



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Manuel de Medeiros Oliveira

**DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMO DE RASTREAMENTO DE RAIAS  
APLICADO NA MONITORAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO DE  
GERADORES SÍNCRONOS**

Florianópolis

2024

Manuel de Medeiros Oliveira

**DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMO DE RASTREAMENTO DE RAIAS  
APLICADO NA MONITORAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO DE  
GERADORES SÍNCRONOS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Eng. Luis Otavio Steffenmunsberg Grillo, Dr.

Coorientador: Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Florianópolis

2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.  
Dados inseridos pelo próprio autor.

Oliveira, Manuel de Medeiros

Desenvolvimento de algoritmo de rastreamento de raias aplicado na monitoração do campo magnético externo de geradores síncronos / Manuel de Medeiros Oliveira ; orientador, Luis Otavio Steffenmunsberg Grillo, coorientador, Nelson Jhoe Batistela, 2024.

86 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Algoritmo de rastreamento de raias. 3. Campo magnético externo. 4. Geradores síncronos. I. Grillo, Luis Otavio Steffenmunsberg. II. Batistela, Nelson Jhoe. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

Manuel de Medeiros Oliveira

**DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMO DE RASTREAMENTO DE RAIAS APLICADO NA  
MONITORAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO DE GERADORES SÍNCRONOS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 20 de dezembro de 2024.



Prof. Miguel Moreto, Dr.  
Coordenação do Curso

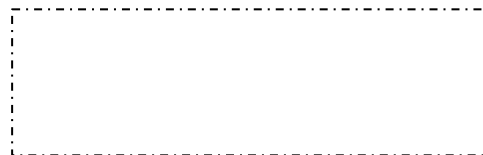
**Banca examinadora**



Eng. Luis Otavio Steffenmunsberg Grillo, Dr.  
Orientador



Prof. Patrick Kuo-Peng, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina



Eng. Gustavo Felipe Martin Nascimento, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 2024.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço imensamente à minha família, que sempre esteve ao meu lado, oferecendo apoio e carinho ao longo desta jornada.

Aos colegas e amigos que compartilharam comigo momentos importantes, tanto dentro quanto fora da universidade. Com um agradecimento especial ao grupo do GRUCAD e LAESP, pelos aprendizados, colaborações e pelas oportunidades que contribuíram diretamente para a realização deste trabalho.

Às empresas Engie Brasil Energia, Itá Energética S.A. e AQTech Engenharia e Instrumentação S.A., pelo suporte técnico e financeiro através do projeto de PD-00403-0048/2019, viabilizando parte significativa da pesquisa e dos recursos materiais necessários.

Ao meu orientador, Luis Otavio Steffenmunsberg Grillo, pela paciência, orientação, e pela confiança em meu trabalho ao longo de todo este processo. Estendo também minha gratidão ao meu coorientador e professor Nelson Jhoe Batistela, por seu apoio técnico, ensinamentos e oportunidades oferecidas que pavimentaram o caminho para o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, sou grato a todos os professores do departamento de Engenharia Elétrica da UFSC, que contribuíram direta ou indiretamente para minha formação, e às instituições que me possibilitaram acesso a recursos, ferramentas e oportunidades. A todos que, de alguma forma, colaboraram com esta etapa da minha vida, o meu muito obrigado!

## RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um algoritmo em C# que realiza o rastreamento de raias espectrais para monitoramento não invasivo da condição de geradores síncronos (GSs) a partir do campo magnético externo, com o objetivo de detectar possíveis faltas nestas máquinas e promover a sua manutenção preditiva. A análise é realizada por meio do espectro em frequência da derivada temporal do campo magnético obtido pela Transformada Rápida de Fourier (FFT), no qual estão presentes a frequência fundamental mecânica da máquina e suas harmônicas. A amplitude destas componentes espectrais compõem a assinatura magnética do GS, a qual está associada com as características construtivas e operacionais da máquina. A monitoração desta assinatura magnética ao longo do tempo possibilita o acompanhamento das condições operacionais e o diagnóstico de faltas incipientes no GS. O algoritmo desenvolvido é estruturado em quatro etapas principais: cálculo da FFT para extração das componentes espectrais de interesse, detecção da frequência fundamental mecânica real, ajuste espectral baseado na frequência fundamental mecânica detectada e rastreamento das harmônicas associadas. No processo, o algoritmo ajusta a resolução espectral e aplica verificações de coerência para assegurar a confiabilidade dos dados e minimizar a interferência de ruídos, que podem mascarar componentes de interesse ou gerar falsos positivos, especialmente em frequências altas, em que as amplitudes das componentes harmônicas são mais próximas ao nível de ruído. A partir dos dados de entrada, o código fornece saídas de análise tanto para uma aquisição única quanto para múltiplas aquisições, o que amplia a abrangência do monitoramento e permite uma visão detalhada do comportamento da assinatura magnética do gerador síncrono ao longo do tempo. Testes realizados com dados sintéticos e experimentais mostraram que o algoritmo identifica com precisão as raias de interesse, podendo ser capaz de diferenciar componentes harmônicas reais da frequência fundamental mecânica da máquina de raias espectrais no nível do ruído e mostrar visualmente possíveis variações na condição do gerador monitorado. Os resultados indicam que o algoritmo é robusto para operar em condições reais, contribuindo para um sistema de manutenção preditiva mais confiável e assertivo para geradores síncronos.

**Palavras-chave:** rastreamento de raias espectrais, geradores síncronos, campo magnético externo, manutenção preditiva.

## ABSTRACT

This work presents the development of an algorithm in C# language for harmonic tracking aimed at non-invasive monitoring of synchronous generators (SGs) through their external magnetic field, with the objective of detecting potential machine failures and enabling predictive maintenance of equipment. The analysis is conducted via the frequency spectrum of the magnetic field derivative obtained through the Fast Fourier Transform (FFT), where the machine's fundamental mechanical frequency and its harmonics are present. The amplitudes of these spectral components form the generator's magnetic signature, associated with its structural and operational characteristics. Monitoring this magnetic signature over time enables the tracking of operational conditions and early fault diagnosis in SGs. The developed algorithm is structured in four main stages: FFT calculation to extract the spectral components of interest, detection of the actual fundamental mechanical frequency, spectral adjustment based on the detected fundamental frequency, and tracking of associated harmonics. During the process, the algorithm adjusts spectral resolution and applies coherence checks to ensure data reliability and minimize noise interference, which can mask components of interest or generate false positives, particularly at high frequencies where harmonic amplitudes are near the noise levels. Additionally, the algorithm offers analysis outputs for both single and multiple acquisitions, expanding the monitoring scope and providing a detailed view of the synchronous generator's magnetic signature behavior over time. Tests performed with synthetic and experimental data showed that the algorithm precisely identifies the relevant harmonics, differentiates true harmonic components from spectral noise, and visually shows potential variations in the monitored generator's condition. These results demonstrate that the algorithm is robust for real-world operation, contributing to a more reliable and accurate predictive maintenance system for synchronous generators.

**Keywords:** harmonic tracking; synchronous generators; external magnetic field; predictive maintenance.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Arquitetura geral do sistema de aquisição de sinais do campo magnético externo.....   | 25 |
| Figura 2 – Influência da ocorrência de uma falta sobre o espectro de frequências do sinal $dH/dt$ de um gerador síncrono de 8 polos.....   | 26 |
| Figura 3 – (a) Espectros de frequências (assinaturas magnéticas) obtidos a partir da medição periódica de $dH/dt$ e indicação dos pontos a serem armazenados, (b) Série temporal resultante após a etapa de rastreamento de raias..... | 27 |
| Figura 4 – Fluxograma da metodologia de rastreamento de raias.....   | 30 |
| Figura 5 – Fluxograma da metodologia para a leitura dos arquivos de dados.....   | 35 |
| Figura 6 – Fluxograma do cálculo da FFT.....   | 38 |
| Figura 7 – Fluxograma da detecção da frequência mecânica real.....   | 41 |
| Figura 8 – Fluxograma do ajuste do espectro em frequência.....   | 43 |
| Figura 9 – Fluxograma do rastreamento de harmônicas.....   | 46 |
| Figura 10 – Dados sintéticos no domínio do tempo.....  | 54 |
| Figura 11 – Dados sintéticos no domínio da frequência.....   | 54 |
| Figura 12 – Espectros em frequência em escala linear do código em C# e em MATLAB.....  | 56 |
| Figura 13 – Espectros em frequência em escala logarítmica do código em C# e em MATLAB.....   | 56 |
| Figura 14 – Frequência elétrica rastreada mais faixa de incerteza em C# e em MATLAB.....   | 57 |
| Figura 15 – Frequência elétrica rastreada ao longo das iterações mais a faixa de incerteza com zoom em C# e em MATLAB.....   | 58 |
| Figura 16 – Espectro sem (verde/azul) e com (vermelho) ajuste de $df$ em C# e em MATLAB.....   | 60 |
| Figura 17 – Harmônica n° 2067 rastreada em C# e em MATLAB.....   | 61 |
| Figura 18 – Amplitude de cada harmônica em C# e em MATLAB.....   | 62 |
| Figura 19 – Confiabilidade de cada harmônica em C# e em MATLAB.....  | 63 |
| Figura 20 – Número de harmônicas por confiabilidade em C# e em MATLAB.....   | 63 |
| Figura 21 – Bancada de testes.....   | 64 |
| Figura 22 – Equipamento para medição do campo magnético externo.....   | 65 |
| Figura 23 – Sinal dos dados do ensaio em laboratório no domínio do tempo.....  | 66 |
| Figura 24 – Espectro em frequência em escala logarítmica em C# e em MATLAB.<br>67  |    |
| Figura 25 – Espectro em frequência em escala logarítmica com zoom em C# e em MATLAB.....   | 67 |
| Figura 26 – Espectro sem (verde/azul) e com (vermelho) ajuste de $df$ em C# e em MATLAB.....   | 69 |
| Figura 27 – Harmônica de ordem 290 rastreada em C# e em MATLAB.....  | 70 |
| Figura 28 – Amplitude de cada harmônica em C# e em MATLAB.....   | 71 |



|  |    |
|--|----|
| Figura 29 – Número de harmônicas por confiabilidade em C# e em MATLAB..... | 72 |
| Figura 30 – Sinal dos dados do protótipo no domínio do tempo.....          | 73 |
| Figura 31 – Espectro em frequência em escala logarítmica.....              | 74 |
| Figura 32 – Espectro sem (verde) e com (vermelho) ajuste de df.....        | 75 |
| Figura 33 – Amplitude de cada harmônica.....                               | 76 |
| Figura 34 – Número de harmônicas por confiabilidade.....                   | 76 |
| Figura 35 – Sinal dos dados do cabeça de série no domínio do tempo.....    | 77 |
| Figura 36 – Espectro em frequência em escala logarítmica.....              | 78 |
| Figura 37 – Espectro sem (verde) e com (vermelho) ajuste de df.....        | 79 |
| Figura 38 – Amplitude de cada harmônica.....                               | 80 |
| Figura 39 – Número de harmônicas por confiabilidade.....                   | 80 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Comparação dos valores das fundamentais entre os algoritmos implementados em C# e em MATLAB..... | 59 |
| Tabela 2 – Comparação dos algoritmos implementados em C# e em MATLAB após o ajuste de df.....               | 60 |
| Tabela 3 – Comparação dos valores das fundamentais entre os algoritmos implementados em C# e em MATLAB..... | 68 |
| Tabela 4 – Comparação dos algoritmos implementados em C# e em MATLAB após o ajuste de df.....               | 69 |
| Tabela 5 – Valores obtidos das frequências $f_e$ e $f_m$ reais e do ajuste de df pelo algoritmo.....        | 75 |
| Tabela 6 – Valores obtidos das fundamentais e do ajuste de df pelo algoritmo.....                           | 79 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|        |   |
|--------|---|
| UFSC   | Universidade Federal de Santa Catarina                        |
| GS     | Gerador Síncrono  |
| FFT    | Transformada Rápida de Fourier                                |
| TDF    | Transformada Discreta de Fourier                              |
| GRUCAD | Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos |
| CC     | Corrente contínua   |
| CA     | Corrente alternada  |
| FEM    | Força eletromotriz  |
| TCC    | Trabalho de conclusão de curso                                |
| CDF    | Função de distribuição cumulativa                             |
| Q1     | Primeiro quartil  |
| Q2     | Segundo quartil   |
| Q3     | Terceiro quartil  |
| IQR    | Intervalo interquartil  |
| LabMAQ | Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos              |
| P&D    | Pesquisa e Desenvolvimento                                    |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                  |   |
|------------------|---|
| $f_e$            | Frequência fundamental elétrica                       |
| $f_m$            | Frequência fundamental mecânica                       |
| $n_m$            | Velocidade mecânica                                   |
| $p$              | Número de pólos                                       |
| $H$              | Campo Magnético                                       |
| $N_0$            | Número de amostras do sinal                           |
| $f_a$            | Frequência de aquisição                               |
| $dt$             | Período de amostragem                                 |
| $df$             | Resolução espectral                                   |
| $f_{m\ real}$    | Frequência fundamental mecânica real                  |
| $B(t)$           | Indução magnética                                     |
| $F_{mm}(t)$      | Força magnetomotriz                                   |
| $\mathcal{P}(t)$ | Permeância magnética                                  |
| $\mu_0$          | Permeabilidade magnética do ar                        |
| $v(t)$           | Tensão nos terminais da bobina                        |
| $N$              | Número de espiras da bobina                           |
| $S$              | Seção da bobina                                       |
| $H_{tan}$        | Componente tangencial do campo magnético disperso     |
| $H_{nor}$        | Componente normal do campo magnético disperso         |
| $u(f_e)$         | Incerteza associada à frequência fundamental elétrica |
| $k$              | Ordem da harmônica                                    |

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b>  | <b>15</b> |
| 1.1 OBJETIVO PRINCIPAL   | 18        |
| 1.2 OBJETIVOS METODOLÓGICOS  | 18        |
| 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO  | 19        |
| <b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b>   | <b>21</b> |
| 2.1 GERADORES SÍNCRONOS  | 21        |
| 2.2 MONITORAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO   | 22        |
| 2.3 RASTREAMENTO DE RAIAS  | 27        |
| 2.4 UTILIZAÇÃO DA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT)                       | 31        |
| <b>3 DESENVOLVIMENTO DO CÓDIGO DE RASTREAMENTO DE RAIAS</b>                  | <b>33</b> |
| 3.1 ENTRADA E A ETAPA DE CÁLCULO DA FFT                                      | 33        |
| 3.2 ETAPA DA DETECÇÃO DA FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL MECÂNICA REAL                | 38        |
| 3.3 ETAPA DO AJUSTE DO ESPECTRO EM FREQUÊNCIA                                | 42        |
| 3.4 ETAPA DO RASTREAMENTO DE HARMÔNICAS                                      | 44        |
| 3.5 SAÍDAS DO CÓDIGO   | 47        |
| 3.5.1 Saídas para o Primeiro Tipo de Entrada: Análise de uma Única Aquisição | 47        |
| 3.5.2 Saídas para o Segundo Tipo de Entrada: Análise de Múltiplas Aquisições | 49        |
| <b>4 TESTES E RESULTADOS OBTIDOS COM O CÓDIGO</b>                            | <b>51</b> |
| 4.1 ANÁLISE COM DADOS SINTÉTICOS   | 52        |
| 4.1.1 Etapa 01: FFT do sinal de entrada                                      | 55        |
| 4.1.2 Etapa 02: Detecção da frequência fundamental mecânica real             | 57        |
| 4.1.3 Etapa 03: Ajuste da resolução espectral                                | 59        |
| 4.1.4 Etapa 04: Rastreamento das raias de interesse                          | 61        |
| 4.2 ANÁLISE COM DADOS DE ENSAIO EM LABORATÓRIO                               | 64        |
| 4.2.1 Etapa 01: FFT do sinal de entrada                                      | 65        |
| 4.2.2 Etapa 02: Detecção da frequência fundamental mecânica real             | 68        |
| 4.2.3 Etapa 03: Ajuste da resolução espectral                                | 68        |
| 4.2.4 Etapa 04: Rastreamento das raias de interesse                          | 70        |
| 4.3 ANÁLISE COM DADOS DO PROTÓTIPO   | 72        |
| 4.4 ANÁLISE COM DADOS DO CABEÇA DE SÉRIE                                     | 77        |
| <b>5 CONCLUSÃO</b>   | <b>81</b> |
| <b>REFERÊNCIAS</b>   | <b>85</b> |



## 1 INTRODUÇÃO

Os geradores síncronos (GSs) são componentes essenciais no sistema elétrico, sendo responsáveis pela geração de energia elétrica em diferentes plantas de geração. Devido ao seu papel crítico na geração de energia, a confiabilidade desses equipamentos é de extrema importância para os sistemas de potência. Qualquer falha em um gerador síncrono pode levar a interrupções significativas no fornecimento de energia, causando prejuízos financeiros e comprometendo a estabilidade da rede elétrica. Diante disso, a monitoração contínua da condição operacional desses geradores é essencial para prevenir falhas e prolongar a vida útil dos equipamentos.

Nesse contexto, técnicas de detecção de faltas por meio do monitoramento do campo magnético externo permitem identificar anomalias no comportamento do gerador continuamente sem a necessidade do desligamento da máquina para instalar ou fazer manutenção do equipamento de monitoração. Dentro desse escopo, o GRUCAD (Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) conduz uma linha de pesquisa sobre a monitoração das características do campo magnético externo de geradores síncronos. Nesse escopo, foram realizados pelo GRUCAD dois projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D), com um terceiro projeto em andamento, que trata do desenvolvimento de um equipamento pioneiro para monitoração do campo magnético externo de geradores síncronos, o qual foi denominado MagAnalyzer. Esses projetos, desenvolvidos em parceria com empresas do setor privado, geraram importantes contribuições para a área de monitoração da condição de máquinas elétricas (Santos et al., 2015; Santos et al., 2017; Grillo et al., 2022a; Grillo et al., 2022b) e proporcionaram a concessão da patente de invenção INPI N° BR1020150114389, concedida em 2020 (Santos et al., 2020).

Entre os trabalhos mais significativos desenvolvidos no GRUCAD, destaca-se a tese de doutorado de Rigoni (2014), que apresenta o desenvolvimento de um equipamento e de uma metodologia específica para a detecção e análise de faltas em geradores síncronos por meio do campo magnético externo. Esta metodologia seguiu a premissa de monitoração da amplitude de componentes espectrais do campo magnético externo associadas à velocidade de rotação do

gerador, que estão relacionadas com a parte construtiva e operacional da máquina. Utilizando um sensor de campo por indução, o sistema proposto por Rigoni confirmou a possibilidade de detecção de faltas de rotor em máquinas síncronas por meio do campo magnético externo.

Seguindo essa linha de pesquisa, a dissertação de Santos (2016) propôs o desenvolvimento de um equipamento mais aprimorado, com relação ao utilizado por Rigoni (2016), dedicado à monitoração do campo magnético externo de geradores síncronos. Este equipamento foi projetado para detectar eventos que indicam faltas incipientes, e seu desempenho foi avaliado tanto em uma bancada experimental na Universidade Federal de Santa Catarina quanto em uma aplicação de monitoração da condição de um gerador síncrono de 305 MVA na usina hidrelétrica de Itá. Na sequência desse trabalho, a tese de Santos (2021), trouxe avanços na teoria sobre detecção de falhas incipientes em máquinas síncronas por meio do monitoramento de variações de amplitudes de componentes de frequência do campo magnético externo. Neste trabalho foi desenvolvido um modelo da indução magnética no entreferro do GS, onde a forma de onda da indução magnética é descrita como resultado de um processo de modulação envolvendo as forças magnetomotrizes produzidas pelos enrolamentos do estator e do rotor, juntamente com a permeância variável do entreferro. Essa formulação teórica demonstrou a viabilidade de detectar faltas nos enrolamentos do estator e do rotor por meio da análise espectral do campo magnético externo, uma hipótese validada tanto por simulações numéricas quanto por análises experimentais.

Mais recentemente, a dissertação de Antunes (2023) apresentou novas estratégias de análise no domínio do tempo e da frequência para a detecção e diferenciação de faltas incipientes em geradores síncronos, demonstrando que é possível detectar e diferenciar faltas em diferentes condições de operação da máquina. Além desse trabalho, a tese de doutorado de Grillo (2024c) introduziu uma metodologia inovadora para a detecção automática de faltas em geradores síncronos, baseada na análise de alterações na assinatura magnética da máquina, minimizando a ocorrência de falsos positivos.

Estes trabalhos, desenvolvidos no GRUCAD, abordam a monitoração da condição dos geradores síncronos a partir do acompanhamento da assinatura magnética da máquina. Essa assinatura é definida pelo padrão de amplitudes de raias específicas do espectro de frequências obtido a partir da transformada de



Fourier de medidas do campo magnético da máquina operando em regime permanente. Estas raias espectrais, associadas à velocidade de rotação da máquina, podem ter seu padrão de amplitudes alterado em decorrência da evolução de uma falta incipiente. Isso possibilita a detecção da falta a partir da medição e da análise em frequência do campo magnético externo. Neste contexto, a identificação precisa da frequência e da amplitude das raias espectrais de interesse, utilizadas para monitorar a assinatura magnética da máquina, é de fundamental importância nesta técnica de monitoração de geradores síncronos. A precisão e a confiabilidade desse processo, denominado de rastreamento de raias (Santos et al., 2017), implica na precisão de todo o processo de monitoração da máquina e é uma das principais etapas de processamento de dados desta técnica.

Ao longo do desenvolvimento destes trabalhos no GRUCAD, diversas estratégias de rastreamento de raias foram propostas e evoluídas, sendo desenvolvidos algoritmos computacionais nos softwares LabVIEW e MATLAB para o processamento das medidas de campo magnético externo. No projeto de P&D ANEEL PD-00403-0048/2019, intitulado “Equipamento não Invasivo para Detecção de Falhas em Geradores Síncronos através do Campo Magnético Externo” e desenvolvido pelo GRUCAD/UFSC em parceria com as empresas Engie Brasil Energia, Itá Energética S.A. e AQTech Engenharia e Instrumentação S.A., chegou-se a uma versão refinada do algoritmo de rastreamento de raias, com eficiência comprovada por meio da análise de dados experimentais e de dados provenientes de equipamentos instalados em usinas hidrelétricas. Contudo, o desenvolvimento de um equipamento de monitoração do campo magnético externo de GSs com especificação industrial, pretendido por este projeto, culminou na necessidade de implementar este algoritmo em uma linguagem de programação que permitisse sua utilização em aplicações embarcadas.

Nesse contexto, este trabalho de conclusão de curso propõe o desenvolvimento e implementação do algoritmo de rastreamento de raias espectrais na linguagem C#, para possibilitar a utilização embarcada desta aplicação junto a um equipamento industrial. Além disso, o presente trabalho é motivado pelo interesse em contribuir para a consolidação do algoritmo desenvolvido no projeto de P&D ANEEL PD-00403-0048/2019 por meio da documentação da metodologia de rastreamento de raias, da realização de testes de comparação entre algoritmos e avaliação de resultados obtidos pela análise de dados sintéticos, obtidos por

simulação computacional, dados experimentais e dados obtidos por equipamentos instalados em usinas hidrelétricas.

O trabalho de pesquisa apresentado neste trabalho foi motivado e parcialmente custeado no âmbito do programa de P&D ANEEL e desenvolvido no programa de P&D da Engie Brasil Energia e Itá Energética S.A. no projeto PD 0403-0057/2023, intitulado “Equipamento não Invasivo para Detecção de Falhas em Geradores Síncronos através do Campo Magnético Externo – Lote Pioneiro e Inserção no Mercado”, realizado em parceria com a empresa AQTech Engenharia e Instrumentação S.A.

## 1.1 OBJETIVO PRINCIPAL

O objetivo principal deste trabalho é implementar um algoritmo de rastreamento de raias espectrais na linguagem C#, com o intuito de processar o espectro de frequências dos sinais medidos do campo magnético externo de geradores síncronos em sistemas de detecção de faltas.

## 1.2 OBJETIVOS METODOLÓGICOS

Para alcançar o objetivo principal, foram definidos os seguintes objetivos metodológicos:

- Revisar metodologias de monitoração da condição de geradores síncronos por meio do campo magnético externo;
- Avaliar a análise em frequência de sinais medidos no domínio do tempo;
- Examinar técnicas de rastreamento de raias previamente desenvolvidas em outras linguagens de programação;
- Documentar as etapas da metodologia de rastreamento de raias;
- Comparar o algoritmo desenvolvido em C# com algoritmos previamente desenvolvidos em outras linguagens de programação;
- Avaliar o desempenho do algoritmo desenvolvido em C# utilizando dados experimentais.

Por meio da realização destes objetivos metodológicos e do objetivo principal, espera-se contribuir significativamente para o aprimoramento das técnicas de detecção de faltas em geradores síncronos, por meio da consolidação do software de processamento de dados do equipamento para monitoração da condição dessas máquinas síncronos concebido no GRUCAD.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, conforme descrito a seguir. No Capítulo 1 é apresentada a introdução ao tema, contextualizando a pesquisa e expondo seus objetivos principais e metodológicos. Também são abordadas as contribuições do trabalho para a área de monitoração de geradores síncronos. No Capítulo 2, realiza-se uma breve revisão de literatura, discutindo os principais conceitos sobre geradores síncronos, a monitoração do campo magnético, as técnicas de rastreamento de raias espectrais e a aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT) nesses contextos.

