 127 V por fase em uma conexão estrela. Os TCs, por sua vez, foram configurados com a relação 1200:5, de modo que a corrente nominal do motor, de 240 A, correspondesse a 1 A em valores de secundário. Dessa forma, ao injetar 1 A, o relé interpreta que a corrente nas fases do motor é de 240 A. Após a configuração completa do relé, foram realizadas as ligações físicas entre a mala de testes, o relé e o computador. Na Figura 3 é apresentado o arranjo experimental para a simulação da mala de testes como um motor de 100 HP.

Figura 3: Simulação da mala de testes Vebko como motor



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para simular o funcionamento do motor em condições ideais e estabelecer a linha de base no relé (*baseline*), foi desenvolvido, inicialmente, um *template* no *software* da mala de testes, configurado no modo *sequencer*. Este *template* contém dois estados distintos.

No primeiro estado foi realizada a simulação do arranque do motor, com duração de 5 segundos e corrente de 5 A, a qual, em termos de valores secundários, equivale a 1200 A. Em sequência, foi implementado um segundo estado que representa o funcionamento do motor sob condições normais, com valor nominal de tensão e noventa por cento da corrente à plena carga. Neste contexto, a corrente foi fixada em 900 mA, o que corresponde a 216 A em valores primários.

A tensão aplicada em ambos os estados foi a tensão nominal de 127 V de fase e 220 V de linha. O estado de operação do motor, em valores nominais, foi mantido por um período de 65 minutos, tempo suficiente para que o relé pudesse identificar a linha de base

do motor simulado por meio da mala de testes. Essa metodologia assegura a coleta de dados adequados para a análise do desempenho do motor em sua condição operacional ideal.

Em seguida, procedeu-se à simulação das falhas no motor, optando-se por uma falha mecânica. As frequências de falta associadas a essa falha foram configuradas em sequência de fase negativa, uma vez que esse tipo de falha está relacionado ao aumento das vibrações.

Para a simulação do funcionamento do motor sob falhas, utilizou-se novamente o módulo *sequencer* da mala de testes. O primeiro estado representou o arranque do motor, de forma idêntica ao estado sem falhas, com 127 V e 5 A por fase durante 5 segundos. No estado subsequente, que corresponde ao regime permanente do motor, foram aplicados 127 V e 900 mA por fase. Neste momento, foram adicionadas as harmônicas pertinentes às falhas. O módulo *sequencer* permite a inclusão de duas harmônicas de frequência arbitrária, combinadas com o sinal de corrente da fundamental.

A frequência fundamental, neste caso, é de 60 Hz, enquanto as harmônicas foram configuradas em 1,67 Hz e 118,33 Hz. Esses valores foram selecionados com base em uma falha mecânica de ordem  $m=1$ , conforme calculado pela equação (4). A amplitude das harmônicas foi utilizada como variável no experimento. O teste foi repetido para diferentes valores de amplitude das harmônicas, especificamente 10 mA, 25 mA, 50 mA, 100 mA e 150 mA. Cada um dos testes, com essas amplitudes, foi realizado por 60 minutos, com o objetivo de obter a análise espectral correspondente a cada uma das amplitudes testadas.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

É importante destacar que não foi utilizado um motor real, mas sim uma mala de testes para simular um motor. Os sinais utilizados foram muito próximos de sinais ideais, ao contrário de um motor real em funcionamento, que apresenta características não ideais. Essa diferença pode ser um dos motivos para a dificuldade do relé identificar a mala de testes como um motor, entretanto, as TRFs e os dados referentes ao funcionamento do motor foram obtidos corretamente. Portanto, as análises serão realizadas a partir da observação das TRFs e dos dados do motor, em vez de se basearem na análise automática do algoritmo do relé.

O método de Análise de Assinatura Elétrica (AAE) implementado no algoritmo do relé 869 facilita o tratamento de dados e a identificação de falhas, pois, apesar de gerar as TRFs, não requer um profundo conhecimento sobre elas. O relé gera relatórios que apontam as falhas utilizando três cores para identificar o estado do motor, do sistema mecânico e dos rolamentos: verde indica que o motor está saudável, amarelo indica atenção, e vermelho sinaliza que o motor está crítico, próximo de uma falha.

