



Emilly Josy Bezerra Duarte

**Detecção de Constituinte Prejudicial Sigma em um Aço
Inoxidável Duplex do Tipo SAF 2205 pela Aplicação da
Decomposição Empírica de Modos**

João Pessoa - PB

Setembro de 2024



Emilly Josy Bezerra Duarte

Detecção de Constituinte Prejudicial Sigma em um Aço Inoxidável Duplex do Tipo SAF 2205 pela Aplicação da Decomposição Empírica de Modos

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Telecomunicações

Linha de Pesquisa: Eletromagnetismo Aplicado

Orientador: Edgard de Macedo Silva, Dr.

Coorientadora: Suzete Élide Nóbrega Correia, Dr^a.

João Pessoa - PB

Setembro de 2024

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

D812d Duarte, Emilly Josy Bezerra.

Detecção de constituinte prejudicial Sigma em um aço inoxidável duplex do tipo SAF 2205 pela aplicação da decomposição empírica de modos / Emilly Josy Bezerra Duarte. – 2024.

75 f. : il.

Dissertação (Mestrado – Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação da Paraíba / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), 2024.

Orientação : Prof^o Dr Edgard de Macedo Silva.

Coorientação : Prof^a Dra Suzete Élide Nóbrega Correia.

1. Decomposição empírica de modos. 2. Ruído magnético de Barkhausen. 3. Ensaio eletromagnético. 4. Aço inoxidável duplex. I. Título.

CDU 537.8:621.391(043)

Bibliotecária responsável: Lucrecia Camilo de Lima – CRB 15/132



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU*

MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

EMILLY JOSY BEZERRA DUARTE

**DETECÇÃO DE CONSTITUINTE PREJUDICIAL SIGMA EM UM AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX DO TIPO SAF
2205 PELA APLICAÇÃO DA DECOMPOSIÇÃO EMPÍRICA DE MODOS**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB - Campus João Pessoa.

Aprovado em 25 de setembro de 2024.

Membros da Banca Examinadora:

Dr. Edgard de Macedo Silva

IFPB – PPGEE

Dra. Suzete Élide Nóbrega Correia

IFPB - PPGEE

Dr. Alfredo Gomes Neto

IFPB – PPGEE

Dr. João Pereira Leite

UFPB

João Pessoa/2024

Documento assinado eletronicamente por:

- **Edgard de Macedo Silva**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 21/10/2024 20:40:58.
- **Alfredo Gomes Neto**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 21/10/2024 21:14:38.
- **Suzete Elida Nobrega Correia**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 22/10/2024 08:34:32.
- **João Pereira Leite**, PROFESSOR DE ENSINO SUPERIOR NA ÁREA DE ORIENTAÇÃO EDUCACIONAL, em 23/10/2024 16:54:24.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 16/09/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código 606481

Verificador: 63bccaa6e4

Código de Autenticação:



Dedico este trabalho ao meu marido, ao meu filho e à minha mãe, por serem meu apoio incondicional e minha fonte de inspiração. Esta conquista é para vocês.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por me guiar, proteger e iluminar os caminhos percorridos nesta jornada. Toda honra e glória a Ti, Senhor, por me conceder a sabedoria e perseverança necessárias para concluir este trabalho.

Agradeço com muito amor ao meu esposo, Manassés Mikaell, pela paciência e pelo apoio incondicional ao longo deste caminho. Você sempre ouviu minhas ideias, ofereceu conselhos valiosos e compartilhou suas opiniões de maneira construtiva. Sua contribuição foi indispensável para o sucesso deste processo. Obrigada por ser meu parceiro em todos os sentidos.

Sou imensamente grata ao meu filho, João Gabriel, que tantas vezes demonstrou paciência e compreensão quando precisei estar ausente durante minha jornada de pós-graduação. Este trabalho é dedicado a você, que sempre esteve ao meu lado, inspirando-me e motivando-me com seu amor constante.

De coração, agradeço à minha querida mãe, Dalva Bezerra, fonte inesgotável de amor e apoio ao longo de toda a minha vida. Sua presença e seu carinho foram fundamentais durante minha jornada acadêmica.

Gostaria de expressar meu profundo agradecimento aos meus orientadores, os professores Edgar Macedo e Suzete Correia, que sempre acreditaram no meu potencial, me inspiraram e encorajaram ao longo desta jornada. Professores, saibam que são fontes de inspiração para mim. Seus ensinamentos foram inestimáveis e fundamentais para o sucesso deste trabalho. Sou imensamente grata por todo o apoio e orientação que me proporcionaram.

Por fim, expresso minha gratidão ao IFPB por me acolher de braços abertos desde o ensino técnico subsequente em Eletrotécnica, passando pela graduação de Engenharia Elétrica e agora concluindo a pós-graduação, também em Engenharia Elétrica. Agradeço ao seu corpo docente, aos colegas de curso, aos servidores e funcionários.

Resumo

As principais aplicações dos Aços Inoxidáveis Duplex (AID) ocorrem na área industrial, devido suas boas propriedades mecânicas, sendo utilizados principalmente no setor de óleo e gás, especialmente na extração de petróleo, sendo utilizados em plataformas semi submersíveis em águas profundas. A análise do Ruído Magnético de Barkhausen (RMB) é uma técnica utilizada para caracterizar microestruturas prejudiciais em materiais ferromagnéticos, especialmente em aços inoxidáveis duplex submetidos a diferentes tratamentos térmicos. Trata-se de um tipo de ensaio eletromagnético não destrutivo, capaz de detectar fases prejudiciais ao captar o ruído gerado quando as paredes dos domínios magnéticos se movem abruptamente através das imperfeições do material sob um campo magnético variável. No presente trabalho, a Decomposição Empírica de Modos (EMD - do inglês *Empirical Mode Decomposition*) foi aplicada para a análise do RMB, com o objetivo de detectar o constituinte prejudicial sigma em um aço inoxidável duplex do tipo SAF 2205. Ondas senoidais eletromagnéticas, com frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz e 50 Hz, e, amplitudes de 1 V; 1,25 V; 1,5 V; 1,75 V e 2 V, foram aplicadas em duas amostras, uma sem e outra com a formação de 4% de fase sigma, para a análise do ruído presente nas microestruturas. Inicialmente, aplicou-se a EMD nos sinais oriundos dos ensaios eletromagnéticos para verificar a viabilidade da técnica na detecção da presença de fase sigma através do RMB. O ruído foi quantificado através do cálculo do RMS (do inglês *Root Means Square*). Os resultados iniciais revelaram que a primeira função de modo intrínseco (IMF - do inglês *Intrinsic Mode Functions*) consegue isolar e analisar o Ruído Magnético de Barkhausen de forma eficaz, sendo possível verificar a diferença entre os valores RMS das condições com e sem a presença de sigma. A EMD mostrou-se eficiente na detecção do constituinte sigma em frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz e 25 Hz, especialmente na amplitude de 1,25 V, a qual ofereceu uma maior resolução para detectar a presença da fase fragilizante. Contudo, a técnica encontrou dificuldades ao lidar com sinais de 50 Hz, resultando em distorções devido à mistura de diferentes escalas de frequência em uma única IMF, indicando um problema de mistura entre modos (*mode mixing*).

Palavras-chave: Decomposição Empírica de Modos, Ruído Magnético de Barkhausen, Ensaio Eletromagnético.

Abstract

The main applications of Duplex Stainless Steels (DSS) occur in the industrial sector due to their excellent mechanical properties, being mainly used in the oil and gas industry, especially in oil extraction, where they are employed in semi-submersible platforms in deep waters. The analysis of the Barkhausen Noise (BN) is a technique used to characterize detrimental microstructures in ferromagnetic materials, particularly in duplex stainless steels subjected to different heat treatments. It is a type of non-destructive electromagnetic testing capable of detecting harmful phases by capturing the noise generated when magnetic domain walls move abruptly through material imperfections under a varying magnetic field. In this work, the Empirical Mode Decomposition (EMD) was applied to analyze BN with the aim of detecting the detrimental sigma phase in a SAF 2205 duplex stainless steel. Electromagnetic sinusoidal waves with frequencies of 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, and 50 Hz, and amplitudes of 1 V, 1.25 V, 1.5 V, 1.75 V, and 2 V, were applied to two samples—one without and one with 4% sigma phase formation—to analyze the noise presented by the microstructures. Initially, EMD was applied to the signals obtained from the electromagnetic tests to verify the feasibility of the technique in detecting the presence of the sigma phase through BN. The noise was quantified by calculating the Root Mean Square (RMS). The initial results revealed that the first Intrinsic Mode Function (IMF) effectively isolates and analyzes Barkhausen Noise, enabling the identification of differences in RMS values between conditions with and without the presence of sigma. EMD proved efficient in detecting the sigma phase at frequencies of 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, and 25 Hz, especially at an amplitude of 1.25 V, which provided higher resolution for detecting the presence of the embrittling phase. However, the technique encountered difficulties when handling 50 Hz signals, resulting in distortions due to the mixing of different frequency scales in a single IMF, indicating a mode mixing problem.

Keywords: Empirical Mode Decomposition, Barkhausen Magnetic Noise, Electromagnetic Test.

Lista de ilustrações

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Material como recebido. Ataque químico KOH 10 % | 20 |
| Figura 2 – Diagrama de precipitação isotérmica para os aços inoxidáveis duplex 2205, 2304 e 2507 recozidos a 1050 °C | 22 |
| Figura 3 – Microconstituente sigma, microscopia óptica do AID SAF 2205 atacado com KOH 10% | 23 |
| Figura 4 – Curva de histerese magnética e estados de deflexão do domínio magnético: (a) Estado natural; (b) Domínios dispostos na mesma orientação do campo aumentam o seu tamanho e os não orientados diminuem; (c) Rotação do domínio magnético; (d) Estado de saturação magnética | 24 |
| Figura 5 – Experimento clássico para ensaio do RMB | 26 |
| Figura 6 – Diagrama esquemático do sistema de medição do RMB para uma bobina receptora envolvente | 26 |
| Figura 7 – Bancada experimental: gerador de sinais (1); cabos blindados (2); bobina emissora (3); amostra (4); bobina receptora (5); gaiola de Faraday (6); osciloscópio (7) e computador (8) | 27 |
| Figura 8 – Efeito Hall | 28 |
| Figura 9 – Configuração experimental com sensor de efeito Hall: computador (1), placa de aquisição de dados com um conversor digital analógico de 10 bits (2), fonte de alimentação (3), bancada de testes (4); sensor de efeito Hall (5), amostra de AID (6) e ímã permanente (7) | 28 |
| Figura 10 – Equipamento de ensaio: (1) gerador de sinais, (2) cabos blindados, (6) bancada de testes, (7) placa de aquisição, (8) computador | 29 |
| Figura 11 – Bancada experimental: (3) bobina emissora, (4) amostra, (5) sensor de efeito Hall | 29 |
| Figura 12 – Gaiola de Faraday | 30 |
| Figura 13 – Módulo da diferença do RMS em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras, para todas as frequências | 31 |
| Figura 14 – (a) Sinal aperiódico $x(t)$; (b) sinal periódico $\tilde{x}(t)$, construído para ser igual a $x(t)$ em um período | 33 |
| Figura 15 – Decomposição do sinal mediante Transformada de Fourier | 33 |
| Figura 16 – Árvore de decomposição <i>Wavelet</i> em três níveis de resolução. | 35 |
| Figura 17 – Decomposição de modo empírico aplicado a um sinal | 37 |
| Figura 18 – Fluxograma da metodologia proposta | 42 |

| | |
|---|----|
| Figura 19 – Configuração experimental com sensor de efeito Hall: (1) gerador de sinais, (2) cabos blindados, (3) bobina emissora, (4) amostra, (5) sensor de efeito Hall, (6) bancada de testes com gaiola de Faraday, (7) placa de aquisição de dados e (8) computador | 44 |
| Figura 20 – Algoritmo do método EMD | 46 |
| Figura 21 – Decomposição em IMFs do sinal medido com RMB coletado da amostra com tratamento térmico, submetida à frequência de 5 Hz e amplitude de 1,5 V | 47 |
| Figura 22 – Decomposição do sinal medido com RMB coletado da amostra com tratamento térmico, submetida à frequência de 5 Hz e amplitude de 2 V | 49 |
| Figura 23 – Decomposição do sinal medido com RMB coletado da amostra sem tratamento térmico, submetida à frequência de 5 Hz e amplitude de 2 V. | 49 |
| Figura 24 – Variação do RMS em função da frequência da onda emissora com amplitude de 2 V, para as condições com e sem formação de fase sigma | 50 |
| Figura 25 – Variação do RMS em função da amplitude da onda emissora para as frequências de 5 Hz e 10 Hz, para as condições com e sem formação de fase sigma | 51 |
| Figura 26 – Variação do RMS em função da amplitude da onda emissora para as frequências de 10 Hz e 15 Hz, para as condições com e sem formação de fase sigma | 52 |
| Figura 27 – Variação do RMS em função da amplitude da onda emissora para as frequências de 10 Hz e 20 Hz, para as condições com e sem formação de fase sigma | 52 |
| Figura 28 – Variação do RMS em função da amplitude da onda emissora para as frequências de 10 Hz e 25 Hz, para as condições com e sem formação de fase sigma | 53 |
| Figura 29 – Variação do RMS em função da amplitude da onda emissora para as frequências de 10 Hz e 50 Hz, para as condições com e sem formação de fase sigma | 54 |
| Figura 30 – Comportamento da IMF 1 de um sinal de 1 V e 50 Hz submetido à EMD na condição com fase sigma | 55 |
| Figura 31 – Comportamento da IMF 1 de um sinal de 2 V e 50 Hz submetido à EMD na condição com fase sigma | 55 |
| Figura 32 – Comportamento da IMF 1 de um sinal de 1 V e 50 Hz submetido à EMD na condição sem fase sigma | 56 |
| Figura 33 – Comportamento da IMF 1 de um sinal de 2 V e 50 Hz submetido à EMD na condição sem fase sigma | 56 |
| Figura 34 – Comportamento do Sinal de 1 V e 5 Hz, no Domínio do Tempo, na Condição sem Fase Sigma | 58 |

| | |
|--|----|
| Figura 35 – Comportamento do Sinal de 1 V e 50 Hz, no Domínio do Tempo, na Condição sem Fase Sigma | 58 |
| Figura 36 – Comportamento do Sinal de 1 V e 5 Hz, no Domínio do Tempo, na Condição com Fase Sigma | 59 |
| Figura 37 – Comportamento do Sinal de 1 V e 50 Hz, no Domínio do Tempo, na Condição com Fase Sigma | 59 |
| Figura 38 – Variação do RMS em função da frequência para aplicação da família Bio 3.9 para amostras com e sem a presença de precipitado | 60 |
| Figura 39 – Variação do RMS em função da frequência para aplicação da família DB5 para amostras com e sem a presença de precipitado | 61 |
| Figura 40 – Decomposição do sinal medido com RMB coletado da amostra com tratamento térmico, submetida à frequência de 10 Hz e amplitude de 2 V | 72 |
| Figura 41 – Decomposição do sinal medido com RMB coletado da amostra com tratamento térmico, submetida à frequência de 15 Hz e amplitude de 2 V | 73 |
| Figura 42 – Decomposição do sinal medido com RMB coletado da amostra com tratamento térmico, submetida à frequência de 20 Hz e amplitude de 2 V | 73 |
| Figura 43 – Decomposição do sinal medido com RMB coletado da amostra com tratamento térmico, submetida à frequência de 25 Hz e amplitude de 2 V | 74 |
| Figura 44 – Decomposição do sinal medido com RMB coletado da amostra com tratamento térmico, submetida à frequência de 50 Hz e amplitude de 2 V | 74 |
| Figura 45 – Decomposição do sinal medido com RMB coletado da amostra sem tratamento térmico, submetida à frequência de 10 Hz e amplitude de 2 V | 75 |
| Figura 46 – Decomposição do sinal medido com RMB coletado da amostra sem tratamento térmico, submetida à frequência de 15 Hz e amplitude de 2 V | 76 |
| Figura 47 – Decomposição do sinal medido com RMB coletado da amostra com tratamento térmico, submetida à frequência de 20 Hz e amplitude de 2 V | 76 |
| Figura 48 – Decomposição do sinal medido com RMB coletado da amostra sem tratamento térmico, submetida à frequência de 25 Hz e amplitude de 2 V | 77 |
| Figura 49 – Decomposição do sinal medido com RMB coletado da amostra sem tratamento térmico, submetida à frequência de 50 Hz e amplitude de 2 V | 77 |

Lista de tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Parâmetros das ondas emisoras para os dois corpos de prova de 8 mm, com e sem a formação de fase sigma | 30 |
| Tabela 2 – Parâmetros das ondas emisoras para os dois corpos de prova de 8 mm, com e sem a formação de fase sigma | 32 |
| Tabela 3 – Composição do AID SAF 2205, como recebido, em percentual de peso . | 43 |
| Tabela 4 – Parâmetros dos sinais utilizados neste estudo para os dois corpos de prova de 8 mm, um com a formação de fase sigma e outro sem formação | 45 |
| Tabela 5 – Diferença entre valores RMS das técnicas EMD, TWD e Transformada de Fourier, para as condições com e sem a presença de fase sigma mediante ensaio com sensor Hall | 62 |

Lista de abreviaturas e siglas

| | |
|--------|---|
| AID | Aço Inoxidável Duplex |
| CEMD | <i>Compact Empirical Mode Decomposition</i> |
| Db | Daubechies |
| EMD | <i>Empirical Mode Decomposition</i> |
| EEMD | <i>Ensemble Empirical Mode Decomposition</i> |
| END | Ensaio Não Destrutivo |
| IMF | <i>Intrinsic Mode Functions</i> |
| FT | Transformada de Fourier |
| FFT | <i>Fast Fourier Transform</i> |
| GSCMat | Grupo de Simulação de Comportamento dos Materiais |
| Hz | Hertz |
| LDV | Vibrocópio de Doppler a Laser |
| PZT | Sensores Piezoelétricos |
| RMB | Ruído Magnético de Barkhausen |
| RMS | Raiz Média Quadrática |
| SAF | <i>Sandvik Austenite Ferrite</i> |
| SNR | Relação Sinal-Ruído |
| STFT | <i>Short Time Fourier Transform</i> |
| THH | Transformada de Hilbert Huang |
| TWD | Transformada Wavelet Discreta |
| V | Volts |
| VMD | <i>Variational Mode Decomposition</i> |

Sumário

| | | |
|---------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1 | Objetivo Geral | 18 |
| 1.1.1 | Objetivos Específicos | 18 |
| 1.2 | ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO | 19 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 20 |
| 2.1 | Aço Inoxidável Duplex | 20 |
| 2.1.1 | Fase Sigma | 21 |
| 2.2 | Ruído Magnético de Barkhausen | 23 |
| 2.2.1 | Medição do Ruído Magnético de Barkhausen | 25 |
| 2.3 | Sensor de Efeito Hall | 27 |
| 2.3.1 | Aplicações do Sensor de Efeito Hall em Ensaios Eletromagnéticos | 28 |
| 2.4 | Métodos de análise de sinais de RMB | 32 |
| 2.4.1 | Transformadas de Fourier e Wavelet | 33 |
| 2.4.2 | Transformada de Hilbert-Huang | 35 |
| 2.4.2.1 | Método de Decomposição Empírica de Modos | 35 |
| 2.4.2.2 | Aplicação da Transformada de Hilbert-Huang | 38 |
| 2.5 | Trabalhos Relacionados à EMD | 39 |
| 3 | METODOLOGIA | 42 |
| 3.1 | Obtenção da base de Dados | 43 |
| 3.1.1 | Material de Estudo | 43 |
| 3.1.2 | Bancada Experimental | 43 |
| 3.1.3 | Parâmetros dos Sinais a Serem Utilizados | 44 |
| 3.2 | EMD aplicada aos sinais de RMB adquiridos nos ensaios eletromagnéticos | 45 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 47 |
| 4.1 | Estudo da quantidade ideal de IMFs para a análise do RMB | 47 |
| 4.2 | Análise da detecção do constituinte sigma pela aplicação da EMD | 50 |
| 4.3 | Limitações da EMD para a frequência de 50 Hz | 54 |
| 4.4 | Comparação entre a aplicação da Decomposição Empírica de Modos, a Transformada Wavelet Discreta e a Transformada Rápida de Fourier para a amplitude de 1,5 V e frequências de 5 Hz e 25 Hz | 59 |
| 5 | CONCLUSÕES | 64 |

| | | |
|-----|---|----|
| 5.1 | Trabalhos publicados | 65 |
| 6 | PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS | 66 |
| | REFERÊNCIAS | 67 |
| A | APÊNDICE - FIGURAS DOS RESULTADOS DA APLICA- ÇÃO DA EMD AOS SINAIS COM RMB | 72 |
| A.1 | EMD aplicada aos sinais com RMB da amostra com fase sigma | 72 |
| A.2 | EMD aplicada aos sinais com RMB da amostra sem fase sigma | 75 |

1 INTRODUÇÃO

A imposição de ciclos térmicos nos materiais, como em processos de soldagem, levam a alterações microestruturais que mudam a sua permeabilidade magnética, o que torna atrativo à aplicação de ensaios eletromagnéticos. Tais ensaios são aplicados para detecção de tensões mecânicas residuais, formação de novos constituintes, presença de tratamentos térmicos e evolução de trincas em materiais (XU et al., 2019; TAVARES et al., 2010; QIU et al., 2021).