No Capítulo 3, é descrito o desenvolvimento do código de rastreamento de raias espectrais, detalhando as etapas de entrada de dados, o cálculo da FFT, a detecção da frequência mecânica real, o ajuste do espectro em frequência, o rastreamento das componentes harmônicas e as saídas do código. O Capítulo 4 apresenta os testes realizados, incluindo a análise e comparação dos resultados obtidos com dados sintéticos, dados de ensaios em laboratório, dados de um equipamento protótipo e de equipamentos cabeças de série instalados em uma usina hidrelétrica, abordando a avaliação da precisão e eficiência do algoritmo desenvolvido. Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões do trabalho, discutindo os resultados alcançados e sugestões para futuros trabalhos.



## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo, são abordados conceitos teóricos essenciais sobre geradores síncronos e sobre a monitoração do campo magnético, fundamentais para a compreensão do comportamento do campo magnético externo destas máquinas. Além disso, será apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre a técnica de rastreamento de raias espectrais e sobre a Transformada de Fourier (FFT) empregada neste processo.

### 2.1 GERADORES SÍNCRONOS

Nesta seção, são discutidas as principais características construtivas e operacionais dos geradores síncronos (GS), conforme descritas por Chapman (2013).

Os geradores síncronos são máquinas elétricas que convertem energia mecânica em energia elétrica, sendo amplamente utilizados em sistemas de geração de energia. A estrutura física de um GS é composta por duas partes principais: o estator e o rotor. O estator é a parte fixa do gerador e é composto por um núcleo de ferro laminado, que serve para reduzir as perdas por correntes parasitas, e por enrolamentos trifásicos inseridos em ranhuras na superfície interna do núcleo. O rotor, por outro lado, é a parte móvel do gerador e é o responsável por criar campo magnético principal necessário para a indução de tensões no estator. Esse campo pode ser gerado tanto por ímãs permanentes quanto por eletroímãs alimentados por corrente contínua (CC), os quais são mais comumente utilizados

A excitação do rotor em geradores síncronos pode ser realizada de duas formas principais: por meio de escovas e anéis coletores, que fornecem corrente CC ao rotor a partir de uma fonte externa, ou por meio de excitatrizes sem escovas, que utilizam um pequeno gerador CA com seu circuito de campo montado no estator e seu circuito de armadura montado no eixo do rotor em que a saída é convertida em corrente contínua por meio de um circuito retificador trifásico. Essa última abordagem é preferida em aplicações de grande porte devido à menor necessidade de manutenção.

O princípio de funcionamento dos geradores síncronos está fundamentado na Lei de Faraday, a qual afirma que uma variação do fluxo magnético no tempo em um circuito induz uma força eletromotriz (FEM) nesse circuito (BASTOS, 2004). No caso dos GSs, a rotação do rotor, que é impulsionada por uma máquina motriz primária, causa uma variação do campo magnético que interage com os enrolamentos do estator. Essa interação resulta na indução de tensões alternadas nos terminais dos enrolamentos do estator, gerando energia elétrica.

A frequência da tensão elétrica gerada (frequência fundamental elétrica),  $f_e$ , em Hz, está diretamente relacionada à velocidade mecânica do rotor,  $n_m$ , em rpm, e ao número de polos do gerador,  $p$ , conforme a equação:

$$f_e = \frac{n_m p}{120} \quad (2.1)$$

A manipulação algébrica da equação anterior permite determinar a frequência fundamental mecânica  $f_m$ , em Hz. O resultado dessa manipulação pode ser visto pela equação:

$$f_m = \frac{f_e}{\frac{p}{2}} \quad (2.2)$$

## 2.2 MONITORAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO

Conforme diversos estudos (Rigoni, 2014; Santos, 2016; Grillo, 2024c), a monitoração do campo magnético em máquinas elétricas, em especial nos geradores síncronos, têm se mostrado uma técnica eficiente para a detecção e o diagnóstico de faltas. O campo magnético estabelecido em um gerador síncrono é um dos principais indicadores do seu estado operacional, uma vez que alterações sutis nas características do campo magnético provaram resultar em indicativos de problemas iminentes da máquina. A análise do campo magnético, portanto, oferece uma maneira de monitorar essas alterações, possibilitando a identificação precoce de faltas antes que estas evoluam para uma condição crítica de falha.

Ao longo do tempo, diferentes métodos foram idealizados e testados visando a monitoração do campo magnético. Dentre eles, Zamudio-Ramirez et al. (2013), confirmaram a viabilidade da monitoração do campo magnético interno por meio de sensores instalados no entreferro da máquina, o que permite uma detecção precisa de faltas como curto-circuitos nos enrolamentos de campo e danos nas barras amortecedoras, especialmente durante transientes. Na mesma vertente, técnicas de detecção de faltas por meio do monitoramento do fluxo magnético foram exploradas por Iamamura (2011), que investigou a detecção e diferenciação de faltas no rotor com o uso de sensores também posicionados no entreferro da máquina. No entanto, esse tipo de abordagem apresenta desvantagens significativas (Santos, 2021), como a intrusividade dos sensores e a complexidade na instalação, o que pode limitar sua aplicação em determinadas plantas de geração. Essas limitações abrem espaço para a consideração de métodos menos intrusivos, como a análise do campo magnético externo.

Em relação à monitoração do campo magnético externo em GSs, que tem emergido como uma técnica promissora para a detecção de faltas incipientes, diversas publicações apresentam a importância e os benefícios desta abordagem. Cuevas (2016) avaliou experimentalmente as alterações no espectro do campo magnético externo de um GS, comparando o comportamento da máquina saudável com sua condição após a inserção de um curto-circuito de espiras no rotor. Os resultados indicaram sensibilidade do espectro magnético à presença de uma falta, corroborada por ensaios no espectro de vibrações mecânicas. Já Pusca et al. (2021) investigaram alterações no espectro magnético externo causadas por faltas no estator de máquinas síncronas em cenários de variação de carga, utilizando sensores externos. Ambos os estudos destacam o potencial da análise espectral para identificar condições anômalas de maneira não invasiva e eficiente.

Nas publicações de Grillo et al. (2022a, 2024a e 2024b) é comentado que a investigação das características do campo magnético externo para fins de detecção de faltas em máquinas síncronas começou com a observação de alterações no espectro de frequência dessas medidas do campo. Estudos teóricos e experimentais comprovaram a presença de componentes espectrais associadas à frequência de rotação mecânica da máquina, cuja amplitude é sensibilizada diante da ocorrência de falhas. A monitoração contínua dessas componentes permite detectar faltas de maneira precoce e não invasiva.

Além disso, sobre esta abordagem, a monitoração da condição dos GSs pode ser realizada por meio da análise de formas de onda da derivada temporal do campo magnético externo, medidas na parte externa da carcaça da máquina. Estas medições podem ser realizadas por meio da instalação de sensores de campo por indução que podem ser instalados sem a necessidade de interrupção da operação, facilitando a manutenção contínua e eficiente dos GSs sem interferir em sua operação. Esta metodologia permite avaliar o espectro de frequência das formas de onda, acompanhando a amplitude de componentes harmônicas da frequência de rotação mecânica da máquina. A monitoração periódica destas amplitudes gera séries temporais que podem ser utilizadas para detectar faltas incipientes, permitindo a manutenção preditiva dos GSs de maneira não invasiva.

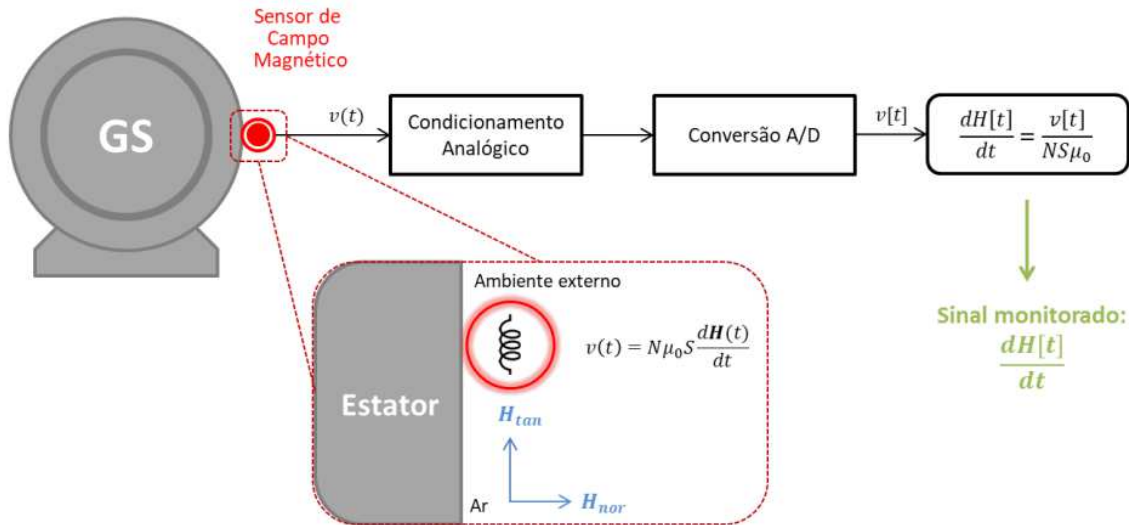
Neste contexto de estudo, existe a metodologia de monitoração do campo magnético externo desenvolvida na UFSC pelo GRUCAD, descritas nos trabalhos de Rigoni (2014), Santos (2016) e Grillo et al. (2022b); e presente no equipamento pioneiro, denominado MagAnalyzer. Este equipamento utiliza sensores de campo magnético posicionados na parte externa do GS para medir formas de onda proporcionais ao campo magnético externo. Estas medidas, por sua vez, permitem a análise das amplitudes das componentes harmônicas da frequência mecânica de rotação, as quais permitem monitorar a condição da máquina de maneira não invasiva. Essa metodologia foi validada experimentalmente, mostrando resultados positivos na detecção de falhas em um GS de uma usina hidrelétrica (Grillo et al., 2022b).

Na metodologia desenvolvida no GRUCAD, um ponto importante mencionado por Grillo (2024c) é a utilização de sensores de campo magnético por indução, que medem a derivada temporal do campo magnético externo ( $dH/dt$ ). A Figura 1 ilustra a arquitetura geral do sistema de medição da derivada temporal do campo magnético externo. A baixa amplitude da tensão induzida nos terminais do sensor de campo por indução pelo campo magnético externo torna necessário o condicionamento analógico do sinal medido, por meio de etapas de amplificação e filtragem. Após a etapa de condicionamento analógico/digital (A/D), a derivada temporal do campo magnético externo  $dH/dt$  pode ser obtida em função da tensão digitalizada  $v(t)$  do sensor e de constantes construtivas do sensor ( $NS\mu_0$ ), em que  $N$



é o número de espiras,  $S$  é a seção do sensor e  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do ar (Grillo, 2024c).

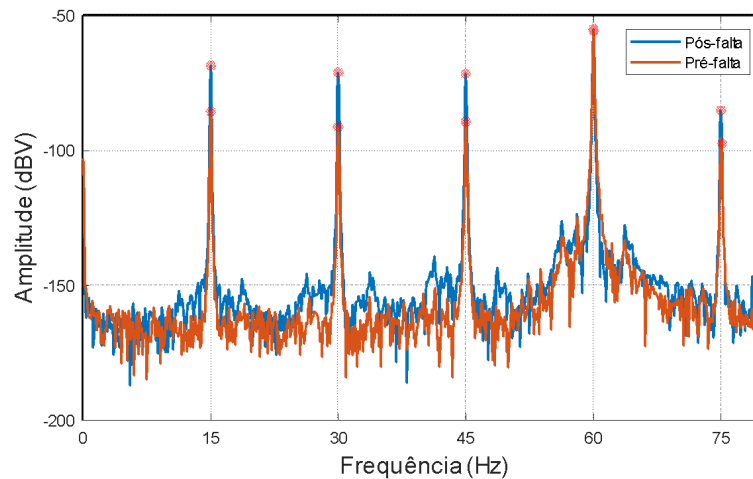
Figura 1 – Arquitetura geral do sistema de aquisição de sinais do campo magnético externo.



Fonte: Grillo (2024c).

A partir do processo de medição do sinal  $dH/dt$ , o espectro de frequências resultante dos sinais medidos é analisado para identificar componentes específicas como a frequência de rotação mecânica da máquina ( $f_m$ ) e suas harmônicas que são essenciais para monitorar a condição da máquina, pois refletem características construtivas e operacionais do GS. Como exemplo de aplicação, Grillo et al. (2022a) apresentam o espectro de frequências de sinais  $dH/dt$  medidos em um GS de 8 polos, cuja  $f_m$  em 15 Hz, antes e depois da ocorrência de uma falta de curto-circuito de espiras do rotor. Neste exemplo, apresentado na Figura 2, observa-se que a ocorrência da falta faz com que a amplitude das componentes harmônicas da  $f_m$  seja aumentada, com relação à condição pré-falta. A identificação desta variação de amplitude em uma condição de operação com pequenas variações do ponto de operação do GS permite a detecção desta falta.

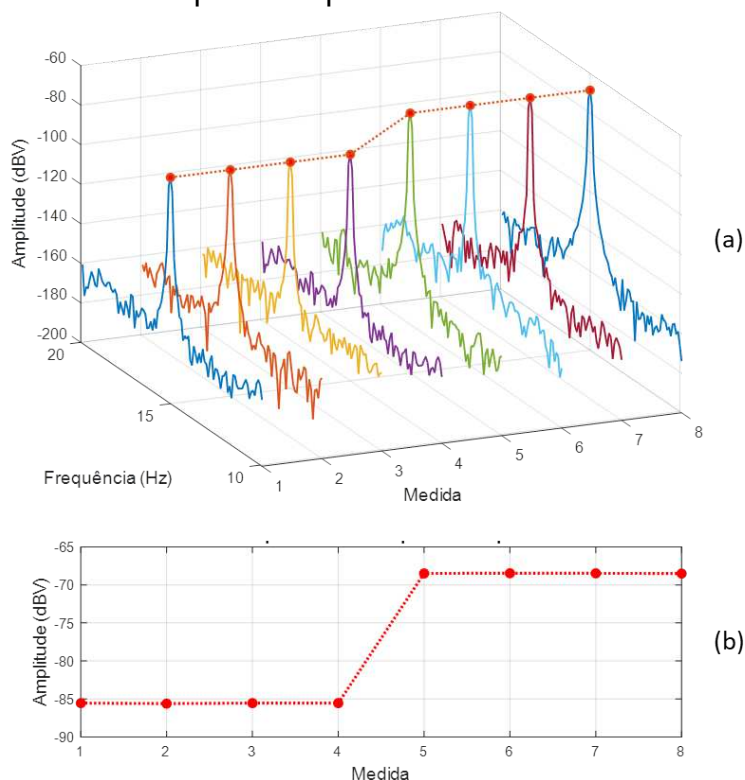
Figura 2 – Influência da ocorrência de uma falta sobre o espectro de frequências do sinal  $dH/dt$  de um gerador síncrono de 8 polos.



Fonte: Grillo et al. (2022a).

Para automatizar este processo de monitoração da amplitude das componentes harmônicas da  $f_m$ , o equipamento MagAnalyzer (GRILLO et al., 2022a) monitora a tendência da amplitude de cada componente harmônica por meio de medições realizadas periodicamente e do armazenamento destas amplitudes no formato de séries temporais. Este processo é ilustrado na Figura 3 (a), que apresenta um segmento do espectro de frequências de seis aquisições periódicas do sinal  $dH/dt$  para um GS de 8 polos ( $f_m = 15 \text{ Hz}$ ) durante a ocorrência de uma falta (a mesma ilustrada no exemplo anterior). Observa-se que a amplitude da  $f_m$  permanece em um patamar próximo aos -85 dB e sofre uma variação após a ocorrência da falta, chegando perto dos -70 dB. Rastreando essa componente e armazenando sua amplitude ao longo do tempo no formato de uma série temporal, como apresentado na Figura 3 (b), é possível detectar automaticamente a falta por meio de análise de tendência desta série temporal.

Figura 3 – (a) Espectros de frequências (assinaturas magnéticas) obtidos a partir da medição periódica de  $dH/dt$  e indicação dos pontos a serem armazenados, (b) Série temporal resultante após a etapa de rastreamento de raias.



Fonte: Grillo et al. (2022a).

O processo de identificação automática da frequência fundamental mecânica e da sua respectiva amplitude, bem como de suas harmônicas, é denominado "Rastreamento de raias". Diante disto, o rastreamento de raias é o foco principal da aplicação desenvolvida no escopo deste trabalho.

### 2.3 RASTREAMENTO DE RAIAS

Na metodologia de monitoração do campo magnético externo apresentada por Rigoni (2014), Santos (2016) e Grillo et al. (2022b) a primeira fase de processamento de dados é conhecida também como a etapa de "rastreamento de raias". Essa é a etapa na qual é realizada a identificação das componentes espectrais de interesse para monitorar a condição da máquina. As fases do processo de rastreamento estão ilustradas no fluxograma da Figura 4.

Esse processo foi especificado a partir da necessidade de detectar e rastrear automaticamente a amplitude das raias espectrais de interesse, o que é necessário para monitorar contínua e eficientemente a condição do gerador

síncrono. Desse modo, a identificação precoce de potenciais faltas incipientes por meio da análise da assinatura magnética ao longo do tempo se torna possível. Neste contexto, a estratégia de rastreamento de raias melhora os resultados obtidos, diminuindo as incertezas e garantindo uma maior precisão na detecção de anomalias.

A entrada do processo é o vetor de dados correspondente à derivada temporal do campo magnético externo proveniente da medição do campo magnético externo por um sensor de campo por indução, condicionado e digitalizado através de um hardware adequado para a aquisição destes sinais, como ilustrado na Figura 1. A fase de processamento de dados, o foco desse trabalho, pode ser dividida em quatro etapas principais, sendo elas:

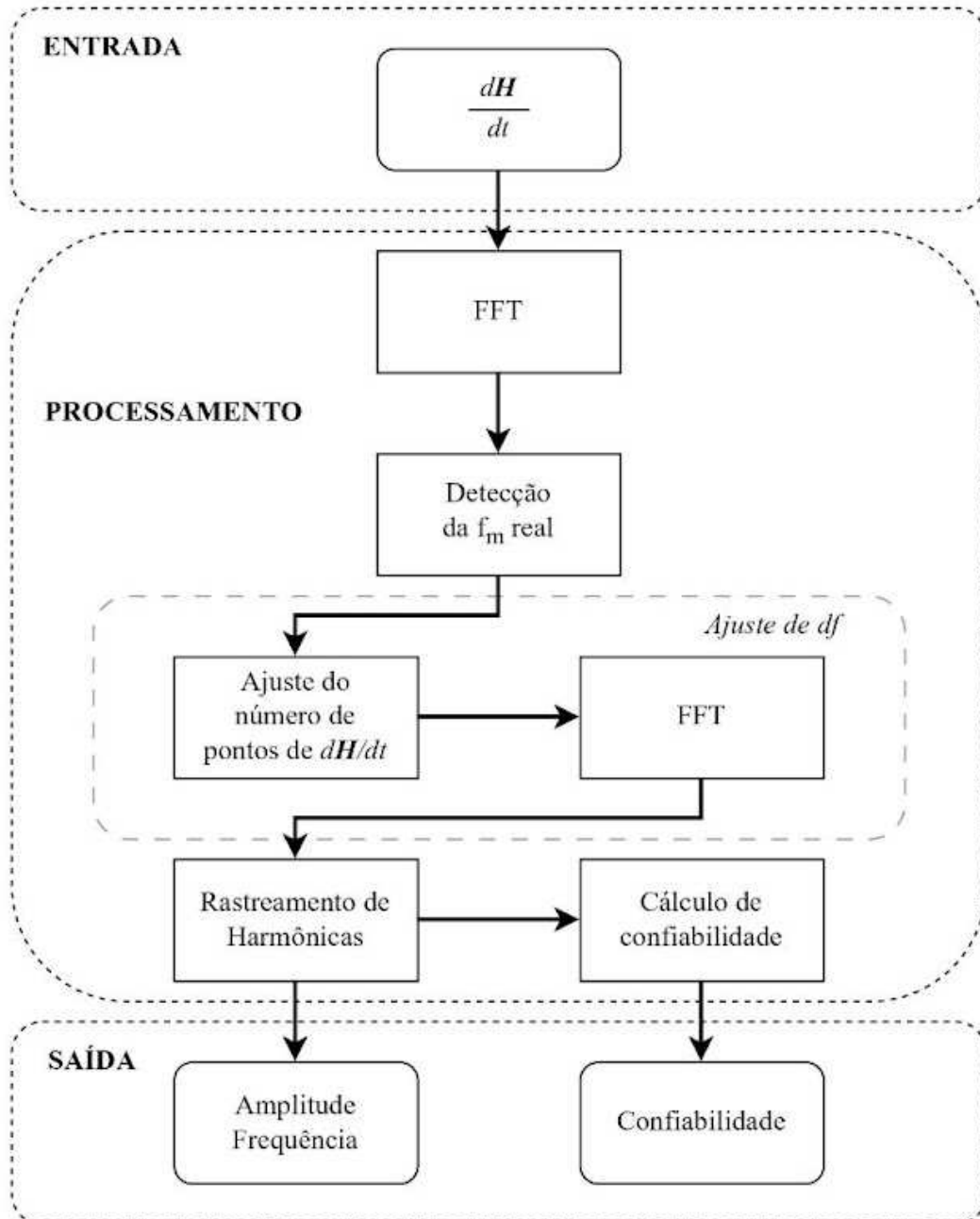
- **Etapa 1 – Cálculo da FFT:** É a etapa inicial do processamento de dados. Nela é realizado o tratamento do sinal de entrada, na qual é feito o cálculo inicial do espectro de frequências por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT). Para este procedimento, é utilizado o janelamento Hanning e o espectro de frequências obtido é convertido para a escala logarítmica para melhor identificação das componentes espectrais de interesse.
- **Etapa 2 – Detecção da frequência fundamental mecânica real:** Essa é considerada a etapa principal do processo de rastreamento. Nela é realizado um processo iterativo para detecção da frequência fundamental mecânica ( $f_m$ ) real e sua incerteza por meio da análise das componentes ímpares da frequência fundamental elétrica ( $f_e$ ) ao longo do espectro de frequências do sinal avaliado. Esta etapa é necessária pois os GSs operando de maneira sincronizada com sistemas elétricos de potência apresentam pequenos desvios de frequência com relação ao valor nominal da frequência (normalmente 50 Hz ou 60 Hz, dependendo do país). Estes pequenos desvios podem provocar erros no processo de rastreamento de harmônicas de alta ordem, pois são multiplicados pela ordem da harmônica e podem direcionar a busca de uma componente em uma região errônea do espectro. Nesse sentido, a detecção da  $f_m$  real para cada aquisição é essencial para a correto rastreamento das componentes harmônicas da  $f_m$ . Nesta etapa, a tese de doutorado de Wengerkievicz (2021) apresenta um procedimento de atualização do valor detectado da  $f_m$ , realizado

por meio do refinamento da incerteza ao longo das iterações, com base na iteração anterior, o que tem como resultado a detecção da frequência fundamental mecânica com menor incerteza. O método recursivo presente na metodologia apresentada por Wengerkievicz (2021) é utilizado a partir das componentes harmônicas ímpares da frequência fundamental elétrica, as quais possuem maior amplitude e são menos suscetíveis ao ruído de fundo, proporcionando um ponto de partida confiável para o rastreamento. O ajuste considera as frequências fundamentais elétrica e mecânica ( $f_e$  e  $f_m$ ) encontradas na iteração anterior e seus limites de busca superior e inferior (que definem a região de busca da componente de interesse no espectro de frequências), com base em suas incertezas e confiabilidade. Após cada iteração, o valor da  $f_m$  é recalculada com base nas frequências anteriormente detectadas. O refinamento progressivo da incerteza ao longo das iterações faz com que o processo forneça um valor atualizado da  $f_m$  cada vez mais próximo ao valor real, resultando em uma identificação mais confiável da frequência mecânica real. A incerteza associada à detecção da  $f_m$  é continuamente refinada, até que a variação na estimativa do valor e da incerteza atinjam um critério de convergência de interesse, sinalizando que uma solução estável e confiável foi alcançada.

- **Etapa 3 – Ajuste do espectro ( $df$ ):** Nesta etapa, é realizada uma adequação da quantidade de pontos do vetor de dados de entrada, com base na frequência fundamental mecânica real detectada, para que o espectro de frequência do vetor de dados ajustado apresente raias espectrais coincidindo com a frequência fundamental mecânica real e suas harmônicas. Isto facilita o processo de rastreamento de raias e a detecção da amplitude real das componentes rastreadas. No final desta etapa é refeito o cômputo da FFT para fornecer o espectro de frequências ajustado para a etapa 4.
- **Etapa 4 – Rastreamento de harmônicas:** Nesta etapa é realizado o rastreamento das componentes harmônicas da frequência mecânica e suas amplitudes. Além disso, é realizado o cálculo de um índice de confiabilidade para cada componente harmônica, que permite avaliar se a raia rastreada é válida para fins de monitoramento da condição da máquina naquela aquisição. Assim,

na saída tem-se as frequências de interesse rastreadas, suas amplitudes e o índice de confiabilidade de cada componente rastreada.

Figura 4 – Fluxograma da metodologia de rastreamento de raias.



Fonte: Autor.

## 2.4 UTILIZAÇÃO DA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT)

Nesta seção, são discutidas as características da FFT que explicam sua utilidade no algoritmo de rastreamento de raias desenvolvido para este trabalho, com base nas descrições feitas por Lathi (2008) sobre a FFT.