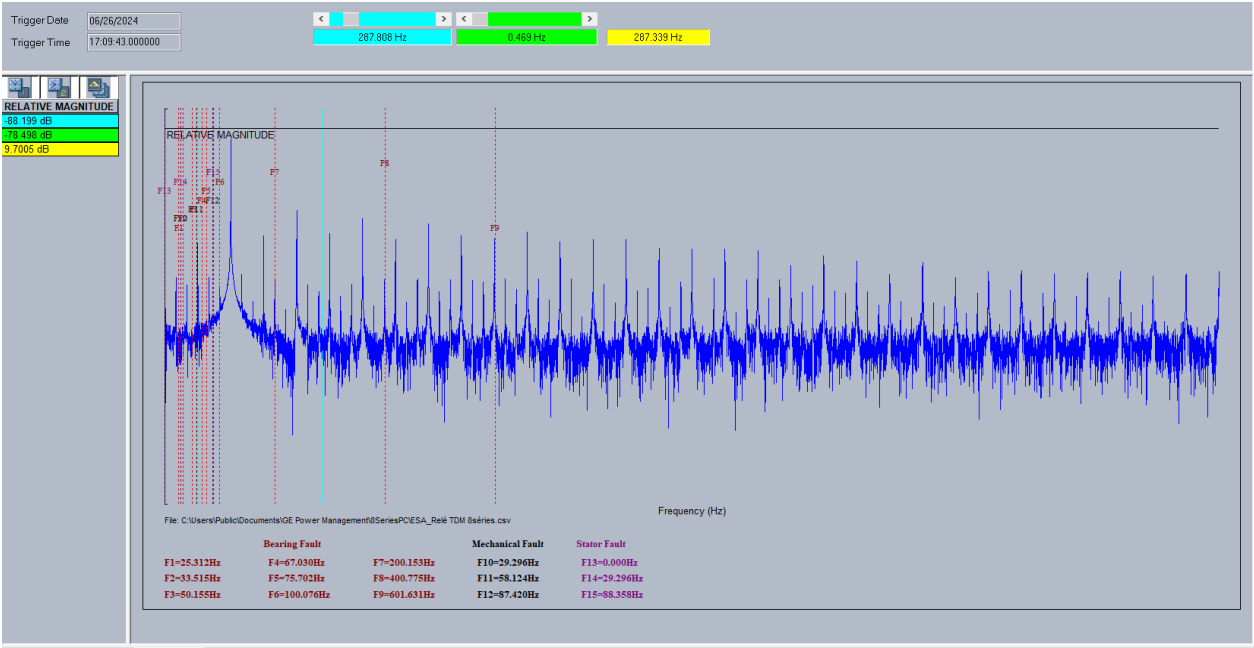
No caso deste trabalho, houve problemas nas identificações, pois o relé não comparou a *baseline* do motor de forma coerente com as falhas injetadas. Apesar disso, a leitura dos dados e a geração das TRFs pelo relé foram realizadas corretamente. Assim, torna-se possível uma inspeção visual, permitindo identificar facilmente a mudança nos padrões das TRFs à medida que a amplitude das falhas aumenta. Isso possibilita observar como o relé identifica as falhas e valida seu funcionamento. Além disso, abre espaço para futuras pesquisas utilizando um motor real de 100 Hp, que é o valor mínimo de potência sugerido pelo relé para um trabalho com resultados numéricos e aproveitando toda a sua capacidade. Outra limitação observada foi relacionada à mala de testes Vebko, que, ao utilizar inter-harmônicas em vez de harmônicas, apresenta uma restrição, pois permite apenas a injeção de duas inter-harmônicas. No contexto da falha mecânica, é viável adicionar apenas a ordem  $m = 1$  o que limita o formato da falha. Essa restrição compromete a análise e pode impactar negativamente a identificação de falhas mais complexas, que demandariam a consideração de múltiplas ordens de inter-harmônicas.

Durante toda a execução do trabalho, utilizou-se uma faixa de 90% da Corrente de Linha da FLA, desde a obtenção da *baseline* até o último teste com falha de amplitude de 150 mA. Isso ocorre porque, para o relé 869, deve haver a aquisição de uma *baseline* para cada faixa de carga. Neste caso, como a *baseline* foi obtida apenas para essa faixa de carga, todo o trabalho foi realizado com base nela.

3.1 *Baseline* do motor simulado

Na Figura 4 apresenta-se a TRF referente a *baseline* do motor simulado a partir da mala de testes Vebko.

Figura 4: TRF *baseline*



Fonte:Elaborado pelo autor.

Não são apresentados os eixos com o intuito de facilitar a visualização dos dados. Caso se deseje visualizar uma frequência específica, basta arrastar a linha azul até o ponto desejado. A magnitude é apresentada em decibéis no eixo y, enquanto as frequências estão dispostas no eixo x. Neste contexto, como se refere à *baseline* do motor simulado, a Transformada Rápida de Fourier (TRF) representa o funcionamento do motor sem falhas.

3.2 Funcionamento com falhas do motor simulado

Após a execução da *baseline*, iniciou-se a simulação do motor com falhas. Na Tabela 2 são apresentados os dados do motor, incluindo tensão, frequência, rotação e taxa de distorção harmônica, durante uma falha mecânica simulada a partir das harmônicas de corrente com amplitude de 5 mA.