O Ruído Magnético de Barkhausen (RMB) é gerado pela interação entre o movimento das paredes dos domínios magnéticos e pontos de ancoragens da microestrutura do material, como contornos de grãos, impurezas, precipitados, presença de novos constituintes, entre outros. O desprendimento dos domínios magnéticos ao tentarem passar por essas discontinuidades da estrutura causam o ruído. A análise do RMB é usada em ensaios eletromagnéticos não destrutivos para obter informações do material como estado de tensões, presença de tratamentos térmicos, variação de dureza, formação de constituintes prejudiciais e presença de trincas, por exemplo (DENG et al., 2018; SILVA et al., 2021; STUPAKOV; PEREVERTON; NESLUSAN, 2020).

É importante ressaltar que as tensões internas mecânicas exercem um papel fundamental no desempenho dos materiais, integridade estrutural e vida útil de sistemas industriais. O RMB tem sido extensivamente aplicada ao estudo do aço inoxidável duplex devido às suas características de resistência à corrosão e impacto (SERNA-GIRALDO; PADOVESE, 2015; FAGAN et al., 2022).

O RMB traz a informação sobre a condição do material e sua obtenção pode ser feita mediante a aplicação de uma onda eletromagnética, por uma bobina emissora. A detecção do sinal de interação da onda eletromagnética com o material é feita por uma bobina receptora. Como os movimentos das paredes dos domínios resultam em um sinal estocástico, as medições brutas do RMB não podem ser reproduzidas na prática, uma vez que trata-se de um sinal não-estacionário com características ruidosas. Tradicionalmente, a análise do ruído é realizada no sinal no domínio tempo através do valor da Raiz Média Quadrática (RMS). Entretanto, essa abordagem considera a influência da variação das amplitudes da onda principal, de modo que a análise não leva em conta apenas o ruído. Para sanar esse problema, outras técnicas têm sido empregadas para a análise do RMB, como as Transformadas de Fourier e Wavelets (TAVARES et al., 2019; SILVA et al., 2016b; DENG et al., 2018; SILVA et al., 2021).

Embora a Transformada de Fourier de Tempo Curto permita realizar esse tipo de análise, ela fornece uma abordagem limitada devido ao seu janelamento fixo. A Transformada Wavelet é uma alternativa para superar essa limitação da Transformada de

Fourier, pois apresenta características que a fazem se ajustar às frequências do sinal, proporcionando uma janela de tamanho variável. No entanto, seus filtros pré-definidos, mediante sua função de base, denominada Wavelet mãe, pode ocasionar uma longa busca para encontrar a família Wavelet ideal para a análise do sinal (HUANG et al., 1998).

A Decomposição Empírica de Modos (EMD, do inglês *Empirical Mode Decomposition*) é uma etapa chave da análise da Transformada de Hilbert-Huang (THH), e se destaca das técnicas Fourier e Wavelet por ser um método de análise tempo-frequência adaptativo, aplicável a processos não-lineares e não-estacionários, em que suas funções de base derivam do próprio sinal (HUANG et al., 1998).

O aço inoxidável duplex possui boas propriedades mecânicas e de resistência à corrosão e é muito aplicado no setor de petróleo e gás. Contudo, quando submetidos a temperaturas acima de 550 °C, têm suas propriedades comprometidas devido à formação de uma fase paramagnética denominada sigma. Essa fase, que possui dureza em torno de 1000 HV e tem alto teor de cromo, provoca o empobrecimento do material, comprometendo suas propriedades mecânicas e de resistência à corrosão (TAVARES et al., 2019; SILVA et al., 2016b).

Este trabalho busca verificar a capacidade de detectar a presença da fase prejudicial sigma em um Aço Inoxidável Duplex SAF 2205, através da análise do Ruído Magnético de Barkhausen, por meio da Decomposição Empírica de Modos. Os sinais estudados foram obtidos a partir de ensaios eletromagnéticos realizados na pesquisa de Lins (2020).

1.1 Objetivo Geral

Analisar o Ruído Magnético de Barkhausen para detecção de fases prejudiciais em aços inoxidáveis duplex, mediante a aplicação da Decomposição Empírica de Modos.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Identificar a presença de fase sigma através do Ruído Magnético de Barkhausen em um aço inoxidável duplex;
- Avaliar a utilização da Decomposição Empírica de Modos na análise do RMB para identificar a presença de fase sigma em um aço inoxidável duplex, do tipo SAF 2205;
- Verificar a quantidade de níveis de decomposição, IMFs, capazes de identificar a formação da fase fragilizante;
- Comparar os resultados obtidos mediante a aplicação das técnicas EMD, Wavelet e Transformada de Fourier, na diferenciação das condições com e sem a presença de sigma.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho discorreu em cinco capítulos, onde, inicialmente, no Capítulo 1, foi realizada a introdução do assunto a ser estudado, abordando uma visão geral e a relevância dos estudos relacionados à utilização do RMB para caracterização de aços inoxidáveis duplex e aplicação da EMD para a análise do ruído. O segundo capítulo é dedicado à fundamentação teórica, onde são abordados os tópicos: Ruído Magnético de Barkhausen, Aço Inoxidável Duplex (AID) e Transformada de Hilbert-Huang. Esse capítulo apresenta uma breve explanação sobre o que é o Efeito Barkhausen, como ele ocorre e como é medido. Aborda as características dos aços inoxidáveis duplex, e formação do constituinte prejudicial sigma. Na penúltima seção são apresentadas as técnicas matemáticas utilizadas para processamento dos dados. Na última seção do capítulo são apresentados trabalhos relacionados à técnica proposta, baseados na utilização da EMD para caracterização e monitoramento das características dos aços.

O Capítulo 3 descreve detalhadamente a metodologia adotada para o desenvolvimento da pesquisa. No Capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos a partir da análise dos dados, acompanhados das discussões pertinentes. O Capítulo 5 traz as considerações finais. Por fim, o Capítulo 6 sugere propostas para trabalhos futuros.

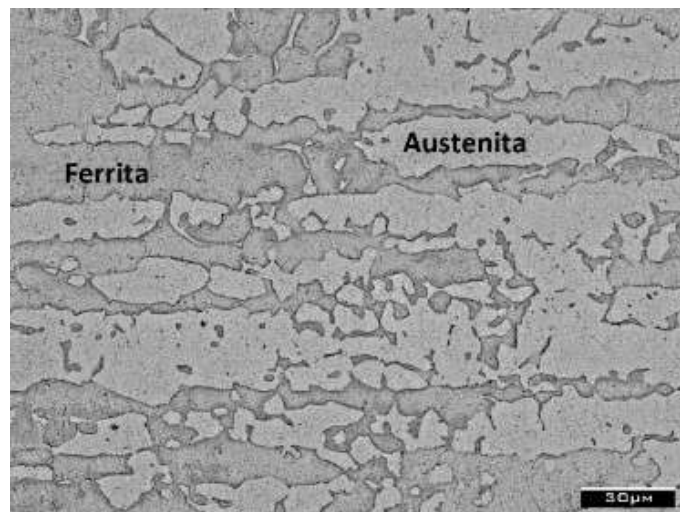
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura, a qual elenca os conteúdos pertinentes ao embasamento teórico necessário para a compreensão e análise do trabalho desenvolvido. Segmentado em 5 seções, inicialmente, a seção 2.1 disserta acerca do Aço Inoxidável Duplex (AID); a seção 2.2 aborda o RMB e sua medição; a seção 2.3 discorre sobre o sensor de efeito Hall e sua aplicação em ensaios eletromagnéticos; a seção 2.4 é dedicada aos métodos de processamento de sinais empregados para análise do RMB, e, por fim, a seção 2.5 apresenta trabalhos relacionados à técnica proposta, baseados na utilização da EMD.

2.1 Aço Inoxidável Duplex

Os aços inoxidáveis duplex resultam da combinação das fases austenita e ferrita em frações de volume aproximadamente iguais, que proporciona aos AID propriedades mecânicas superiores aos aços inoxidáveis puramente ferríticos ou austeníticos. Essa abordagem visa combinar a alta resistência à corrosão dos aços austeníticos com a elevada resistência mecânica e tenacidade dos aços ferríticos. Esses aços de liga bifásica possuem uma região elástica duas vezes superior à de aços compostos por uma única fase, apresentando uma alta tenacidade e ductilidade quando comparados aos aços puramente ferríticos ou martensíticos, e destacam-se dos aços austeníticos pela alta resistência à corrosão sob tensão e corrosão intergranular (PARDAL, 2009). A Figura 1 mostra a microestrutura do AID SAF 2205, em que as regiões escuras correspondem à matriz ferrítica (δ) e as claras são ilhas de austenita (γ).

Figura 1 – Material como recebido. Ataque químico KOH 10 %



Fonte: (TAVARES et al., 2019; XU et al., 2019)

Os AID possuem elementos de liga em quantidades significativas, que são responsáveis pelo correto balanceamento das fases e garantem as propriedades desejadas. Sua composição química típica é constituída principalmente por ferro (Fe), cromo (Cr), molibdênio (Mo), níquel (Ni) e nitrogênio (N), apresentando teores de 20 a 30% de cromo, 5 a 10% de níquel, 1 a 3% de molibdênio e 0,1 a 0,4% de nitrogênio. Além disso, o teor de carbono é mantido abaixo de 0,03% para prevenir a formação de carbonetos. No entanto, esses mesmos elementos de liga podem acelerar a cinética de precipitação de compostos intermetálicos indesejáveis, principalmente as fases sigma (σ) e chi (χ), onde a precipitação dessas fases tem o potencial de fragilizar o material e comprometer sua resistência à corrosão (MARTINS, 2017).

O SAF 2205 (ou UNS S31803) é um tipo de AID bastante utilizado no setor industrial e se caracteriza por apresentar alta resistência mecânica, boa tenacidade, elevada resistência à corrosão em meios agressivos, e excelente resistência à corrosão sob tensão e à fadiga. Entretanto, quando submetidos a altas temperaturas, como em tratamentos térmicos ou processo de soldagem, podem desencadear fases indesejáveis, precipitados, que afetam suas propriedades (TAVARES et al., 2010; SILVA et al., 2016b; MARTINS, 2017).

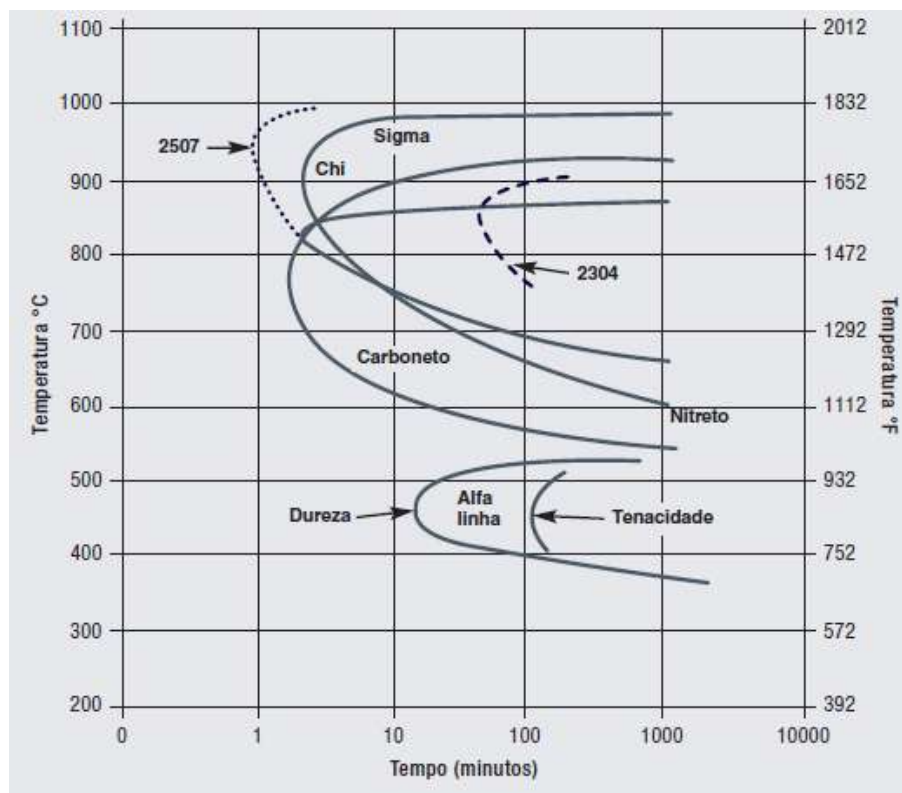
Tratamentos térmicos na faixa de 600 °C a 1000 °C podem desencadear o aparecimento de várias reações de precipitação, como fases do tipo sigma (σ), chi (χ), austenita secundária (γ_2), carbonetos ($M_{23}C_2$) e nitreto de cromo (Cr_2N). Todavia, dentre essas fases, a sigma é a que mais impacta negativamente sobre a ductilidade, tenacidade e resistência à corrosão do material (GHOSH; MONDAL, 2008).

2.1.1 Fase Sigma

A fase sigma é um composto intermetálico caracterizado por uma alta concentração de cromo, formado em uma grande variedade de aços inoxidáveis duplex, como também em alguns aços inoxidáveis austeníticos. É uma fase frequentemente mais relatada como causa de problemas industriais, visto que uma quantidade de 5% de fase sigma já é suficiente para comprometer as propriedades mecânicas e de resistência à corrosão (MARTINS, 2017; PEREIRA, 2009).

O diagrama de precipitação isotérmica para os aços inoxidáveis 2205, 2304 e 2507, apresentado na Figura 2, permite identificar o tempo necessário, em função da temperatura, para o início da precipitação das fases prejudiciais (sigma, chi, carbonetos, nitretos e alfa linha). As linhas pontilhadas indicam o início da precipitação de intermetálicos para os aços duplex 2507 e 2304. As curvas em linhas contínuas se referem ao AID 2205. Observa-se que no intervalo de 300 °C a 600 °C há a formação da fase alfa primário (α'), e no intervalo de 600 °C a 1000 °C tem-se a precipitação da fase sigma (σ), onde ambas são responsáveis pela fragilização do material (MARTINS, 2017).

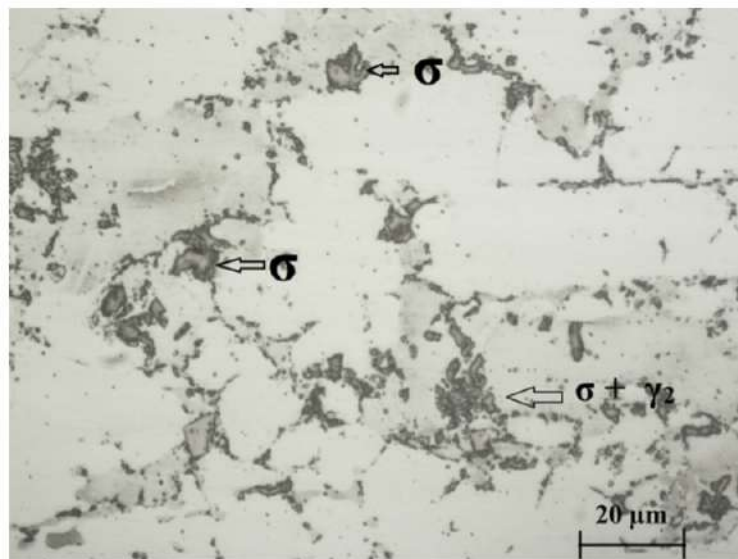
Figura 2 – Diagrama de precipitação isotérmica para os aços inoxidáveis duplex 2205, 2304 e 2507 recozidos a 1050 °C



Fonte: (MARTINS, 2017)

A precipitação da fase sigma ocorre por meio de uma transformação eutetóide de ferrita em fase sigma e austenita secundária, em uma faixa de temperatura entre 600 °C e 1000 °C, a partir da ferrita na interface ferrita/austenita ou a partir dos contornos de grão da ferrita. O constituinte sigma possui Fe, Mo e Cr em sua composição, dureza em torno de 900 HV a 1000 HV (Dureza Vickers), e é não magnética. Apesar de sua formação ocorrer na faixa de temperatura entre 650 °C e 950 °C, ela pode ser mais rapidamente obtida em temperaturas entre 800 °C e 900 °C. Ademais, devido sua presença está diretamente relacionada com a diminuição da fase ferrita, a sigma reduz o magnetismo do material por ser uma fase paramagnética (VIANNA, 2013; PEREIRA, 2009). A Figura 3 mostra a formação da fase sigma em um AID SAF 2205.

Figura 3 – Microconstituente sigma, microscopia óptica do AID SAF 2205 atacado com KOH 10%



Fonte: (SILVA et al., 2016a)

A formação do constituinte paramagnético sigma muda a permeabilidade do material, e a aplicação de ensaios eletromagnéticos passa a ser atrativa para acompanhamento desse constituinte prejudicial. A interação entre uma onda eletromagnética e o material faz com que o movimento das paredes dos domínios magnéticos interaja com pontos de ancoragem, como contornos de grãos e precipitados, gerando o Ruído Magnético de Barkhausen que traz a informação da mudança microestrutural do material, e serve para inspeções preventivas de estruturas bem como a análise se procedimentos de soldagem foram realizados corretamente, e evitem assim rompimentos de tubulações e riscos de desastres ecológicos (SILVA et al., 2021; XU et al., 2019).

2.2 Ruído Magnético de Barkhausen

O Ruído Magnético de Barkhausen (RMB) é um fenômeno que ocorre em materiais ferromagnéticos durante o processo de magnetização. O RMB foi detectado pela primeira vez em 1919, pelo físico alemão Heinrich Barkhausen, que percebeu que ao aplicar um campo magnético variável a um material ferromagnético, eram induzidos em uma bobina próxima, ruídos provenientes de pulsos de tensão elétrica de curta duração, causados mediante o movimento das paredes dos domínios magnéticos do material (MELO, 2019; ANTÔNIO et al., 2013).

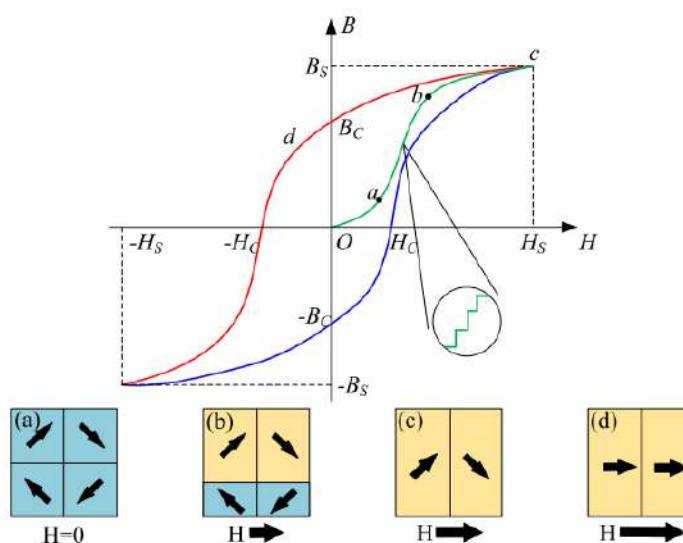
O ruído é resultante de pequenos saltos que acontecem quando as paredes dos domínios magnéticos passam por pontos de ancoragem, como uma descontinuidade, que impede e libera rapidamente o movimento da parede do domínio. De modo que, o RMB é caracterizado devido sua sensibilidade a tensões residuais, microestruturas como precipitados, discordâncias, inclusões e impurezas, e vem sendo e vem sendo utilizado para

obtenção de parâmetros para avaliação de materiais ferromagnéticos (LIN et al., 2023; OMAE et al., 2023).

Sob uma perspectiva microscópica, um material ferromagnético é constituído por muitas estruturas de domínios magnéticos minúsculos, e os limites entre esses domínios magnéticos são denominados de paredes de domínio magnético. Esses materiais não apresentam magnetismo em seu estado natural, uma vez que os domínios magnéticos estão alinhados ao longo de suas respectivas direções de polarização, alcançando, assim, um estado estável de estrutura com a mínima energia possível. No entanto, sob a ação de um campo magnético externo, os domínios magnéticos podem se desviar de suas direções de fácil polarização e realinhar-se de acordo com a direção do campo externo aplicado (NESLUŠAN et al., 2019).

A magnetização e desmagnetização de uma amostra ferromagnética é bem representada pela curva de histerese, que também permite observar a presença do Ruído Magnético de Barkhausen. A Figura 4 apresenta a curva, a qual relaciona a densidade de fluxo magnético (B) exercida por materiais ferromagnéticos sob a ação de diferentes intensidades de campo magnético externo aplicado (H). Ao analisar o processo de magnetização O-a-b-c na posição com a maior inclinação na curva de magnetização (seção a-b), percebe-se que a curva não é contínua, mas aumenta em etapas de forma serrilhada. Nesse momento, se uma bobina de detecção for colocada na superfície do material, a variação magnética causada pelo movimento e deflexão do domínio magnético excitaria um sinal de corrente pulsada na bobina, o RMB (LIN et al., 2023).

Figura 4 – Curva de histerese magnética e estados de deflexão do domínio magnético: (a) Estado natural; (b) Domínios dispostos na mesma orientação do campo aumentam o seu tamanho e os não orientados diminuem; (c) Rotação do domínio magnético; (d) Estado de saturação magnética



Fonte: (LIN et al., 2023)

O processo de magnetização resulta de dois mecanismos distintos. O primeiro é o movimento das paredes dos domínios, ilustrado na Figura 4(b), em que aqueles com magnetização favorável ao campo magnético aplicado aumentam de tamanho, enquanto os desfavoráveis diminuem proporcionalmente. O segundo mecanismo consiste na rotação, apresentado na Figura 4(c), onde a magnetização de um domínio magnético, inicialmente alinhado ao longo de um eixo preferencial, gira de maneira coordenada em direção à orientação do campo magnético aplicado, rompendo as barreiras presentes no material (FAGAN et al., 2022).