A Transformada Rápida de Fourier (FFT), conforme descrito no livro de Lathi (2008), é uma técnica algorítmica eficiente que reduz consideravelmente o número de cálculos necessários para calcular a Transformada Discreta de Fourier (TDF). A TDF convencional exigiria um número de operações da ordem de  $N_0^2$ , em que  $N_0$  é o número de amostras do sinal. Em contraste, a FFT reduz essa complexidade para  $N_0 \log(N_0)$ , o que permite uma implementação prática da transformada de Fourier em sistemas de processamento digital de sinais.

A FFT otimiza o cálculo da TDF ao dividir o problema em partes menores e mais fáceis de calcular, explorando a simetria dos sinais e aplicando uma técnica de divisão e conquista. Esta abordagem reduz significativamente o tempo de processamento, especialmente quando se lida com sinais de grandes quantidades de amostras, tornando a FFT essencial para aplicações que exigem rapidez e eficiência computacional. Um dos principais métodos para calcular a FFT por meio desta abordagem é o algoritmo de Cooley-Tukey, o qual é amplamente utilizado na área de processamento digital de sinais (Lathi, 2008). Em sistemas de monitoramento em tempo real, como o rastreamento de raias espectrais abordado neste trabalho, a eficiência da FFT permite realizar a transformação do sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência de maneira prática e eficiente.

Ainda com base em Lathi (2008), apesar de existirem várias variações do algoritmo de Cooley-Tukey, elas podem ser agrupadas em dois tipos básicos: decimação em tempo e decimação em frequência. Ambas as abordagens têm como objetivo reduzir a complexidade computacional do cálculo da Transformada Discreta de Fourier (TDF), mas operam de maneiras distintas. A decimação em tempo divide o sinal original em blocos menores no domínio do tempo, aplicando recursivamente a FFT a cada sub-bloco, o que reduz significativamente o número de operações necessárias para a transformação. Este método é amplamente utilizado devido à sua simplicidade e eficiência computacional, sendo a base para a maioria das

versões práticas da FFT, como a deste trabalho em questão. Por outro lado, a decimação em frequência lida com a decomposição do sinal em diferentes faixas de frequência antes de aplicar a FFT. Essa abordagem é menos comum, mas pode ser útil em cenários em que a análise em faixas específicas de frequência é necessária, ou quando o sinal contém componentes de alta e baixa frequência que exigem tratamentos separados. Assim sendo, devido a maior complexidade e menor eficiência computacional da decimação em frequência, a decimação em tempo tende a ser mais utilizada.

No contexto do processo de rastreamento de raias espectrais tratado neste TCC, a FFT desempenha um papel central na etapa de análise espectral do sinal de campo magnético externo do gerador síncrono. A FFT faz a transformação dos sinais temporais coletados pelos sensores de campo para o domínio da frequência, decompondo o sinal em suas componentes de frequência. Isso, permite identificar componentes espectrais associadas à frequência fundamental mecânica do gerador e suas harmônicas. A amplitude destas componentes são a parte fundamental para o processo não invasivo de monitoramento da condição da máquina, que permite a detecção de faltas incipientes a partir de variações dos padrões de amplitudes destas componentes.

Portanto, a FFT não apenas torna o cálculo da TDF mais acessível, mas também possibilita a implementação de uma abordagem eficaz e de baixo custo computacional para o rastreamento em tempo real das raias espectrais no estudo de monitoração de falhas em geradores síncronos. Assim, a FFT é uma ferramenta essencial ao fornecer uma representação clara das características do sinal que podem conter indicativos de possíveis faltas no equipamento monitorado. Com relação a implementação do algoritmo de rastreamento de raias, os algoritmos de cálculo da FFT são bem estabelecidos na literatura e existem bibliotecas prontas nas mais diversas linguagens de programação com funções que permitem executar esses cálculos. Com isso, não é objetivo deste trabalho a programação de um algoritmo de cálculo da FFT, sendo usadas bibliotecas específicas em MATLAB e em C# para executar esta função.



### 3 DESENVOLVIMENTO DO CÓDIGO DE RASTREAMENTO DE RAIAS

O programa desenvolvido para executar a metodologia de rastreamento de raias foi implementado na linguagem C#, pois esta é a linguagem de programação dos componentes de software do equipamento MagAnalyzer, para o qual o algoritmo proposto é destinado. Este equipamento foi desenvolvido, e está sendo aprimorado, no escopo do projeto de P&D denominado “Equipamento Não Invasivo para Detecção de Falhas em Geradores Síncronos através do Campo Magnético Externo”, desenvolvido pela UFSC em parceria com as empresas Engie Brasil Energia, Itá Energética S.A. e AQTech Engenharia e Instrumentação S.A.. A implementação do código em C# visa facilitar a integração entre diferentes componentes de software, além de fornecer uma melhor compreensão de possíveis melhorias e de facilitar a execução de atualizações do algoritmo. Uma das dificuldades encontradas ao utilizar a linguagem C# é a necessidade de definir as variáveis de forma “rígida” e gerenciá-las. Em várias etapas do desenvolvimento, especialmente ao manipular vetores de dados e implementar funções matemáticas específicas, foi necessário alterar constantemente o tipo das variáveis para garantir compatibilidade e precisão nos cálculos. Maiores detalhes sobre essas etapas serão comentadas nas próximas subseções, nos momentos em que foram necessárias.

#### 3.1 ENTRADA E A ETAPA DE CÁLCULO DA FFT

Uma das primeiras etapas no desenvolvimento do código, antes mesmo da leitura dos dados, consiste no estabelecimento dos parâmetros da máquina síncrona na qual foram obtidos os dados de entrada, ou seja, as medidas da derivada temporal do campo magnético externo e os parâmetros do equipamento de medição destes sinais. Os parâmetros de interesse da máquina são: a frequência fundamental elétrica teórica ( $f_e$ ) e o número de pólos do gerador síncrono ( $p$ ). Por outro lado, os parâmetros necessários do equipamento de medição do sinal  $dH/dt$  para a etapa da FFT são: a frequência de aquisição dos dados ( $f_a$ ) e o período de amostragem ( $dt$ ). Além disso, com esses valores definidos, são estabelecidos também o número de pontos do espectro de frequência, que corresponde ao limite

do espectro obtido após a aplicação da FFT (metade da  $f_a$ ), e o número de harmônicas ímpares a serem consideradas no rastreamento da frequência fundamental mecânica real, o qual pode ser obtido pelo menor valor inteiro obtido por meio de

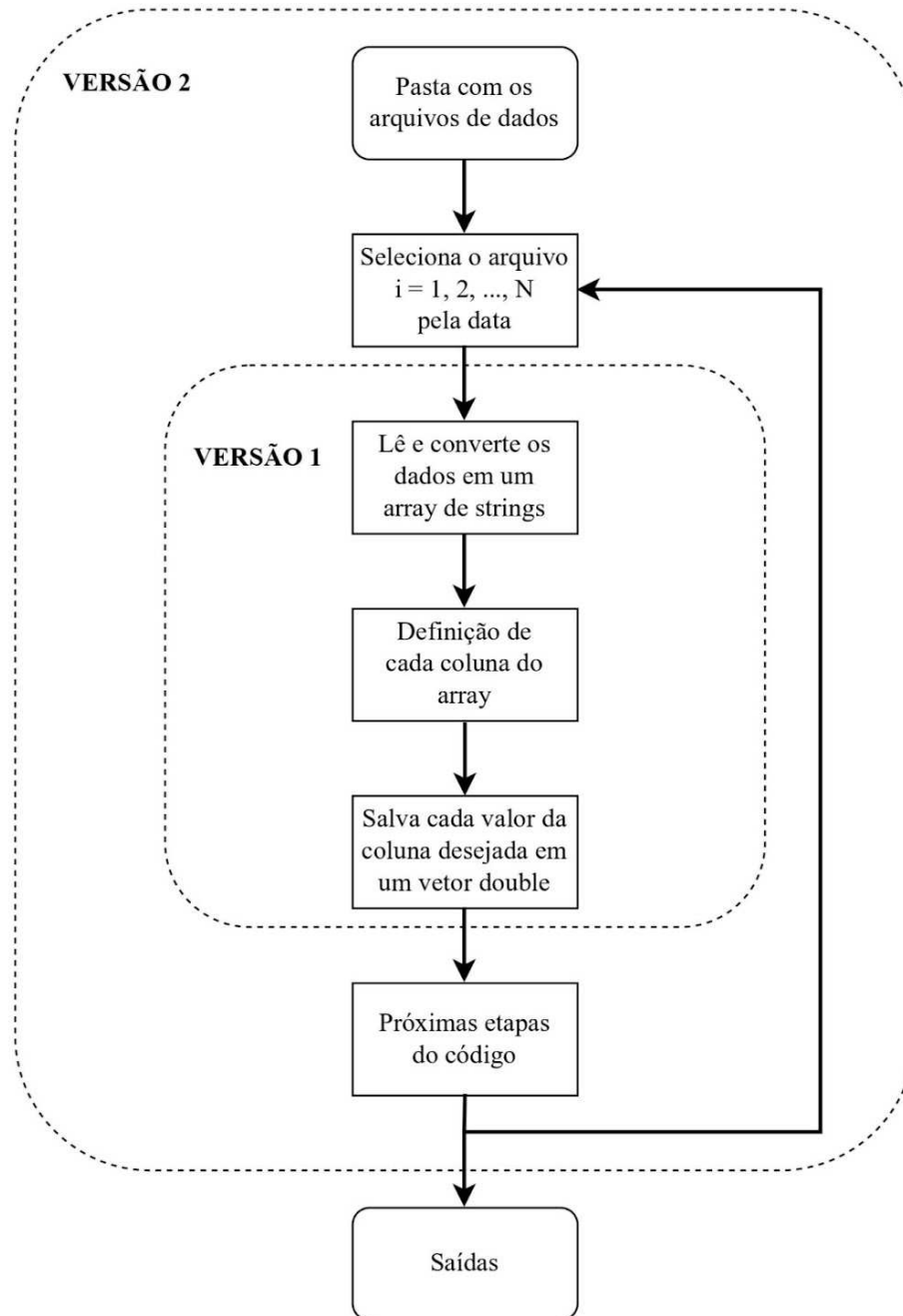
$$n^\circ \text{ de Harmônicas Ímpares} = \frac{\frac{f_a}{2}}{2f_e} \quad (3.1)$$

Na sequência do desenvolvimento do algoritmo, foi implementada a etapa de leitura dos arquivos de dados das medições (especificados em um formato .txt). Para essa etapa foram feitas 2 versões para o código. A primeira por meio de uma função que lê uma coluna específica escolhida de um dos arquivos, ou seja, só uma das aquisições ou período de medição. E a segunda versão, que é basicamente uma expansão da primeira, já que serve para ler todas as aquisições de vários arquivos de dados de uma pasta definida, com o objetivo de criar históricos das frequências rastreadas de interesse com suas amplitudes e confiabilidades durante certo período de tempo.

Em relação à função em comum de ambas as versões, ou seja, a que faz a leitura de uma das aquisições (uma das colunas de um arquivo de dados), ela inicia pegando todas as linhas do arquivo e carregando-as em um *array* de *strings*, em que cada elemento corresponde a uma linha do arquivo. Em seguida, o algoritmo cria um vetor para armazenar os dados convertidos, ainda do tipo *string*. Cada linha do arquivo é então processada de forma individual, sendo dividida em partes (colunas), cada uma correspondente a um sensor do equipamento de monitoração.

Após essa separação, o algoritmo verifica se a coluna desejada existe na linha, garantindo que o índice especificado não exceda o número de colunas presentes. Caso a coluna exista, o valor correspondente é convertido de *string* para um número do tipo *double* por meio de uma função (*double.TryParse*). O valor convertido é então armazenado no vetor de saída. Este vetor então contém todos os valores numéricos das amostras da coluna escolhida ao final do processo. A Figura 5 apresenta o fluxograma da metodologia para leitura dos arquivos de dados.

Figura 5 – Fluxograma da metodologia para a leitura dos arquivos de dados.



Fonte: Autor.

Em seguida inicia-se o processo de cálculo da Transformada Rápida de Fourier (FFT) das medidas de  $dH/dt$  pré-processados na etapa anterior. Inicialmente, são definidos *arrays* para armazenar os dados resultantes do espectro de frequência obtido, tanto em valores absolutos quanto em valores logarítmicos. Essa definição é especialmente relevante no contexto da linguagem C#, que não permite a troca dinâmica de tipos de variáveis. O *array* para armazenar os dados do espectro após a FFT é criado com a metade do comprimento (número de medidas)

do sinal original no domínio do tempo devido à simetria dos resultados da FFT de um sinal real, em que apenas a primeira metade do espectro é relevante. Já o outro *array*, é utilizado para armazenar as magnitudes espectrais convertidas para a escala logarítmica (dBV), uma vez que essa conversão facilita a análise visual de componentes com diferentes amplitudes, como é apresentado na seção de resultados deste trabalho.

Neste processo, é calculada a resolução espectral ( $df$ ), que determina a separação em frequências entre pontos adjacentes do espectro e depende diretamente do número de amostras e do intervalo entre elas ( $dt$ ), sendo um valor importante em etapas futuras do código. O cálculo de  $df$  pode ser definido por

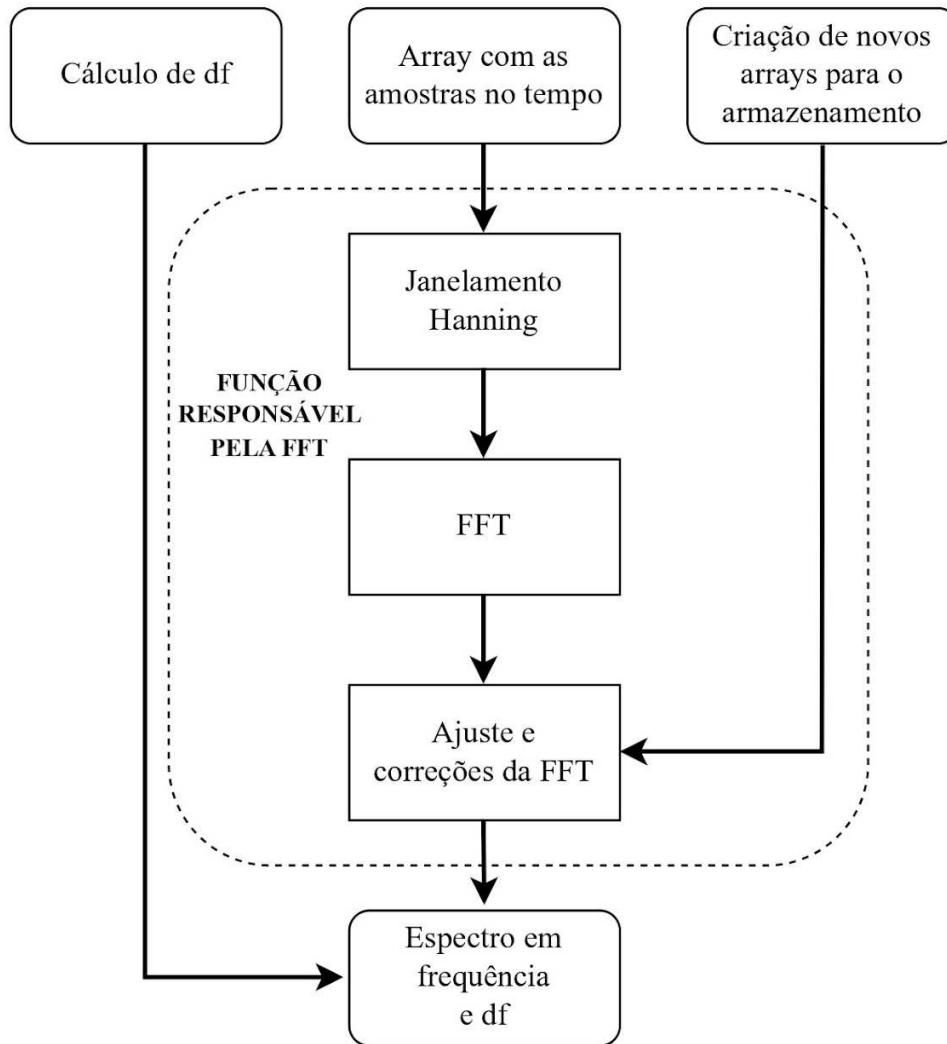
$$df = \frac{1}{n^{\circ} \text{ total de amostras} \cdot dt} \quad (3.2)$$

Em seguida, inicia-se a função responsável pelo cálculo da FFT, começando com a aplicação da janela de Hanning aos dados do sinal. A janela de Hanning suaviza o início e o fim do sinal, minimizando o efeito de vazamento espectral durante a análise no domínio da frequência, sendo essencial para reduzir possíveis distorções que poderiam mascarar ou alterar a verdadeira natureza e amplitude das componentes espectrais (Lathi, 2008). O *array* do sinal suavizado é então convertido em um *array* de números complexos, necessário para a aplicação da função de FFT da biblioteca escolhida em C#. O algoritmo então aplica o cálculo da FFT utilizando a biblioteca MathNet.Numerics, que transforma os dados do domínio do tempo para o domínio da frequência. O uso de uma biblioteca para isso se dá exclusivamente devido à complexidade necessária para criar um algoritmo original dentro da linguagem C#. Isso exigiria a criação de mais vetores e mais comandos com várias iterações, o que levaria a um aumento considerável no tempo de processamento e de desenvolvimento. Essa abordagem não foi considerada necessária, devido à existência de bibliotecas de código aberto que executam eficientemente esta função.

Após a transformação do sinal de entrada do domínio do tempo para o domínio da frequência, o espectro resultante é ajustado para corrigir as amplitudes das componentes. O primeiro ajuste é a normalização do vetor de saída (dividindo pela quantidade de amostras); O segundo passo é corrigir as amostras em função do janelamento. Para este ajuste, é necessário multiplicar cada componente do vetor

por 2 para compensar a amplitude das duas componentes laterais geradas pelo janelamento Hanning, as quais apresentam amplitude correspondente a 25% da amplitude da componente original; Por fim, deve-se obter o espectro unilateral (multiplicando por 2 para pegar o espectro unilateral a partir do resultado bilateral, o qual é o resultado padrão obtido pelo cálculo da FFT). Estes procedimentos de correção da amplitude de componentes específicas são padrões para o tipo de biblioteca utilizada, sendo muitas vezes indicados junto a documentação das bibliotecas que calculam a FFT em diferentes linguagens de programação. Finalmente, as magnitudes são extraídas e armazenadas nos *arrays* anteriormente criados, um com os valores em escala linear e o outro com os valores em uma escala logarítmica (dBV), permitindo uma análise mais prática das amplitudes espectrais. Este processo é ilustrado pelo fluxograma apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Fluxograma do cálculo da FFT.



Fonte: Autor.

### 3.2 ETAPA DA DETECÇÃO DA FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL MECÂNICA REAL

Para essa etapa, utilizou-se um processo de busca e análise das componentes harmônicas ímpares da frequência fundamental elétrica presentes no espectro de frequências. Estas componentes específicas são selecionadas por serem mais fáceis de identificar inicialmente em relação às demais componentes, uma vez que possuem amplitudes mais elevadas, o que ajuda a evitar erros devido a ruídos e variações transitórias. A ideia base desta estratégia envolve a definição de regiões de busca no espectro para cada harmônica ímpar da frequência fundamental elétrica, permitindo que a  $f_e$  real seja rastreada com base nas

frequências dos picos espectrais correspondentes a essas componentes harmônicas.

Inicialmente, com base no valor da frequência fundamental elétrica teórica (60 Hz), são definidos os limites de busca tanto inferior, quanto superior. Em seguida, o algoritmo procura o valor máximo de amplitude dentro da faixa definida pelos limites inferior e superior de busca, o que corresponde ao pico da harmônica ímpar mais próxima. A frequência de ocorrência do valor máximo encontrado é considerado a frequência rastreada da componente de interesse, e sua incerteza associada  $u(f_e)$  é calculada com base na resolução espectral ( $df$ ) e na ordem da harmônica  $k$ , de acordo com a relação

$$u(f_e) = \frac{df}{2 \cdot k} \quad (3.3)$$

A incerteza é reduzida proporcionalmente pela ordem da harmônica, como pode ser observado pela fórmula, de maneira que a cada iteração em que uma harmônica ímpar da  $f_e$  é identificada. Assim, o processo iterativo refina o valor da  $f_e$  com uma incerteza menor que a da iteração anterior. Isso é a base do que a metodologia citada por Wengerkievicz (2021) utiliza para o refinamento da incerteza ao longo de várias iterações, a qual será detalhada na sequência.

Uma vez identificada a frequência fundamental elétrica ( $f_e$ ), o algoritmo obtém também a frequência fundamental mecânica ( $f_m$ ) ao dividir o valor de  $f_e$  pelo número de pares de pólos do gerador síncrono, indicado por (2.2). Da mesma maneira, a incerteza da frequência mecânica é então calculada a partir da incerteza da frequência elétrica, também dividindo a incerteza associada a  $f_e$  pelo número de pares de polos.

O processo de rastreamento segue iterando para cada harmônica ímpar, ajustando dinamicamente os limites de busca com base nos resultados anteriores. Neste processo, a região de busca é centrada na harmônica que se deseja rastrear dada por  $kf_e$ , sendo  $k$  a ordem da harmônica e  $f_e$  a frequência fundamental elétrica detectada na iteração anterior. A região de busca pode ser definida por  $k([f_e \pm u(f_e)])$  com base na frequência rastreada na iteração anterior e na incerteza associada a

esta frequência. Este ajuste progressivo é necessário para garantir que o algoritmo permaneça fiel na localização das verdadeiras componentes harmônicas, evitando que ruídos ou variações temporárias da frequência elétrica com relação ao seu valor teórico desviem o rastreamento para regiões espectrais que não contenham a real componente harmônica que se deseja detectar.

A precisão do rastreamento de cada harmônica depende não apenas da localização do pico no espectro, mas também da amplitude dessa harmônica em relação ao ruído de fundo. Com isso, para validar a confiabilidade de cada componente rastreada, o algoritmo calcula o nível de confiança utilizando a função de distribuição cumulativa (CDF) baseada na distribuição t de Student. Essa abordagem estatística permite que o algoritmo estime a probabilidade de que a amplitude do pico rastreada corresponda efetivamente à amplitude da harmônica esperada, em vez de ser um valor de amplitude do ruído presente no espectro.

Para isso, o algoritmo incorpora uma análise das regiões vizinhas ao pico rastreado, verificando a probabilidade da amplitude rastreada não pertencer ao ruído de fundo (caso no qual a frequência da componente rastreada pode ser atribuída à harmônica da  $f_e$  desejada). Nesse sentido, são calculadas a média e o desvio padrão do ruído de fundo para, assim, normalizar a amplitude da harmônica rastreada. Por fim, um índice de confiabilidade baseado na distribuição t de Student é calculado. Se a confiabilidade calculada pela CDF for superior a 99%, a amplitude rastreada é considerada não pertencente ao ruído de fundo. Neste caso, a amplitude rastreada é considerada válida para a harmônica de interesse e a frequência rastreada é armazenada juntamente com o valor de incerteza atualizado. Caso contrário, o algoritmo não atualiza o valor da  $f_e$  e da sua incerteza de detecção, atualizando os valores de  $f_e$  e  $u(f_e)$  da iteração atual com os mesmos valores identificados na iteração anterior.

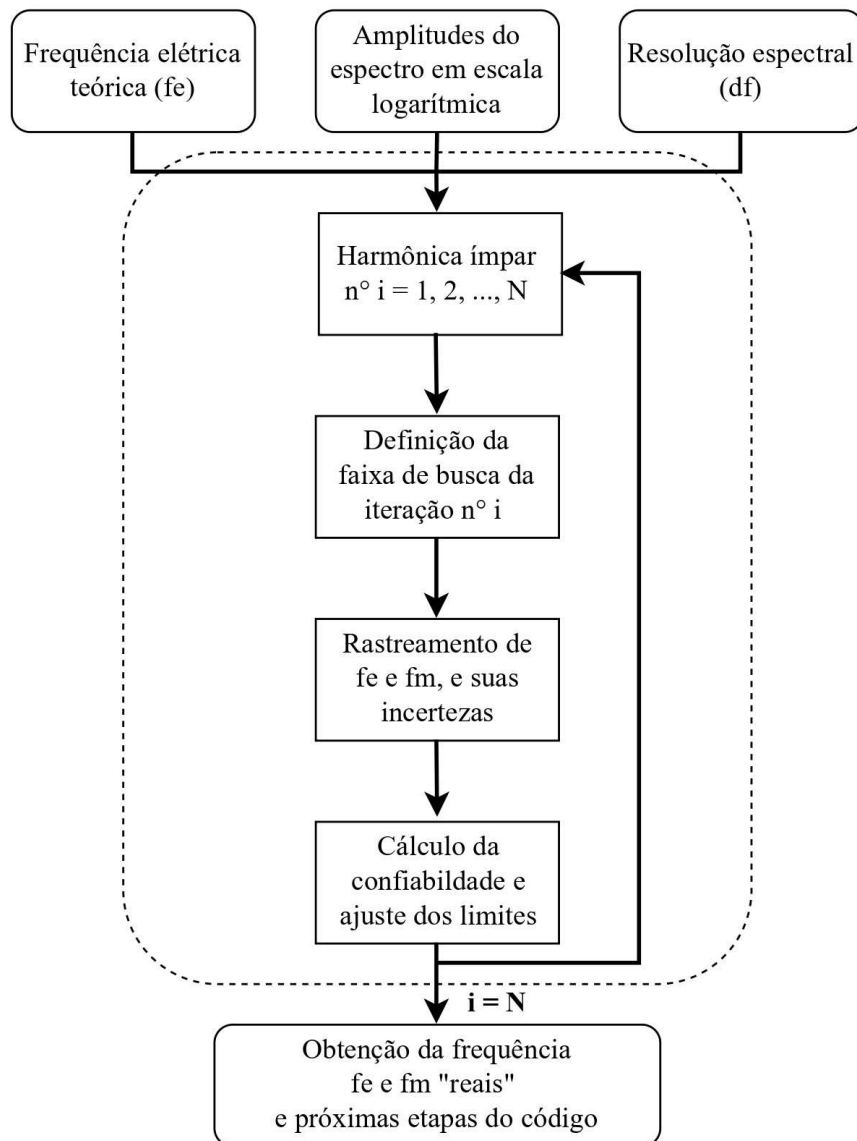
Para o ajuste dos limites de busca, o algoritmo verifica três possibilidades: 1) se o limite superior da faixa de incerteza atual é maior do que a da iteração anterior; 2) se o limite inferior da faixa de incerteza atual é menor do que a da iteração anterior e 3) se as faixas dos limites de busca atuais não se cruzam (limite superior da faixa de incerteza menor do que o limite inferior da faixa de incerteza). Caso uma dessas possibilidades se confirme, a correção é feita com base na iteração anterior



(tomando como atual um valor de incerteza igual ao da iteração anterior); caso contrário, os limites são atualizados com base na iteração atual.