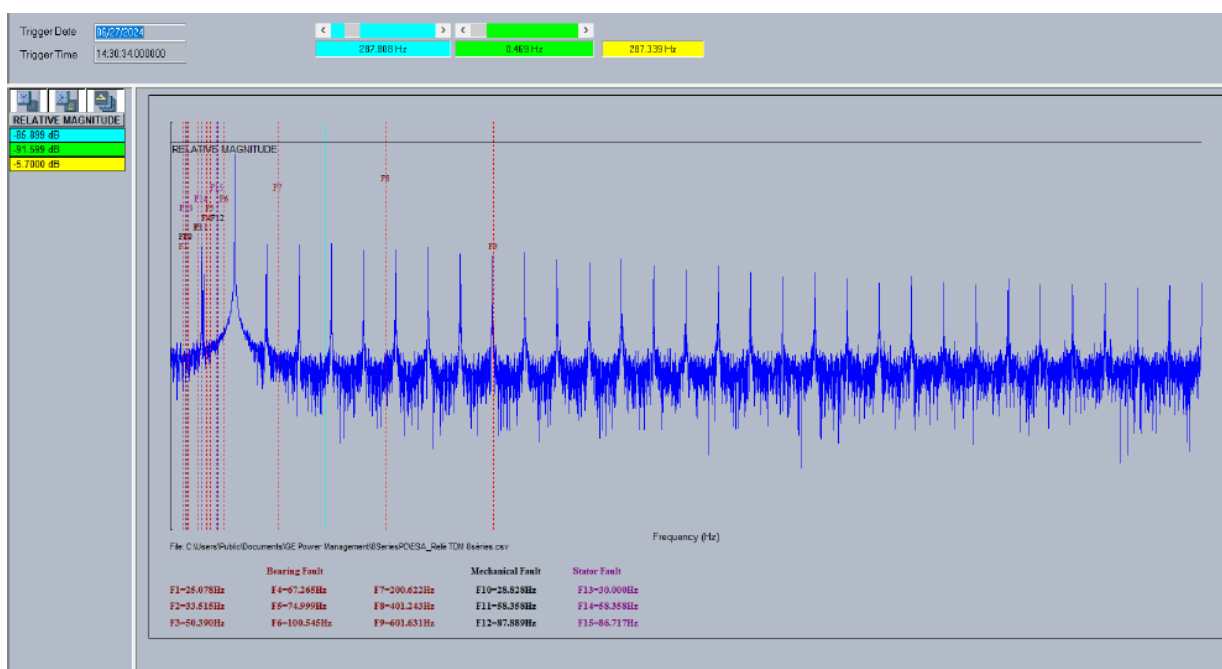
Tabela 2: Dados com falha mecânica de 5 mA

| Alimentação                    |                    | Carga                                    |            |
|--------------------------------|--------------------|------------------------------------------|------------|
| Tensão de Linha (V)            | 220,55 V           | Fator da Corrente a Plena Carga do Motor | 0,90 x FLA |
| Frequência(Hz)                 | 59,995 Hz          | Velocidade (RPM)                         | 1756,0 RPM |
| Desbalanço de Tensão(%)        | 0,0%               | Corrente Média (A)                       | 216,602 A  |
| Desbalanço de Corrente(%)      | 0,0%               | Capacidade Térmica Utilizada(%)          | 1%         |
| TDH de Tensão por fase A/B/C   | 1,3% / 1,3% / 1,3% | Compartilhamento de Carga                | 0          |
| TDH de Corrente por fase A/B/C | 1,9% / 1,9% / 1,9% | Fator de Potência                        | 0,86 Lag   |
| Taxa de Variação de Frequência | 0,04 Hz/seg        | Potência Ativa(kW)                       | 71,4 kW    |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 5 é apresentada a TRF do motor simulado com amplitude de 5 mA.

Figura 5: TRF com falha mecânica de 5mA



Fonte: Elaborado pelo autor.

Não são apresentados os eixos com o intuito de facilitar a visualização dos dados. Caso se deseje visualizar uma frequência específica, basta arrastar a linha azul até o ponto desejado. A magnitude é apresentada em decibéis no eixo y, enquanto as frequências estão dispostas no eixo x.

Na Tabela 3 são apresentados os dados do motor, incluindo tensão, frequência, rotação e taxa de distorção harmônica, durante uma falha mecânica com amplitude de 10 mA.