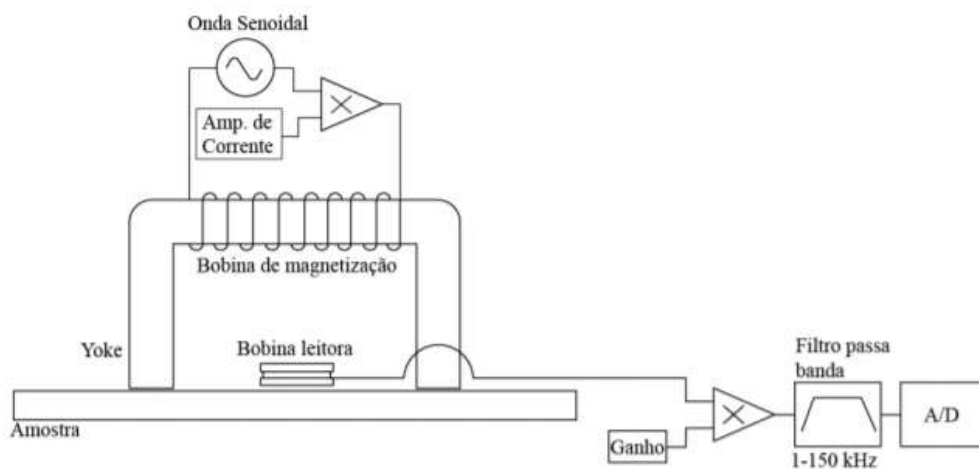
Os obstáculos que se opõem à movimentação das paredes no processo de magnetização são denominados pontos de ancoragem, ocasionados devido às descontinuidades presentes na estrutura cristalina do material. Conforme as paredes dos domínios atravessam essas barreiras, ocorrem transições abruptas na magnetização, resultando no RMB (CARVALHO FILHO, 2018).

2.2.1 Medição do Ruído Magnético de Barkhausen

A análise do Ruído Magnético de Barkhausen é utilizada para avaliar características microestruturais de materiais ferromagnéticos e detectar irregularidades como descontinuidades na rede cristalina. O princípio de detecção do RMB é baseado na aplicação de um sinal através de uma bobina de excitação, e medição do campo resultante da interação desta com a microestrutura do material, através de uma bobina receptora. Há uma variedade de dispositivos empregados em Ensaio Não Destrutivo (END) que fazem uso do princípio do RMB. Os parâmetros de construção desses dispositivos são influenciados tanto pela geometria quanto pelo tipo de material que se pretende analisar (PRAXEDES, 2010).

O equipamento clássico utilizado para as medições do RMB é mostrado esquematicamente na Figura 5. A configuração é composta por uma amostra, uma bobina de magnetização que envolve um eletroímã no formato de "U", denominado *yoke*, e uma bobina receptora posicionada na superfície da amostra entre as extremidades do *yoke*. Uma fonte de onda senoidal impõe uma corrente alternada em baixas frequências, na faixa de 1 Hz a 50 Hz, que passa pelo amplificador de corrente e posteriormente pela bobina de excitação, magnetizando o eletroímã. Isso ocasiona alterações na microestrutura do material, gerando transientes magnéticos em altas frequências, superiores a 1 kHz, os quais são detectados pela bobina receptora. A obtenção da resposta magnética em altas frequências resulta em uma diferença entre as frequências de excitação, tornando necessário aplicar filtros, analógicos ou digitais, para isolar a informação útil do sinal e eliminar possíveis perturbações (CALDAS-MORGAN; PADOVESE, 2012).

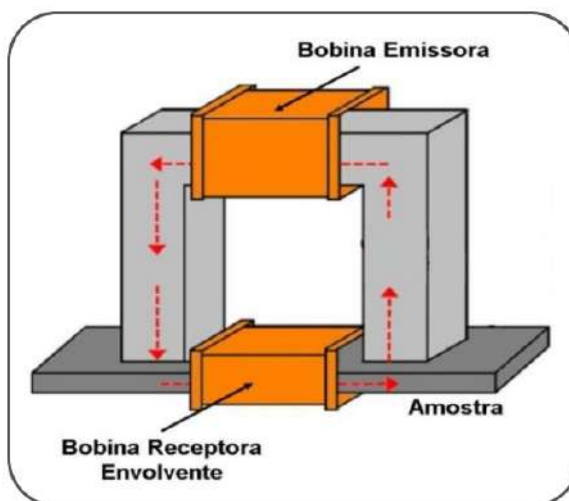
Figura 5 – Experimento clássico para ensaio do RMB



Fonte: (CALDAS-MORGAN; PADOVESE, 2012)

Na técnica a seguir, a bobina receptora envolve o corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 6. Neste cenário, a bobina pode apresentar um enrolamento simples, o qual tende a limitar as informações relativas ao RMB devido à frequência de trabalho, ou um enrolamento duplo, que, devido à disposição dos enrolamentos em sentidos opostos e à conexão em série entre eles, pode resultar na minimização ou no cancelamento da frequência de magnetização (KAHROBAEE; HEJAZI, 2017).

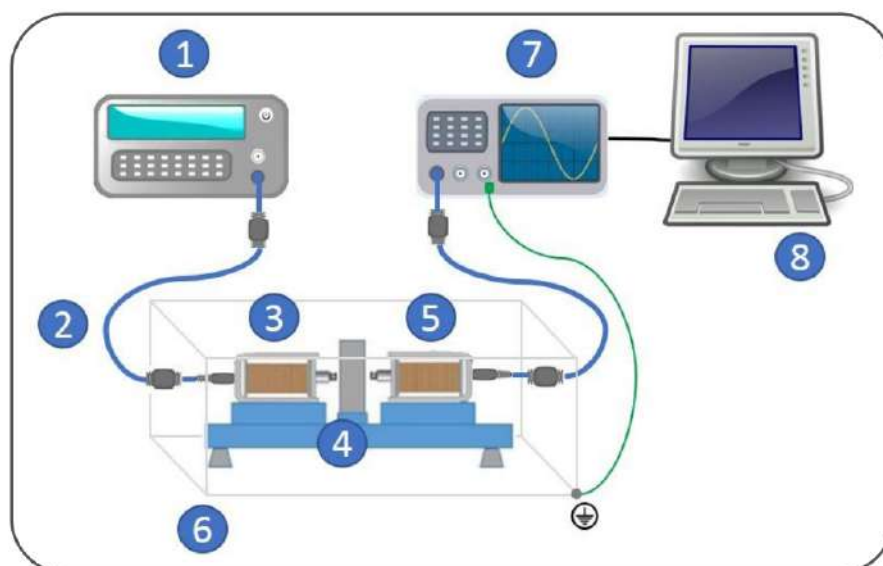
Figura 6 – Diagrama esquemático do sistema de medição do RMB para uma bobina receptora envolvente



Fonte: adaptado de (KAHROBAEE; HEJAZI, 2017)

No estudo de CARVALHO FILHO (2018), foi realizado um END baseado no RMB com o propósito de monitorar as transformações microestruturais em um material de aço inoxidável duplex do tipo SAF 2205. Para configuração do experimento, o autor utilizou um esquema simplificado composto por duas bobinas de superfície, cada uma posicionada em uma das faces da amostra, em que a bobina receptora foi alocada na superfície oposta da emissora. Essa configuração permite uma maior facilidade de implementação em comparação com os sistemas de medição de RMB apresentados anteriormente. Além disso é possível analisar as amostras em um volume maior de material, o que pode ser útil para análise de juntas soldadas. A Figura 7 apresenta uma visão detalhada do experimento.

Figura 7 – Bancada experimental: gerador de sinais (1); cabos blindados (2); bobina emissora (3); amostra (4); bobina receptora (5); gaiola de Faraday (6); osciloscópio (7) e computador (8)



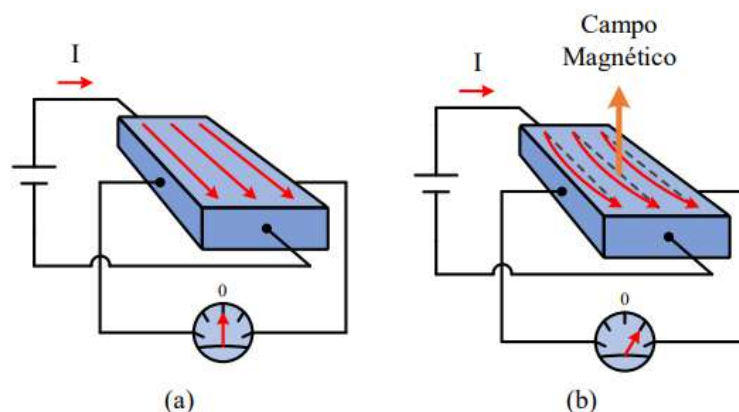
Fonte: adaptado de (SILVA et al., 2020)

2.3 Sensor de Efeito Hall

O efeito Hall foi descoberto em 1879 pelo físico Edwin Herbert Hall, que percebeu que quando um elemento condutor de corrente é submetido a um campo magnético, há o aparecimento de uma tensão em uma direção perpendicular à corrente e ao campo, conforme ilustrado na Figura 8.

A Figura 8a apresenta uma placa fina de material condutor, que é percorrida por uma corrente elétrica fornecida por uma bateria. Para que a tensão medida seja inicialmente nula, um par de pontas de prova é conectado a um voltímetro, de modo que fiquem opostas uma à outra ao longo das laterais da placa. Assim, ao aplicar um campo magnético perpendicular, o fluxo de corrente sofre uma distorção, conforme mostrado na Figura 8b. Como resultado, ocorre uma diferença de potencial, chamada de tensão Hall (SOUZA, 2022).

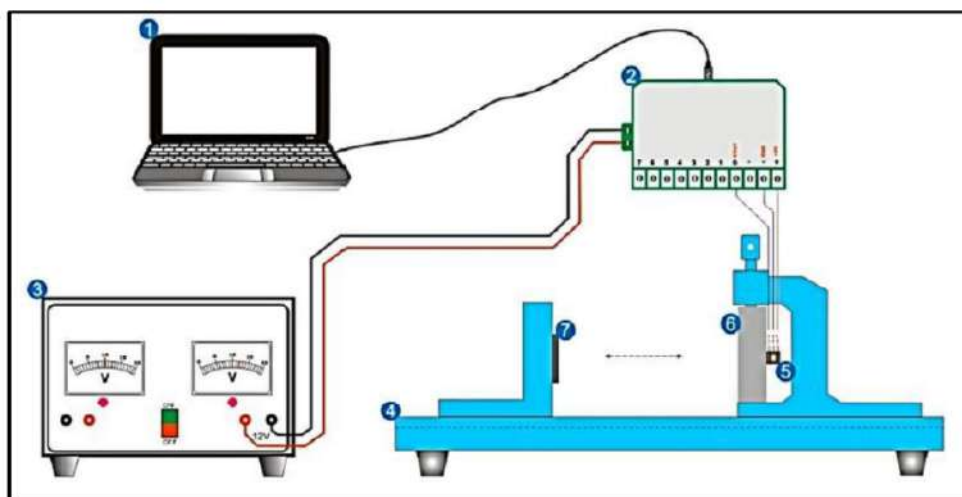
Figura 8 – Efeito Hall



Fonte: (SOUZA, 2022)

Em Silva et al. (2014) foi desenvolvida uma metodologia não destrutiva utilizando um sensor de efeito Hall no lugar da bobina receptora, para detectar as variações microestruturais do AID SAF 2205. Os autores chegaram à conclusão de que a técnica baseada na medição da variação de permeabilidade magnética é viável para o monitoramento contínuo de estruturas em operação que apresentam vulnerabilidade à fragilização. A configuração experimental pode ser observada na Figura 9.

Figura 9 – Configuração experimental com sensor de efeito Hall: computador (1), placa de aquisição de dados com um conversor digital analógico de 10 bits (2), fonte de alimentação (3), bancada de testes (4); sensor de efeito Hall (5), amostra de AID (6) e ímã permanente (7)



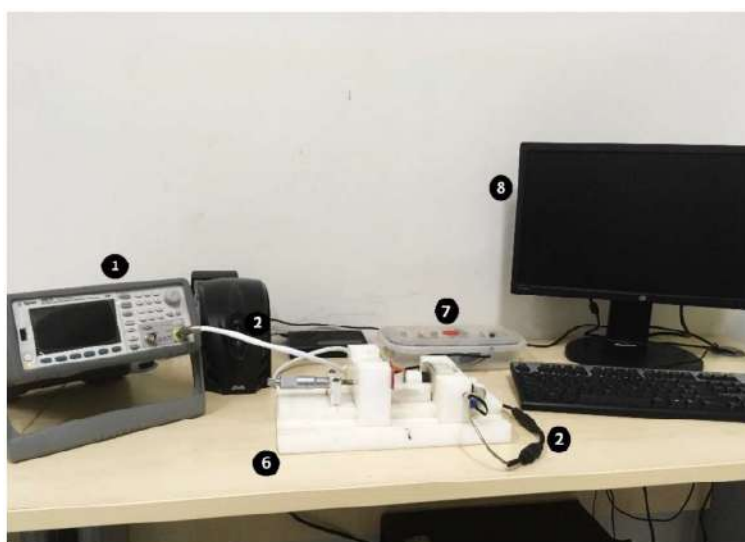
Fonte: adaptado de (SILVA et al., 2014)

2.3.1 Aplicações do Sensor de Efeito Hall em Ensaios Eletromagnéticos

Em sua pesquisa, Lins (2020) estudou a detecção da presença da fase sigma em um aço SAF 2205, através da análise do RMB. O objetivo da pesquisa foi identificar a onda emissora ideal que proporcionasse uma amplitude de medida de RMS capaz de diferenciar

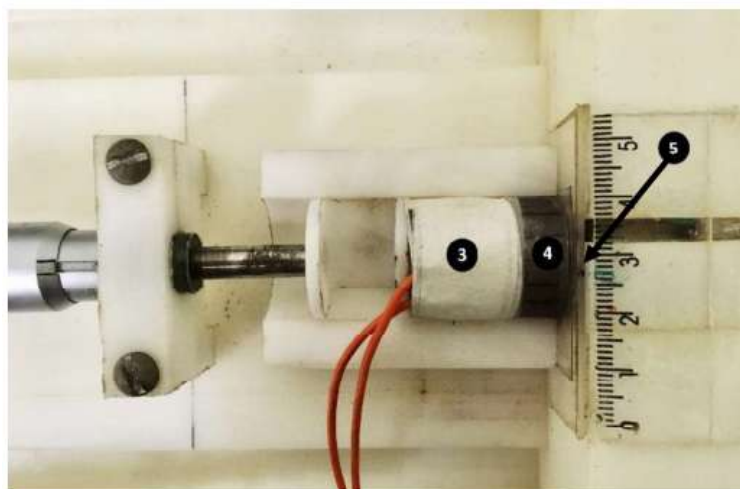
duas condições de corpos de prova, uma com a formação de sigma e outra sem, de modo que, assim, apresentasse uma maior sensibilidade para acompanhar a formação da fase fragilizante. Ensaios eletromagnéticos foram realizados com duas amostras do aço AID SAF 2205 em formatos circulares com 24 mm de diâmetro e espessura de 8 mm, uma como recebida (sem envelhecimento), e outra envelhecida à temperatura de 850 °C por 15 min, em forno de resistência e resfriada em água. As Figuras 10 e 11 mostram a configuração da bancada experimental utilizada por Lins (2020) para detecção do RMB, composta por um módulo de emissão do sinal e outro de aquisição do sinal.

Figura 10 – Equipamento de ensaio: (1) gerador de sinais, (2) cabos blindados, (6) bancada de testes, (7) placa de aquisição, (8) computador



Fonte: (LINS, 2020)

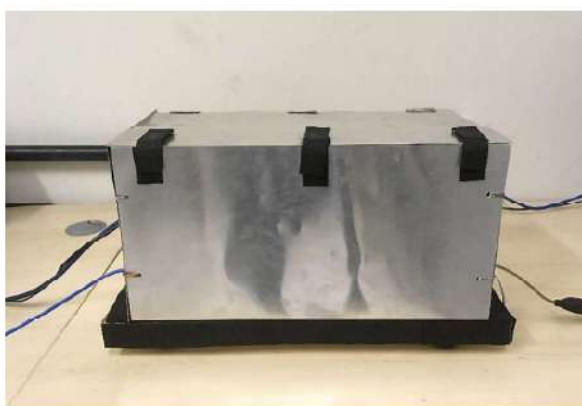
Figura 11 – Bancada experimental: (3) bobina emissora, (4) amostra, (5) sensor de efeito Hall



Fonte: (LINS, 2020)

No módulo de emissão, um gerador de função transmite para a bobina emissora, a qual está posicionada no centro de uma das faces da amostra, ondas senoidais com frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz e 50 Hz e amplitudes de 0,25 V, 0,5 V, 0,75 V, 1 V, 1,25 V, 1,5 V, 1,75 V, 2 V, 3 V, 5 V, 7 V e 9 V. O módulo de aquisição é composto por um sensor de efeito Hall, uma placa de aquisição e um computador. O sensor de efeito Hall posicionado no lado oposto do corpo de prova em relação a bobina emissora detecta o campo resultante da interação entre a onda emissora e o material. Os sinais com a resposta do RMB foram adquiridos a uma aquisição de 1000 pontos a cada 1 *ms*. De cada arranjo de frequência e amplitude, para cada amostra, foram captados 50 sinais com o objetivo de analisar a região que produz a maior diferença de RMS entre a condição com e sem tratamento térmico, visando reduzir ainda mais a faixa de erro. Para inibir interferências de ondas eletromagnéticas externas ao experimento, Lins (2020) construiu uma Gaiola de Faraday, conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Gaiola de Faraday



Fonte: (LINS, 2020)

A tabela 1 apresenta o resumo dos parâmetros das ondas emisoras aplicadas nos dois corpos de prova de 8 mm, um com e outro sem a formação de fase sigma.

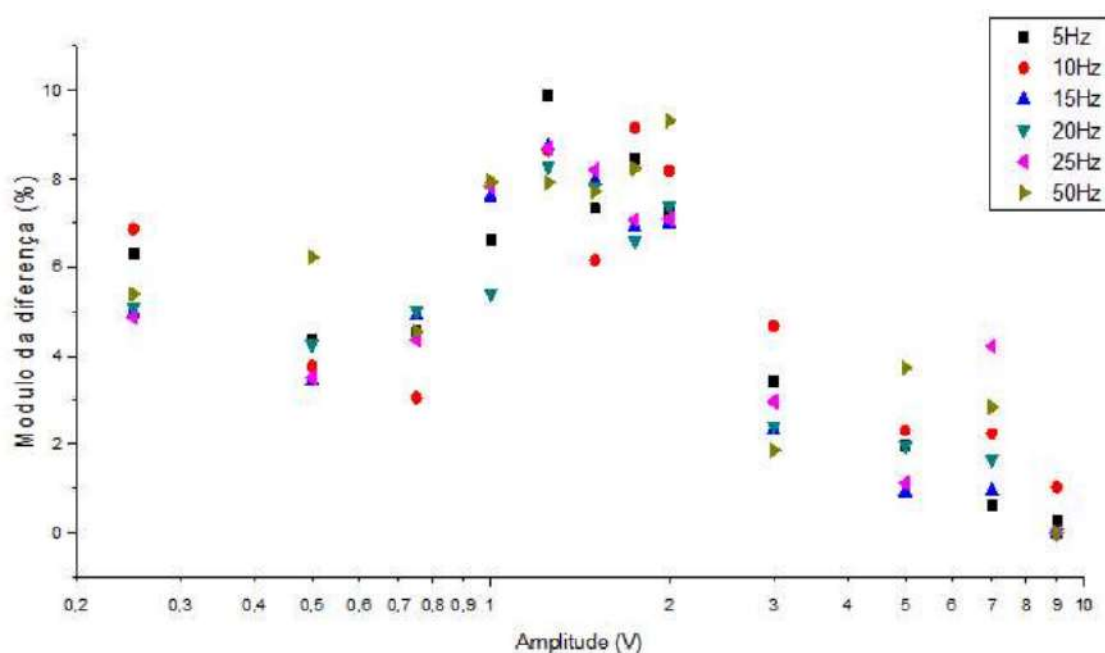
Tabela 1 – Parâmetros das ondas emisoras para os dois corpos de prova de 8 mm, com e sem a formação de fase sigma

| Parâmetros das ondas emisoras | |
|-------------------------------|---|
| Tipo de onda | Senoidal |
| Frequências | 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz e 50 Hz |
| Amplitudes | 0,25 V, 0,5 V, 0,75 V, 1 V, 1,25 V, 1,5 V, 1,75 V, 2 V, 3 V, 5 V, 7 V e 9 V |
| Tempo de aquisição | 1000 pontos a cada 1 ms |
| Técnica de análise | FFT |
| Parâmetro de medição | RMS |
| Melhores resultados | De 1 a 2 V |

Fonte: adaptado de (LINS, 2020)

Os sinais adquiridos foram submetidos à Transformada de Fourier, aplicando cortes de frequências a partir de 200 Hz. Como parâmetro para a análise do ruído de Barkhausen foi utilizado o RMS com um intervalo de confiança de 95%. A partir da utilização da diferença em módulo do RMS das duas condições, com e sem a presença da fase sigma, Lins (2020) observou que a melhor região de trabalho para as amostras com espessura de 8 mm ocorre na faixa de 1 V a 2 V, localizada na região central do gráfico da Figura 13. Essa região se mostra mais apropriada para análise e detecção da fase sigma por apresentar uma maior diferença de valores RMS, possibilitando uma caracterização mais efetiva.