Ao final do processo, são obtidas tanto as frequências fundamental elétrica e fundamental mecânica “reais” depois de todas as iterações, como também suas incertezas de detecção. Além disso, a utilização de um indicador de confiabilidade (pela CDF) oferece uma métrica quantitativa que pode ser usada para avaliar a qualidade do rastreamento ao longo do tempo, garantindo que a  $f_e$  seja atualizada com base em uma componente espectral com alta confiabilidade para esta atualização. A Figura 7 apresenta o fluxograma desta etapa.

Figura 7 – Fluxograma da detecção da frequência mecânica real.



Fonte: Autor.

### 3.3 ETAPA DO AJUSTE DO ESPECTRO EM FREQUÊNCIA

O ajuste da resolução espectral do sinal de entrada é uma etapa essencial para aumentar a precisão na análise dos espectros de frequências. Modificando o número de pontos do sinal original, consegue-se alinhar os picos do espectro de frequência com a frequência fundamental mecânica real, rastreada na etapa anterior, e suas harmônicas. Isso melhora a precisão na etapa seguinte, que envolve o rastreamento efetivo das harmônicas de interesse para a monitoração da condição do GS, uma vez que esse ajuste evita o vazamento espectral, ou seja, que as frequências de interesse fiquem posicionadas entre dois pontos discretos do espectro resultante. Esse processo garante que as amplitudes das frequências harmônicas da frequência mecânica sejam corretamente identificadas, melhorando a qualidade da resposta obtida.

O ajuste do espectro em frequência inicia-se calculando o novo número de amostras do conjunto de dados, o qual fornece um espectro de frequência em que existem raias espectrais coincidentes com a  $f_m$  real e suas harmônicas. Esse número de amostras, diferente do tamanho do conjunto original de dados, é definido com base na frequência fundamental mecânica real ( $f_{m\text{real}}$ ), encontrada na etapa anterior, e na resolução espectral ( $df$ ) original. Essa relação é calculada por meio de

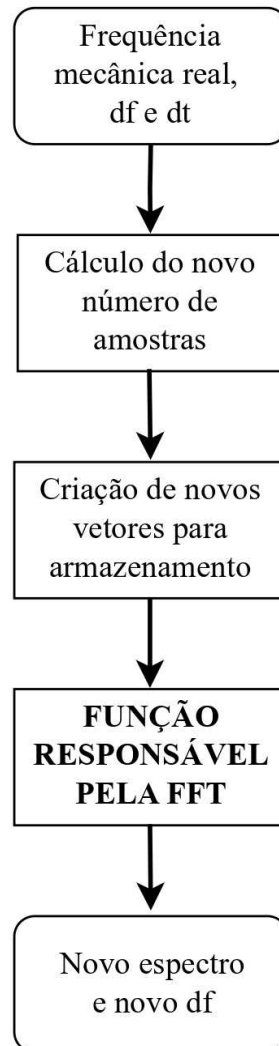
$$\text{Novo número de amostras} = \frac{\text{Floor}(f_{m\text{real}}/df)}{f_{m\text{real}}/dt} \quad (3.4)$$

em que o termo  $\text{floor}(f_{m\text{real}}/df)$  fornece o número inteiro arredondado para baixo do total de amostras até a  $f_{m\text{real}}$ , que é então dividido pela própria  $f_{m\text{real}}$ , para assim obter-se um tempo total de amostragem em que o número total de amostras coletadas fornece um espectro com pontos (raias espectrais) alinhados com a frequência fundamental mecânica real e suas harmônicas. O resultado dessa operação é dividido pelo tempo entre amostras ( $dt$ ), obtendo-se o número total de amostras desejado para evitar o fenômeno de vazamento espectral.

Em seguida, um novo vetor de amostras é criado com espaço suficiente para armazenar o novo número reduzido de pontos. Com isso, é utilizado uma

função (*Array.Copy*) para copiar os dados correspondentes do vetor original para esse novo vetor, assegurando que o conteúdo do sinal seja preservado após a redução no número de pontos. Com a diminuição no número de amostras é então possível a obtenção de uma nova resolução espectral pela equação (3.2), a qual será a resolução espectral do espectro de frequências do sinal ajustado.

Figura 8 – Fluxograma do ajuste do espectro em frequência.



Fonte: Autor.

Após o ajuste ser realizado, são criados novos vetores para armazenar os resultados de uma nova Transformada Rápida de Fourier (FFT), agora para o novo vetor de dados. Novamente, cria-se um vetor para conter as amplitudes do espectro em frequência em seu valor original, e outro para o mesmo espectro, só que em escala logarítmica.

Posteriormente, a função responsável pela FFT é novamente acionada, agora para o novo vetor de dados, armazenando os resultados nos novos vetores de armazenamento criados, para a escala original e logarítmica. Agora com a frequência de cada ponto sendo múltipla da nova resolução espectral ( $df$ ). Todo o processo de ajuste do espectro em frequência é ilustrado pelo fluxograma apresentado na Figura 8.

### 3.4 ETAPA DO RASTREAMENTO DE HARMÔNICAS

O rastreamento de raias, também conhecido como rastreamento de harmônicas, é o processo que a identificação precisa das frequências e amplitudes das componentes harmônicas da frequência fundamental mecânica da máquina síncrona. Para isso, primeiramente, calcula-se o número de harmônicas a serem monitoradas, como definido por

$$\text{Harmônicas monitoráveis} = \text{Floor}\left(\frac{\left(\frac{f_a}{2}\right)}{f_{m\text{real}}} - 1\right) \quad (3.5)$$

em que  $f_a$  é a frequência de amostragem e  $f_{m\text{real}}$  é a frequência fundamental mecânica real da máquina, detectada na etapa 2.

Esse número de harmônicas define a quantidade de componentes do espectro que terão suas amplitudes armazenadas para futuras análises associadas à monitoração da condição da máquina. A adição de “-1” presente na equação 3.5 se deve ao ruído posterior, utilizado para o cálculo da confiabilidade, que utiliza a harmônica seguinte para ser definido, o que não seria possível para a literal última harmônica presente dentro do espectro.

Com a definição da quantidade de harmônicas a serem rastreadas, passa-se, então, para o processo de rastreamento propriamente dito. As frequências são determinadas simplesmente pela multiplicação do valor da frequência fundamental mecânica real e da ordem da harmônica correspondente. As amplitudes de cada harmônica são extraídas diretamente do vetor de dados espectrais em escala logarítmica, e são salvas nas posições de cada harmônica dentro do vetor de dados.

Outra etapa fundamental presente no processo de rastreamento é o cálculo da confiabilidade de cada harmônica, que é semelhante ao que foi implementado na etapa de detecção da frequência fundamental mecânica real. Ela é uma medida para testar a confiabilidade com que o sistema identifica a amplitude de uma raia específica. Para isso, são coletados dados de ruído de fundo adjacente às componentes harmônicas rastreadas. O ruído é dividido em duas partes: o ruído anterior, que está localizado antes da harmônica, e o ruído posterior, que está posicionado após a harmônica. Esses dados são coletados e concatenados em um único vetor de ruído, que representa a variação do espectro adjacente à harmônica rastreada.

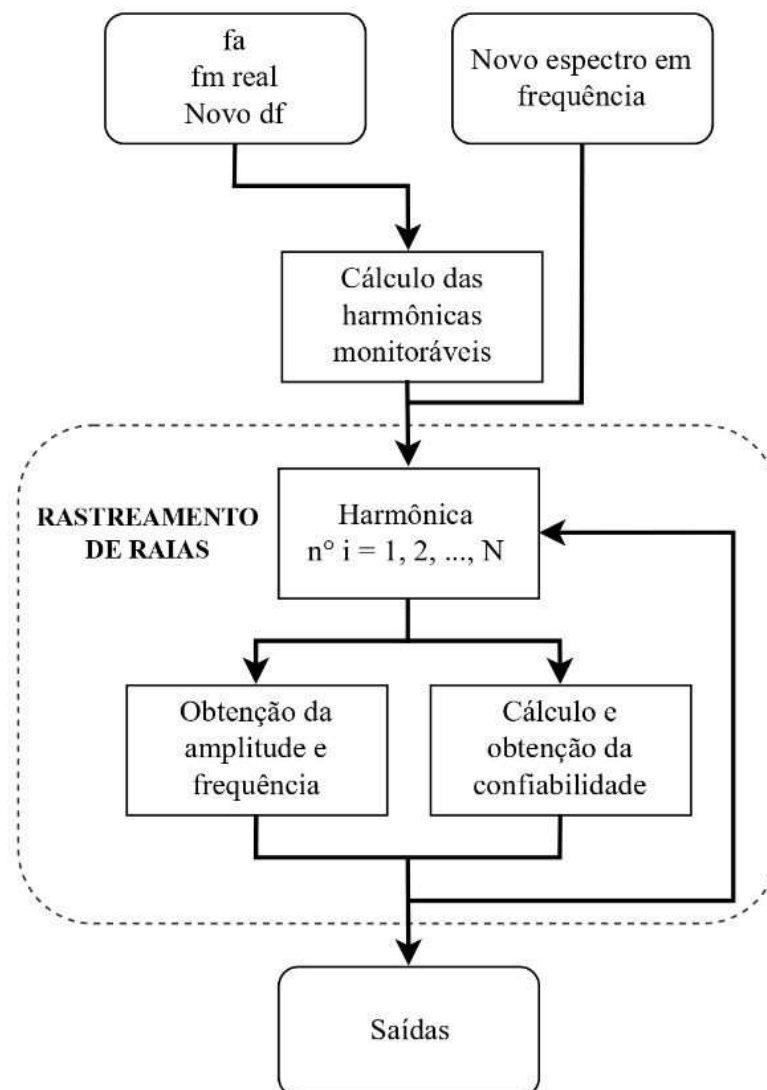
Após a coleta do ruído, tanto as amplitudes das harmônicas quanto o ruído de fundo são convertidos de uma escala logarítmica para uma escala linear, para que os valores possam ser comparados adequadamente. Além disso, é realizado um tratamento de rejeição de outliers, baseado na técnica de Boxplot (Tukey, 1977), uma técnica estatística que ajuda a identificar e remover valores extremos que possam distorcer a análise, escolhida devido à sua simplicidade de implementação computacional. Inicialmente, são calculados os três quartis principais: o primeiro quartil (Q1), o segundo quartil (Q2 ou mediana) e o terceiro quartil (Q3). O primeiro quartil (Q1) representa o ponto onde 25% dos valores estão abaixo, enquanto o terceiro quartil (Q3) representa o ponto onde 75% dos valores estão abaixo. A diferença entre Q3 e Q1 é chamada de intervalo interquartil (IQR) e é uma medida da dispersão dos dados (Bussab; Morettin, 2017).

Com base no IQR, define-se uma faixa aceitável de ruído, na qual os valores que estão dentro do intervalo  $[Q1 - 1,5IQR, Q3 + 1,5IQR]$  são considerados aceitáveis, enquanto valores que ficam fora desse intervalo são classificados como outliers e são desconsiderados do ruído. Isso é um passo essencial para garantir que apenas os valores esperados do ruído de fundo sejam usados no cálculo da confiabilidade, descartando o efeito de possíveis outliers.

Com o ruído tratado e os outliers removidos, da mesma forma que anteriormente, são calculadas a média e o desvio padrão do ruído de fundo adjacente. A amplitude da harmônica rastreada é então normalizada em relação a esses parâmetros (média e desvio padrão), permitindo a comparação com o nível de ruído ao seu redor. Esse valor normalizado é, por fim, utilizado para calcular um índice de confiabilidade baseado na distribuição t de Student, para medir a

probabilidade de que a amplitude rastreada seja significativamente diferente do ruído de fundo. Essa probabilidade, chamada de confiabilidade, é armazenada para cada harmônica e pode ser visualizada para verificação posterior, fornecendo um indicativo robusto da precisão de que cada harmônica foi rastreada corretamente e que corresponde de fato a uma harmônica da  $f_m$  e não a um ponto do espectro do ruído. O fluxograma da etapa de rastreamento de harmônicas pode ser visualizado na Figura 9.

Figura 9 – Fluxograma do rastreamento de harmônicas.



Fonte: Autor.

### 3.5 SAÍDAS DO CÓDIGO

As saídas do código foram projetadas para fornecer um conjunto abrangente de informações que possam facilitar a interpretação e a visualização dos resultados para futuras análises. Seja na análise de uma única aquisição ou no monitoramento contínuo do GS por meio de múltiplos arquivos de medidas obtidos periodicamente ao longo do tempo, as informações fornecidas por gráficos ou tabelas permitem a avaliação, de forma precisa e confiável, das características e do estado das componentes harmônicas rastreadas.

Dessa maneira, assim como na entrada, o código desenvolvido apresenta duas formas distintas para as saídas, que correspondem ao tipo de entrada fornecida. Cada uma dessas foi projetada para oferecer os resultados de maneira clara e detalhada, atendendo aos diferentes tipos de saídas necessárias e para os diferentes tipos de análise de dados de monitoramento de geradores síncronos. A seguir, são descritas as saídas para cada tipo de entrada:

#### 3.5.1 Saídas para o Primeiro Tipo de Entrada: Análise de uma Única Aquisição

Quando o usuário opta por realizar a análise de uma única aquisição, ou seja, escolhendo uma coluna específica de um único arquivo, as saídas geradas pelo código são as seguintes:

- **Primeira Etapa (Cálculo da FFT):** O código gera dois gráficos da Transformada Rápida de Fourier (FFT) do sinal de entrada. Um gráfico é apresentado em **escala linear**, enquanto o outro é exibido em **escala logarítmica**, permitindo uma análise mais detalhada das amplitudes em diferentes escalas de plotagem. A escala logarítmica, como indicado anteriormente, é especialmente útil para observar variações sutis de amplitude entre os diferentes valores de frequência.
- **Segunda e Terceira Etapas (Detecção da Frequência Fundamental Mecânica Real e Ajuste da Resolução Espectral):**
  - **Gráfico da frequência elétrica fundamental detectada em cada iteração**, acompanhado por uma faixa de incerteza, o que

permite visualizar a convergência da detecção ao longo das iterações.

- **Gráfico de comparação entre as FFTs em escala logarítmica, antes e após o ajuste da resolução espectral ( $df$ ),** evidenciando o ganho de precisão no posicionamento dos picos harmônicos com pontos discretos do espectro de frequências e evidenciando a diminuição do efeito do vazamento espectral.
- **Uma tabela** com os valores detectados das frequências fundamentais elétrica e mecânica reais, suas incertezas, o novo valor de  $df$ , o número de pontos da FFT e a frequência máxima observada, ou seja, o fim do espectro. Esses valores são fundamentais para a análise do processo de monitoramento e do funcionamento adequado do código.
- **Última Etapa (Rastreamento das Harmônicas):**
  - **Gráfico que exhibe a raia da harmônica de interesse rastreada,** destacando também o ruído de fundo adjacente. Esse gráfico permite uma avaliação visual da raia da harmônica de interesse (a qual pode ser especificada para visualização), além da clareza da funcionalidade do processo de rastreamento de raias.
  - **Gráfico com as amplitudes de todas as harmônicas rastreadas,** de modo a apresentar uma visão geral das amplitudes detectadas para todas as componentes monitoradas, em escala logarítmica.
  - **Gráfico do índice de confiabilidade calculado para cada harmônica rastreada,** permitindo a identificação rápida de quais harmônicas possuem uma alta confiabilidade de detecção, ou seja, são aptas a futuras análises.

As saídas para a análise do algoritmo de rastreamento de raias para uma única aquisição são amplamente tratadas e exemplificadas no capítulo seguinte, no qual são apresentados resultados para diferentes conjuntos de dados de entrada.



### 3.5.2 Saídas para o Segundo Tipo de Entrada: Análise de Múltiplas Aquisições

Quando a entrada se baseia na análise de múltiplas aquisições a partir de arquivos de dados presentes em uma pasta definida, o código gera e salva um conjunto de dados que serve para criar um histórico das variações de amplitude de cada harmônica rastreada ao longo do tempo, ou seja, ao longo de aquisições consecutivas igualmente intervaladas no tempo. Neste caso, são processadas todas as aquisições de todos os arquivos de dados da pasta, e são salvos em um novo arquivo os seguintes resultados:

- **Frequência, amplitude e confiabilidade** da harmônica de interesse para cada arquivo de dados, criando-se um histórico ordenado por aquisição, já que cada aquisição corresponde a um arquivo de dados na pasta. Esse histórico permite que se identifiquem padrões de variação ao longo do tempo, o que é essencial para o monitoramento de condições de funcionamento de geradores síncronos e para a detecção de faltas incipientes.



#### 4 TESTES E RESULTADOS OBTIDOS COM O CÓDIGO

Para validar a precisão e a confiabilidade do código desenvolvido em C#, foram realizados testes com quatro tipos distintos de conjuntos de dados: dados sintéticos, dados de ensaios laboratoriais, e dados provenientes tanto do protótipo do MagAnalyzer quanto do seu cabeça de série. Estes últimos instalados em geradores síncronos de grande porte de uma usina hidrelétrica. A seleção de diferentes fontes de dados teve como objetivo testar o algoritmo em diferentes arquiteturas e contextos de aquisição, desde situações teóricas até no processamento de dados de diferentes geradores síncronos.

Com o intuito de avaliar o desempenho do algoritmo desenvolvido neste trabalho, os resultados obtidos foram comparados com os resultados obtidos por um algoritmo que implementa a metodologia de rastreamento de raias desenvolvido no software MATLAB por pesquisadores do GRUCAD durante o desenvolvimento dos projetos de P&D ANEEL PD-00403-0048/2019 e PD-0403-0057/2023. Essa implementação em MATLAB já havia sido testada e utilizada em pesquisas anteriores, servindo também como uma referência sólida para o desenvolvimento do código em C# desse trabalho, tanto no que diz respeito à metodologia de rastreamento de raias espectrais quanto aos critérios de validação. Uma versão básica deste algoritmo em MATLAB também serviu de referência para o desenvolvimento do algoritmo de rastreamento de raias já empregado no equipamento MagAnalyzer em sua versão cabeça de série, já sendo validado em diferentes estudos e aplicações dentro do escopo dos projetos de P&D que conceberam o equipamento MagAnalyzer.

A comparação entre os resultados das duas versões de código (C# e MATLAB) é crucial para assegurar que a implementação atual alcance o mesmo nível de precisão, garantindo a consistência dos diagnósticos e das análises espectrais. Além disso, análises anteriores possibilitaram verificar eventuais melhorias no desempenho computacional e na flexibilidade de uso do código em diferentes aplicações, as quais são aqui constatadas e documentadas pelas duas versões do algoritmo final da metodologia de rastreamento de raias.

Os resultados dos testes realizados, assim como as comparações entre as duas implementações, são apresentados e discutidos nos tópicos subsequentes,

destacando as semelhanças e eventuais divergências encontradas, além dos possíveis motivos dessas diferenças e de como os resultados obtidos podem influenciar as etapas subsequentes ao rastreamento no monitoramento da condição dos geradores síncronos. Vale ressaltar que, para esses testes, foi utilizada apenas a análise individual de cada tipo de arquivo de dados. No entanto, cabe lembrar que a análise de múltiplos arquivos segue os mesmos processos, diferenciando-se apenas no tipo de entrada e de saída.

#### 4.1 ANÁLISE COM DADOS SINTÉTICOS

A validação do código de rastreamento de raias desenvolvido neste trabalho foi conduzida utilizando, inicialmente, dados sintéticos gerados por simulações computacionais. Esses dados foram projetados para emular o comportamento do campo magnético externo de máquinas síncronas, enfrentando as limitações práticas de obtenção de dados experimentais em laboratório. Entre as principais dificuldades do processo de obtenção de dados em laboratório estão o tempo prolongado necessário para realizar testes que gerem históricos de amplitudes suficientemente extensos para uma caracterização estatística robusta nos processos de detecção de faltas em máquinas, além dos desafios de induzir falhas de progressão lenta ou em estágios iniciais.

A criação desses tipos de dados pode ser realizada por meio de um modelo analítico da indução magnética no entreferro, conforme proposto por Santos (2021). Neste modelo, dado por

$$B(t) = F_{mm}(t) \cdot \mathcal{P}(t) \quad (4.1)$$

a indução magnética ( $B(t)$ ) é definida pela multiplicação de duas funções principais: uma que representa a força magnetomotriz ( $F_{mm}(t)$ ) proveniente do rotor e outra que descreve a permeância magnética ( $\mathcal{P}(t)$ ) ao longo do entreferro.

O modelo analítico descrito foi implementado em um simulador computacional desenvolvido no software LabVIEW, da National Instruments, por Aurich (2022) em seu Trabalho de Conclusão de Curso. Esse simulador realiza o cálculo da forma de onda da indução magnética, seguido da análise de frequência,

rastreamento das componentes espectrais de interesse e armazenamento das amplitudes das harmônicas monitoradas. De maneira interativa, a ferramenta gera diversos vetores contendo as formas de onda da indução magnética, produzindo como saída históricos de amplitudes das componentes harmônicas relevantes para a detecção de falhas.

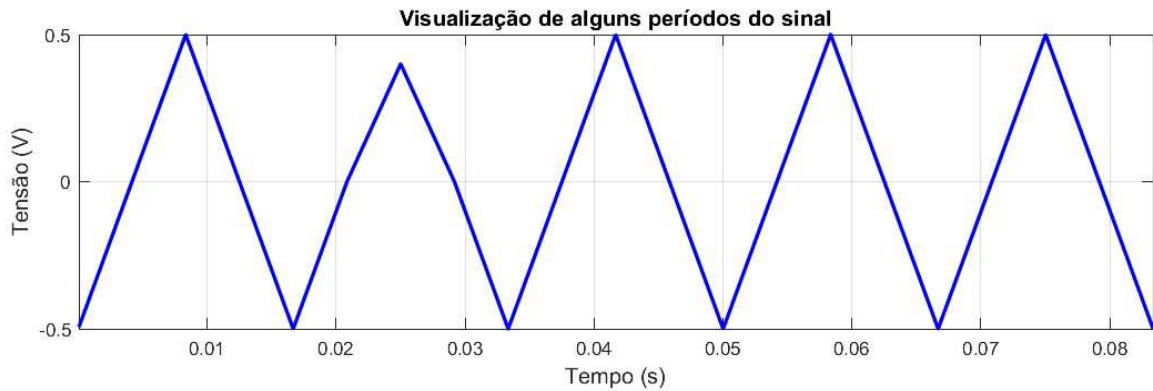
As principais entradas desse simulador desenvolvido para investigar as características de falhas específicas em geradores síncronos, incluem as configurações do gerador síncrono, os parâmetros de faltas a serem investigadas e a adição de ruído ao sinal. Parâmetros específicos, como frequência de operação, número de polos e número de ranhuras, são definidos para simular a máquina. As pequenas assimetrias presentes no GS, relacionadas aos polos e ranhuras, são modeladas automaticamente utilizando números aleatórios de acordo com funções de densidade de probabilidade associadas a esses parâmetros (Aurich, 2022).

Para simular faltas, são realizadas alterações graduais nas funções que descrevem a força magnetomotriz e a permeância, utilizando uma função sigmóide para representar o desenvolvimento progressivo de faltas. Além disso, o simulador permite a adição de ruídos na frequência de operação, representando variações de velocidade da máquina, bem como ruídos de fundo que reproduzem os encontrados em medições reais do campo magnético externo.