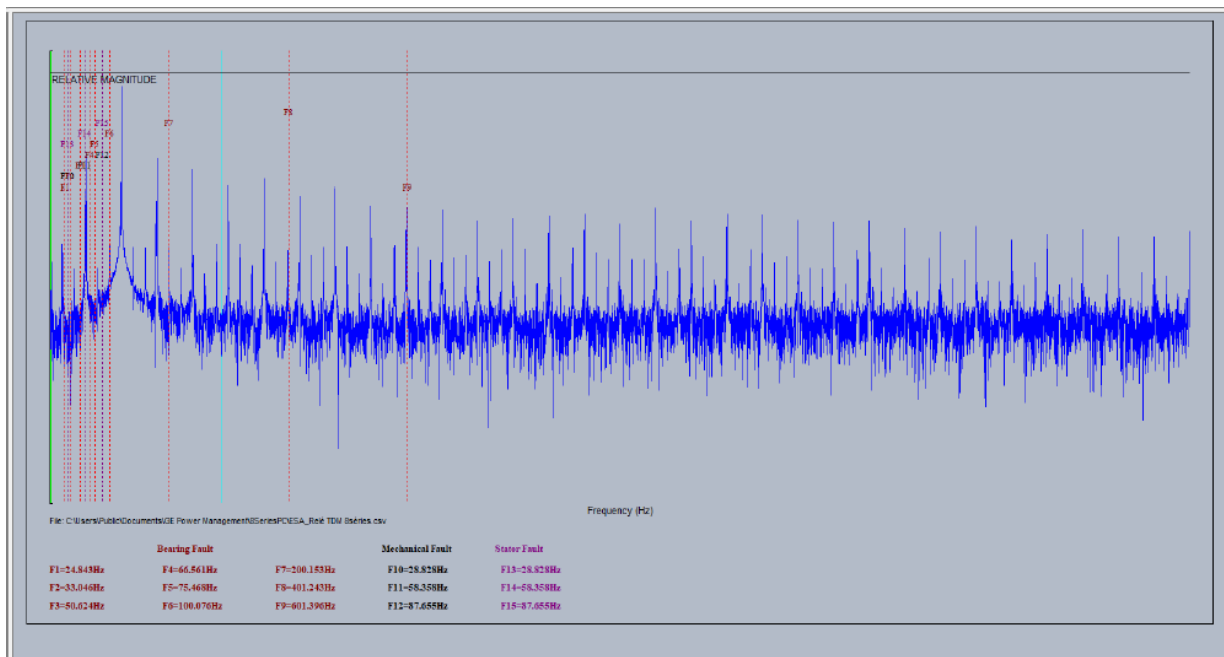
Tabela 3: Dados com falha mecânica de 10mA

| Alimentação                    |                    | Carga                                    |            |
|--------------------------------|--------------------|------------------------------------------|------------|
| Tensão de Linha (V)            | 218,91 V           | Fator da Corrente a Plena Carga do Motor | 0,90 x FLA |
| Frequência(Hz)                 | 60,016 Hz          | Velocidade (RPM)                         | 1756,0 RPM |
| Desbalanço de Tensão(%)        | 2,0%               | Corrente Média (A)                       | 216,211 A  |
| Desbalanço de Corrente(%)      | 0,0%               | Capacidade Térmica Utilizada(%)          | 1%         |
| TDH de Tensão por fase A/B/C   | 3,3% / 2,7% / 3,7% | Compartilhamento de Carga                | 0          |
| TDH de Corrente por fase A/B/C | 3,8% / 3,3% / 2,7% | Fator de Potência                        | 0,86 Lag   |
| Taxa de Variação de Frequência | -0,02 Hz/seg       | Potência Ativa(kW)                       | 70,5 kW    |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 6 apresenta-se a Transformada Rápida de Fourier (TRF) do motor simulado, evidenciando uma falha do tipo mecânica com amplitude de 10 mA.

Figura 6: TRF com falha mecânica de 10mA



Fonte: Elaborado pelo autor.

Não são apresentados os eixos com o intuito de facilitar a visualização dos dados. Caso se deseje visualizar uma frequência específica, basta arrastar a linha azul até o ponto desejado. A magnitude é apresentada em decibéis no eixo y, enquanto as frequências estão dispostas no eixo x.

Na Tabela 4 são apresentados os dados do motor, incluindo tensão, frequência, rotação e taxa de distorção harmônica, durante uma falha mecânica com amplitude de 50

mA.