Figura 13 – Módulo da diferença do RMS em função da amplitude da onda emissora aplicada nas amostras, para todas as frequências



Fonte: (LINS, 2020)

Alencar (2022) analisou a aplicação da Transformada Wavelet Discreta na detecção do Ruído Magnético de Barkhausen, para acompanhamento da formação do constituinte sigma, em um AID SAF 2205, com espessura de 8 mm. Conforme pode ser observado na Tabela 2, foram empregados no estudo os mesmos sinais obtidos na pesquisa de Lins (2020), porém, considerando apenas aqueles que compreendiam a melhor região de trabalho, os quais são resultantes da interação do material com ondas emisoras senoidais de frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz e 50 Hz, e amplitudes de 1 V até 2 V.

Tabela 2 – Parâmetros das ondas emisoras para os dois corpos de prova de 8 mm, com e sem a formação de fase sigma

| Parâmetros das ondas emisoras | |
|--------------------------------------|--|
| Tipo de onda | Senoidal |
| Frequências | 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz e 50 Hz |
| Amplitudes | 1 V, 1,25 V, 1,5 V, 1,75 V e 2 V |
| Tempo de aquisição | 1000 pontos a cada 1 ms |
| Técnica de análise | TWD |
| Famílias | Daubechies, Symlets, Coiflets e Biorthogonal |
| Parâmetro de medição | RMS |
| Melhores resultados | db5 e bio 3.9 |

Fonte: adaptado de (ALENCAR, 2022)

Alencar (2022) verificou a eficiência das famílias Wavelets Daubechies, Symlets, Coiflets e Biorthogonal para a análise do RMB em sinais de frequência de 5 Hz e amplitude de 1,5 V, os quais estão contidos dentro da melhor região de trabalho detectada por Lins (2020). Foi estabelecido um critério de seleção baseado na diferença dos valores RMS, buscando uma diferença percentual acima de 10% entre as condições com e sem precipitados. Os resultados mostraram que as famílias db5 e bio 3.9 foram as que mais se destacaram segundo esse critério, apresentando as maiores diferenças percentuais. Além disso, ao comparar os resultados obtidos com a Transformada Wavelet Discreta com aqueles obtidos por Lins (2020) usando a Transformada Rápida de Fourier (FFT - do inglês *Fast Fourier Transform*), notou-se que as famílias db5 e bio 3.9 amplificaram a amplitude das medidas em 20 vezes em relação à aplicação da FFT.

2.4 Métodos de análise de sinais de RMB

O Processamento de Sinais é uma área que permite a análise de diversos tipos de sinais, como imagens, áudio e ondas elétricas, entre outros. Esse método possibilita a extração de informações relevantes para aplicações específicas e pode ser realizado tanto no domínio do tempo, quanto no domínio de uma Transformada (SHIRADO et al., 2015). As técnicas de análise utilizadas neste trabalho podem ser baseadas em ferramentas matemáticas para a representação e manipulação de sinais discretos no tempo e no espaço, como as transformadas de Fourier, Wavelet e Hilbert-Huang. Neste estudo, especificamente, utilizou-se a EMD, que é um dos passos para a obtenção da Transformada de Hilbert-Huang.

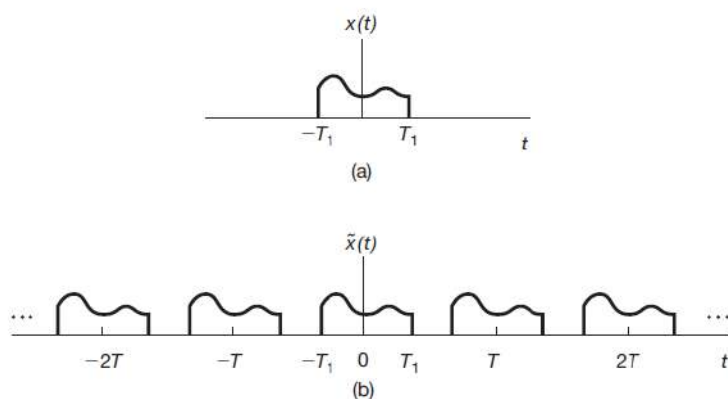
Resultados de estudos com Fourier e Wavelet para a análise de sinais de RMB, sob as mesmas condições metodológicas, foram comparados com a técnica EMD utilizada na presente pesquisa para detectar a fase prejudicial sigma em materiais ferromagnéticos, permitindo a diferenciação entre as condições com e sem a presença desse constituinte. Portanto, serão abordados alguns conceitos referentes ao processamento digital de sinais, mediante um breve comparativo das transformadas, as quais costumam ser utilizadas nas

aplicações de análise espectral, filtragem digital de sinais e tratamento de sinais. Desse modo, nesta seção, revisam-se as transformadas de Fourier e Wavelet, e aborda-se mais detalhadamente a EMD.

2.4.1 Transformadas de Fourier e Wavelet

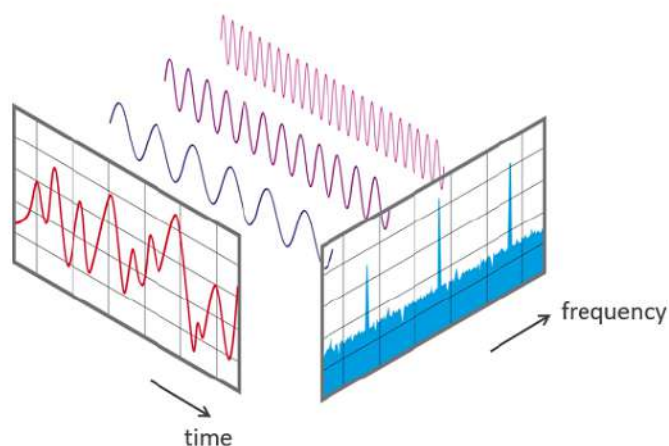
O princípio básico da Transformada de Fourier permite que o sinal aperiódico ganhe uma representação periódica, com período infinito, de forma a alcançar todas as componentes de frequências presentes no sinal em análise, como apresentado na Figura 14. Esse método decompõe um sinal em suas componentes elementares de seno e cosseno. Em que, na prática, consiste na transformação do sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência, conforme pode ser observado na Figura 15 (OPPENHEIM; WILLSKY, 2010).

Figura 14 – (a) Sinal aperiódico $x(t)$; (b) sinal periódico $\tilde{x}(t)$, construído para ser igual a $x(t)$ em um período



Fonte: (OPPENHEIM; WILLSKY, 2010)

Figura 15 – Decomposição do sinal mediante Transformada de Fourier



Fonte: (AUDIO, 2022)

A Transformada de Fourier (FT) é comumente utilizada para analisar as propriedades das componentes de frequência. Entretanto, essa transformada resulta na perda da informação do tempo, e apenas a informação da frequência é apresentada para análise. Isso ocorre porque a FT elimina o tempo matematicamente no processo de transformação. Portanto, essa transformada é mais adequada para sinais estacionários, em que a frequência não varia no tempo (HUANG et al., 1998).

Para solucionar o problema da perda da informação do tempo, possibilitando uma análise tempo-frequência, em 1946, Gabor, introduziu a técnica de janelamento do sinal na Transformada de Fourier, que ficou conhecida como Transformada de Fourier de Curta Duração (STFT - do inglês *Short Time Fourier Transform*). Entretanto, ainda que a STFT permita realizar uma análise tempo-frequência do sinal, ela possui uma precisão limitada devido ao seu janelamento fixo, visto que, após a escolha do tamanho da janela a mesma permanece inalterada para todas as frequências, restringindo assim os resultados a serem obtidos, que apresentam uma mesma resolução de frequência para observação do sinal (ABREU, 2019).

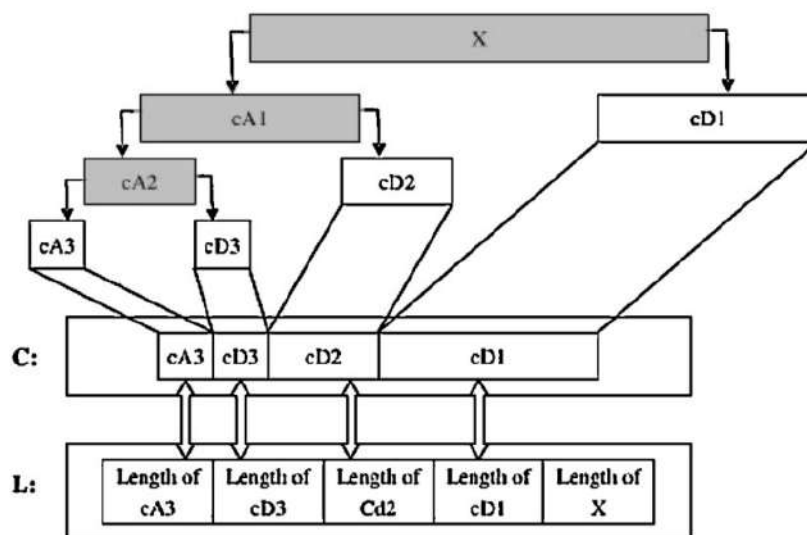
Basicamente, a STFT separa um sinal temporal em vários segmentos de períodos fixos, denominamos “janelas”, e em seguida realiza o cálculo da Transformada Fourier separadamente para cada segmento, de forma a calcular os coeficientes em partes do sinal, sistematicamente em sequências de janelamentos. Dessa forma, considera-se que a janela se desloca pelo sinal e faz a análise de cada intervalo separadamente.

Esse problema do janelamento fixo da STFT pode ser resolvido por meio da Transformada Wavelet, a qual utiliza a técnica de janelamento variável e apresenta características que a fazem se ajustar a frequências do sinal, proporcionando uma janela de tamanho variável, que melhora em precisão as informações sobre tempo e frequência de um sinal. Dessa forma, essa técnica torna-se versátil e apresenta uma abordagem de aplicação bem diversificada, pois, pode assumir diversas formas, cada uma com características próprias, tornando-a mais adequada a um determinado número de situações. A transformada Wavelet discreta, emprega filtragens sucessivas com filtros passa-baixas e passa-altas, permitindo a análise em diferentes escalas e resoluções, de modo que sejam extraídos tanto a característica global, quanto os detalhes do sinal (DOMINGUES et al., 2016).

Dessa forma, como pode ser observado na Figura 16, tem-se que o sinal obtido mediante a passagem do sinal original representado por X , pelo filtro passa-baixas é denominado coeficiente de aproximação (cA), e entende-se como coeficiente de detalhe (cD) o sinal obtido por meio da passagem do sinal original pelo filtro passa-altas, em que os coeficientes de aproximação correspondem as baixas frequências do sinal e os coeficientes de detalhe correspondem as altas frequências do sinal. De modo que, para dar continuidade ao processo e alcançar um próximo nível de decomposição, utiliza-se apenas o coeficiente

de aproximação do nível anterior. Sendo assim, o sinal passa por um banco de filtros Wavelets e é decomposto em sub-bandas de frequências, permitindo que seja visto tanto o global quanto os detalhes de um sinal, em diferentes escalas e resoluções (SANCHEZ, 2008; ARAUJO, 2011).

Figura 16 – Árvore de decomposição *Wavelet* em três níveis de resolução.



Fonte: (WANG et al., 2013)

A Transformada Wavelet Discreta (TWD) possui uma função base denominada Wavelet mãe, a qual é uma função que oscila, tem energia finita e tem valor médio nulo. As diferentes características da Wavelet mãe são fundamentais para definir as propriedades e vantagens de uma família de funções Wavelet. Na literatura, várias famílias Wavelets foram propostas, tais como Daubechies, Biortogonais e Coiflets (PALECHOR, 2013).

2.4.2 Transformada de Hilbert-Huang

Proposta em 1998 por Norden E. Huang, a Transformada de Hilbert-Huang é um método adaptativo de análise em tempo-frequência, destinado a sinais oscilatórios não-lineares e não-estacionários, cujas suas propriedades estatísticas variam com o tempo. Esta técnica é composta por duas etapas: a decomposição do sinal original em funções intrínsecas de modo (IMF - do inglês *Intrinsic Mode Function*) e a análise do espectro de Hilbert resultante da transformada (HUANG et al., 1998).

2.4.2.1 Método de Decomposição Empírica de Modos

A EMD é um método intuitivo, direto e adaptativo, que tem como objetivo identificar empiricamente todos os modos de oscilação presentes em um sinal, utilizando as propriedades locais desse sinal. O sinal é decomposto em componentes com base nessas

particularidades locais, e posteriormente é aplicada a Transformada de Hilbert-Huang para extrair informações relevantes sobre a dinâmica do sinal (MARTINS et al., 2018).

Desse modo, a EMD permite decompor sinais complexos em componentes mais simples, cada um representando uma oscilação específica, onde cada IMF apresenta características na amplitude, tempo e frequência.

Para concepção da IMF, faz-se necessário satisfazer duas condições:

- O número de extremos e o número de cruzamentos por zero devem ser iguais ou diferir apenas por uma unidade, para um dado conjunto de dados;
- A média local em qualquer ponto do envelope definido pelos pontos de máximos e de mínimos locais deve ser zero.

O método básico de extração de IMF é realizado através do processo denominado peneiramento (ou, em inglês, *sifting*), o qual consiste na interpolação cúbica dos valores de máximo e mínimo do sinal, gerando assim uma envoltória superior para os valores de pico superiores e uma envoltória inferior para os valores de pico inferiores, conhecidas como envelopes.

Após a interpolação, obtém-se a média $m_1(t)$ entre os envelopes superior e inferior, conforme apresentado na Equação 2.1:

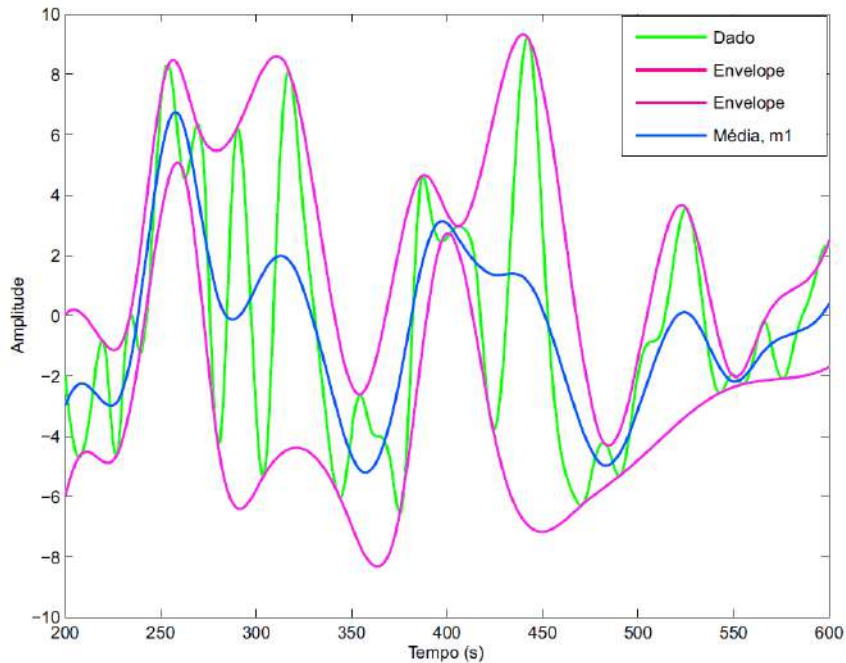
$$m_1(t) = \frac{E_{sup}(t) + E_{inf}(t)}{2}. \quad (2.1)$$

De modo que a primeira componente, $h_1(t)$, é obtida mediante a diferença entre o sinal a ser decomposto $x(t)$ e a média $m_1(t)$, como segue na Equação 2.2:

$$h_1(t) = x(t) - m_1(t) \quad (2.2)$$

A Figura 17 apresenta o procedimento de decomposição empírica de modos aplicada a um sinal aleatório. De modo que as envoltórias superior e inferior, obtidas a partir da interpolação dos máximos e mínimos estão destacadas na cor magenta. A linha azul corresponde à média resultante das duas envoltórias. O sinal analisado está na cor verde.

Figura 17 – Decomposição de modo empírico aplicado a um sinal



Fonte: (SANTOS et al., 2019)

De acordo com Huang et al. (1998), para $h_1(t)$ ser considerado uma IMF, o sinal não pode apresentar nenhum máximo local abaixo de zero ou um mínimo local acima de zero. Caso contrário, o processo de peneiramento deve ser repetido até que o componente satisfaça os critérios necessários para ser considerado uma IMF, conforme Equação 2.3:

$$h_{11}(t) = h_1(t) - m_{11}(t), \quad (2.3)$$

em que $h_1(t)$ é considerado uma IMF primitiva e $m_{11}(t)$ é a média dos envelopes inferior e superior de $h_1(t)$.

A Equação 2.4 mostra a forma geral:

$$h_{1k}(t) = h_{1(k-1)}(t) - m_{1k}(t). \quad (2.4)$$

Isto posto, se o critério de parada for obtido, origina-se a primeira IMF denominada $c_1(t)$, mediante a Equação 2.5:

$$c_1(t) = h_{1k}(t). \quad (2.5)$$

Sendo assim, $c_1(t)$ pode ser retirada do sinal original, conforme a Equação 2.6 a seguir:

$$r_1(t) = x(t) - c_1(t). \quad (2.6)$$

Entretanto, se o resíduo $r_1(t)$ ainda possuir informações do sinal em análise, considera-se esse resíduo um novo dado e o processo de peneiramento é iniciado novamente, n vezes, até que $r_n(t)$ se torne uma função monótona, com um único máximo e mínimo, de forma que nenhuma IMF possa ser obtida do sinal residual, e o sinal original possa ser reconstruído como a soma de n IMFs e um resíduo $r_n(t)$, como pode ser observado na Equação 2.7 (HUANG; SHEN; LONG, 1999; HUANG et al., 2023).

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t), \quad (2.7)$$

em que $c_i(t)$ é a i -ésima IMF e $r_n(t)$ é um sinal residual final.

A etapa subsequente é aplicar a Transformada de Hilbert em cada IMF, $c_i(t)$, com o objetivo de obter a série de amplitudes e frequências instantâneas.

2.4.2.2 Aplicação da Transformada de Hilbert-Huang

A Transformada de Hilbert $y(t)$ de um sinal $x(t)$ é definida conforme apresentado na Equação 2.8:

$$y(t) = \frac{1}{\Pi} P \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau, \quad (2.8)$$

em que P representa o valor principal de *Cauchy*, cujo método visa atribuir valores a certas integrais próprias indeterminadas (HUANG et al., 1998).

Após a obtenção de $y(t)$, o sinal analítico pode ser estabelecido como descrito na Equação 2.9:

$$y(t) = x(t) + iy(t) = a(t)^{i\Theta(t)}, \quad (2.9)$$

onde $i = \sqrt{-1}$ e $\Theta(t) = \arctan\left(\frac{y(t)}{x(t)}\right)$.

Desse modo, a amplitude $a(t)$ e a frequência $f(t)$ instantâneas são dadas conforme as Equações 2.10 e 2.11:

$$a(t) = [x(t)^2 + y(t)^2]^{\frac{1}{2}}. \quad (2.10)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Theta(t)}{dt}. \quad (2.11)$$

Após a aplicação da Transformada de Hilbert em todas as IMFs, o sinal original $x(t)$ pode ser expresso analiticamente como descrito na Equação 2.12 (HUANG et al., 1998).

$$x(t) = \sum_{n=1}^k a(t)e^{i\Theta(t)} = \sum_{n=1}^k a(t)e^{2\pi i} \int f(t)dt \quad (2.12)$$

A apresentação final dos resultados da transformada de Hilbert-Huang é composta por uma distribuição de amplitude-tempo-frequência. Isto posto, a transformada de Hilbert Huang também é conhecida como Decomposição Empírica de Modos (EMD), e possui como características: adaptatividade (*data-driven*), as IMFs são baseadas nas propriedades locais dos sinais (*locality*), e soma perfeita (*completeness*).

Neste estudo, não foi utilizada a transformada de Hilbert em sua totalidade. Apenas o passo inicial, a EMD, foi suficiente para os objetivos da pesquisa. Assim, a análise dos sinais foi realizada diretamente no domínio do tempo.

2.5 Trabalhos Relacionados à EMD

O estudo de Rezaei e Taheri (2010) utilizou a transformada de Hilbert-Huang como técnica de análise para identificar fissuras em soldas circunferenciais de dutos de aço suspenso. Ele analisou sinais de vibração do duto por meio do EMD e THH, em conjunto com dois parâmetros sensíveis a danos diferentes. O primeiro foi um índice de danos estabelecido, denominado como EMD-EDI, com base em uma comparação de energia da primeira ou segunda IMF dos sinais de vibração, capturados antes e depois da ocorrência do dano. O segundo parâmetro foi uma avaliação do atraso na fase instantânea proveniente da THH. A vibração local do duto nas proximidades da solda foi monitorada de duas maneiras diferentes: pelo uso de sensores piezoelétricos (PZT) e pelo uso de um Vibroscópio de Doppler a Laser (LDV). Os resultados mostraram que, em todos os casos de danos, o EMD-EDI determinado com base na primeira ou segunda IMF do sensor PZT, ou nos sinais do LDV nas proximidades da fissura, pôde detectar sua presença, como também acompanhar qualitativamente o progresso do seu tamanho.

Lei et al. (2013) realizaram uma revisão sobre decomposição de modo empírico no diagnóstico de falhas de máquinas rotativas. Os autores observaram que a EMD é comumente aplicada em estudos para detectar falhas em rolamentos, engrenagens e rotores, que são considerados os principais componentes das máquinas rotativas. Nos estudos analisados, a EMD foi utilizada para processar sinais de vibração coletados das máquinas para encontrar características de falhas, com o objetivo de possibilitar a realização do monitoramento das condições de funcionamento e o diagnóstico de falhas da máquina. No entanto, observou-se que a EMD apresenta melhor desempenho na extração de características de falha de rotores do que de rolamentos e engrenagens. Alguns problemas como, efeitos de extremidade, problemas de interpolação, critério de parada e seleção do melhor IMF, foram detectados. De modo que, para superar essas limitações, métodos aprimorados de EMD, como o conjunto empírico de decomposição de modos, do

inglês, *Ensemble Empirical Mode Decomposition* (EEMD), foram desenvolvidos a fim de oferecerem melhoria em relação ao EMD original no diagnóstico de falhas de máquinas rotativas.