As formas de onda geradas em uma simulação, que teoricamente apresentam as mesmas características do campo magnético interno e do campo magnético externado pela máquina, permitiram a validação do código de rastreamento, utilizando dados sintéticos que simularam o comportamento de um gerador síncrono de 56 polos salientes, operando a uma frequência de 59,98 Hz. Para este GS, a frequência fundamental equivale a aproximadamente 2,14 Hz. A simulação foi configurada para gerar um vetor de dados com duração de 20 segundos, gerando um sinal triangular a uma frequência de amostragem de 20 kHz ( $dt = 50 \mu s$ ), de forma a garantir uma resolução temporal adequada para a análise. A Figura 10 apresenta alguns ciclos do sinal gerado no domínio do tempo, na qual é possível visualizar a onda triangular e a alteração imposta em um dos semiciclos, a qual é utilizada para simular o efeito de uma falta incipiente (Aurich, 2022). Por outro lado, a Figura 11 ilustra o espectro de frequência obtido a partir desses dados, com destaque para a região de baixa frequência do espectro, em que é possível

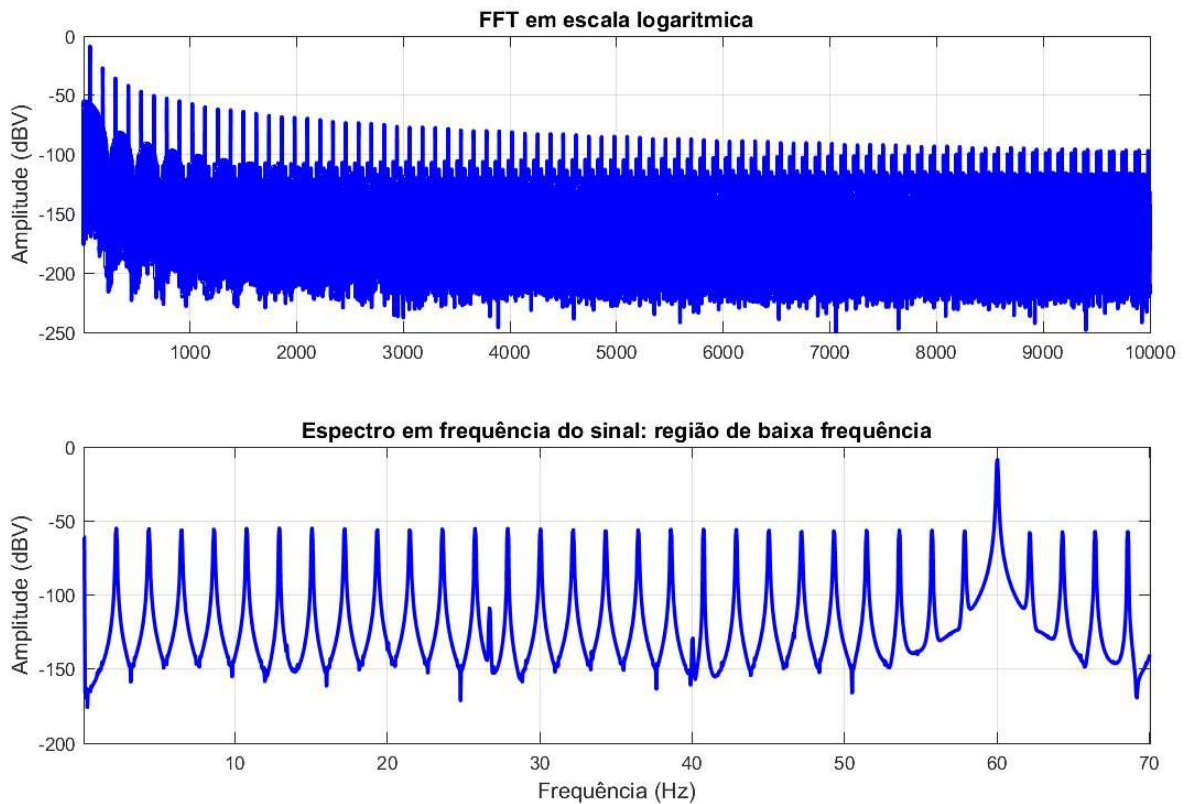
identificar a frequência fundamental mecânica próxima de 2,14 Hz, e suas harmônicas.

Figura 10 – Dados sintéticos no domínio do tempo.



Fonte: Autor.

Figura 11 – Dados sintéticos no domínio da frequência.



Fonte: Autor.

#### 4.1.1 Etapa 01: FFT do sinal de entrada

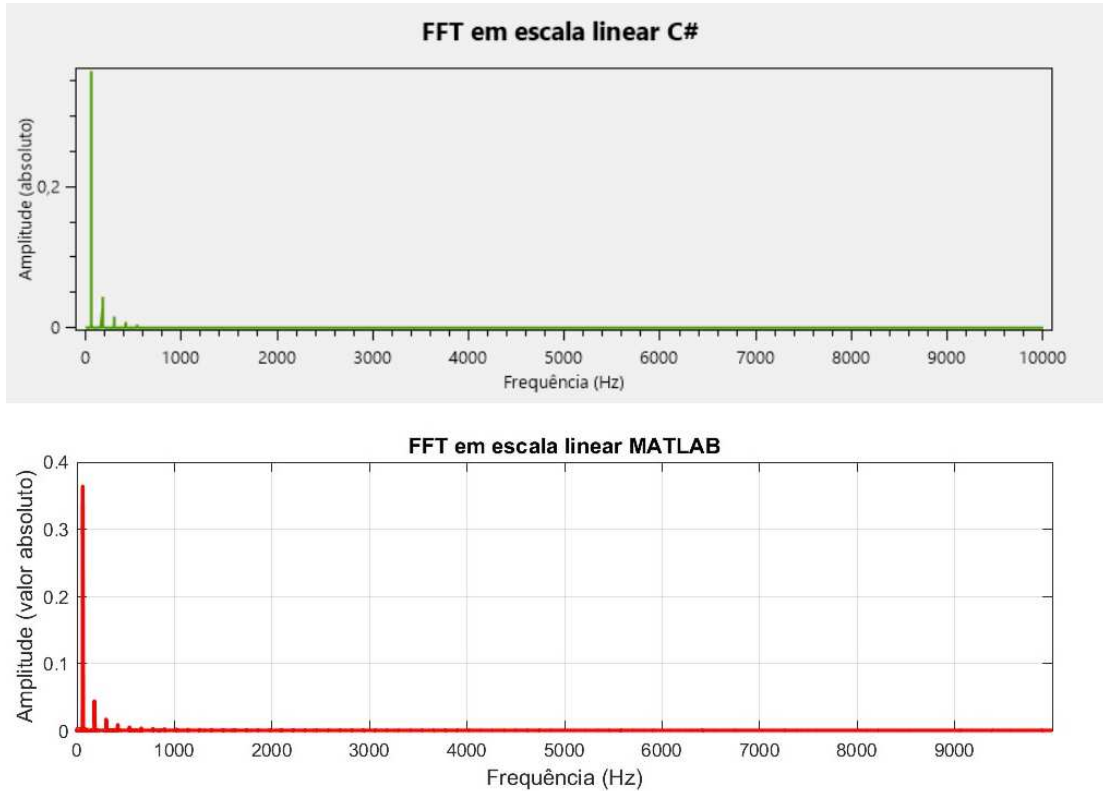
Para uma avaliação inicial da primeira etapa do método de rastreamento de raias no algoritmo implementado em C#, que realiza o cálculo do espectro de frequências do sinal de entrada ( $dH(t)/dt$ ) utilizando a Transformada Rápida de Fourier (FFT) com janelamento Hanning, foi realizada uma comparação dos resultados obtidos pelo algoritmo em C# com aqueles gerados no MATLAB, usando os mesmos dados sintéticos. O objetivo foi verificar a aderência e a consistência entre os dois algoritmos, utilizando o algoritmo desenvolvido no MATLAB como referência e avaliando os resultados obtidos.

Como descrito anteriormente, as saídas dessa etapa são os espectros de frequência em escala linear e logarítmica, apresentados nas Figuras 12 e 13 respectivamente, os quais exibem as comparações entre os espectros obtidos em ambos os códigos, em C# e MATLAB. Como a função FFT escolhida para a implementação em C# foi baseada na função FFT do MATLAB, ambas as representações resultaram em espectros praticamente idênticos, com correspondência nas amplitudes das componentes principais.

Nas regiões em torno do ruído de fundo, algumas pequenas variações entre os espectros podem até ser observadas, o que se deve, possivelmente, às diferenças intrínsecas nas bibliotecas de cálculo FFT entre as duas linguagens, como no tratamento de valores de ponto flutuante e arredondamentos. Essas diferenças, contudo, são mínimas e ocorrem em amplitudes que não afetam o interesse principal do rastreamento de raias. Além disso, as configurações de parâmetros, como a taxa de amostragem e o comprimento da janela, são iguais nas duas versões do código, o que contribui para a obtenção de resoluções espectrais basicamente idênticas e picos nas mesmas frequências.

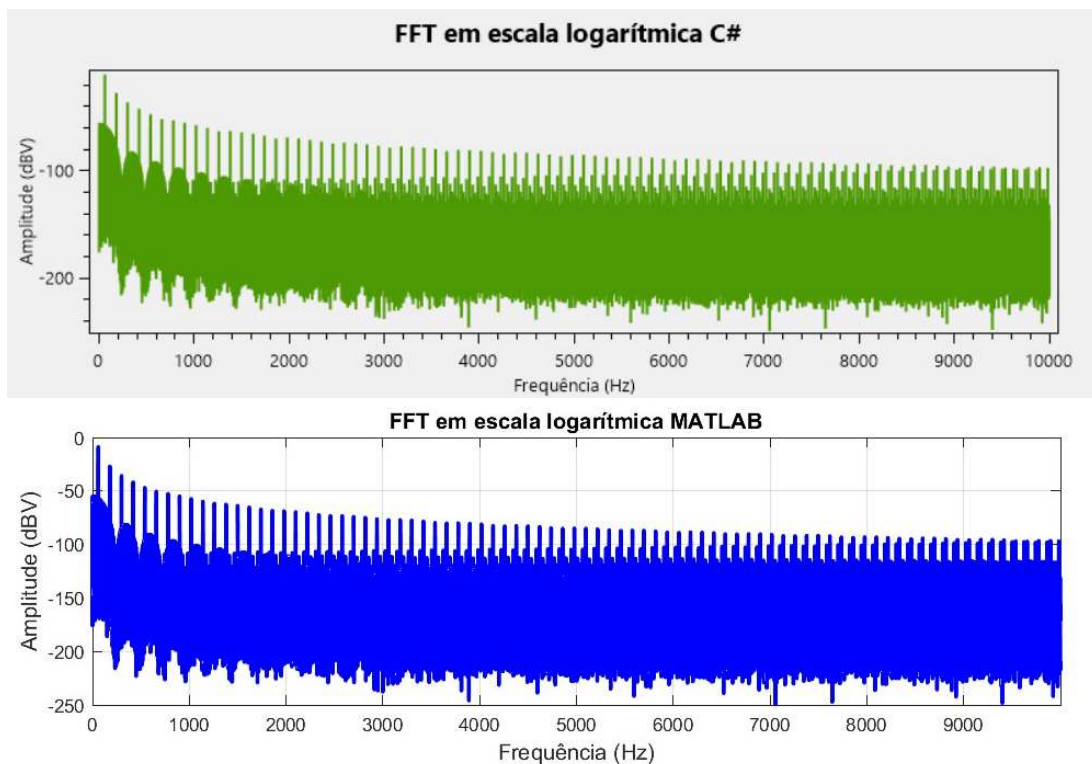
Com isso, esses resultados permitem concluir que, apesar das pequenas discrepâncias nas regiões de ruído, as componentes de interesse mantêm equivalência tanto em frequência quanto em amplitude nas duas implementações. Assim, nessa primeira análise, assegura-se a equivalência e a validação da implementação do cálculo da FFT no código desenvolvido em C#.

Figura 12 – Espectros em frequência em escala linear do código em C# e em MATLAB.



Fonte: Autor.

Figura 13 – Espectros em frequência em escala logarítmica do código em C# e em MATLAB.



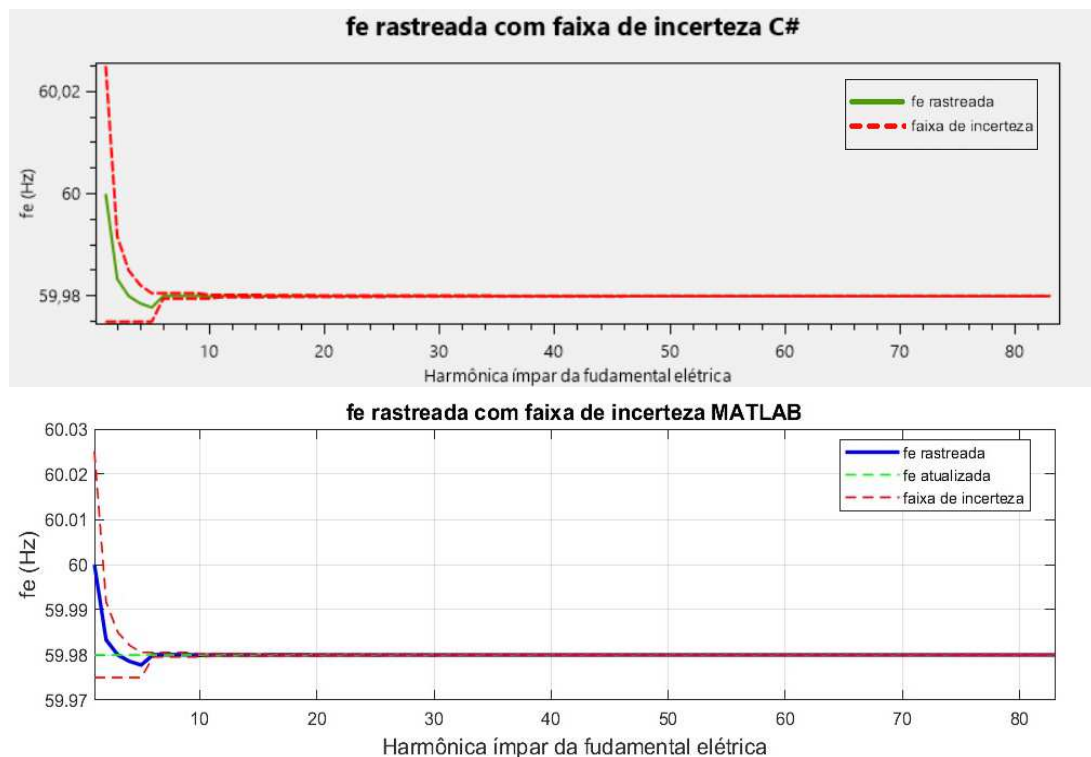
Fonte: Autor.



#### 4.1.2 Etapa 02: Detecção da frequência fundamental mecânica real

A segunda etapa do método de rastreamento de raias é dedicada à detecção da frequência fundamental mecânica real, assim como da fundamental elétrica real. Essa etapa se baseia no rastreamento das componentes ímpares da frequência fundamental elétrica no espectro do sinal de entrada. Os resultados obtidos demonstraram uma forte aderência entre as implementações em C# e MATLAB, como apresentado na Figura 14, a qual ilustra a evolução da frequência fundamental elétrica real rastreada ao longo das iterações, juntamente com a faixa de incerteza associada para ambas as implementações. O comportamento do rastreamento dessa componente é praticamente idêntico em ambas as implementações, o que pode ser comprovado pelos valores finais obtidos após a convergência do processo de rastreamento presentes na Tabela 1.

Figura 14 – Frequência elétrica rastreada mais faixa de incerteza em C# e em MATLAB.



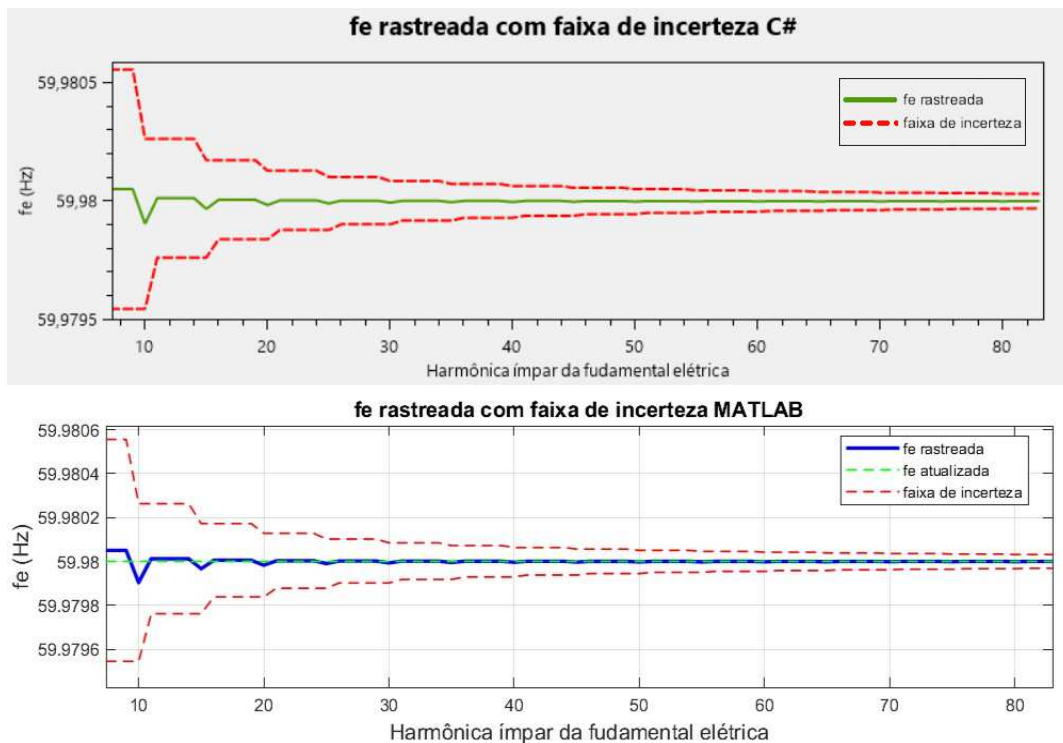
Fonte: Autor.

A Figura 15 apresenta um detalhe da Figura 14, na qual se pode visualizar as iterações finais. Desse modo, pelo zoom nas iterações finais, é possível verificar que a faixa de incerteza das iterações diminui de forma considerável e gradual com

o crescimento do número de iterações, o que ajuda a comprovar a assertividade do rastreamento e contribui para o sucesso na identificação das componentes harmônicas da frequência fundamental mecânica, como mencionado em capítulos anteriores.

Além disso, a Tabela 1 sintetiza a comparação dos valores da frequência fundamental elétrica real detectada, da frequência fundamental mecânica e das incertezas associadas, obtidas pelos dois algoritmos. Os valores numéricos demonstraram-se idênticos até a décima casa decimal, validando, assim, a equivalência entre as implementações em ambas as linguagens para os dados sintéticos. Com relação aos resultados obtidos pela metodologia, observa-se que partindo da frequência elétrica nominal (60 Hz) os programas convergiram a frequência detectada para o valor aproximado de 58,9800 Hz, que corresponde a frequência elétrica real utilizada para simular este conjunto de dados. As incertezas associadas às frequências fundamentais reais detectadas estão na faixa dos micro Hertz, o que confere uma assertividade aceitável para o processo de detecção destas frequências.

Figura 15 – Frequência elétrica rastreada ao longo das iterações mais a faixa de incerteza com zoom em C# e em MATLAB.



Fonte: Autor.

Tabela 1 – Comparação dos valores das fundamentais entre os algoritmos implementados em C# e em MATLAB.

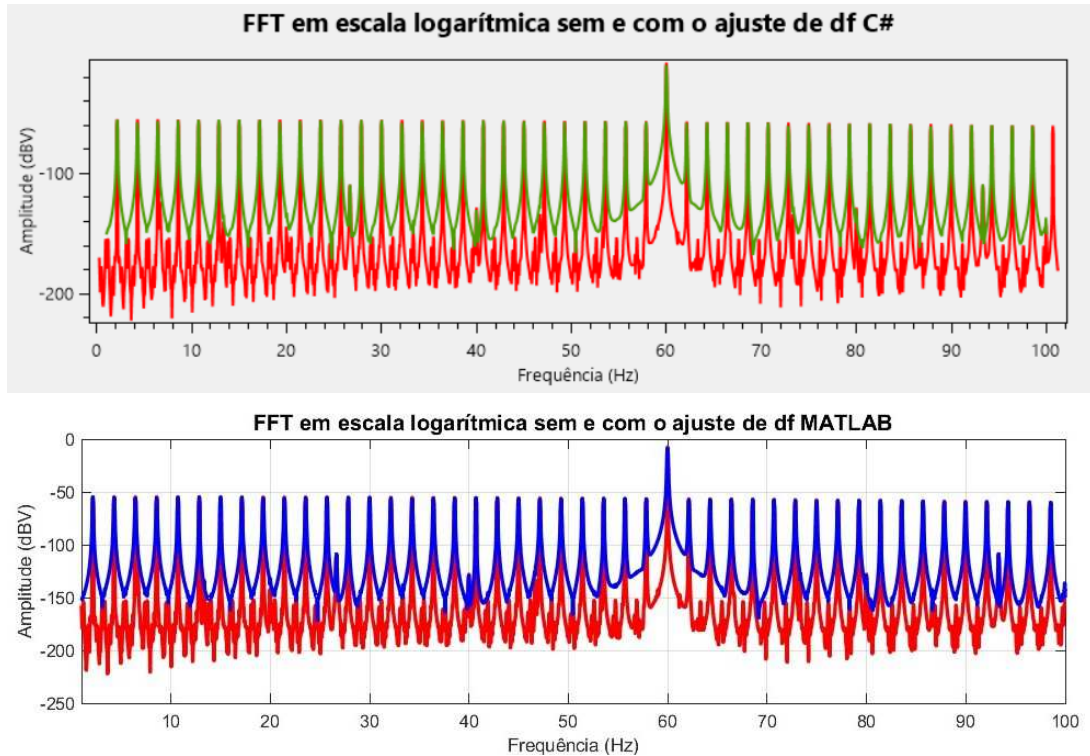
| Elementos de Interesse                     | C#               | MATLAB           |
|--|------------------|------------------|
| Fundamental elétrica rastreada             | 59,9800001953 Hz | 59,9800001953 Hz |
| Incerteza associada à fundamental elétrica | 0,0000312512 Hz  | 0,0000312512 Hz  |
| Fundamental mecânica rastreada             | 2,1421428641 Hz  | 2,1421428641 Hz  |
| Incerteza associada à fundamental mecânica | 0,0000011161 Hz  | 0,0000011161 Hz  |

Fonte: Autor.

#### 4.1.3 Etapa 03: Ajuste da resolução espectral

Na terceira etapa do método de rastreamento de raias se realiza o ajuste da resolução espectral. Essa etapa consiste na adaptação do número de pontos do vetor de dados de entrada para o aprimoramento da análise no domínio da frequência. Os resultados obtidos também indicaram a aderência entre as implementações em C# e MATLAB. Na Figura 16, que ilustra uma comparação entre as respostas dessa etapa, fornecida por cada um dos dois algoritmos, observa-se que, além de o espectro se manter idêntico, os picos do espectro com ajuste se mostram levemente maiores que os do espectro sem ajuste, além de uma diminuição no efeito do vazamento espectral, visível na diminuição das amplitudes do ruído presente entre as componentes principais. Este resultado comprova que o ajuste da resolução espectral favorece a detecção da amplitude real das componentes de interesse e valida a consistência dos algoritmos. A amplitude das componentes harmônicas da  $f_m$  após a etapa de ajuste da resolução espectral é equivalente entre as duas implementações, garantindo a equivalência entre os resultados obtidos nesta etapa pelos dois programas.

Figura 16 – Espectro sem (verde/azul) e com (vermelho) ajuste de  $df$  em C# e em MATLAB.



Fonte: Autor.

A Tabela 2 complementa essa análise ao apresentar os valores numéricos do número de pontos ajustado no vetor de dados e da resolução espectral resultante em cada caso. Nota-se que ambas as implementações apresentam o mesmo número de pontos e mantém uma precisão equivalente até a sexta casa decimal, o que demonstra a equivalência entre os dois algoritmos após o ajuste de  $df$ .

Tabela 2 – Comparação dos algoritmos implementados em C# e em MATLAB após o ajuste de  $df$ .

| Elementos de Interesse                        | C#          | MATLAB      |
|---|-------------|-------------|
| Número de pontos da FFT antes do ajuste       | 200000      | 200000      |
| Número de pontos da FFT depois do ajuste      | 196066      | 196066      |
| Resolução espectral ( $df$ ) antes do ajuste  | 0,05 Hz     | 0,05 Hz     |
| Resolução espectral ( $df$ ) depois do ajuste | 0,051003 Hz | 0,051003 Hz |

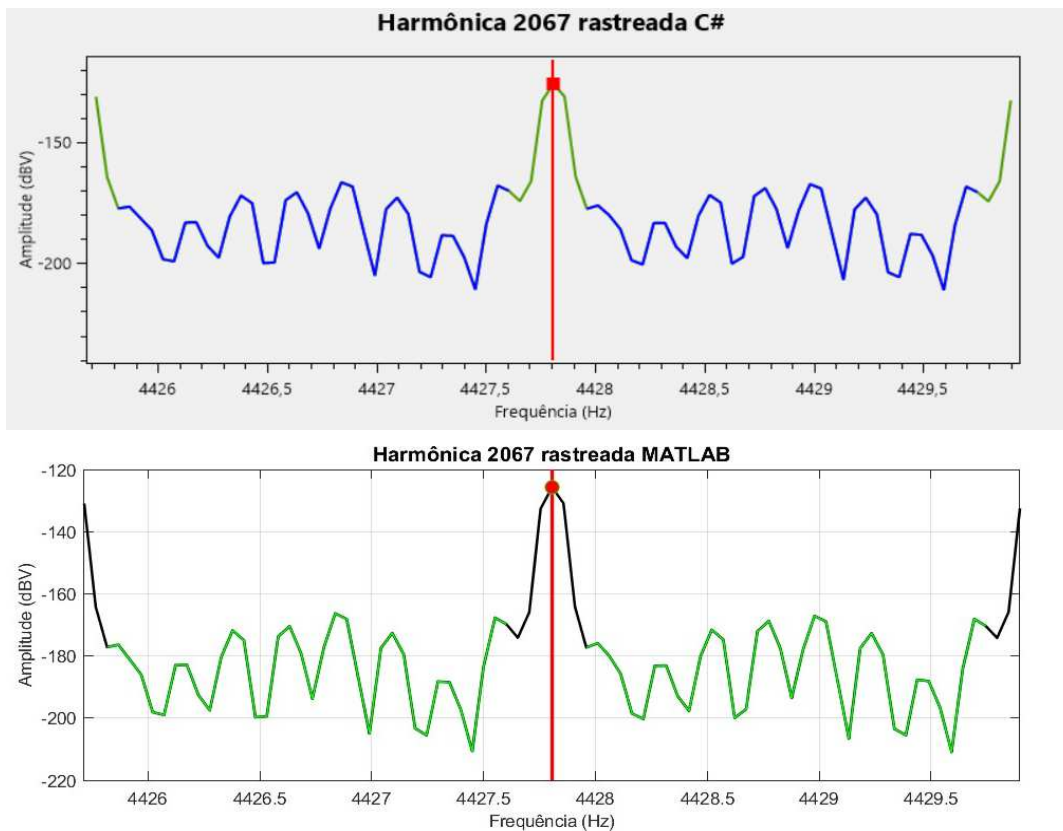
Fonte: Autor.