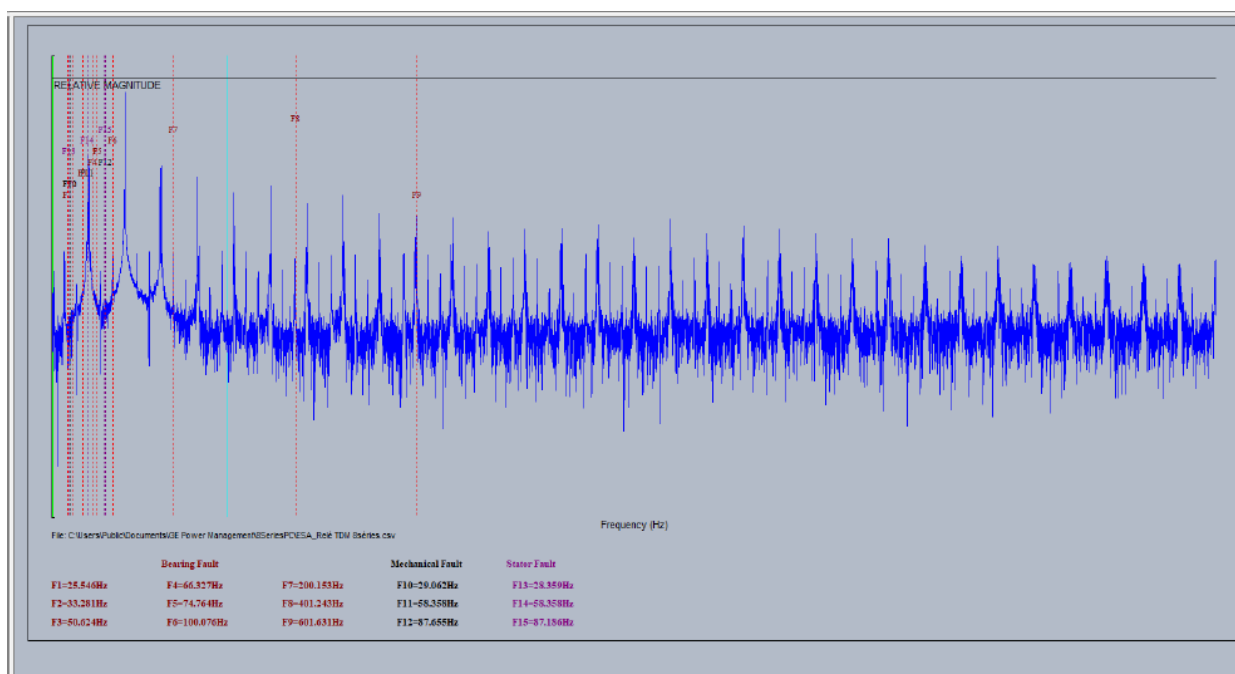
Tabela 4: Dados com falha mecânica de 50mA

| Alimentação                    |                    | Carga                                    |            |
|--------------------------------|--------------------|------------------------------------------|------------|
| Tensão de Linha (V)            | 218,83 V           | Fator da Corrente a Plena Carga do Motor | 0,90 x FLA |
| Frequência(Hz)                 | 59,947 Hz          | Velocidade (RPM)                         | 1756,0 RPM |
| Desbalanço de Tensão(%)        | 1,9%               | Corrente Média (A)                       | 216,406 A  |
| Desbalanço de Corrente(%)      | 0,0%               | Capacidade Térmica Utilizada(%)          | 1%         |
| TDH de Tensão por fase A/B/C   | 3,2% / 2,7% / 3,7% | Compartilhamento de Carga                | 0          |
| TDH de Corrente por fase A/B/C | 4,9% / 5,4% / 2,2% | Fator de Potência                        | 0,86 Lag   |
| Taxa de Variação de Frequência | 0,56 Hz/seg        | Potência Ativa(kW)                       | 70,7 kW    |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 7 apresenta-se a Transformada Rápida de Fourier (TRF) do motor simulado, evidenciando uma falha do tipo mecânica com amplitude de 50 mA.

Figura 7: TRF com falha mecânica de 50mA



Fonte: Elaborado pelo autor.

Não são apresentados os eixos com o intuito de facilitar a visualização dos dados. Caso se deseje visualizar uma frequência específica, basta arrastar a linha azul até o ponto desejado. A magnitude é apresentada em decibéis no eixo y, enquanto as frequências estão dispostas no eixo x.

Na Tabela 5 são apresentados os dados do motor, incluindo tensão, frequência, rotação e taxa de distorção harmônica, durante uma falha mecânica com amplitude de 100 mA.