O artigo desenvolvido por Sharma et al. (2015) propôs a utilização da Decomposição Empírica em Modo de Conjunto (EEMD) com um algoritmo de minimização de sinal em Funções de Modo Intrínseco (IMFs) selecionadas, para reconstrução de sinais ultrassônicos em aço inoxidável austenítico de grão grosso. A metodologia utilizada foi capaz de superar o problema de mistura de modos encontrado na análise de EMD, e como resultado, mostrou um considerável aumento na relação sinal-ruído (SNR) para os sinais ultrassônicos obtidos a partir de defeitos artificiais em diferentes profundidades, quando comparados com a abordagem convencional.

A pesquisa de Abdelkader, Khorchef e Zergou (2020) aborda uma técnica híbrida de diagnóstico de falhas com base na EMD e no filtro Savitzky-Golay (SG), para extrair informações sobre o estado dos materiais a partir de sinais de RMB medidos. Esse filtro se torna útil uma vez que o sinal do RMB pode ser corrompido por sinais de interferência de outras fontes durante a medição, e informações sobre o estado do material podem ser perdidas. Inicialmente, os autores utilizam a EMD para decompor o sinal do RMB em IMFs, posteriormente, a energia de cada IMF é calculada para selecionar os modos úteis. As IMFs selecionadas são filtradas pelo filtro SG e o sinal reconstruído é obtido pelas IMFs tratadas. Os resultados obtidos demonstram que as informações sobre o estado dos materiais com a metodologia proposta se mostraram mais eficientes em comparação com o uso do sinal medido.

Khalid et al. (2021) utilizaram a transformada de Hilbert-Huang para realizar a avaliação e caracterização de Aço Doce Soldado (E-6013) mediante testes ultrassônicos. O estudo proposto avaliou as propriedades mecânicas de peças de aço carbono soldadas e tratadas termicamente a diferentes temperaturas. O processo de tratamento térmico ou envelhecimento artificial altera tanto as propriedades mecânicas quanto as características dos sinais ultrassônicos. Desse modo, os sinais adquiridos nos testes foram categorizados em termos de diferentes níveis de envelhecimento térmico através da THH. Observou-se que a energia da THH diminui com o aumento da temperatura de tratamento térmico em grãos maiores que, portanto, oferece mais resistência ao sinal.

Yan e Tang (2023) desenvolveram um método para diagnóstico precoce de danos por fadiga em peças de aço inoxidável 316L fabricadas pela tecnologia de fusão a laser seletiva (SLM). Foi proposto um novo método de avaliação de dano precoce por fadiga com base em testes ultrassônicos não lineares. Para cada sinal de teste ultrassônico instável foi aplicado a EMD, decompondo o sinal em múltiplas IMFs, em que foi extraída uma IMF específica (ESI) contendo informações eficazes de dano por fadiga. Com a finalidade de obter as informações necessárias para avaliar o dano na parte medida causado por

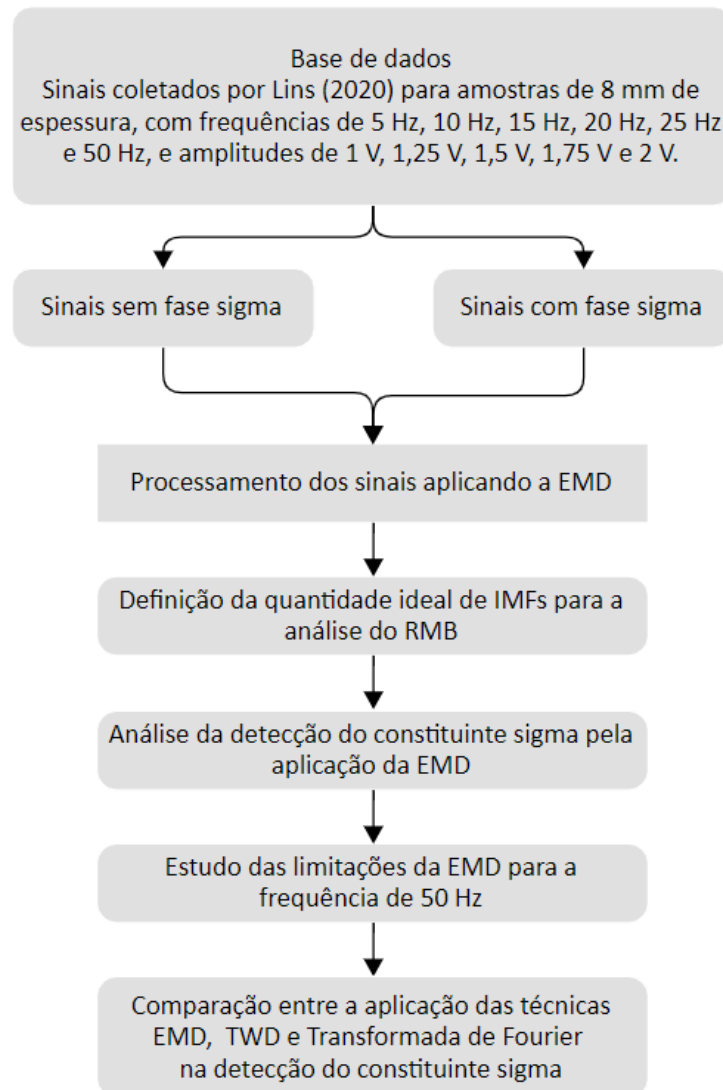
fadiga, a transformada rápida de Fourier (FFT) foi aplicada ao sinal IMF específico. Os resultados obtidos no estudo concordaram com a análise experimental por microscópio eletrônico de transmissão e o modelo teórico de não linearidade acústica causado por discordâncias. Os autores concluíram que, em comparação com o método clássico de FFT, o método EMD-ESI-FFT é mais sensível na identificação do dano precoce em peças de aço inoxidável 316L fabricadas por SLM induzido pelo carregamento de fadiga. Visto que, os sinais ultrassônicos possuem características não lineares e instáveis, e o processamento de sinal por meio da FFT não consegue filtrar efetivamente os sinais de interferência no sinal ultrassônico.

A análise do estado da arte dos últimos anos corrobora que a EMD se destaca como ferramenta de processamento de sinais para monitoramento da integridade e diagnósticos de falhas em peças de aços inoxidáveis. Neste estudo, utiliza-se a EMD para detectar a presença da microestrutura prejudicial sigma em aço inoxidável duplex, por meio da análise do RMB obtido a partir de ensaios eletromagnéticos.

3 METODOLOGIA

A metodologia proposta nesta pesquisa para detecção de microestruturas prejudiciais de fase sigma em um aço do tipo AID 2205, se baseia na análise do Ruído Magnético de Barkhausen a partir da Decomposição Empírica de Modos. A primeira seção tratará da obtenção da base de dados. Em seguida, aborda-se o processamento dos sinais mediante a EMD, os quais são decompostos em funções de modo intrínseco (IMF, do inglês *Intrinsic Mode Functions*). Posteriormente, cada IMF é submetida à Transformada de Fourier e ao cálculo da Raiz Média Quadrática (RMS). A Figura 18 apresenta o fluxograma da metodologia proposta.

Figura 18 – Fluxograma da metodologia proposta



Fonte: elaborado pela autora, 2024

3.1 Obtenção da base de Dados

Os sinais estudados neste trabalho foram oriundos da pesquisa de Lins (2020), mediante a utilização da bancada de teste elaborada e disponibilizada pelo laboratório do Grupo de Simulação de Comportamento dos Materiais (GSCMat) do IFPB. Para a captura dos sinais de RMB foram realizados ensaios eletromagnéticos não destrutivos (END), capazes de detectar fases prejudiciais em materiais ferromagnéticos. A seguir será descrita toda a metodologia utilizada por Lins (2020), bem como os materiais utilizados.

3.1.1 Material de Estudo

Lins (2020) utilizou dois corpos de prova, que fazem parte do acervo do GSCMat, usinados pelo processo de eletroerosão em formato circular, com diâmetro de 24 mm e espessura de 8 mm. A composição química do material do corpo de prova pode ser observada na Tabela 3, que exibe os valores em percentual de peso.

Tabela 3 – Composição do AID SAF 2205, como recebido, em percentual de peso

| Aço Inoxidável Duplex SAF 2205 | | | | | | | |
|---------------------------------------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| C | Mn | P | S | Si | Cr | Ni | Co |
| 0,018 | 1,480 | 0,019 | 0,001 | 0,450 | 22,220 | 5,590 | 0,130 |
| Cu | Mo | N | Nb | Al | Sn | Ce | Fe |
| 0,280 | 3,080 | 0,180 | 0,021 | 0,003 | 0,012 | 0,020 | 66,496 |

Fonte: adaptado de (CARVALHO FILHO, 2018)

Uma amostra permaneceu como recebida, sem tratamento térmico, e a outra foi envelhecida em um forno de resistência, durante um tempo de 15 minutos a uma temperatura de 850 °C, e posteriormente resfriada em água. Em seguida, as amostras foram preparadas por etapas de lixamento, polimento e ataque químico com reagente KOH 10%, e analisadas por microscopia óptica. Esse tratamento é capaz de gerar 4% de fase sigma no material, o que é considerado suficiente para ocasionar a fragilização do aço em análise, afetando diretamente a microestrutura do material e prejudicando suas características mecânicas (TAVARES et al., 2010).

3.1.2 Bancada Experimental

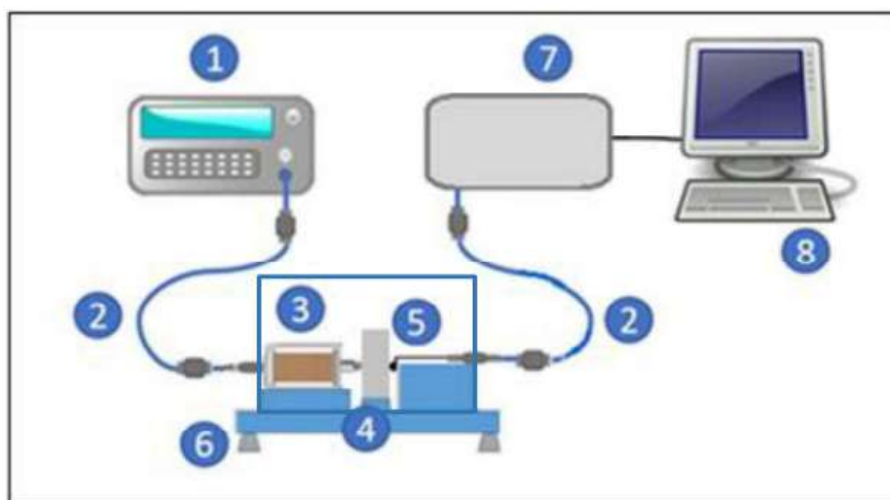
A bancada experimental utilizada por Lins (2020) foi desenvolvida no laboratório do GSCMat do IFPB, para ensaios eletromagnéticos, e é composta por dois módulos principais. O primeiro é o módulo de emissão dos sinais, que inclui um gerador de funções e uma bobina emissora, posicionada no centro de uma das faces do corpo de prova, com a finalidade de gerar uma densidade de fluxo magnético no material. O segundo é o módulo de aquisição dos sinais, que consiste em um sensor de efeito Hall, posicionado no centro da outra face do corpo de prova, com o objetivo de capturar os sinais resultantes do ensaio,

provenientes da interação entre a onda emissora e o material. Esse módulo também é composto por uma placa de aquisição de dados e um computador.

A placa de aquisição de dados, desenvolvida no projeto Grades/Endesa do GSCMat do IFPB, estabelece conexão entre o sensor e o computador por meio de cabos USB. A aquisição automática dos dados é realizada pelo computador utilizando o programa Permeabilidade GSCMat, também desenvolvido pelo grupo.

A bobina utilizada possui dimensões de 19,5 mm de comprimento e é composta por 6000 espiras de fios de cobre esmaltado de calibre nº 38. Ela envolve um núcleo de aço AISI 4140. O sensor selecionado é o modelo SS495A da Allegro Microsystems, um sensor de efeito Hall linear. Esse sensor possui sensibilidade de 3,125 mVolts/Gauss e opera com uma faixa de tensão de alimentação de até 10 V. No experimento, o sensor é alimentado com uma tensão contínua de 5 V. A configuração da bancada experimental pode ser observada na Figura 19.

Figura 19 – Configuração experimental com sensor de efeito Hall: (1) gerador de sinais, (2) cabos blindados, (3) bobina emissora, (4) amostra, (5) sensor de efeito Hall, (6) bancada de testes com gaiola de Faraday, (7) placa de aquisição de dados e (8) computador



Fonte: (LINS, 2020)

3.1.3 Parâmetros dos Sinais a Serem Utilizados

O objetivo da pesquisa de Lins (2020) foi identificar a onda emissora ideal que proporcionasse uma amplitude de medida de RMS capaz de diferenciar as duas condições de amostras e, assim, apresentasse uma maior sensibilidade para acompanhar a formação da fase fragilizante sigma. A autora aplicou na bobina emissora sinais de ondas senoidais com frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz e 50 Hz e amplitudes de 0,25 V, 0,5 V, 0,75 V, 1 V, 1,25 V, 1,5 V, 1,75 V, 2 V, 3 V, 5 V, 7 V e 9 V. Os sinais com as respostas do RMB foram capturados a uma aquisição de 1000 pontos a cada 1 ms. Para

cada amostra, foram adquiridas 50 medidas, para cada arranjo de frequência e amplitude, visando uma maior redução da margem de erro.

Em seus resultados, Lins (2020) concluiu que para as frequências estudadas, a melhor região de amplitude de medida é na faixa de 1 V a 2 V. Isto posto, para este trabalho, foram considerados os sinais obtidos com frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz e 50 Hz e amplitudes de 1 V, 1,25 V, 1,5 V, 1,75 V e 2 V. A Tabela 4 apresenta um resumo dos parâmetros dos sinais utilizados nesta pesquisa capturados nas amostras de 8 mm.

Tabela 4 – Parâmetros dos sinais utilizados neste estudo para os dois corpos de prova de 8 mm, um com a formação de fase sigma e outro sem formação

| Parâmetros das ondas emissoras | |
|---------------------------------------|--|
| Tipo de onda | Senoidal |
| Frequências | 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz e 50 Hz |
| Amplitudes | 1 V, 1,25 V, 1,5 V, 1,75 V e 2 V |
| Tempo de aquisição | 1000 pontos a cada 1 ms |
| Quantidade de sinais | 50 |

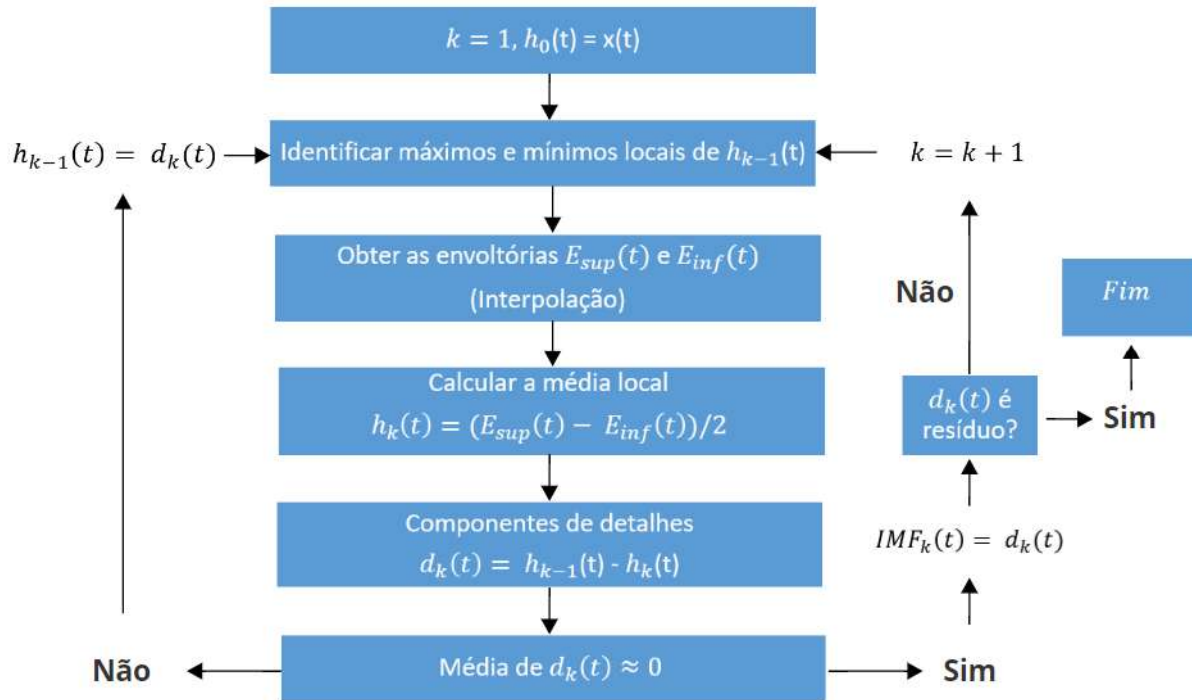
Fonte: adaptado de (LINS, 2020)

3.2 EMD aplicada aos sinais de RMB adquiridos nos ensaios eletromagnéticos

A partir dos sinais medidos por (LINS, 2020), realizou-se nesta pesquisa, a etapa de processamento desses por meio da EMD. Foi aplicada a decomposição empírica de modos do sinal original em funções de modo intrínseco. Após, foi feita a análise do espectro resultante mediante a Transformada Fourier, que calculou a frequência instantânea de cada IMF (HUANG et al., 1998).

Para os sinais em análise, aplicou-se a EMD em cada um deles, com a finalidade de obter as IMFs. Como o algoritmo do método da EMD, que pode ser observado na Figura 20, garante que qualquer sinal $x(t)$ possa ser decomposto em um número finito de n iterações gerando suas IMFs, formando uma base de expansão adaptável obtida a partir do próprio sinal, nesta primeira etapa optou-se por não fixar a quantidade de IMFs a serem decompostas, e observar qual era o número máximo que cada sinal poderia ser decomposto.

Figura 20 – Algoritmo do método EMD



Fonte: adaptado de (VIEIRA, 2018)

Para analisar as propriedades das componentes de frequência de cada IMF, foi calculado a FFT para cada uma delas. O parâmetro utilizado para mensurar o RMB foi o RMS com um intervalo de confiança de 95%, calculado em cada IMF. Esse valor permite obter de forma escalar o valor do ruído, que no RMB, é dado na grandeza de tensão elétrica, em volts. Isto posto, o valor de RMS pode ser descrito como na Equação 3.1.

$$RMB_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_i^2}. \quad (3.1)$$

Em que o RMB_{rms} é o valor de RMS (raiz quadrada do valor quadrático médio) do sinal Barkhausen em Volts, c_i corresponde ao valor das amplitudes da i -ésima IMF e N é o número de amostras.

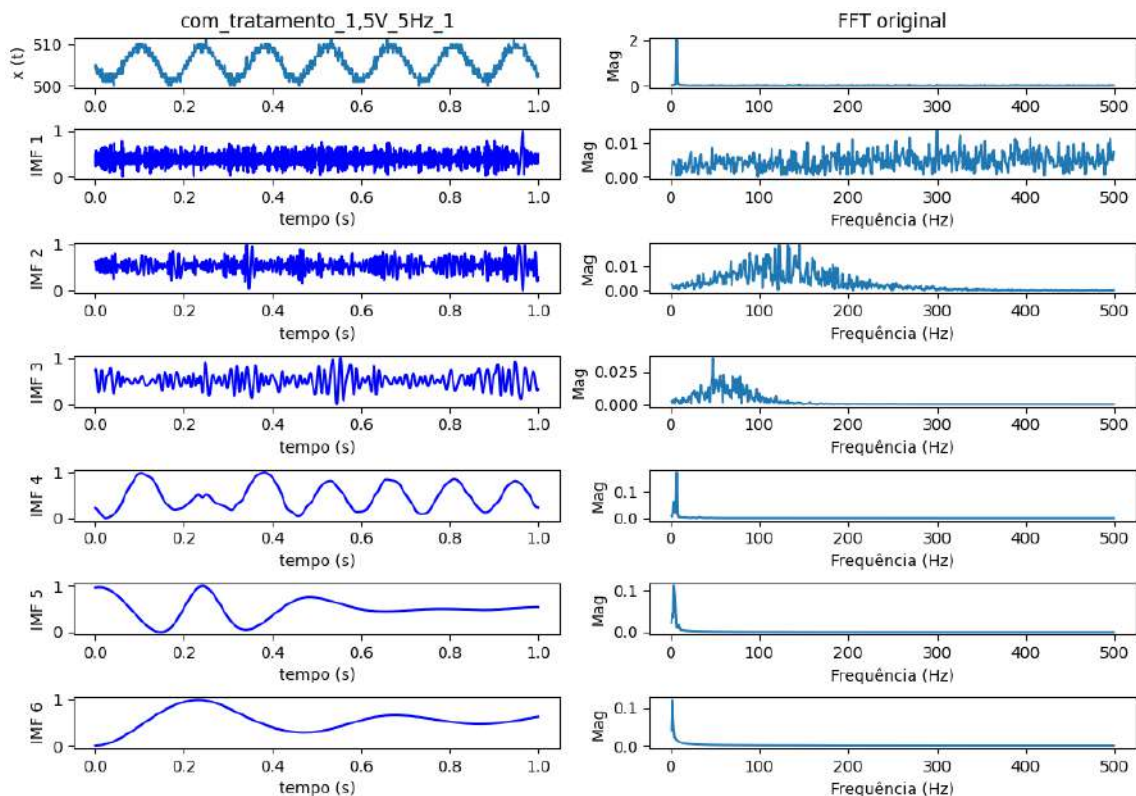
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados estão divididos em quatro seções, em que a primeira traz um estudo para identificar a quantidade ideal de Funções de Modo Intrínseco que possibilita a análise do RMB. Posteriormente, realiza-se uma análise da eficiência da técnica de EMD para detecção do constituinte prejudicial sigma, bem como suas limitações. Por fim, tem-se uma comparação entre os resultados da aplicação das técnicas EMD, TWD e FFT na diferenciação das condições com e sem a presença de fase sigma.