#### 4.1.4 Etapa 04: Rastreamento das raias de interesse

A quarta etapa do método de rastreamento de raias consiste no ponto principal: o rastreamento das componentes harmônicas da frequência mecânica real, suas amplitudes e índices de confiabilidade. Os resultados obtidos para essa etapa, tanto nas implementações em C# quanto em MATLAB, seguiram apresentando resultados congruentes e semelhantes.

A Figura 17 que ilustra o rastreamento da harmônica nº 2067, tomada como exemplo, para ambas as implementações, em que observa-se uma convergência nos resultados, tanto no valor das amplitudes rastreadas quanto na forma do espectro nesta faixa de frequência. Com relação aos resultados da metodologia de rastreamento de raias, observa-se que o pico de amplitude correspondente à harmônica de interesse é corretamente identificado, assim com as regiões de ruído a montante e a jusante desta componente, as quais são utilizadas para calcular a confiabilidade da componente rastreada.

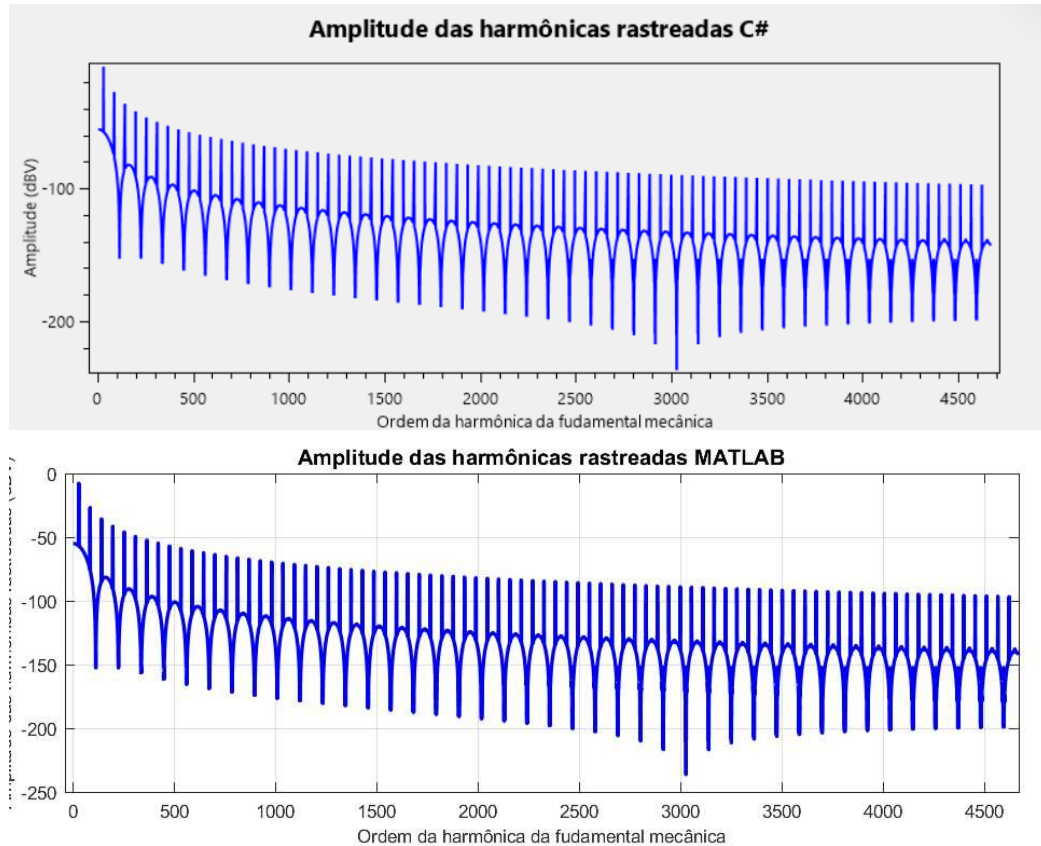
Figura 17 – Harmônica nº 2067 rastreada em C# e em MATLAB.



Fonte: Autor.

Além disso, na Figura 18, em que são comparadas as amplitudes das harmônicas rastreadas pelos algoritmos em C# e MATLAB, as amplitudes das harmônicas também se mostram semelhantes entre as duas versões, com as harmônicas ímpares apresentando maiores valores em relação às outras, como esperado.

Figura 18 – Amplitude de cada harmônica em C# e em MATLAB.



Fonte: Autor.

Com relação à confiabilidade de cada raia rastreada, apresentada na Figura 19, as diferenças entre os dois algoritmos tornam-se mais perceptíveis. Essa divergência se deve, em parte, às diferenças na lógica das fórmulas entre as duas linguagens. Em decorrência disso, algumas das confiabilidades das harmônicas variam entre os dois algoritmos, especialmente à medida que a ordem da harmônica aumenta. A Figura 20 ilustra melhor a visualização dessa diferença ao comparar a distribuição do número de harmônicas por níveis de confiabilidade para as implementações, destacando que o número de harmônicas com uma confiabilidade superior a 98% (valor mínimo considerado aceitável) foi de 4390 e 4385 para o algoritmo em C# e em MATLAB, respectivamente.

Figura 19 – Confiabilidade de cada harmônica em C# e em MATLAB.

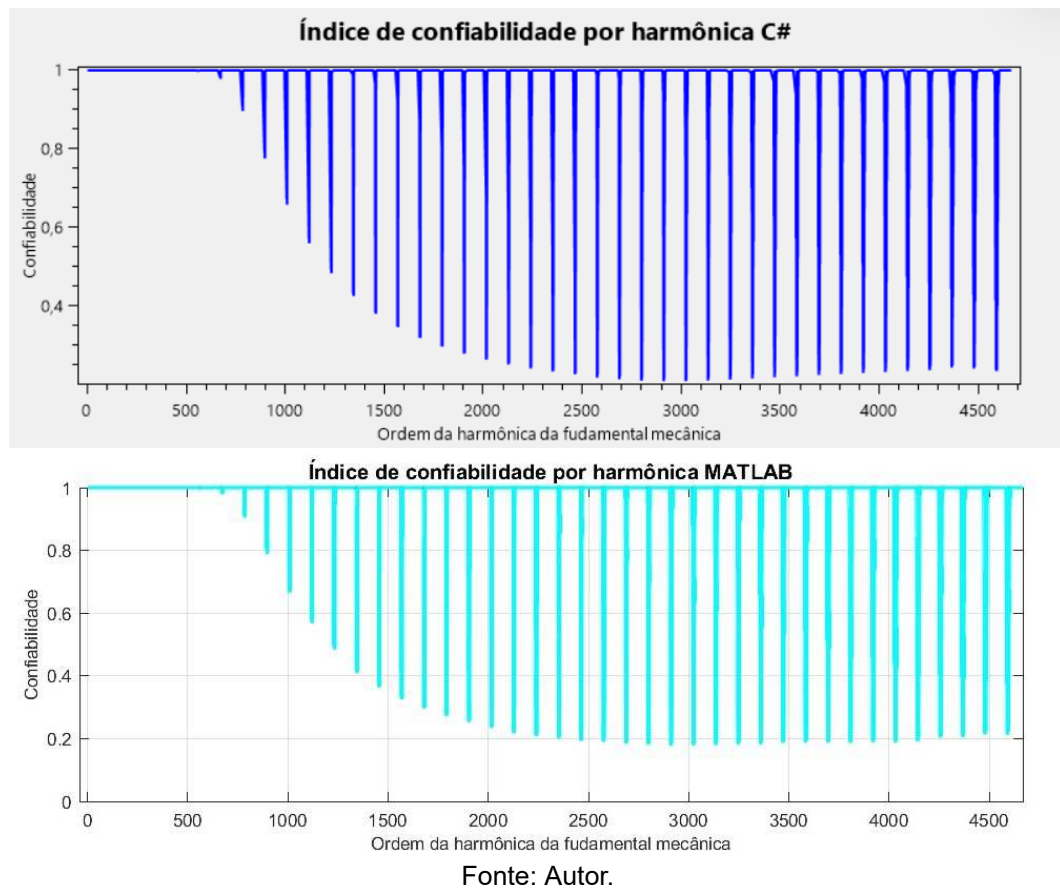
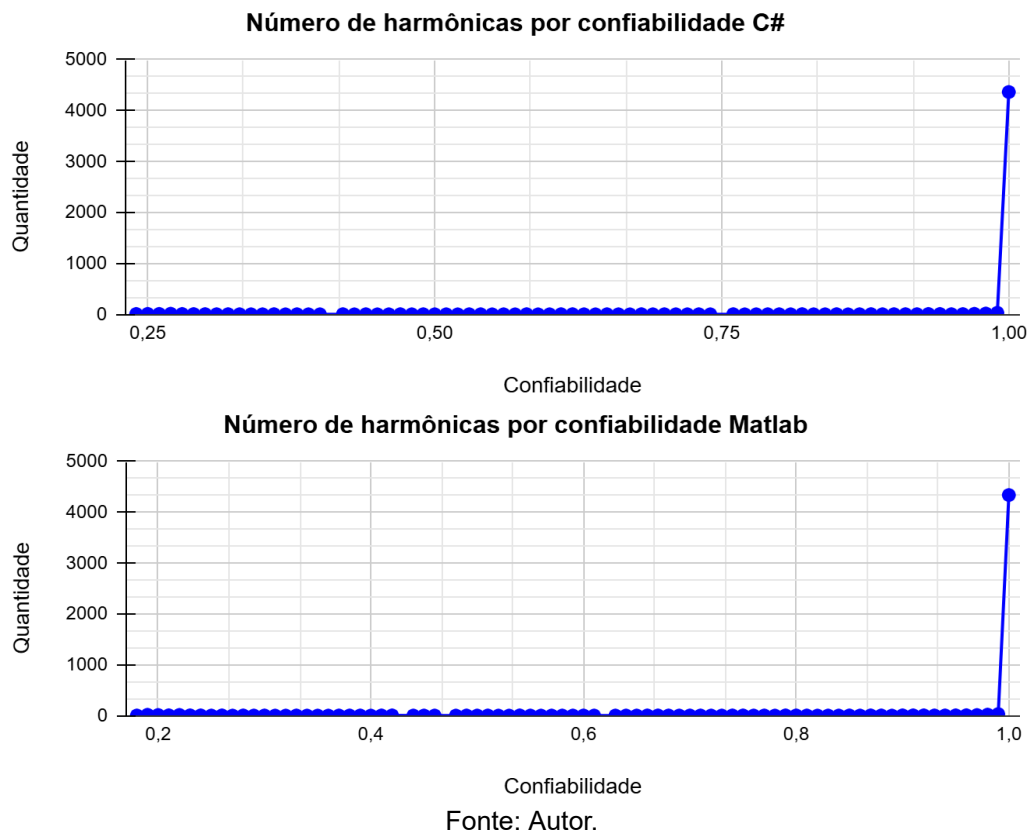


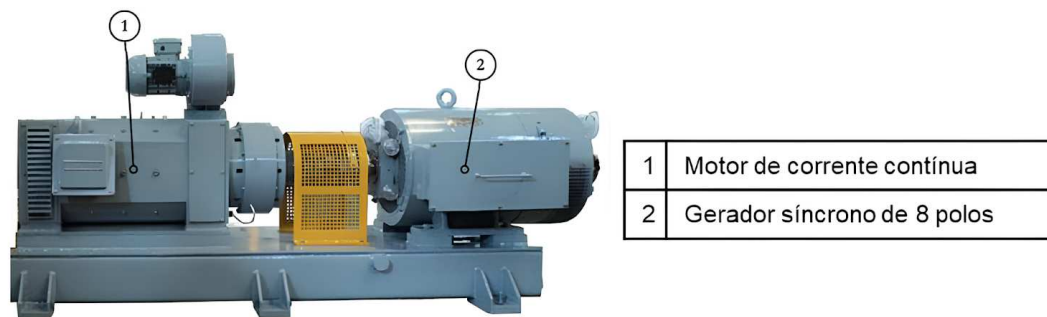
Figura 20 – Número de harmônicas por confiabilidade em C# e em MATLAB.



## 4.2 ANÁLISE COM DADOS DE ENSAIO EM LABORATÓRIO

Continuando a validação do algoritmo de rastreamento de raias espectrais desenvolvido em C#, agora utiliza-se dados experimentais coletados em ensaios realizados no laboratório LabMAQ da UFSC. Para isso, uma bancada de testes específica, apresentada na Figura 21, foi utilizada. Nessa bancada, um motor de corrente contínua serve como máquina primária para o gerador síncrono de oito polos em estudo, permitindo a aquisição de dados reais de um GS em condições controladas.

Figura 21 – Bancada de testes.



Fonte: Adaptado de Equacional (2014).

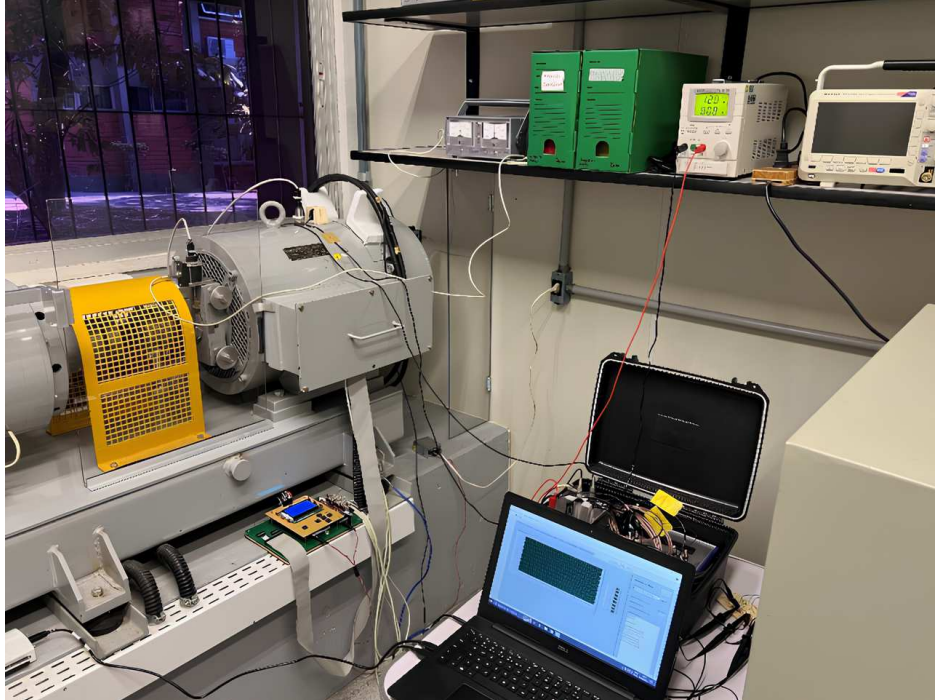
Os ensaios foram executados em uma configuração de frequência fundamental elétrica próxima de 50 Hz, com uma taxa de aquisição de 30 kHz. A frequência fundamental mecânica para o GS de oito polos operando em 50 Hz é de aproximadamente 12,5 Hz. O monitoramento do campo magnético externo foi realizado por meio de um equipamento especialmente criado para capturar dados em uma resolução temporal adequada para permitir o correto rastreamento das componentes espectrais de interesse (harmônicas da  $f_m$ ), apresentado na Figura 22. Dois sensores foram posicionados a aproximadamente 90° entre si, proporcionando dados complementares para uma análise mais detalhada do campo magnético externo. Cada aquisição teve uma duração de 10 segundos, e foram realizadas cinco aquisições nessas condições.

Esta análise com dados de laboratório complementa a etapa inicial de validação, que foi feita com dados sintéticos gerados via simulações computacionais. Enquanto as simulações permitiram modelar diferentes cenários de condições operacionais, a análise com dados de laboratório possibilita observar o



comportamento do algoritmo frente a dados experimentais reais, nos quais o ruído e as variações aleatórias, naturalmente presentes na análise de sistemas físicos reais, trazem novos desafios para a efetividade do algoritmo implementado em C#.

Figura 22 – Equipamento para medição do campo magnético externo.



Fonte: Antunes (2023).

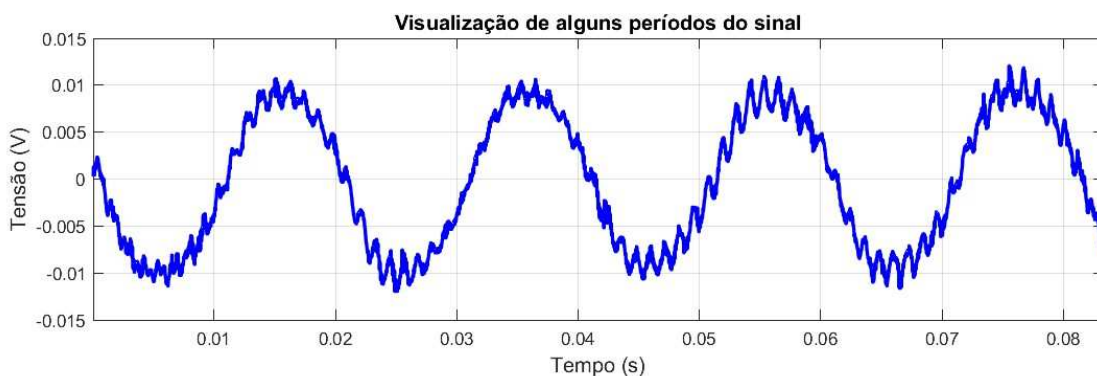
A seguir, cada etapa dos ensaios e seus resultados foram comparados novamente com o algoritmo desenvolvido em MATLAB, agora visando fornecer uma avaliação prática da eficácia e funcionalidade do algoritmo, em relação a versão do algoritmo de rastreamento tomada como referência. Essa comparação contribui para um entendimento e validação mais completos de sua aplicabilidade em dados de um sistema real de medição do campo magnético externo.

#### 4.2.1 Etapa 01: FFT do sinal de entrada

Ao comparar os resultados da FFT entre os dados sintéticos e os ensaios laboratoriais reais, surgem novas considerações sobre a robustez e a adequação do algoritmo em C# para condições de operação fora do ambiente simulado. Nos dados sintéticos, as condições foram idealizadas, nas quais o sinal foi configurado para apresentar um formato triangular para facilitar a análise do processo de rastreamento. Agora com os dados reais, os sinais apresentam flutuações e

imperfeições adicionais, comuns no contexto experimental, como variações de carga e pequenas oscilações de frequência que não estavam presentes nos dados simulados. A Figura 23 ilustra essas diferenças no domínio do tempo, evidenciando que o sinal experimental não só não é triangular, como também apresenta maiores variações da forma de onda em relação aos dados sintéticos, o que exige que o algoritmo em C# seja apto a tratar um sinal com características diferentes das de um sinal ideal.

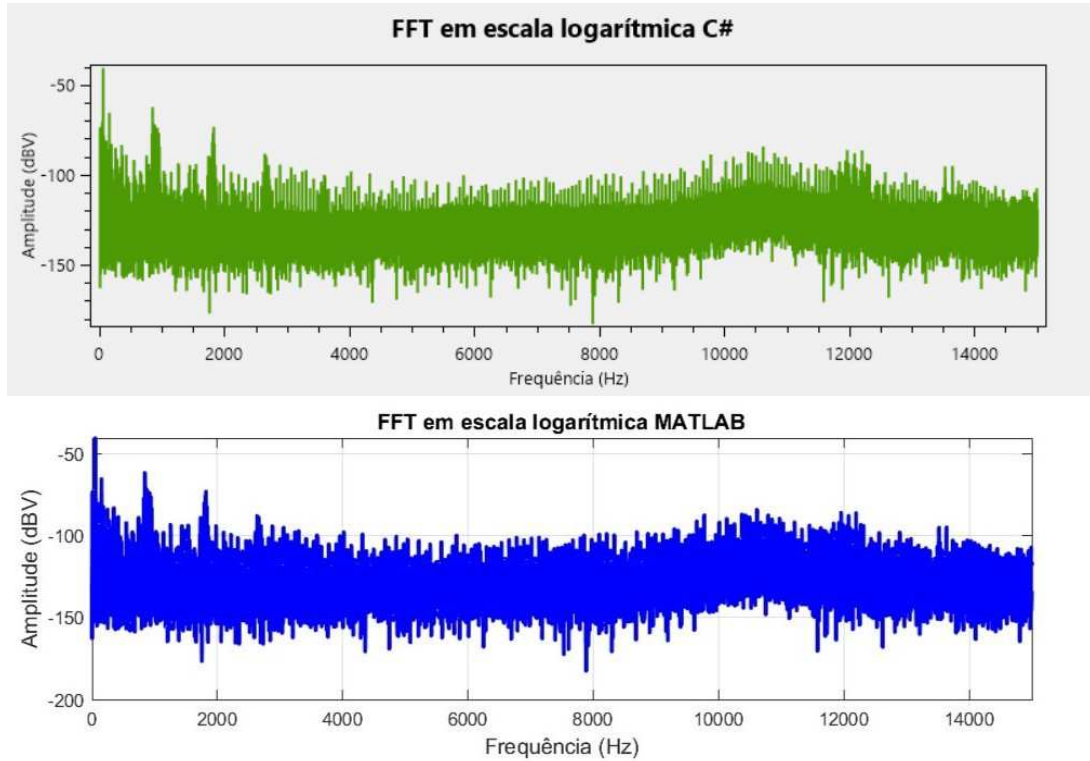
Figura 23 – Sinal dos dados do ensaio em laboratório no domínio do tempo.



Fonte: Autor.

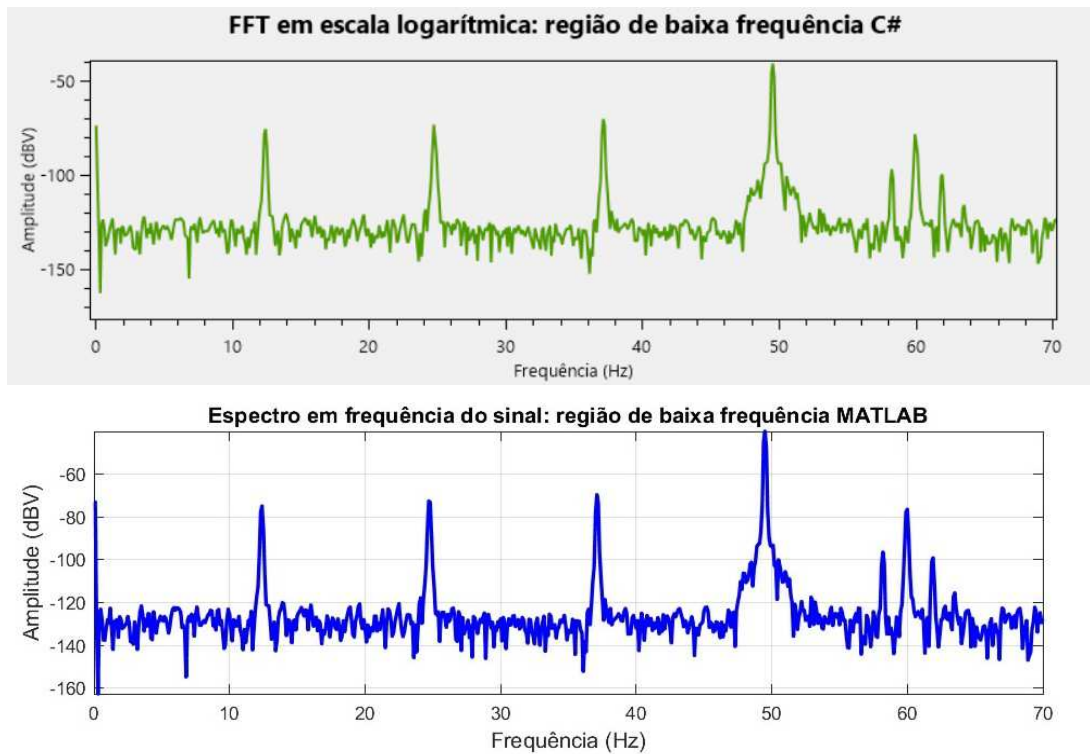
A Figura 24 apresenta a FFT do sinal de entrada, em escala logarítmica, representando o espectro de frequências até 15 kHz, a qual é a frequência de Nyquist para a configuração de aquisição das medições (frequência de amostragem de 30 kHz). A Figura 25, que representa um recorte do espectro de frequência em baixa frequência, também em escala logarítmica, permite observar que as componentes de interesse (múltiplas de  $f_m$ ) permanecem visualmente identificáveis, mesmo os dados experimentais introduzindo uma maior distorção no formato do espectro em comparação aos dados simulados. Apesar disso, analisando as duas versões dos algoritmos, nota-se que as saídas gráficas se mantiveram praticamente idênticas, além de apresentarem espectros congruentes com as especificações do sinal desejado, melhor visto com o detalhe na região de baixa frequência apresentado na Figura 25.