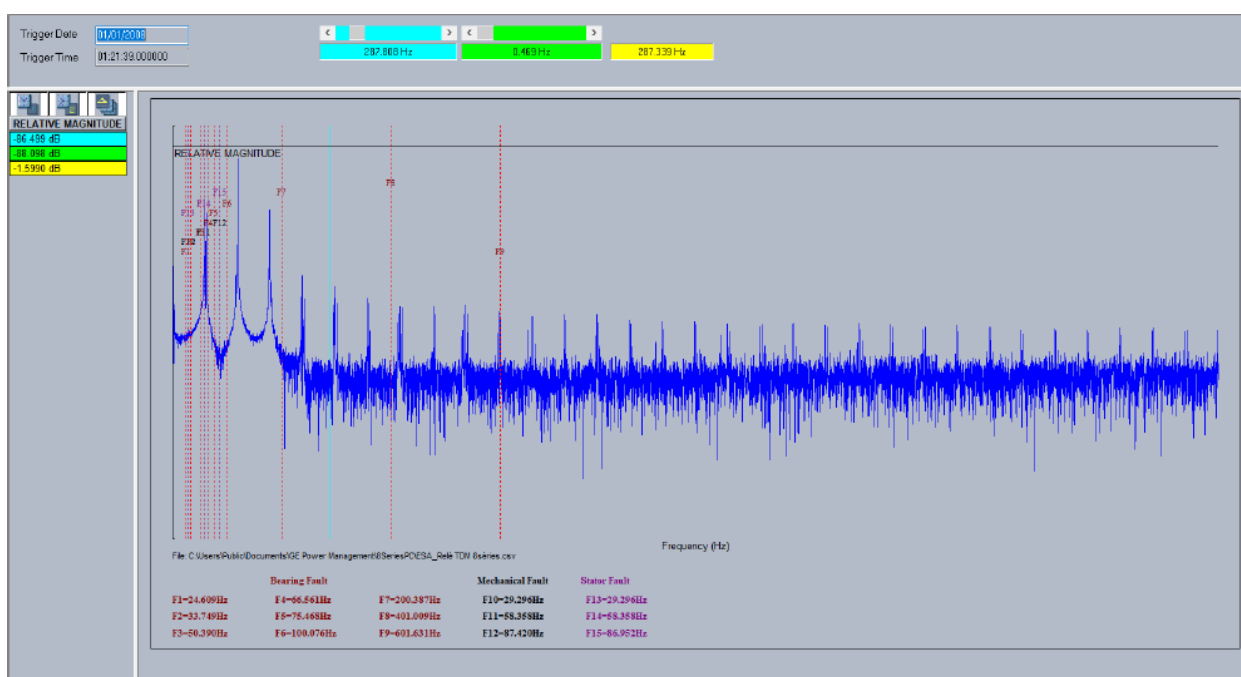
Tabela 5: Dados com falha mecânica de 100mA

| <b>Alimentação</b>             |                    | <b>Carga</b>                             |            |
|--------------------------------|--------------------|------------------------------------------|------------|
| Tensão de Linha (V)            | 220,29 V           | Fator da Corrente a Plena Carga do Motor | 0,90 x FLA |
| Frequência (Hz)                | 59,916 Hz          | Velocidade (RPM)                         | 1756,0 RPM |
| Desbalanço de Tensão (%)       | 0,0%               | Corrente Média (A)                       | 216,211 A  |
| Desbalanço de Corrente (%)     | 0,0%               | Capacidade Térmica Utilizada (%)         | 2%         |
| TDH de Tensão por fase A/B/C   | 3,1% / 1,8% / 2,5% | Compartilhamento de Carga                | 0          |
| TDH de Corrente por fase A/B/C | 5,1% / 6,3% / 5,7% | Fator de Potência                        | 0,87 Lag   |
| Taxa de Variação de Frequência | 1,21 Hz/seg        | Potência Ativa (kW)                      | 71,3 kW    |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 8 apresenta-se a Transformada Rápida de Fourier (TRF) do motor simulado, evidenciando uma falha do tipo mecânica com amplitude de 100 mA.

Figura 8: TRF com falha mecânica de 100mA



Fonte: Elaborado pelo autor.

Não são apresentados os eixos com o intuito de facilitar a visualização dos dados. Caso se deseje visualizar uma frequência específica, basta arrastar a linha azul até o ponto desejado. A magnitude é apresentada em decibéis no eixo y, enquanto as frequências estão dispostas no eixo x.

Na Tabela 6 são apresentados os dados do motor, incluindo tensão, frequência, rotação e taxa de distorção harmônica, durante uma falha mecânica com amplitude de 150 mA.