4.1 Estudo da quantidade ideal de IMFs para a análise do RMB

Nesta seção, será apresentado um estudo para determinar a quantidade ideal de IMFs capaz de analisar o RMB, e assim possibilitar a detecção da presença da fase fragilizante sigma. A Figura 21 apresenta a Decomposição Empírica de Modos, de um sinal obtido para a amostra com tratamento térmico, submetida a uma onda senoidal de 5 Hz e amplitude 1,5 V. Na primeira linha, tem-se do lado esquerdo o sinal senoidal somado ao ruído, e do lado direito a sua respectiva frequência. As próximas linhas compõem as Funções de Modo Intrínseco.

Figura 21 – Decomposição em IMFs do sinal medido com RMB coletado da amostra com tratamento térmico, submetida à frequência de 5 Hz e amplitude de 1,5 V



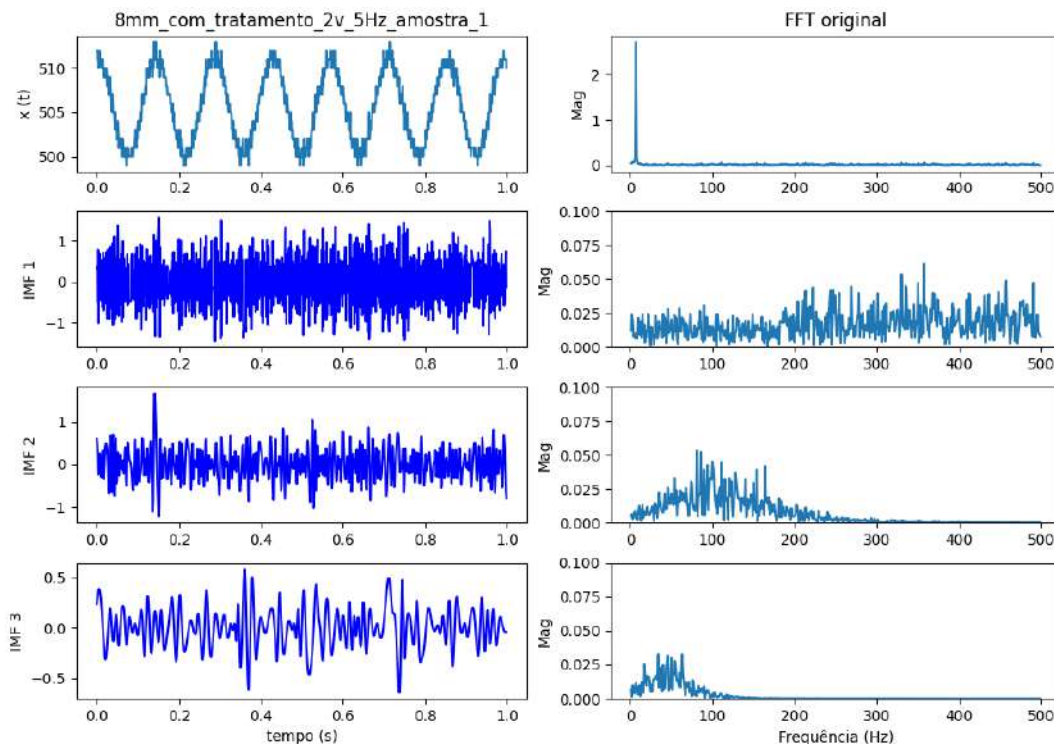
Fonte: elaborado pela autora, 2023

Foram considerados na EMD, seis níveis de interação, em que as três primeiras IMFs de cima para baixo apresentam características ruidosas, portanto, portam componentes do RMB. A quarta indica a frequência fundamental do sinal, e a partir da quinta IMF não é mais apresentado nenhuma informação relevante, onde as IMFs a seguir são constituídas apenas de oscilações. O mesmo padrão foi observado na decomposição dos demais sinais para as frequências de 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz e 50 Hz.

Esse fenômeno pode ser explicado devido ao comportamento característico da própria EMD, a qual realiza uma separação entre as altas frequências e baixas frequências do sinal para compor suas IMFs. De modo que a primeira IMF é formada pelas componentes de detalhe do sinal (altas frequências), as quais apresentam oscilações mais rápidas, e posteriormente há uma redução no número de extremos nas próximas IMFs à medida que o índice de decomposição aumenta. A separação entre componentes de altas e de baixas frequências é repetida de forma iterativa, chegando-se a um conjunto de IMFs e a um resíduo de baixas frequências (VIEIRA, 2018).

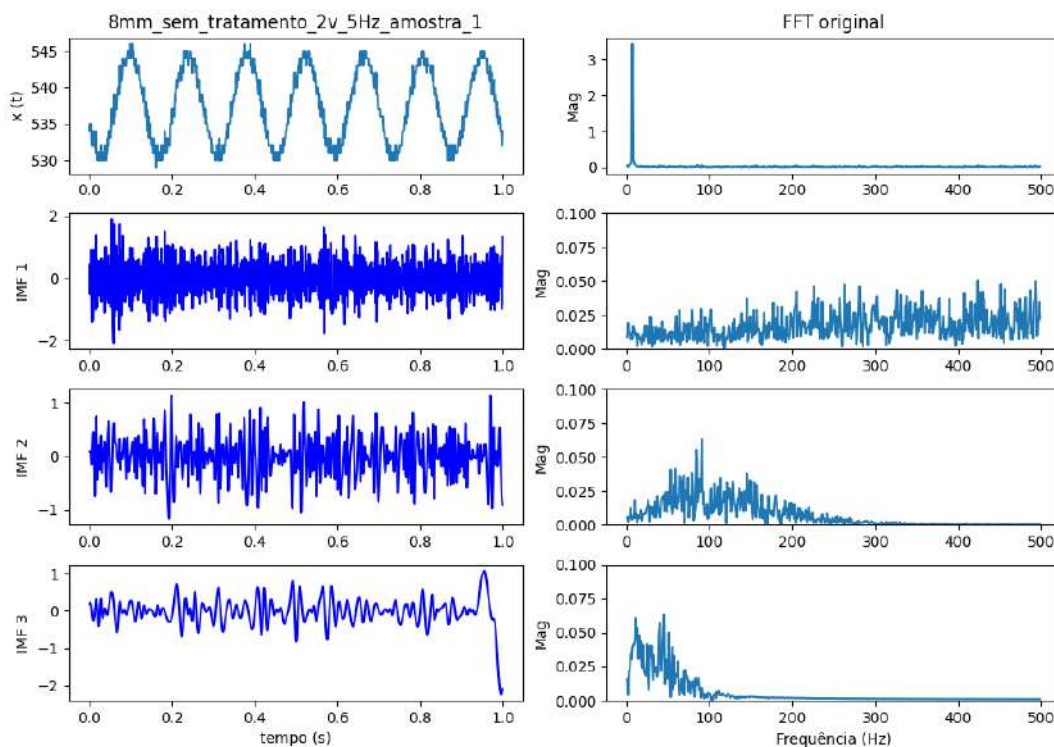
Uma vez que o sinal de RMB foi localizado dentre as IMFs, o algoritmo foi parametrizado para que a decomposição ocorresse até a terceira IMF, conforme apresentado nas Figuras 22 e 23, as quais ilustram a decomposição dos sinais coletados das amostras com e sem tratamento térmico, respectivamente, ambas submetidas a uma frequência de 5 Hz e amplitude de 2 V. Ao analisar a decomposição dos sinais, juntamente com seus espectros de Fourier para cada IMF, percebeu-se que apenas a primeira IMF continha as informações necessárias para a análise do RMB. Isso porque as transformadas de Fourier das segundas e terceiras IMFs mostram a influência das baixas frequências, indicando a presença dos harmônicos da onda principal.

Figura 22 – Decomposição do sinal medido com RMB coletado da amostra com tratamento térmico, submetida à frequência de 5 Hz e amplitude de 2 V



Fonte: elaborado pela autora, 2023

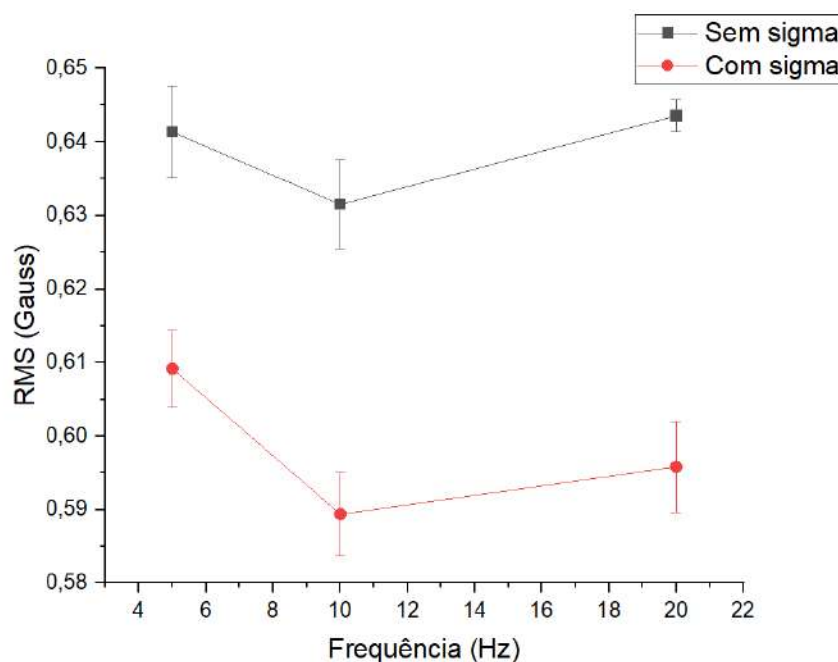
Figura 23 – Decomposição do sinal medido com RMB coletado da amostra sem tratamento térmico, submetida à frequência de 5 Hz e amplitude de 2 V.



Fonte: elaborado pela autora, 2023

A eficiência da utilização apenas da primeira IMF para a análise do RMB pode ser verificada no gráfico da Figura 24, que exibe os valores de RMS em função da frequência da onda emissora com amplitude de 2 V. Os valores de RMS estão expressos em Gauss, pois o sensor de efeito Hall mede a intensidade do campo magnético. Os resultados demonstram que o RMB contido no primeiro nível de decomposição da EMD foi suficiente para diferenciar as condições com e sem formação de fase fragilizante sigma. Percebe-se que a condição com fase fragilizante possui valores RMS inferiores aos das amostras como recebido, sem formação de precipitados. Isso indica que a amplitude da onda aplicada não foi suficiente para que as paredes dos domínios magnéticos conseguissem vencer as barreiras impostas pelos pontos de ancoragem do material com fase sigma, resultando em um baixo RMB. Além disso, o paramagnetismo do constituinte sigma tem sua contribuição (SILVA et al., 2016a).

Figura 24 – Variação do RMS em função da frequência da onda emissora com amplitude de 2 V, para as condições com e sem formação de fase sigma



Fonte: elaborado pela autora, 2023

4.2 Análise da detecção do constituinte sigma pela aplicação da EMD

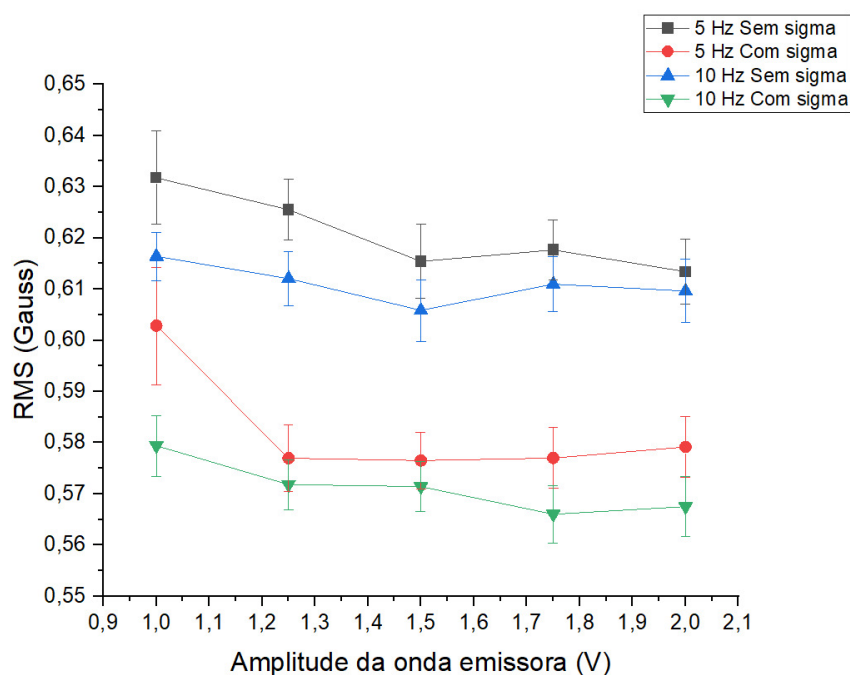
Os gráficos apresentados nas Figuras 25, 26, 27 e 28, exibem os valores RMS do sinal captado pelo sensor Hall em função da amplitude da onda emissora, para 1,0 V, 1,25 V, 1,50 V, 1,75 V e 2,0 V. A análise busca verificar a melhor região de trabalho, que apresente um maior valor RMS entre o material com e sem a formação de fase prejudicial sigma.

O estudo mostrou que a EMD permite a detecção do constituinte sigma em um aço inoxidável duplex para as frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz e 50 Hz.

Em que para todas essas frequências é possível observar a diferença entre os valores RMS das condições com e sem a presença de sigma. Ademais, percebeu-se ainda, que os sinais oriundos das amostras com fase sigma apresentaram valores de RMS inferiores aos das amostras sem a fase fragilizante. Desse modo, entende-se que as amplitudes de 1 V a 2 V não foram suficientes para gerar um campo magnético capaz de permitir que as paredes dos domínios magnéticos vencessem todas as barreiras impostas pela fase sigma. Uma vez que o efeito do paramagnetismo dessa fase contribui para a diminuição da permeabilidade do material.

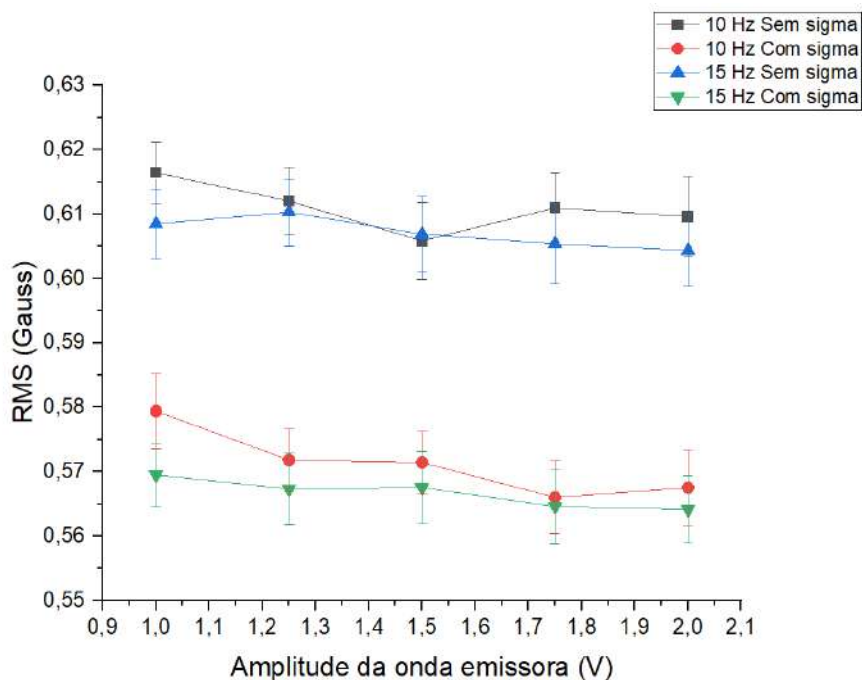
A amplitude de 1,25 V apresentou melhor região de trabalho para as frequências 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz e 25 Hz, oferecendo uma maior resolução para detectar a presença da fase prejudicial sigma.

Figura 25 – Variação do RMS em função da amplitude da onda emissora para as frequências de 5 Hz e 10 Hz, para as condições com e sem formação de fase sigma



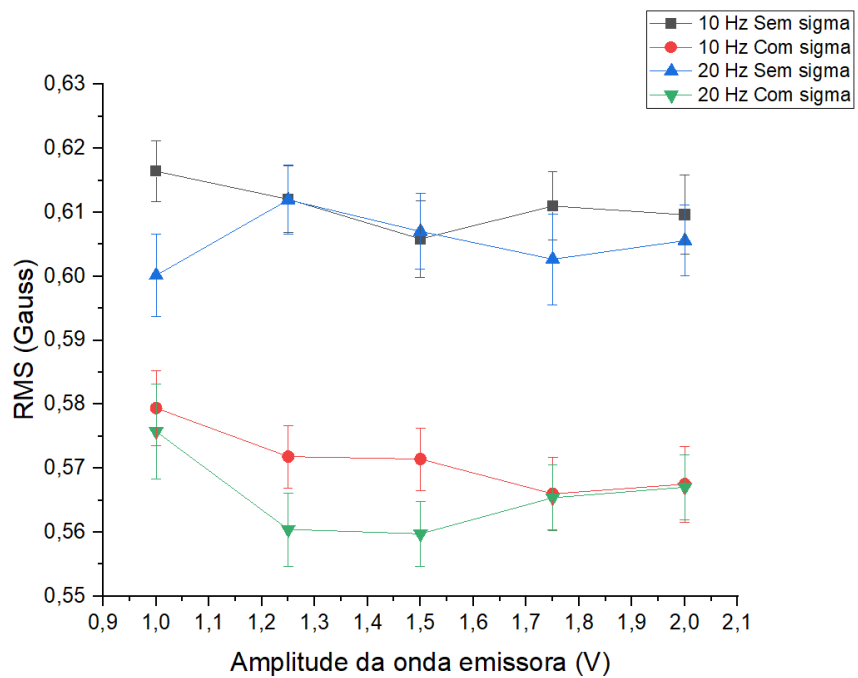
Fonte: elaborado pela autora, 2024

Figura 26 – Variação do RMS em função da amplitude da onda emissora para as frequências de 10 Hz e 15 Hz, para as condições com e sem formação de fase sigma



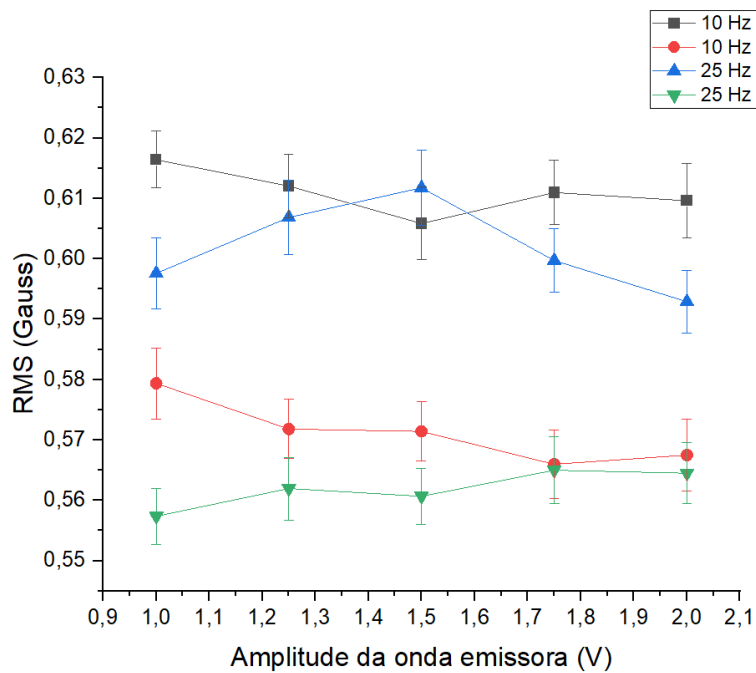
Fonte: elaborado pela autora, 2024

Figura 27 – Variação do RMS em função da amplitude da onda emissora para as frequências de 10 Hz e 20 Hz, para as condições com e sem formação de fase sigma



Fonte: elaborado pela autora, 2024

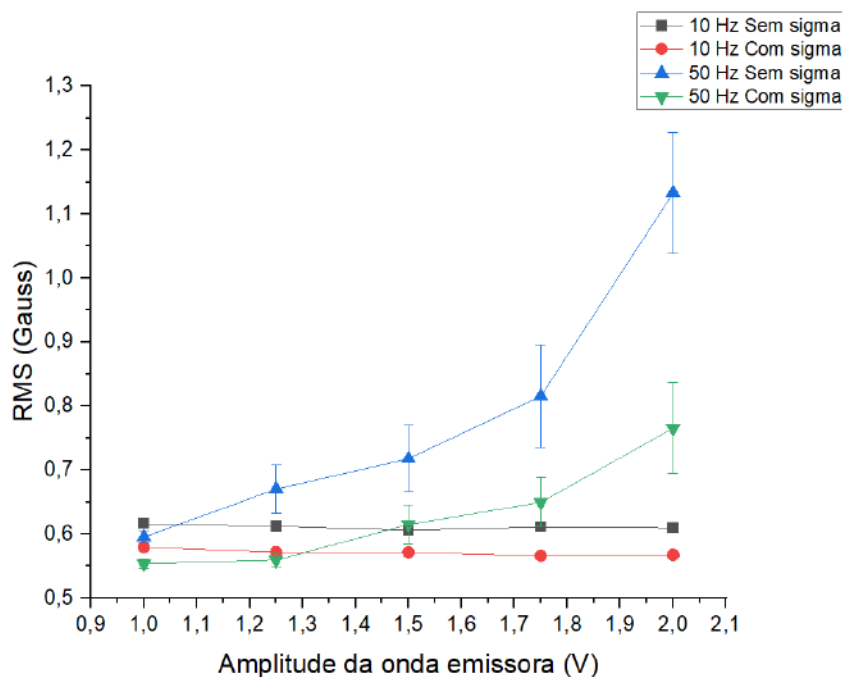
Figura 28 – Variação do RMS em função da amplitude da onda emissora para as frequências de 10 Hz e 25 Hz, para as condições com e sem formação de fase sigma



Fonte: elaborado pela autora, 2024

No entanto, embora a técnica tenha se mostrado eficaz para as frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz e 25 Hz, a frequência de 50 Hz apresentou um comportamento diferente. À medida que a amplitude aumenta, os valores de RMS também aumentam. Ainda assim, é possível diferenciar as condições com e sem a presença da fase sigma nos sinais da frequência de 50 Hz. A Figura 29 mostra a variação do RMS em função da amplitude da onda emissora para as frequências de 10 Hz e 50 Hz. Nota-se que para valores de amplitude a partir de 1,25 V ocorre um crescimento dos valores de RMS para as ondas com frequências de 50 Hz. Este comportamento será discutido na seção 4.3.