Figura 24 – Espectro em frequência em escala logarítmica em C# e em MATLAB.



Fonte: Autor.

Figura 25 – Espectro em frequência em escala logarítmica com zoom em C# e em MATLAB.



Fonte: Autor.

#### 4.2.2 Etapa 02: Detecção da frequência fundamental mecânica real

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos na etapa de detecção da frequência fundamental mecânica real para as implementações em C# e em MATLAB. Ao analisar estes resultados, observa-se que os valores obtidos para as frequências fundamentais mecânica e elétrica apresentaram equivalência entre os dois algoritmos, sendo iguais até a décima casa decimal.

Além disso, vale notar que a frequência rastreada foi menor em relação à esperada (50 Hz) em pelo menos uma casa decimal, provavelmente devido à definição manual durante o ensaio. Contudo, os resultados confirmam a robustez e a consistência dos algoritmos, mostrando que apesar da diferença da frequência esperada ambos os métodos foram eficazes na detecção da frequência fundamental mecânica real, o que é crucial para a precisão do restante da metodologia de rastreamento de raias.

Tabela 3 – Comparação dos valores das fundamentais entre os algoritmos implementados em C# e em MATLAB.

| Elementos de Interesse                     | C#               | MATLAB           |
|--|------------------|------------------|
| Fundamental elétrica rastreada             | 49,4914213625 Hz | 49,4914213625 Hz |
| Incerteza associada à fundamental elétrica | 0,0000420521 Hz  | 0,0000420521 Hz  |
| Fundamental mecânica rastreada             | 12,3728553406 Hz | 12,3728553406 Hz |
| Incerteza associada à fundamental mecânica | 0,0000105130 Hz  | 0,0000105130 Hz  |

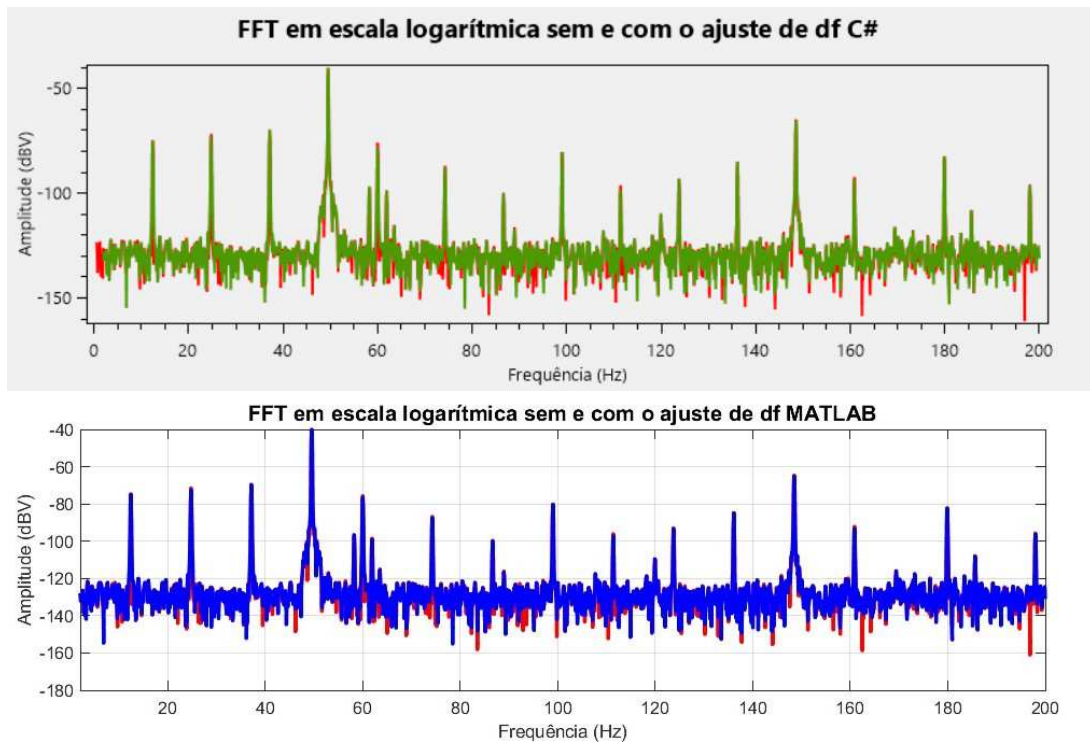
Fonte: Autor.

#### 4.2.3 Etapa 03: Ajuste da resolução espectral

De forma similar ao exposto no item 4.1.3, mas dessa vez para dados obtidos experimentalmente, foi realizado o ajuste da resolução espectral. Os resultados obtidos estão expostos na Figura 26, a qual ilustra a diferença entre os espectros até 200 Hz obtidos antes e após o ajuste de  $df$ . Os dados apresentados nessa figura indicam que, também para dados experimentais, as implementações em C# e em MATLAB continuam resultando em respostas muito semelhantes. A Tabela 4 apresenta resultados complementares a esta análise, mostrando que a

nova resolução espectral e o número de pontos na FFT se mantiveram iguais nas duas implementações.

Figura 26 – Espectro sem (verde/azul) e com (vermelho) ajuste de  $df$  em C# e em MATLAB.



Fonte: Autor.

Tabela 4 – Comparação dos algoritmos implementados em C# e em MATLAB após o ajuste de  $df$ .

| Elementos de Interesse                        | C#          | MATLAB      |
|---|-------------|-------------|
| Número de pontos da FFT antes do ajuste       | 150000      | 150000      |
| Número de pontos da FFT depois do ajuste      | 149117      | 149117      |
| Resolução espectral ( $df$ ) antes do ajuste  | 0,1 Hz      | 0,1 Hz      |
| Resolução espectral ( $df$ ) depois do ajuste | 0,100592 Hz | 0,100592 Hz |

Fonte: Autor.

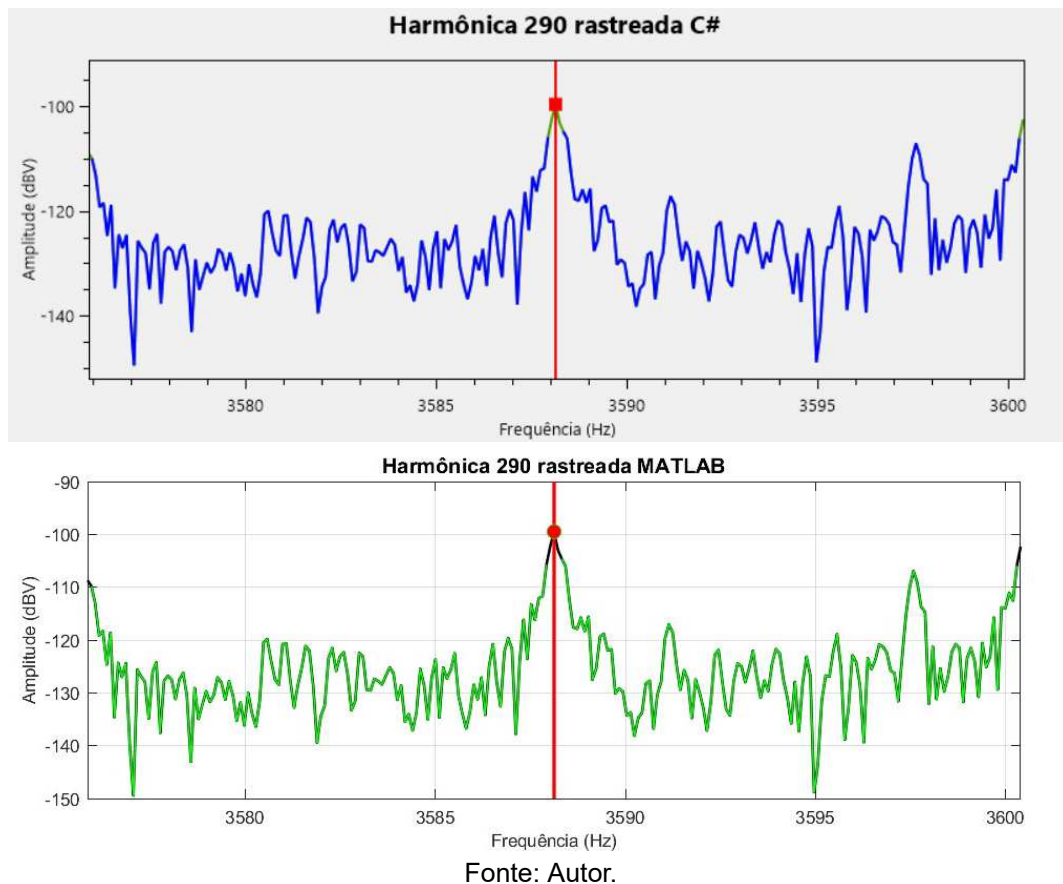
Ao comparar estes resultados com os resultados obtidos para os dados sintéticos, observa-se que, tanto para os dados reais quanto para os dados simulados, o ajuste de  $df$  trouxe uma melhoria na definição dos picos espectrais. Apesar dos dados reais apresentarem ruídos e distorções introduzidas pelas condições experimentais, a resolução espectral ajustada ainda permite uma maior

eficácia na redução das incertezas e no aprimoramento da detecção na etapa seguinte do processo de rastreamento de raias.

#### 4.2.4 Etapa 04: Rastreamento das raias de interesse

Na quarta etapa do processo de rastreamento de raias, apresenta-se como exemplo o rastreamento da harmônica de ordem 290, presente na Figura 27, para demonstrar visualmente a identificação da amplitude desta componente e para continuar a comparação entre os algoritmos em C# e em MATLAB. A análise dos resultados revela que ambos os algoritmos conseguiram rastrear a harmônica com precisão e no pico desejado, apesar das diferenças de formulações entre as duas linguagens, e por se tratar agora de dados de ensaios reais.

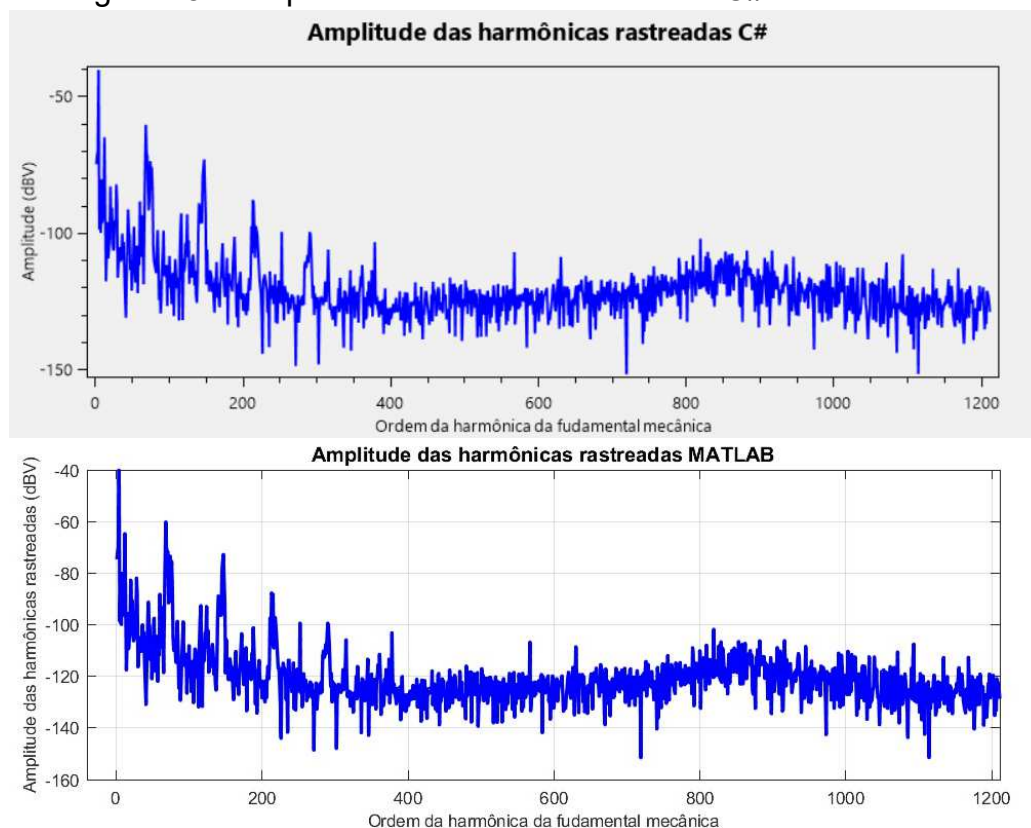
Figura 27 – Harmônica de ordem 290 rastreada em C# e em MATLAB.



Na Figura 28, que ilustra a comparação das amplitudes das harmônicas rastreadas, os gráficos continuam evidenciando que as amplitudes obtidas por ambos os algoritmos são muito semelhantes. Este resultado sugere novamente que

o processo de rastreamento implementado em C# está de acordo com a implementação do processo de rastreamento em outras linguagens. Outro ponto que vale ressaltar é que, agora, a diferenciação entre as amplitudes das harmônicas de interesse e o ruído de fundo fica menos evidente, por se tratar de dados reais que contêm imperfeições como ruídos e variações imprevisíveis.

Figura 28 – Amplitude de cada harmônica em C# e em MATLAB.



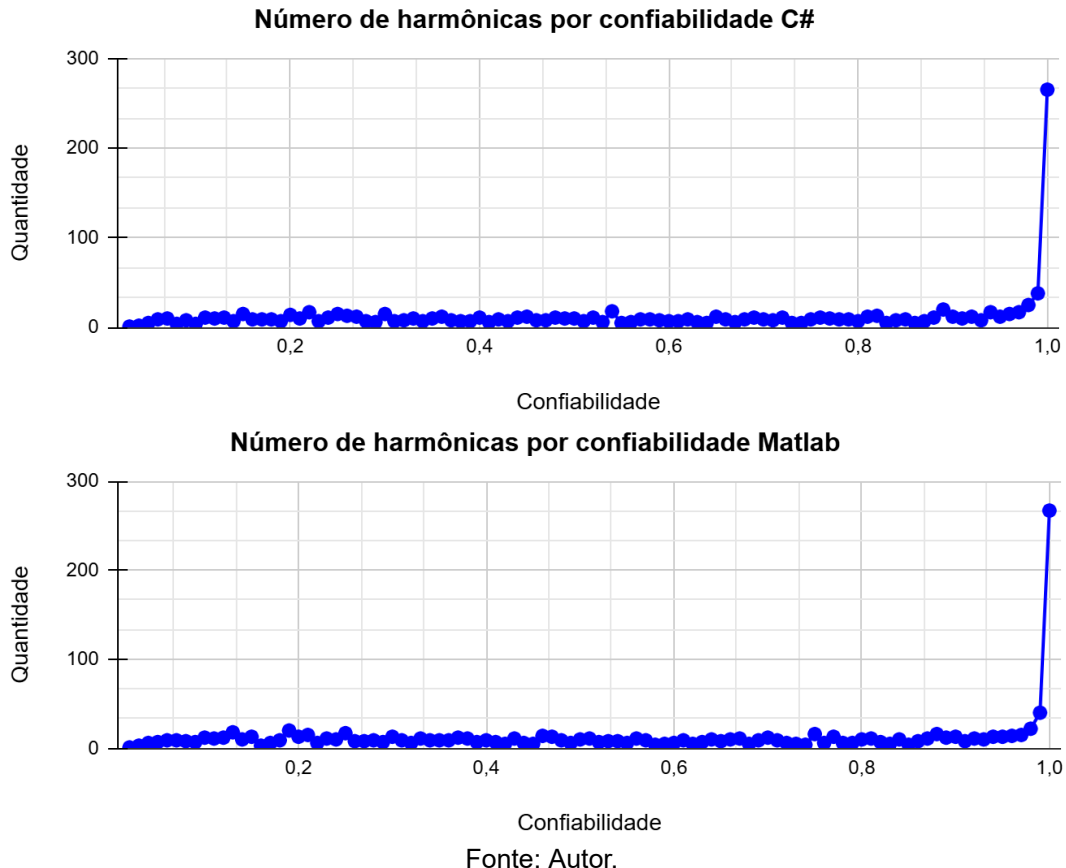
Fonte: Autor.

Finalmente, a Figura 29 apresenta o número de harmônicas identificadas por cada algoritmo, categorizado por níveis de confiabilidade. No total, das 1211 harmônicas rastreáveis, 320 harmônicas no C# e 319 harmônicas no MATLAB apresentaram confiabilidade superior a 98%, o que demonstra a equivalência de ambos os algoritmos na identificação precisa das componentes harmônicas.

Os resultados indicam também que, os dados reais em relação aos sintéticos apresentam uma redução significativa da taxa do número de harmônicas com confiabilidade consideradas aceitáveis (>98%). Essa diferença pode ser atribuída à presença de ruídos (eletrônicos, de ambiente etc) nos dados experimentais, que tendem a interferir no processo de rastreamento e reduzir a confiabilidade dos picos identificados. Contudo, mesmo com a diminuição do número

de harmônicas rastreadas com alta confiabilidade, os algoritmos demonstraram manter sua robustez e capacidade de identificação das principais componentes harmônicas, evidenciando sua aplicabilidade prática.

Figura 29 – Número de harmônicas por confiabilidade em C# e em MATLAB.



#### 4.3 ANÁLISE COM DADOS DO PROTÓTIPO

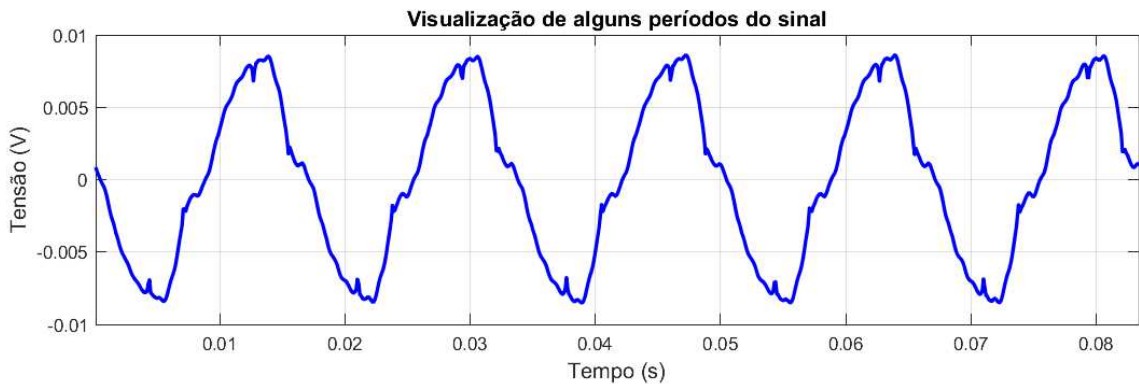
Esta etapa de análise aborda a avaliação do algoritmo desenvolvido em C# apenas com dados medidos por equipamentos de monitoração do campo magnético externo de geradores síncronos em usinas hidrelétricas, sem a comparação com a versão do algoritmo desenvolvida em MATLAB. Inicialmente é realizada a análise de dados coletados por um protótipo do equipamento MagAnalyzer, instalado em um gerador síncrono de 56 polos em operação em uma usina hidrelétrica que opera em 60 Hz, de maneira que a frequência fundamental mecânica da máquina é aproximadamente 2,14 Hz. Esse protótipo, que monitorou o campo magnético externo do GS, adquiriu dados com uma frequência de amostragem de 10 kHz por



6,25 segundos, o que possibilitou a obtenção de um conjunto de dados para validar a eficácia do algoritmo em condições reais de aplicação em uma planta industrial.

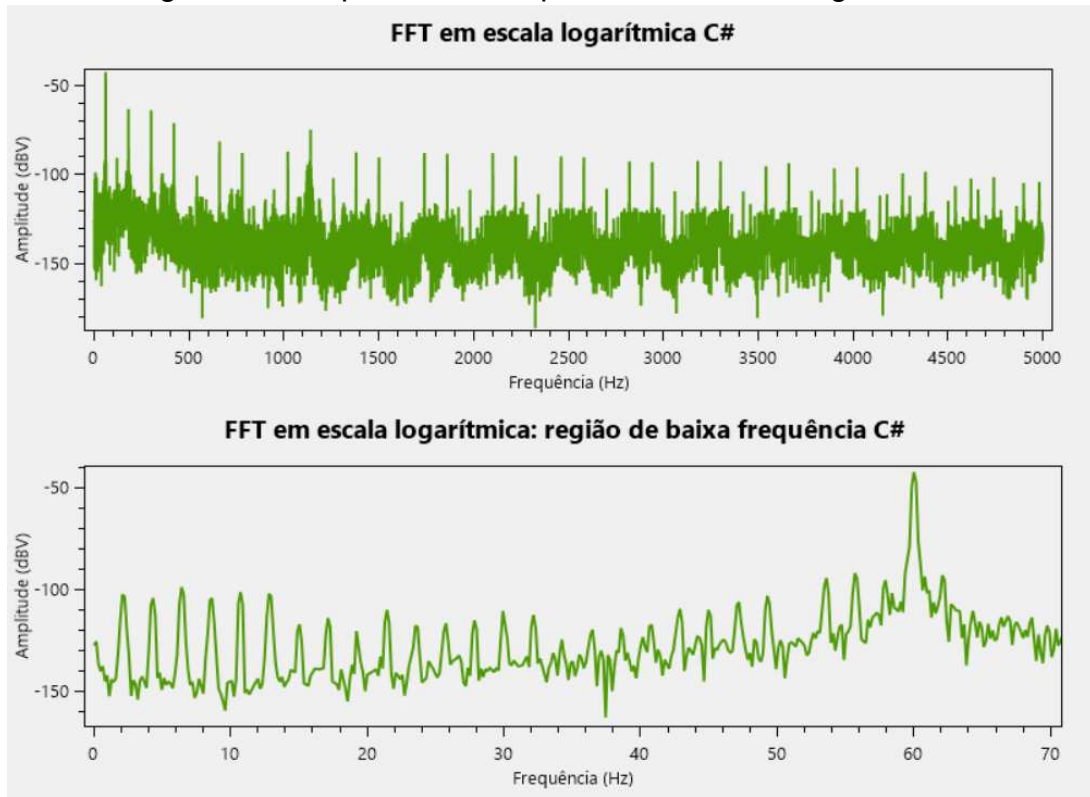
A forma de onda do sinal no domínio do tempo pode ser observada na Figura 30, em que se observa que o sinal se aproxima de um formato senoidal, semelhante aos dados dos ensaios em laboratório e menos estáveis que os dados sintéticos obtidos por simulação. Na Figura 31 se encontra o espectro de frequência deste sinal em escala logarítmica, além de um detalhe na região de baixa frequência. É possível notar que, ao contrário da avaliação dos dados da bancada, é mais evidente identificar as harmônicas ímpares da frequência elétrica, demonstrando que estas componentes são mais proeminentes nesta usina hidrelétrica com relação aos ensaios de laboratório. Além disso, a visualização da região de baixa frequência mostra uma boa distinção visual das harmônicas da  $f_m$  nas posições esperadas, o que confirma a eficácia da etapa de FFT do algoritmo.

Figura 30 – Sinal dos dados do protótipo no domínio do tempo.



Fonte: Autor.

Figura 31 – Espectro em frequência em escala logarítmica.



Fonte: Autor.

A Tabela 5 exibe os valores das frequências fundamentais elétrica e mecânica reais detectadas na segunda etapa do algoritmo, bem como suas respectivas incertezas e o ajuste da resolução espectral ( $df$ ) definido na terceira etapa da metodologia. Estes resultados mostram que as frequências fundamentais detectadas apresentam baixa incerteza, na ordem de micro Hertz, na avaliação dos dados obtidos na usina hidrelétrica, o que é crucial para o bom desempenho no algoritmo nas etapas seguintes. A etapa de ajuste da resolução espectral, que pode ser também vista pela Figura 32, na qual é apresentado o espectro sem e com o ajuste de  $df$ , apresenta um resultado aceitável. Isso pode ser comprovado por meio da constatação de picos do espectro ajustado maiores do que os obtidos sem o ajuste espectral, assegurando que o ajuste contribuiu para obter uma resolução espectral que permite a detecção mais precisa da amplitude das componentes espectrais de interesse. Esse resultado é essencial para assegurar que o espectro de frequência final contenha precisão e resolução adequadas para o rastreamento das raíes.