Tabela 6: Dados com falha mecânica de 150mA

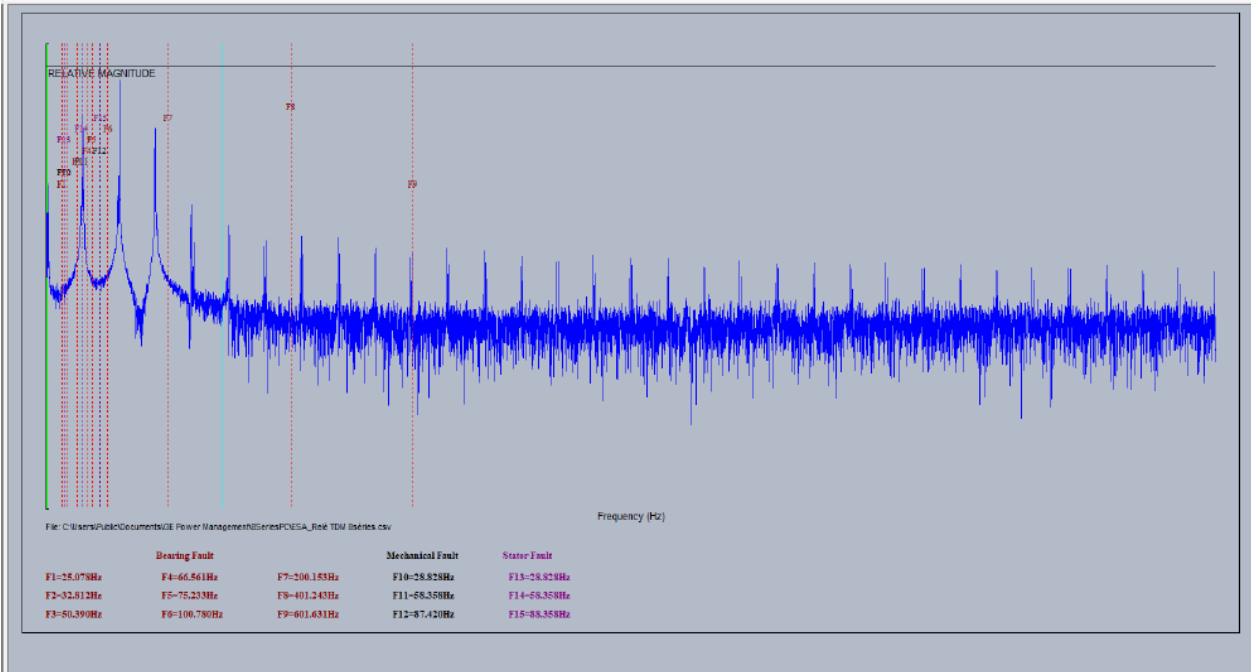
| Alimentação                    |                    | Carga                                    |            |
|--------------------------------|--------------------|------------------------------------------|------------|
| Tensão de Linha (V)            | 220,59 V           | Fator da Corrente a Plena Carga do Motor | 0,90 x FLA |
| Frequência (Hz)                | 59,827 Hz          | Velocidade (RPM)                         | 1756,0 RPM |
| Desbalanço de Tensão (%)       | 0,0%               | Corrente Média (A)                       | 216,992 A  |
| Desbalanço de Corrente (%)     | 0,0%               | Capacidade Térmica Utilizada (%)         | 5%         |
| TDH de Tensão por fase A/B/C   | 1,3% / 1,3% / 1,3% | Compartilhamento de Carga                | 0          |
| TDH de Corrente por fase A/B/C | 8,2% / 8,2% / 8,1% | Fator de Potência                        | 0,87 Lag   |
| Taxa de Variação de Frequência | 0,71 Hz/seg        | Potência Ativa (kW)                      | 71,8 kW    |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 9 apresenta-se a Transformada Rápida de Fourier (TRF) do motor

simulado, evidenciando uma falha do tipo mecânica com amplitude de 150 mA.

Figura 9: TRF com falha mecânica de 150mA



Fonte:Elaborado pelo autor.

Não são apresentados os eixos com o intuito de facilitar a visualização dos dados. Caso se deseje visualizar uma frequência específica, basta arrastar a linha azul até o ponto desejado. A magnitude é apresentada em decibéis no eixo y, enquanto as frequências estão dispostas no eixo x.

Ao comparar a Transformada Rápida de Fourier (TRF) da *baseline* com a falha de 5 mA, observa-se que as mudanças são bastante sutis. Embora já seja possível notar algumas variações, essas alterações são difíceis de identificar, apresentando apenas alguns pontos de frequência com leves divergências. Nesse caso, ainda não é possível identificar de forma satisfatória uma grande mudança ou apontar as falhas.

Ao comparar a Transformada Rápida de Fourier (TRF) da *baseline* com a falha mecânica de 50 mA, já é possível observar uma diferença expressiva entre os gráficos. Na faixa de frequência em torno de 120 Hz, observa-se um aumento notável na largura espectral e na amplitude dos picos. Adicionalmente, novos picos surgem nas proximidades de  $120 \pm 58,33$  Hz, valor que coincide com a frequência de falha rotação mecânica (58,33 Hz), o que evidencia o progresso da falha mecânica no motor. Essa observação é relevante, pois uma das frequências mecânicas utilizadas como falha foi de 58,33 Hz, evidenciando o surgimento e o avanço da falha mecânica.

Em seguida, ao comparar a *baseline* com a falha mecânica de 100 mA, que já

representa uma distorção harmônica superior a 5%, é possível observar uma mudança muito expressiva em relação à *baseline*. Neste caso, a largura dos picos de frequência ao redor da frequência de 120 Hz aumentou, assim como a amplitude desses picos.

Por fim, ao comparar a Transformada Rápida de Fourier (TRF) da *baseline* com a falha mecânica de 150 mA, nota-se uma mudança ainda maior nos mesmos pontos observados na falha anterior, tornando-se mais evidentes. Neste caso, já se apresenta uma distorção harmônica superior a 8%.