Figura 29 – Variação do RMS em função da amplitude da onda emissora para as frequências de 10 Hz e 50 Hz, para as condições com e sem formação de fase sigma

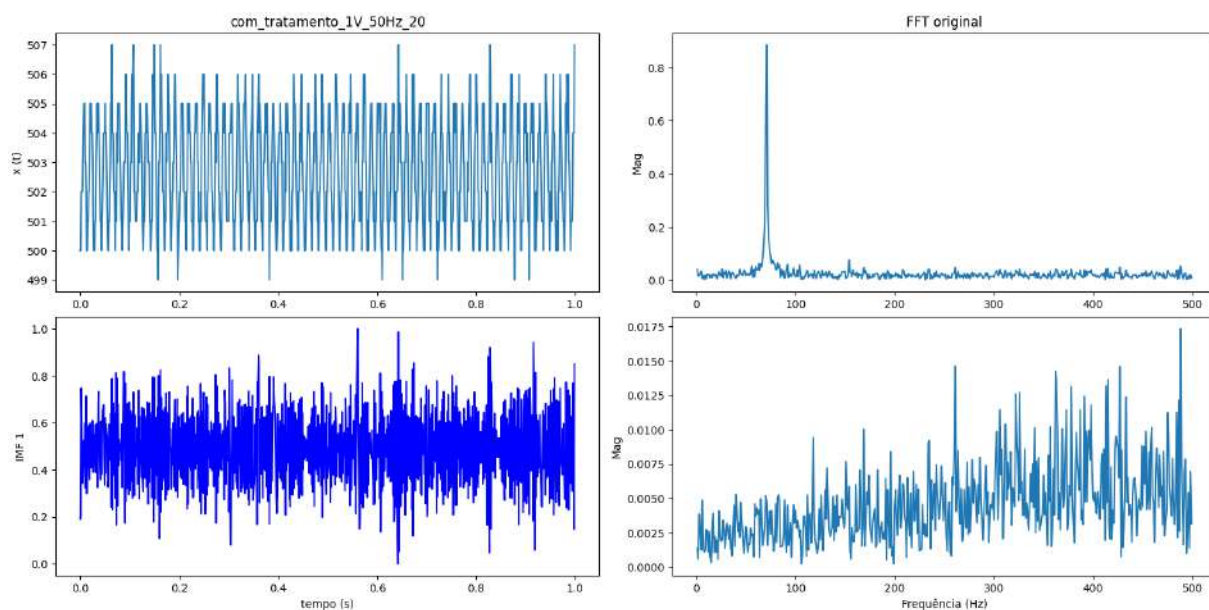


Fonte: elaborado pela autora, 2024

4.3 Limitações da EMD para a frequência de 50 Hz

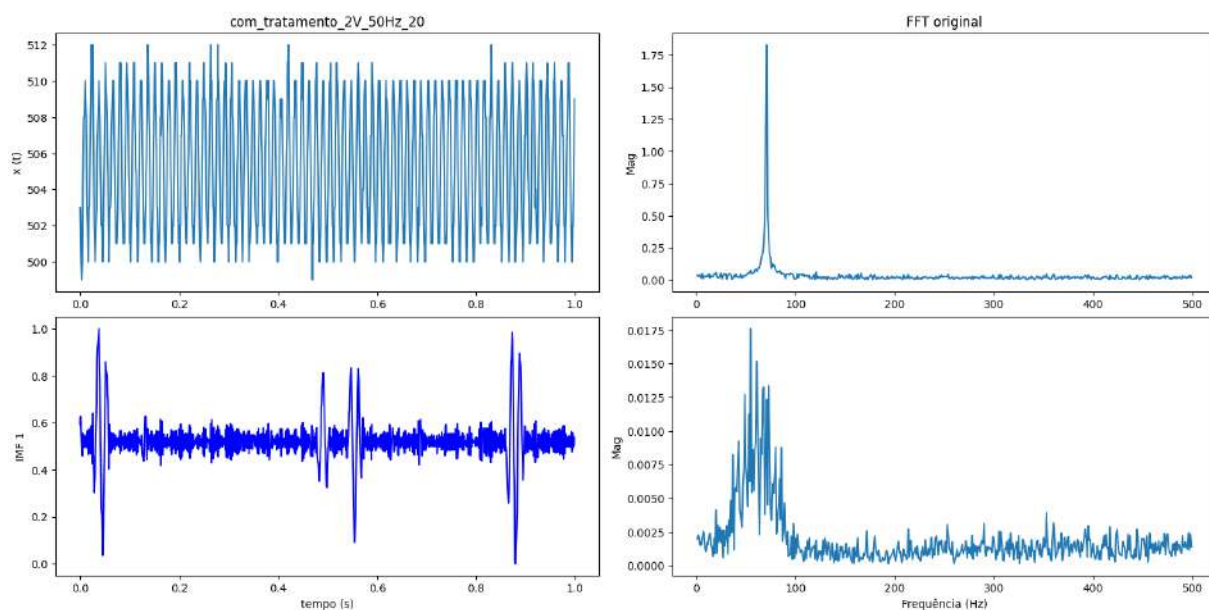
Para uma melhor compreensão do efeito causado pela frequência de 50 Hz, na qual o valor RMS aumentou mediante a elevação da amplitude da onda aplicada ao sinal emitido, foi realizada uma análise dos sinais coletados para a frequência de 50 Hz e amplitudes de 1 V e 2 V, tanto nas condições com fase sigma quanto sem fase sigma. Vale a pena salientar que a análise levou em consideração apenas o comportamento da primeira IMF, que foi o nível de decomposição adotado para o estudo do RMB. As Figuras 30, 31, 32 e 33, apresentam o comportamento da IMF 1, para a amplitude de 1 V. Percebe-se que em ambas as condições, com e sem sigma, é apresentado um comportamento esperado na decomposição, de acordo com o observado nos sinais das frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz e 25 Hz. Entretanto, a amplitude de 2 V revelou distorções e oscilações com diferentes escalas de tempo misturadas em uma mesma função de modo intrínseco.

Figura 30 – Comportamento da IMF 1 de um sinal de 1 V e 50 Hz submetido à EMD na condição com fase sigma



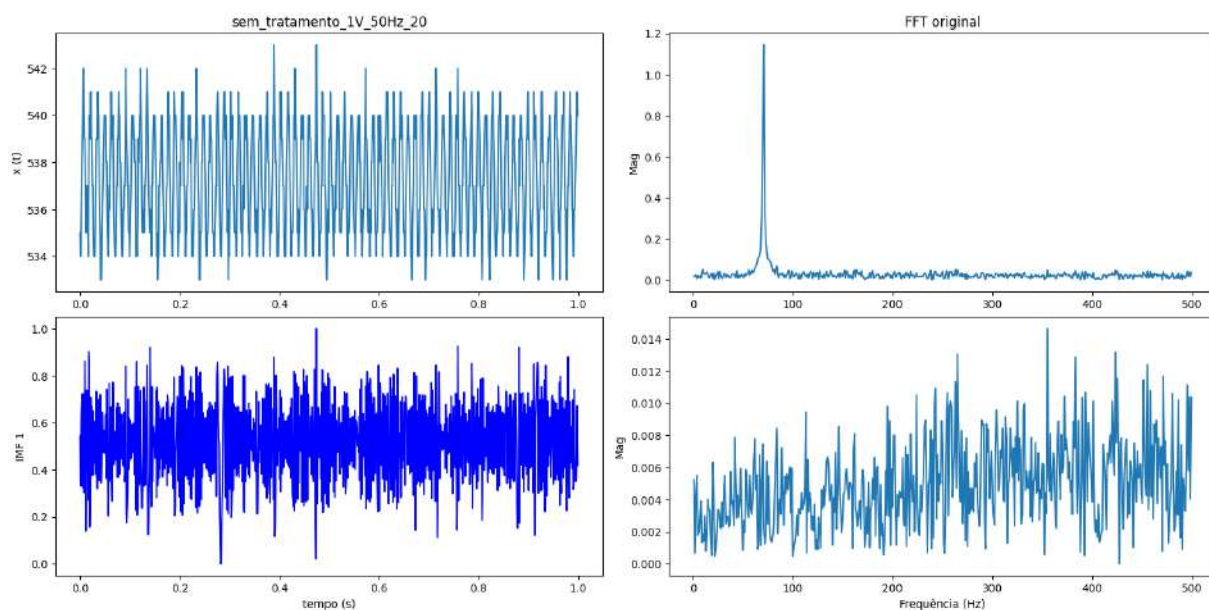
Fonte: elaborado pela autora, 2024

Figura 31 – Comportamento da IMF 1 de um sinal de 2 V e 50 Hz submetido à EMD na condição com fase sigma



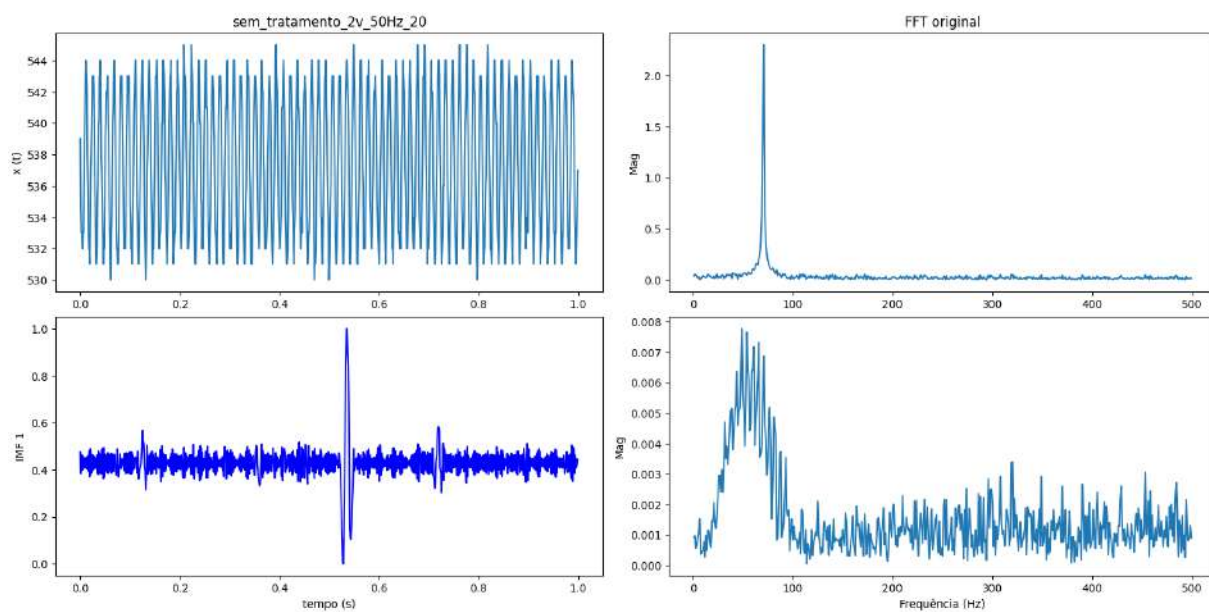
Fonte: elaborado pela autora, 2024

Figura 32 – Comportamento da IMF 1 de um sinal de 1 V e 50 Hz submetido à EMD na condição sem fase sigma



Fonte: elaborado pela autora, 2024

Figura 33 – Comportamento da IMF 1 de um sinal de 2 V e 50 Hz submetido à EMD na condição sem fase sigma



Fonte: elaborado pela autora, 2024

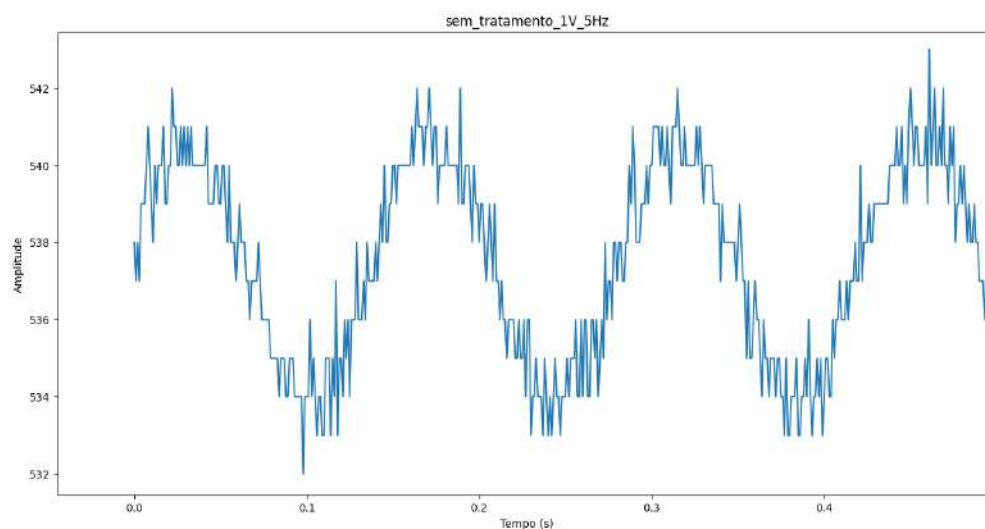
Esse fenômeno pode ser explicado devido algumas limitações do método EMD, que embora demonstre a capacidade de decompor sinais não lineares e não estacionários, o problema da mistura entre modos e os efeitos de extremidade podem ocorrer durante o processamento do algoritmo. A mistura entre modos (*mode mixing*) acontece quando sinais com diferentes escalas de frequência são misturadas em uma mesma IMF ou quando sinais com escalas parecidas são distribuídas em diferentes IMFs. A ocorrência de mistura entre modos implica na transferência de energia de um modo para os modos adjacentes. Os efeitos de bordas podem surgir especialmente nas extremidades do sinal, onde a identificação de pontos extremos locais pode ser inadequada devido à falta de dados suficientes, o que pode resultar em IMFs mal definidas nas extremidades do sinal (VIEIRA, 2018).

Como mostrado nas Figuras 31 e 33, para a amplitude de 2 V, as distorções estão ocorrendo principalmente no meio da IMF e não nas extremidades, isso sugere que seja um problema relacionado à mistura entre modos, onde componentes de frequências diferentes estão sendo erroneamente agrupados em uma IMF.

É interessante notar que o problema de mistura entre modos não foi observado na primeira IMF para as frequências mais baixas (5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz e 25 Hz), mas foi percebido na primeira IMF para a frequência de 50 Hz. Como o processo de decomposição da EMD depende da identificação precisa dos pontos extremos locais no sinal para determinar as IMFs, uma possível razão para essa diferença de comportamento na decomposição de sinais com frequência de 50 Hz e as demais frequências estudadas é a clareza na identificação dos pontos extremos nas frequências de 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz e 25 Hz.

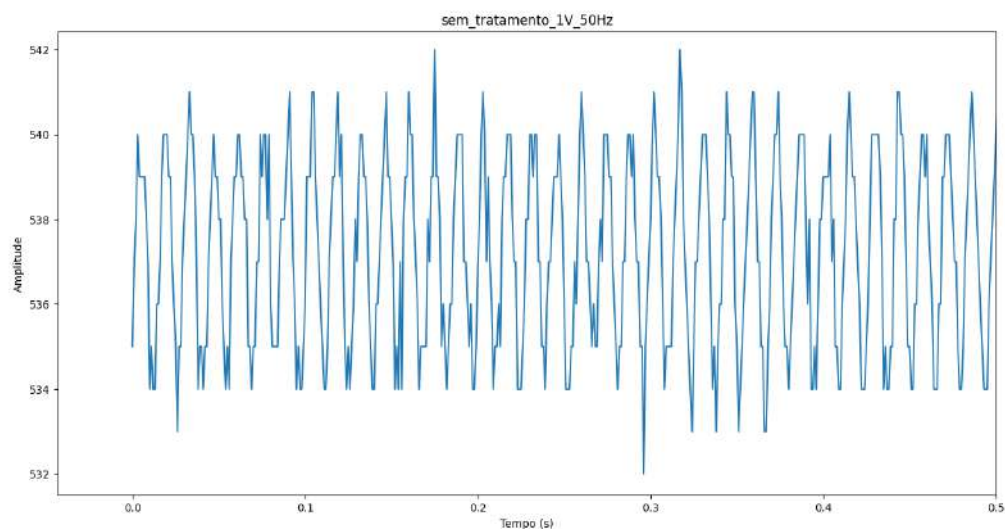
Pois, entende-se ser menos provável que ocorra a mistura entre modos em frequências onde os pontos extremos são mais bem definidos, em que o ruído está presente ao longo de todo o sinal, seguindo o formato da onda, como em sinais de baixas frequências (por exemplo, 5 Hz). No entanto, à medida que a frequência aumenta, o ruído tende a se concentrar nas extremidades da senoide, tornando-se um obstáculo para que a EMD consiga diferenciar o ruído do sinal. As Figuras 34 e 35 apresentam o comportamento do sinal com o ruído, no domínio do tempo, para as frequências de 5 Hz e 50 Hz, respectivamente, na condição sem fase sigma.

Figura 34 – Comportamento do Sinal de 1 V e 5 Hz, no Domínio do Tempo, na Condição sem Fase Sigma



Fonte: elaborado pela autora, 2024

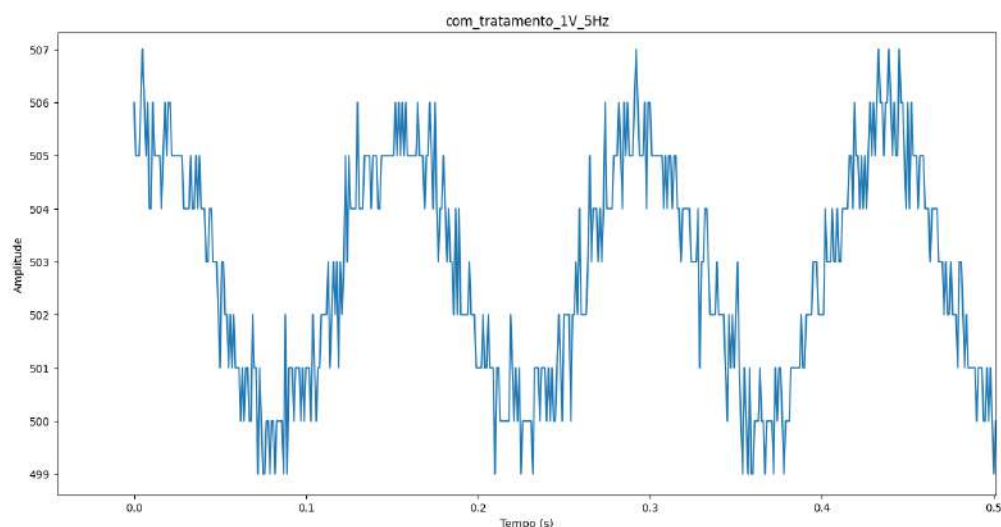
Figura 35 – Comportamento do Sinal de 1 V e 50 Hz, no Domínio do Tempo, na Condição sem Fase Sigma



Fonte: elaborado pela autora, 2024

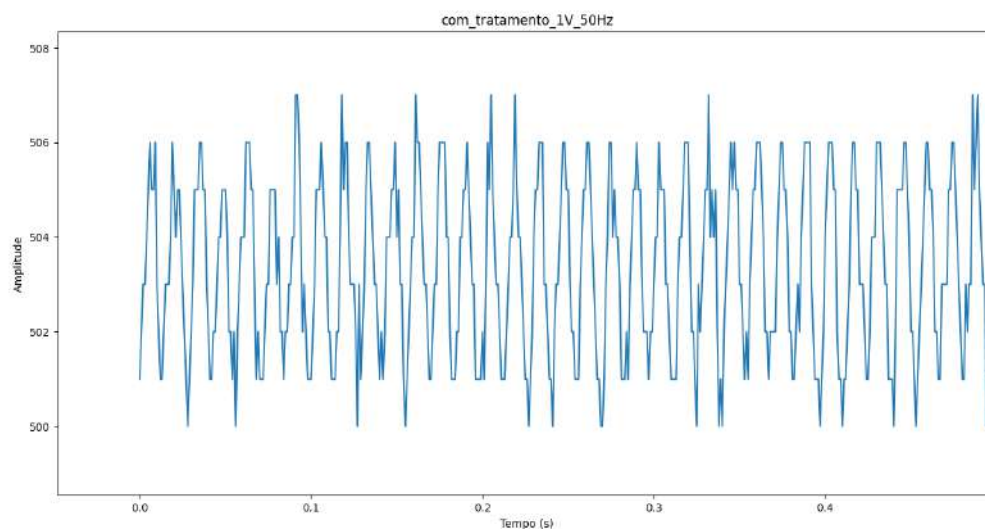
As Figuras 36 e 37 apresentam o comportamento do sinal com o ruído, no domínio do tempo, para as frequências de 5 Hz e 50 Hz, respectivamente, na condição com fase sigma.