A Figura 33 apresenta as amplitudes de cada harmônica rastreada, na qual é possível observar uma melhor distribuição dos valores de amplitude em relação ao

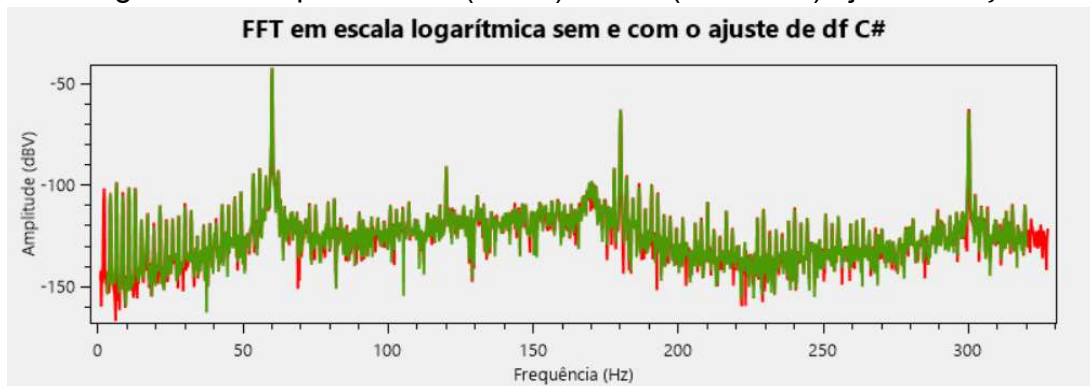
caso do ensaio, o que se confirma ainda mais com uma maior facilidade de visualização das amplitudes das harmônicas ímpares da  $f_m$ , naturalmente maiores que as demais ao longo do espectro. Porém, ainda assim, comparando-se com os dados sintéticos discutidos anteriormente, nota-se que as amplitudes das harmônicas extraídas dos dados reais possuem uma variabilidade maior, refletindo a presença de componentes de ruído e possíveis flutuações de operação típicas de condições experimentais.

Tabela 5 – Valores obtidos das frequências  $f_e$  e  $f_m$  reais e do ajuste de  $df$  pelo algoritmo.

| Elementos de Interesse                        | Valores Obtidos  |
|---|------------------|
| Fundamental elétrica rastreada                | 60,0151037994 Hz |
| Incerteza associada à fundamental elétrica    | 0,0000313357 Hz  |
| Fundamental mecânica rastreada                | 2,1433965642 Hz  |
| Incerteza associada à fundamental mecânica    | 0,0000011191 Hz  |
| Número de pontos da FFT antes do ajuste       | 31250            |
| Número de pontos da FFT depois do ajuste      | 30326            |
| Resolução espectral ( $df$ ) antes do ajuste  | 0,16 Hz          |
| Resolução espectral ( $df$ ) depois do ajuste | 0,164878 Hz      |

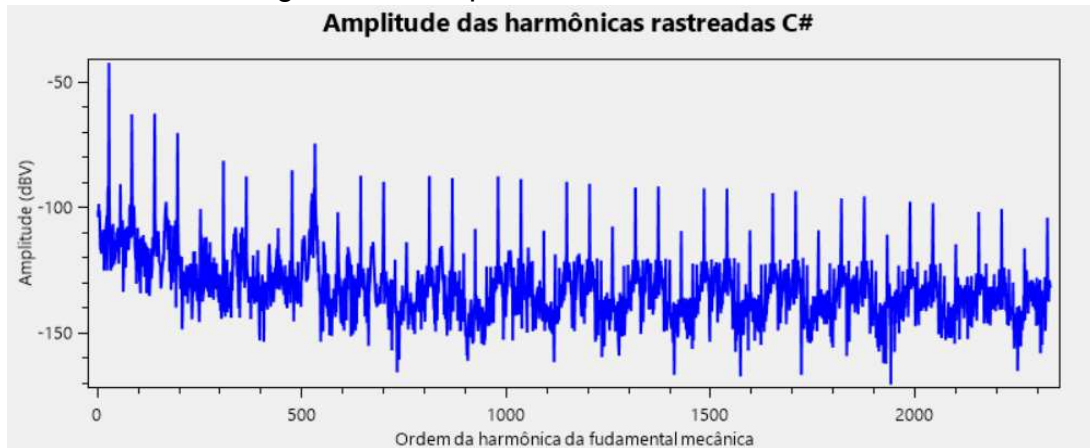
Fonte: Autor.

Figura 32 – Espectro sem (verde) e com (vermelho) ajuste de  $df$ .



Fonte: Autor.

Figura 33 – Amplitude de cada harmônica.



Por fim, a Figura 34 apresenta o número de harmônicas por nível de confiabilidade. Dos 2331 harmônicas rastreáveis, o algoritmo implementado em C# identificou 857 harmônicas com uma confiabilidade superior a 98%, demonstrando uma performance robusta ao lidar com a complexidade de avaliação dos dados reais. Da mesma maneira que com os dados de ensaio, em comparação com os dados sintéticos, esses resultados indicam o impacto do ruído e de variações operacionais na confiabilidade final das harmônicas identificadas. Ainda assim, o algoritmo conseguiu rastrear e classificar com precisão as componentes de interesse, com uma proporção semelhante no caso do ensaio, evidenciando ainda mais a aplicabilidade em ambientes operacionais reais.

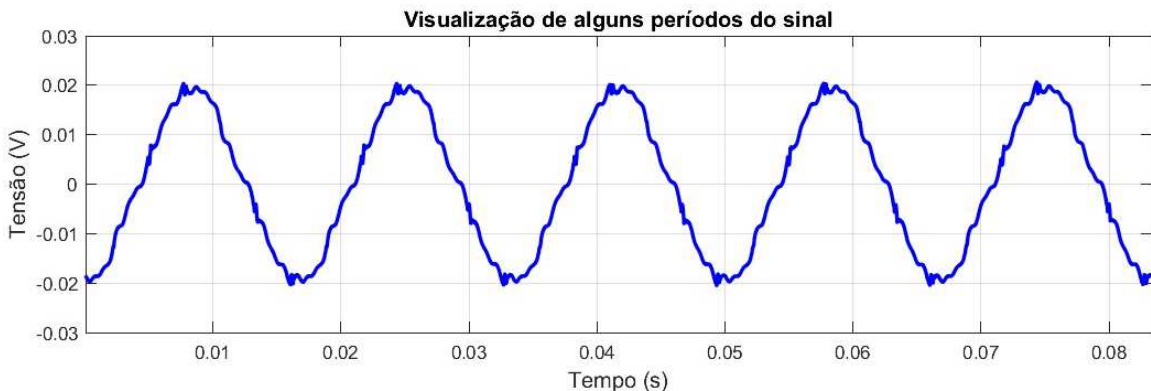
Figura 34 – Número de harmônicas por confiabilidade.



#### 4.4 ANÁLISE COM DADOS DO CABEÇA DE SÉRIE

Por último, foi realizada a análise dos dados experimentais provenientes da versão cabeça de série do equipamento MagAnalyzer. Este equipamento foi instalado na mesma usina hidrelétrica que o protótipo, porém em outro gerador síncrono de 56 polos operando também em 60 Hz (com  $f_m$  de aproximadamente 2,14 Hz). O equipamento de monitoração do campo magnético externo foi configurado para coletar dados com uma frequência de amostragem de 20 kHz durante 20 segundos, similarmente aos dados sintéticos. Na Figura 35, observa-se alguns ciclos do sinal capturado no domínio do tempo, que já revela uma melhor estabilidade em relação aos dados reais do protótipo e dos ensaios em laboratório.

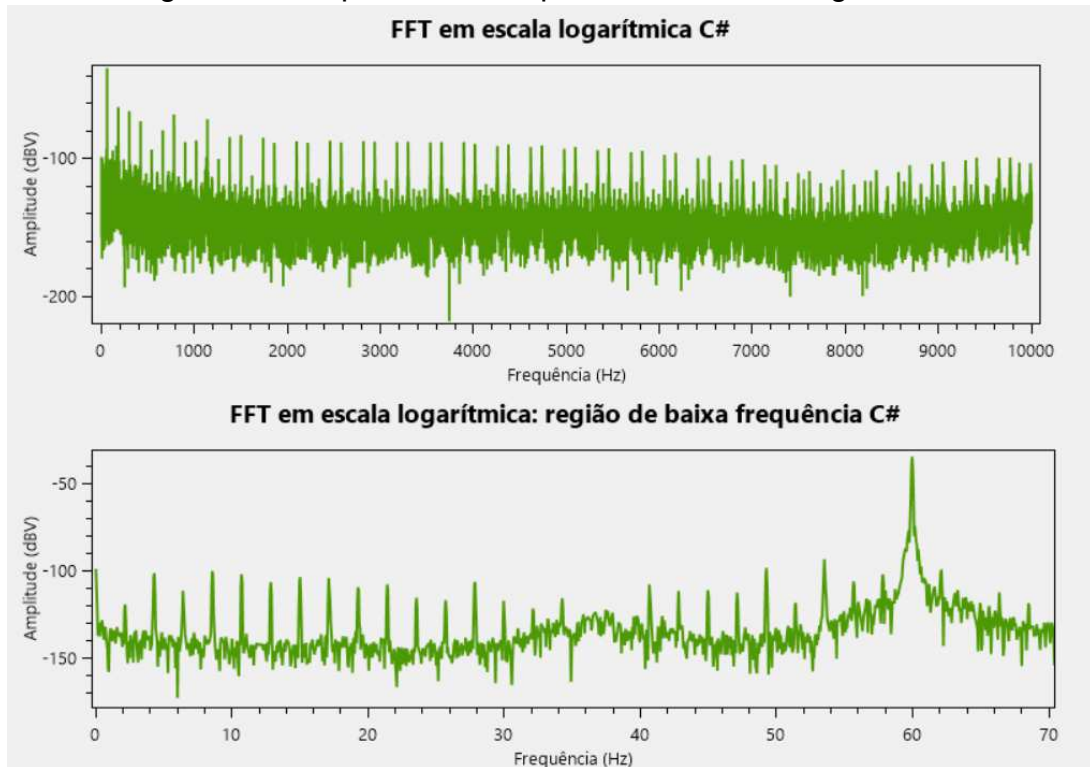
Figura 35 – Sinal dos dados do cabeça de série no domínio do tempo.



Fonte: Autor.

Em seguida, a Figura 36 expõe o espectro de frequência desta aquisição em escala logarítmica, o qual apresenta novamente tanto as componentes harmônicas ímpares da frequência elétrica mais evidentes, quanto muitas das componentes harmônicas da  $f_m$  visualmente detectáveis na região de baixa frequência. A Tabela 6 complementa esses resultados, exibindo valores das frequências fundamentais elétrica e mecânica reais detectadas condizentes com o esperado, ambas detectadas na segunda etapa da metodologia com incertezas na ordem de micro Hertz.

Figura 36 – Espectro em frequência em escala logarítmica.



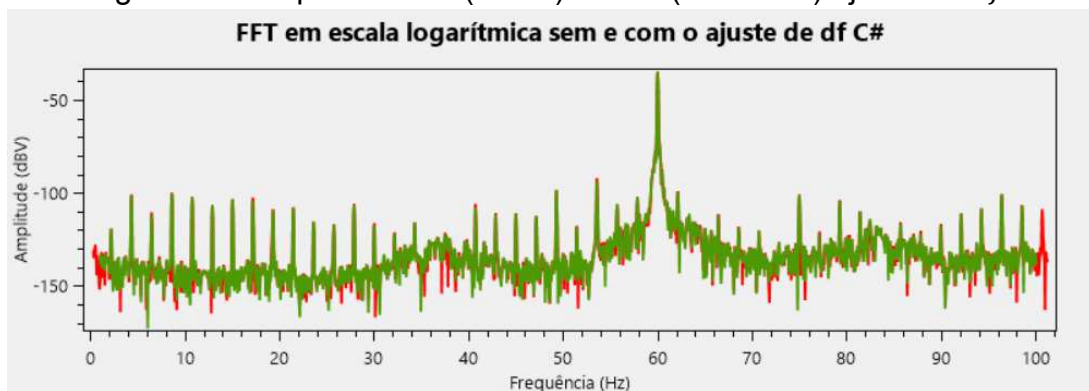
Fonte: Autor.

Além do valor da resolução espectral nova e do novo número de pontos da FFT definidos na etapa três da metodologia de rastreamento, presente na Tabela 6, a Figura 37 apresenta como o algoritmo ajustou o espectro para melhorar a resolução, o que trouxe novamente um espectro com picos nas harmônicas mais acentuados que anteriormente, mostrando novamente a eficácia da etapa de ajuste da resolução espectral do algoritmo desenvolvido.

Tabela 6 – Valores obtidos das fundamentais e do ajuste de  $df$  pelo algoritmo.

| Elementos de Interesse                        | Valores Obtidos  |
|---|------------------|
| Fundamental elétrica rastreada                | 59,9465838509 Hz |
| Incerteza associada à fundamental elétrica    | 0,0001552795 Hz  |
| Fundamental mecânica rastreada                | 2,1409494232 Hz  |
| Incerteza associada à fundamental mecânica    | 0,0000055457 Hz  |
| Número de pontos da FFT antes do ajuste       | 200000           |
| Número de pontos da FFT depois do ajuste      | 196174           |
| Resolução espectral ( $df$ ) antes do ajuste  | 0,05 Hz          |
| Resolução espectral ( $df$ ) depois do ajuste | 0,050975 Hz      |

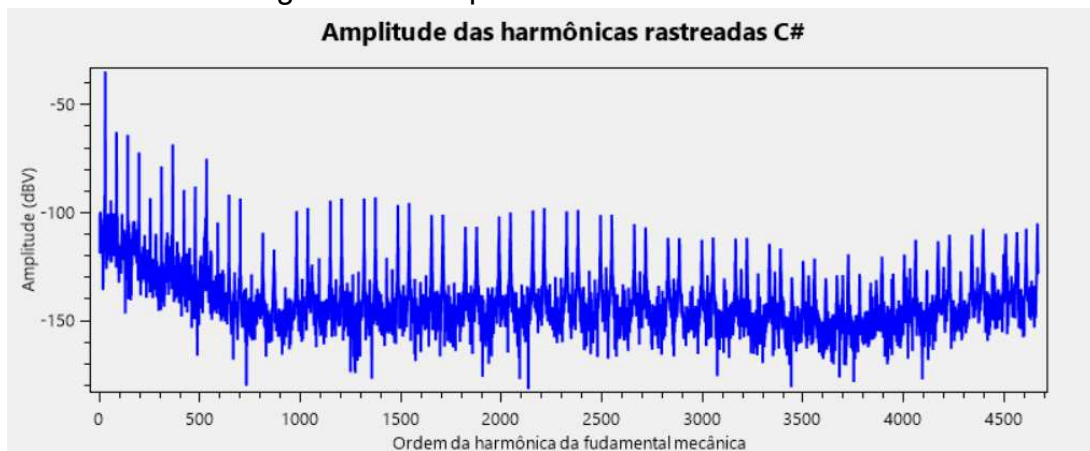
Fonte: Autor.

Figura 37 – Espectro sem (verde) e com (vermelho) ajuste de  $df$ .

Fonte: Autor.

Com relação à etapa final do processo de rastreamento de raias, a Figura 38 apresenta as amplitudes de cada harmônica rastreada, evidenciando a distribuição das amplitudes ao longo do espectro da mesma forma que os dados obtidos com o protótipo. Observa-se com facilidade as amplitudes das harmônicas ímpares da  $f_m$ , o que é uma característica de sistemas elétricos de potência. Porém, devido ao aumento da frequência de amostragem e o consequente aumento da faixa do espectro de frequências, é possível notar uma maior dificuldade de obtenção das amplitudes para harmônicas presentes nas faixas mais altas de frequência, devido principalmente à presença de ruído nas faixas do espectro.

Figura 38 – Amplitude de cada harmônica.



Fonte: Autor.

Por fim, a Figura 39 ilustra o número de harmônicas identificadas por faixa de confiabilidade. Entre as 4669 harmônicas rastreáveis, o algoritmo identificou 650 harmônicas com confiabilidade superior a 98%, o que demonstra uma redução nas componentes de alta confiabilidade em relação ao teste com dados do protótipo. Essa redução pode evidenciar que o ruído e as condições de operação podem ter impactado no índice de confiabilidade das componentes harmônicas, como também que a definição de uma frequência de amostragem maior não implica no aumento da quantidade de componentes confiáveis. Ainda assim, o algoritmo se mostrou capaz de rastrear um grupo de componentes com uma confiabilidade adequada, necessária para uma análise confiável das características do campo magnético externo em condições de operação reais.

Figura 39 – Número de harmônicas por confiabilidade.



Fonte: Autor



## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvido um algoritmo para rastreamento de raias espectrais em C#, com o objetivo de processar sinais medidos da derivada temporal do campo magnético externo e possibilitar a detecção de harmônicas para futuras análises de faltas em geradores síncronos. A pesquisa foi motivada para oferecer um algoritmo, na linguagem C#, de obtenção das componentes espectrais dos sinais medidos e, conseqüentemente, contribuir com a implementação da metodologia de rastreamento de raias no equipamento MagAnalyzer, o qual está em fase de desenvolvimento pelo GRUCAD/UFSC, em parceria com as empresas Engie Brasil Energia, Itá Energética S.A. e AQTech Engenharia e Instrumentação S.A.. Este projeto foi motivado pela relevância de métodos de monitoramento não invasivos da condição de GSs para o setor de geração de energia elétrica, em que a detecção precoce de faltas é essencial para garantir a confiabilidade e a continuidade operacional dos sistemas de energia (Rigoni, 2014; Grillo et al., 2022a; Grillo et al., 2024a).

O algoritmo foi estruturado em quatro etapas principais: cálculo da FFT, detecção da frequência fundamental mecânica real, ajuste da resolução espectral e rastreamento das harmônicas de interesse. Esse fluxo de processamento foi elaborado para ser flexível, adaptando-se tanto a dados sintéticos quanto a sinais reais adquiridos em experimentos ou por equipamentos de medição do campo magnético externo. Com a aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT) e técnicas de ajuste da resolução espectral, o algoritmo se mostrou eficaz na identificação de assinaturas magnéticas da máquina associadas a medidas do campo magnético externo.

Os testes realizados com dados experimentais envolveram diferentes condições de operação de geradores, incluindo dados de laboratório e de protótipos do equipamento de medição desenvolvido para o projeto e instalados em GSs operando em usinas hidrelétricas do parque gerador brasileiro. Esses dados experimentais foram fundamentais para validar o desempenho do algoritmo, especialmente na detecção de harmônicas e de suas confiabilidades. Observou-se que o algoritmo foi capaz de rastrear de forma consistente as raias espectrais de interesse para a monitoração da condição da máquina, mesmo em regiões com

amplitudes reduzidas e suscetíveis ao ruído de fundo. Essa robustez é uma característica essencial para a confiabilidade do sistema de monitoramento e, conseqüentemente, acaba contribuindo para a manutenção preditiva em geradores síncronos.

A revisão do estado da arte trouxe fundamentos teóricos importantes sobre o uso da monitoração de características magnéticas de GSs e o emprego da monitoração da assinatura magnética para o diagnóstico de faltas em máquinas rotativas. Estudos como o de Grillo et al. (2022b) destacaram a importância de metodologias de rastreamento de raias, especialmente no contexto de monitoramento de geradores de grande porte, no qual a detecção precisa de harmônicas é essencial para uma identificação correta das faltas. Outro ponto de destaque foi a comparação do método desenvolvido com abordagens de outra linguagem (MATLAB) já validada em projetos conduzidos pelo GRUCAD, confirmando o funcionamento do algoritmo em C# e a habilidade para se adaptar a diferentes perfis de medições.

Ainda que o algoritmo tenha demonstrado boa precisão, alguns desafios técnicos foram identificados, particularmente no tratamento de ruído em altas frequências e na definição de estratégias para melhorar a confiabilidade das raias rastreadas. Em componentes de frequência mais elevada, a relação sinal-ruído reduzida pode influenciar a estabilidade do algoritmo, levando a potenciais erros de determinação das amplitudes. Para contornar esses efeitos, foi incorporado um indicador de confiabilidade para cada harmônica rastreada, permitindo uma avaliação prévia da confiabilidade dos dados obtidos. Esse indicador fornece uma medida da consistência e precisão de cada raia, o que possibilita determinar se a harmônica rastreada estaria apta para futuras análises, garantindo que possíveis interferências não comprometam o diagnóstico final do sistema.

Além disso, uma direção promissora para trabalhos futuros seria a análise e determinação de uma frequência e período de amostragem ideais, a fim de otimizar o processo de rastreamento de raias e reduzir o tempo de processamento. A partir dos testes realizados com dados reais, como os provenientes do protótipo e do equipamento de cabeça de série, foi possível observar que as harmônicas de maior confiabilidade estão concentradas nas frequências mais baixas, com pouca variação na taxa de confiabilidade total mesmo quando a frequência de amostragem é aumentada. Isso sugere que uma frequência de amostragem mais baixa pode ser

suficiente para capturar as harmônicas mais relevantes, o que reduziria a necessidade de processamento de raias de baixa confiabilidade e evitaria o rastreamento de componentes irrelevantes.

Dessa maneira, um estudo mais aprofundado sobre a escolha da frequência de amostragem ideal poderia ser realizado considerando a relação entre confiabilidade das harmônicas e eficiência computacional, o que pode ser uma estratégia importante para otimizar o desempenho do algoritmo. A implementação dessa abordagem permitiria um monitoramento mais eficiente, com menos sobrecarga computacional, sem comprometer a precisão da detecção de faltas, especialmente em sistemas industriais que necessitam de processos rápidos e eficientes.

Em conclusão, o algoritmo desenvolvido se destaca como uma técnica promissora para auxiliar na monitoração não invasiva de geradores síncronos, com ênfase no rastreamento preciso de raias espectrais que formam a assinatura magnética dos GSs. Embora o rastreamento de raias não seja responsável diretamente pela detecção de faltas, ele é uma etapa essencial para a análise do comportamento do gerador e para a obtenção de assinaturas magnéticas precisas. A robustez do algoritmo, aliada à sua capacidade de lidar com ruídos em altas frequências, possibilita uma avaliação mais confiável das condições operacionais das máquinas. Esse trabalho valida a aplicação do campo magnético externo como uma ferramenta valiosa no monitoramento da condição de máquinas rotativas, indicando o seu potencial para melhorar as práticas de manutenção preditiva e aumentar a segurança e eficiência na operação de sistemas de geração de energia.



## REFERÊNCIAS

- ANTUNES, L. B. **Estratégias para detecção de faltas incipientes em geradores síncronos através do fluxo magnético no entreferro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2023.
- AURICH, D. G. **Modelagem analítica para simulação de interações entre grandezas eletromagnéticas em geradores síncronos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2022.
- BASTOS, J. P. A. **Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e Quase-Estática**. 4. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2004.
- BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística básica**. 9. ed. São Paulo, Brasil: Saraiva, 2017.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. Porto Alegre, Brasil: McGraw-Hill, 2013.
- CUEVAS, M. et al. Non-invasive detection of rotor short-circuit fault in synchronous machines by analysis of stray magnetic field and frame vibrations. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 52, n. 7, p. 1-4, 2016.
- EQUACIONAL, Elétrica e Mecânica. **Manual geral de instruções: Grupo gerador especial**. 2014.
- GRILLO, L. O. S. et al. Método não invasivo para detecção de faltas em geradores síncronos através da monitoração da assinatura magnética. **Sensors**, v. 22, n. 22, p. 8631, 2022a.
- GRILLO, L. O. S. et al. Equipamento de Monitoramento da Condição de Geradores Síncronos através de Formas de Onda do Campo Magnético Externo. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, v. 21, n. 4, p. 527-548, 2022b.
- GRILLO, L. O. S. et al. Detecção de falta em gerador síncrono de 305 MVA através do campo magnético externo considerando a influência do ponto de operação. In: 16º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo. **Anais [...]**. Goiânia, Brasil: 2024a.
- GRILLO, L. O. S. et al. Influência de faltas incipientes e de variações do ponto de operação sobre a assinatura magnética de geradores síncronos. In: 16º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo. **Anais [...]**. Goiânia, Brasil: 2024b.
- GRILLO, L. O. S. **Desenvolvimento de Procedimentos para Detecção e Avaliação de Faltas em Geradores Síncronos por Meio da Monitoração do Campo Magnético Externo**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2024c.

IAMAMURA, B. A. T. **Contribuição à detecção de defeitos nos rotores de turboalternadores.** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

LATHI, B. P. **Sinais e sistemas lineares.** 2. ed. Porto Alegre, Brasil: Bookman, 2008.

PUSCA, R. et al. Procedure for Detection of Stator Inter-Turn Short Circuit in AC Machines Measuring the External Magnetic Field. **Energies**, v. 14, n. 4, p. 1132, 2021.

RIGONI, M. **Desenvolvimento de um sistema de detecção e avaliação de faltas em geradores síncronos por meio do campo magnético externo.** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.

RIGONI, M. et al. **Sistema e método para identificar características de uma máquina elétrica.** Privilégio de Inovação; Registro BR1020150114389. INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depósito: 19 maio 2015. Concessão: 18 ago. 2020.

SANTOS, H. F. et al. Synchronous Generator Fault Investigation by Experimental and Finite Element Procedures. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. PP, 2015.

SANTOS, H. F. **Desenvolvimento de um equipamento para monitoração de geradores síncronos através do campo magnético externo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

SANTOS, H. F. et al. Non-invasive monitoring system of synchronous generator using external field. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, v. 16, n. 1, 2017.

SANTOS, H. F. **Detecção e avaliação de faltas em geradores síncronos por meio de históricos de harmônicos do campo magnético externo.** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2021.

TUKEY, J. W. **Exploratory Data Analysis.** Boston, MA, EUA: Addison-Wesley, 1977. 988 p. ISBN 0201076160.

WENGERKIEVICZ, C. A. C.. **Estudo e Desenvolvimento de Metodologias Não-Intrusivas para Estimação de Rendimento de Motores de Indução Trifásicos em Operação.** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

ZAMUDIO-RAMIREZ, I. et al. Magnetic flux analysis for the condition monitoring of electric machines: a review. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 18, n. 5, p. 2895-2908, 2022.