Apesar das limitações mencionadas no início da discussão, é possível observar as mudanças nos padrões da análise espectral para o caso da falha mecânica, o que reafirma a importância deste trabalho. Além disso, destaca-se a possibilidade de melhorar os resultados utilizando motores reais, para que o algoritmo do relé GE 869 possa identificar as falhas de forma mais precisa e gerar relatórios que facilitem a análise de dados, tornando-a mais quantitativa e assertiva.

Outro fator a ser considerado é a facilidade de utilizar um dispositivo eletrônico inteligente, como o relé 869, para realizar a análise e diagnóstico da assinatura elétrica. Neste caso, não é necessário empregar outros equipamentos para a aquisição e o processamento de dados; o relé é responsável por todo o processo. Em alguns outros trabalhos, como (SILVA FONTES, 2017), é necessária a utilização de um transdutor de corrente para a aquisição dos dados, seguido de um osciloscópio e, por fim, ferramentas computacionais para a realização da TRF e o tratamento dos dados. Neste trabalho, o objetivo foi facilitar esse processo utilizando o relé, que já possui a capacidade de medir, devido aos seus medidores eletrônicos e conversores analógicos para digital internos, além de processar dados por meio de seu microprocessador e softwares integrados, o que proporciona um entendimento facilitado dos relatórios e gráficos gerados.

Os resultados evidenciaram que, mesmo em um ambiente simulado, as assinaturas espectrais permitem identificar padrões de falha progressiva no motor. A comparação entre a *baseline* e os diversos níveis de falha revelou um aumento gradativo na amplitude e na largura dos picos em pontos próximos a  $120 \text{ Hz} \pm 58,33 \text{ Hz}$ , valor que corresponde à frequência da falha mecânica injetada entretanto em volta da segunda harmônica da frequência de alimentação, reforçando a capacidade do relé de detectar anomalias com base na assinatura elétrica.

## CONCLUSÃO

Este trabalho explorou a viabilidade de identificar falhas mecânicas em um motor simulado por meio da análise espectral de assinaturas elétricas, utilizando o relé GE 869. O uso do relé como dispositivo inteligente para aquisição e processamento de dados demonstrou-se eficiente ao automatizar o procedimento de coleta de sinais e geração de relatórios, simplificando o diagnóstico de falhas. Essa metodologia representa uma alternativa vantajosa em relação a sistemas tradicionais, que geralmente requerem transdutores de corrente, osciloscópios e softwares externos para a análise de Transformada Rápida de Fourier (TRF).

Entretanto, a utilização de uma mala de testes, em vez de um motor real, impôs limitações à análise, dado que a simulação não reproduz fielmente as características complexas de um motor em operação, onde variáveis como desgaste natural e ruídos de operação impactam a assinatura elétrica. Essa limitação se refletiu na incapacidade do relé de identificar de maneira automática as falhas com precisão, tornando necessária a inspeção visual das TRFs para caracterizar as anomalias.

Assim, para estudos futuros, recomenda-se a aplicação desta metodologia em motores reais com potências a partir de 100 HP, faixa na qual o relé GE 869 está projetado para atuar com maior precisão. Com isso, espera-se melhorar a sensibilidade do sistema para detecção automática de falhas, permitindo ao relé gerar diagnósticos ainda mais confiáveis e, eventualmente, contribuindo para a otimização de rotinas de manutenção preditiva em instalações indústrias.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ELETROVAL MOTORES. **Motor de indução trifásico**. Disponível em: <https://www.eletovalmotores.com.br/motor-inducao-trifasico>. Acesso em: 19 jan. 2025.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Jr. C. **Máquinas Elétricas**. 6. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2003

GE VERNOVA. **Manual do Relé 869**. Disponível em: <https://www.gevernova.com/grid-solutions/app/ViewFiles.aspx?prod=869&type=3>. Acesso em: 19 jan. 2025.

MARQUES, L. F. B. **Manutenção preditiva de motores trifásicos de indução através da análise de assinatura de corrente e fluxo magnético**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2016.

SILVA FONTES, A. da. **Aplicação e comparação de técnicas de diagnóstico e detecção de falhas em motores elétricos de indução baseados em assinatura de corrente**. 2017. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2017.

TDM GRID. TDM Serviços, 2025. Disponível em: <https://tdmservicos.com/tdm-grid/>. Acesso em: 19 jan. 2025.

THAKUR, A.; WADHWANI, S.; WADHWANI, A. Motor current signature analysis as a tool for induction machine fault diagnosis. **International Journal of Computer Science and Information Technology Research**, v. 3, n. 3, p. 309–313, 2015.

VEBKO. **Instruções de funcionamento da mala de testes VEBKO AMT-105**. Disponível em: <https://vebko.org/instructions>. Acesso em: 19 jan. 2025.

WILLSKY, A. S; OPPENHEIM, A. V. **Sinais e Sistemas**, Pearson, 2010.