Figura 36 – Comportamento do Sinal de 1 V e 5 Hz, no Domínio do Tempo, na Condição com Fase Sigma



Fonte: elaborado pela autora, 2024

Figura 37 – Comportamento do Sinal de 1 V e 50 Hz, no Domínio do Tempo, na Condição com Fase Sigma



Fonte: elaborado pela autora, 2024

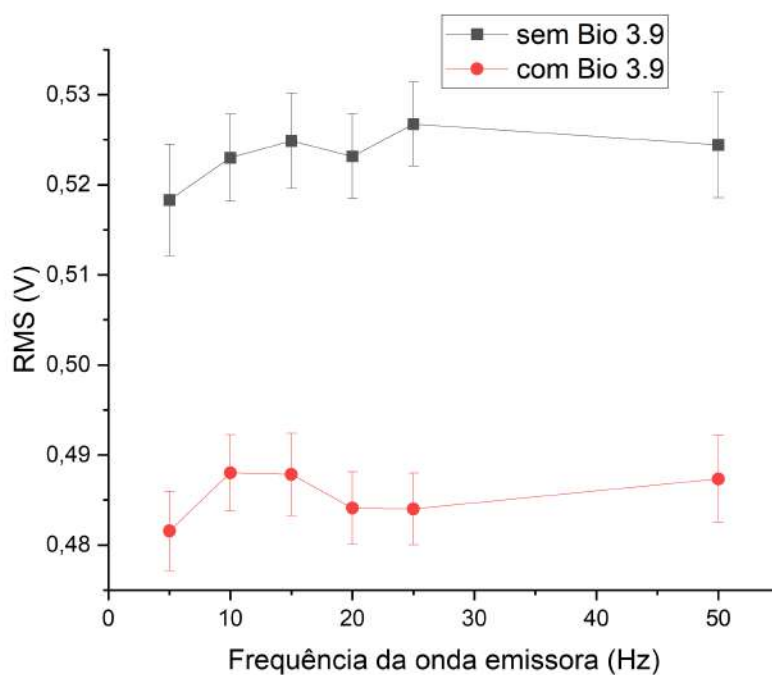
4.4 Comparação entre a aplicação da Decomposição Empírica de Modos, a Transformada Wavelet Discreta e a Transformada Rápida de Fourier para a amplitude de 1,5 V e frequências de 5 Hz e 25 Hz

Alencar (2022) empregou a Transformada Wavelet Discreta na análise de sinais obtidos durante um ensaio eletromagnético conduzido com um sensor de efeito Hall, realizado em duas amostras do material AID SAF 2205, uma com tratamento térmico e

outra sem. O objetivo foi detectar a presença do constituinte prejudicial sigma por meio da análise do Ruído Magnético de Barkhausen. Para este propósito, a autora baseou-se nos sinais previamente estudados por Lins (2020), os quais também foram utilizados neste trabalho. Alencar (2022) inicialmente realizou um estudo preliminar para determinar as famílias wavelets mais adequadas para a análise dos sinais, e concluiu que as db5 e bio 3.9, ambas em dois níveis de decomposição, obtiveram os melhores resultados.

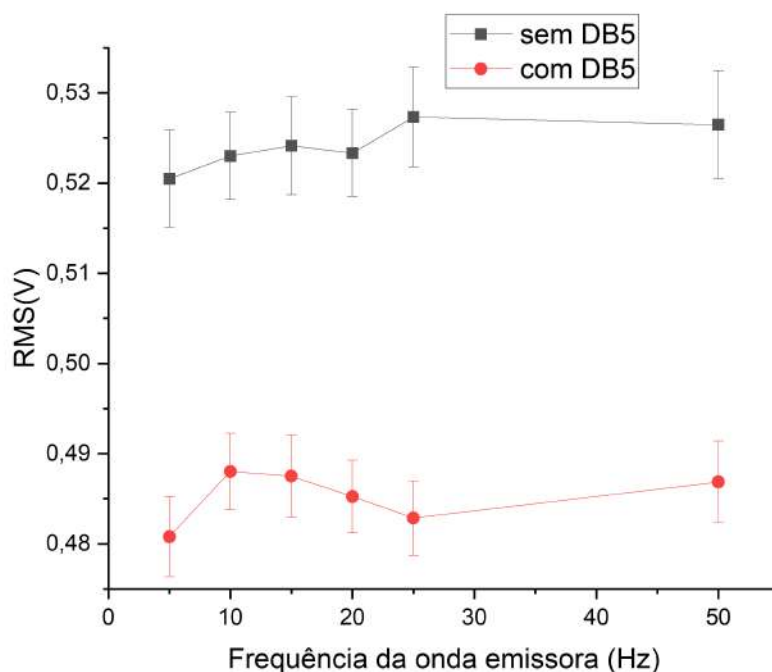
As Figuras 38 e 39 exibem a variação do RMS em função da frequência, utilizando as famílias bio 3.9 e db5, em amostras com e sem a presença de sigma. Como pode ser verificado, as duas famílias apresentaram comportamentos semelhantes, com pequena variação nos valores RMS ao longo da frequência.

Figura 38 – Variação do RMS em função da frequência para aplicação da família Bio 3.9 para amostras com e sem a presença de precipitado



Fonte: (ALENCAR, 2022)

Figura 39 – Variação do RMS em função da frequência para aplicação da família DB5 para amostras com e sem a presença de precipitado



Fonte: (ALENCAR, 2022)

Foi observada uma diferença de 0,04 V nos valores RMS entre as condições com e sem sigma, para as frequências de 5 Hz e 25 Hz e amplitude de onda emissora de 1,5 V, utilizando as famílias db5 e bio 3.9 da TWD para o processamento dos sinais. Ao comparar esses resultados com aqueles alcançados pela técnica empregada por Lins (2020), que se baseou na Transformada de Fourier, Alencar (2022) constatou que a Transformada Wavelet Discreta proporcionou uma amplitude de medidas 20 vezes maior. Neste estudo, sob os mesmos parâmetros, a EMD obteve um valor de RMS de 0,04 V para a frequência de 5 Hz, coincidindo com o resultado de Alencar (2022), e um desempenho superior, de 0,5 V, para a frequência de 25 Hz.

Para uma melhor comparação, a Tabela 5 apresenta a diferença entre valores de RMS (Gauss) mediante ensaio eletromagnético com sensor Hall para as condições com e sem a presença de sigma, utilizando as técnicas EMD, TWD e Transformada de Fourier, para as frequências de 5 Hz e 25 Hz e amplitude de onda emissora de 1,5 V.

Tabela 5 – Diferença entre valores RMS das técnicas EMD, TWD e Transformada de Fourier, para as condições com e sem a presença de fase sigma mediante ensaio com sensor Hall

| Valores de RMS (em Gauss) para a amplitude de 1,5 V | | | |
|--|------------|------------|----------------|
| Frequência | EMD | TWD | Fourier |
| 5 Hz | 0,04 | 0,04 | 0,002 |
| 25 Hz | 0,05 | 0,04 | 0,002 |

Fonte: elaborado pela autora, 2024

Dentre os resultados apresentados nos trabalhos relacionados, é possível realizar um breve estudo comparativo de desempenho entre as técnicas de processamento de sinais aplicadas à detecção do constituinte prejudicial sigma. Percebe-se que, quando comparados os resultados para as frequências de 5 e 25 Hz, a EMD obteve desempenhos semelhantes aos da TWD, e ambas superaram a Transformada de Fourier.

Os resultados inferiores da Transformada de Fourier podem ser explicados pelo fato de que, embora permita uma análise tempo-frequência, a técnica apresenta uma precisão limitada em razão do seu janelamento fixo, uma vez que, a resolução obtida fica atrelada à largura da janela escolhida. A TWD e EMD superaram essas limitações da Transformada de Fourier, permitindo uma análise do sinal em diferentes níveis de resolução de tempo e frequência (FILHO, 2019).

No entanto, ainda que a TWD, assim como a EMD, apresente uma metodologia de análise em tempo-frequência voltada para o estudo de fenômenos não-lineares e não-estacionários, decompondo sinais em diferentes faixas de frequências e permitindo uma análise multirresolução, ela possui a desvantagem de utilizar uma ampla gama de filtros pré-definidos, desenvolvidos para problemas específicos. Essa característica pode resultar em uma busca dispendiosa pelo filtro ideal, na qual diferentes famílias de Wavelets são testadas e comparadas quanto à sua capacidade de representar adequadamente o sinal de interesse. Desse modo, caso não sejam conhecidas às características do sinal em análise, uma escolha arbitrária da família pode resultar na perda de partes significativas de informações. Isto posto, uma abordagem inadequada da técnica pode comprometer a precisão da análise e dificultar a detecção de características importantes do sinal (FILHO, 2019; SHIRADO et al., 2015).

Em contrapartida, a EMD não necessita da pré-definição de filtros, sendo uma técnica adaptativa que se ajusta ao próprio sinal, o que a torna uma alternativa mais prática em cenários onde o conhecimento prévio detalhado do sinal é limitado. No entanto, outro ponto a ser considerado na escolha entre EMD e TWD para eficiência na detecção de constituintes prejudiciais, é a complexidade computacional. A Decomposição Empírica de Modos utiliza um algoritmo iterativo relativamente simples que envolve identificação de pontos extremos e geração das IMFs mediante subtrações e cálculos de médias. Por outro lado, a Transformada Wavelet pode envolver operações mais complexas, como convolução

com funções de base em diferentes escalas. Ademais, é importante pontuar que a EMD opera diretamente no domínio do tempo do sinal, o que simplifica o processamento e elimina a necessidade da transformação para o domínio da frequência. Isso pode acarretar à EMD um processamento computacional mais rápido do que a TWD (SHIRADO et al., 2015; HUANG et al., 1998).

5 CONCLUSÕES

A análise do Ruído Magnético de Barkhausen pela Decomposição Empírica de Modos mostrou ser capaz de detectar a presença de precipitado do constituinte sigma em um aço inoxidável duplex. A decomposição com a primeira IMF foi suficiente para separar o ruído a ser analisado. Os valores de RMS para a condição com a presença do constituinte sigma se mostraram inferiores para as frequências estudadas, indicando que a presença dos precipitados dificulta o movimento das paredes dos domínios magnéticos e reduzem assim o ruído gerado.

Os resultados da pesquisa, revelaram que a metodologia proposta se mostrou eficiente na detecção do constituinte sigma para todas as frequências estudadas, principalmente na região da amplitude de 1,25 V, onde foi obtido uma maior resolução na diferenciação entre as condições com e sem fase fragilizante. No entanto, a EMD apresentou limitações na diferenciação do RMB em sinais com frequência de 50 Hz, exibindo distorções na primeira IMF (a qual foi selecionada para a análise do RMB), com diferentes escalas de frequência misturadas em uma única função de modo intrínseco, indicando um problema de mistura entre modos, que se caracteriza pela presença de escalas muito diferentes dentro de uma mesma IMF ou pela ocorrência de escalas semelhantes em diferentes IMFs.

A pesquisa comparou a eficiência da técnica EMD, analisada neste estudo, com as técnicas TWD e Transformada de Fourier, estudadas por Alencar (2023) e Lins (2020), respectivamente, para a detecção do constituinte prejudicial sigma em Aços Inoxidáveis Duplex do tipo SAF 2205, utilizando o valor RMS para mensurar o RMB. Os resultados indicaram que tanto a EMD quanto a TWD apresentam desempenho superiores que o da Transformada de Fourier. Para a frequência de 25 Hz, a EMD apresentou a maior resolução dentre as técnicas supracitadas. No entanto, quando comparada com a TWD, a EMD demonstrou um desempenho semelhante para sinais com frequência de 5 Hz.

Ainda assim, a EMD oferece algumas vantagens importantes, pois não requer a seleção de filtros pré-definidos e apresenta baixa complexidade computacional em comparação com a TWD, uma vez que possui um algoritmo iterativo que funciona identificando pontos extremos e gerando as Funções Intrínsecas de Modo (IMFs) por meio de subtrações e cálculos de médias. Ademais, a EMD não envolve operações complexas como a convolução com funções base em diferentes escalas, pois opera diretamente no domínio do tempo do sinal, simplificando o processamento e eliminando a necessidade de transformar para o domínio da frequência.

5.1 Trabalhos publicados

No decorrer desta pesquisa, foram publicados os seguintes trabalhos acadêmicos:

- E. J. B. Duarte, E. de M. Silva, S. E. N. Correia, S. L. de C. Alencar, J. B. de O. Silva, “Detecção de Constituinte Prejudicial em um Aço pela Aplicação da Decomposição Empírica de Modos”, *XLI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais - SBrT*, 2023;
- F. F. Abreu, E. J. B. Duarte, E. de M. Silva, P. F. S. Europeu, W. L. Dias; S. E. N. Correia, "Detecção de variações da microestrutura do aço AISI 4340 por meio do Ruído Magnético de Barkhausen", *16º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo - CBMAG*, virtual, 2024.

6 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros e continuação da pesquisa, sugere-se a utilização de uma abordagem alternativa ao método EMD para solucionar o problema de mistura entre modos detectado na frequência de 50 Hz. A seguir são elencadas algumas das técnicas desenvolvidas para resolver algumas limitações encontradas na EMD, incluindo o problema de mistura entre modos:

- *Ensemble Empirical Mode Decomposition* - EEMD;
- *Compact Empirical Mode Decomposition* – CEMD;
- *Variational Mode Decomposition* – VMD.

Referências

- ABDELKADER, R.; KHORCHEF, M.; ZERGOU, M. Fault diagnosis based on enhancement of barkhausen noise using hybrid method empirical mode decomposition-savitzky-golay filter. *Acta Materialia Turcica*, v. 4, p. 33–38, 2020. Citado na página 40.
- ABREU, S. R. de. **Avaliação da Transformada de Hilbert-Huang na Detecção de Desvios Vocais**. 2019. 105 f. Dissertação (Mestrado em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica). Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa – PB, 2019. Citado na página 34.
- ALENCAR, S. L. de C. **Estudo da Aplicação da Transformada Wavelet Discreta para Análise do Ruído Magnético de Barkhausen Utilizando Sensor de Efeito Hall**. 2023. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba. João Pessoa – PB, 2022. Citado 5 vezes nas páginas 31, 32, 59, 60 e 61.
- ANTÔNIO, P. P. de C. et al. Ruído magnético de barkhausen em aços alta resistência baixa liga. *In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*, 7, 2013, penedo, itatiaia, rio de janeiro. Rio de janeiro – RJ, 2013. Citado na página 23.
- ARAUJO, M. da S. **Influência de Famílias Wavelets e Suas Ordens no Desempenho de um Localizador de Faltas em Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica**. 207 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federa do Pará, Belém – PA, 2011. Citado na página 35.
- AUDIO, N. *Transformação rápida de Fourier FFT - Noções básicas*. 2022. Disponível em: <<https://www.nti-audio.com/pt/suporte/saber-como/transformacao-rapida-de-fourier-fft>>. Acesso em: 17 de julho de 2022. Citado na página 33.
- CALDAS-MORGAN, M.; PADOVESE, L. Fast detection of the magnetic easy axis on steel sheet using the continuous rotational barkhausen method. *NDT & E International*, v. 45, n. 1, p. 148–155, 2012. ISSN 0963-8695. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- CARVALHO FILHO, J. A. de. **Ensaio eletromagnético baseado no Ruído de Barkhausen para acompanhamento de transformações microestruturais**. 2018. 61 f. Dissertação (Mestrado em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba. João Pessoa – PB, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 25, 27 e 43.
- DENG, Y. et al. The effects of the structure characteristics on magnetic barkhausen noise in commercial steels. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 451, p. 276–282, 2018. Citado na página 17.
- DOMINGUES, M. et al. **Exploring the continuous wavelet transform**. 2016. 19 f. 2016. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbef/a/QG7xfTNbbWCbPkG3n9d6KRL/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 17 de setembro de 2022. Citado na página 34.

FAGAN, P. et al. Effect of stress on the magnetic barkhausen noise energy cycles: A route for stress evaluation in ferromagnetic materials. *Materials Science and Engineering: B*, v. 278, p. 115650, 2022. ISSN 0921-5107. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 25.

FILHO, J. A. P. **Modelo Híbrido EMD-RNA de Previsão de Cotas Fluviais Médias Diárias em Manaus a partir de Informações Climáticas de Larga Escala**. 2019. 191f. Tese (Doutorado em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ, 2019. Citado na página 62.

GHOSH, S.; MONDAL, S. High Temperature Ageing Behavior of a Duplex Stainless Steel. *Materials Characterization*, v. 59, p. 1776–1783, 2008. Citado na página 21.

HUANG, N. E.; SHEN, Z.; LONG, S. R. A new view of nonlinear water waves: The hilbert spectrum. *Annu Rev Fluid Mech*, v. 31(1), p. 417–457, 1999. Citado na página 38.

HUANG, N. E. et al. The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical AND Engineering Sciences*, v. 454, n. 1971, p. 903–995, 1998. Citado 7 vezes nas páginas 18, 34, 35, 37, 38, 45 e 63.

HUANG, N. E. et al. A confidence limit for the empirical mode decomposition and hilbert spectral analysis. *P Roy Soc Lond A Mat*, v. 459(2037), p. 2317–2345, 2023. Citado na página 38.

KAHROBAEE, S.; HEJAZI, T.-H. A rsm-based predictive model to characterize heat treating parameters of d2 steel using combined barkhausen noise and hysteresis loop methods. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 433, p. 131–140, 2017. ISSN 0304-8853. Citado na página 26.

KHALID, A. et al. Assessment and characterization of welded mild steel (e-6013) using ultrasonic testing and hilbert huang transform. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, v. 57, n. 5, p. 401–407, 2021. Citado na página 40.

LEI, Y. et al. A review on empirical mode decomposition in fault diagnosis of rotating machinery. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 35, p. 108–126, 2013. Citado na página 39.

LIN, Q. et al. Study on non-destructive testing of rail rolling contact fatigue crack based on magnetic barkhausen noise. *Wear*, p. 528–529, 2023. ISSN 0043-1648. Citado na página 24.

LINS, R. S. de A. T. **Ensaio Eletromagnético para Análise do Ruído de Barkhausen por Meio de um Sensor de Campo Magnético**. 2020. 75 f. Dissertação (Mestrado em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba. João Pessoa – PB, 2020. Citado 10 vezes nas páginas 28, 29, 30, 31, 32, 43, 44, 45, 60 e 61.

MARTINS, L. G. N. et al. Aplicação da transformada de hilbert-huang em dados de velocidade medidos em túnel de vento. *Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas - UFSM. Ciência e Natura*, v. 40, p. 266–271, 2018. Citado na página 36.

MARTINS, M. A. **Influência de Tratamentos Térmicos de Recozimento na Precipitação de Fase Sigma e nas Propriedades Mecânicas de um Aço**

Inoxidável Duplex UNS S31803. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Rede Temática em Engenharia de materiais (UFOP – UEMG), Ouro Preto – MG, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

MELO, G. N. de. **Ruído Barkhausen como Ferramenta para Identificação de Modificações Microestruturais em Aço AISI 1020 Soldado**. 2019. 133 f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal – RN, 2019. Citado na página 23.

NESLUŠAN, M. et al. Non-destructive evaluation of the railway wheel surface damage after long-term operation via barkhausen noise technique. *Wear*, v. 420-421, p. 195–206, 2019. ISSN 0043-1648. Citado na página 24.

OMAE, K. et al. Stress measurement based on magnetic barkhausen noise for thin films. *Microelectronic Engineering*, v. 279, p. 112057, 2023. ISSN 0167-9317. Citado na página 24.

OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A. S. *Sinais e Sistemas*. [S.l.: s.n.], 2010. v. 2. 568 p. Citado na página 33.

PALECHOR, E. U. L. **Identificação de Danos em Vigas Metálicas Utilizando Wavelets e Dados Numéricos e Experimentais**. 336 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil). Universidade de Brasília, Brasília – DF, 2013. Citado na página 35.

PARDAL, J. M. **Efeitos dos Tratamentos Térmicos nas Propriedades Mecânicas, Magnéticas e na Resistência à Corrosão de Aços Inoxidáveis Superduplex**. 2009. 440 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Fluminense. Niterói – RJ, 2009. Citado na página 20.

PEREIRA, P. A. de S. **Efeito da Energia de Soldagem na Microestrutura de um Aço Inoxidável Duplex e Super Duplex**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, Campos dos Goytacazes – RJ, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

PRAXEDES, T. de O. **Sistema experimental para realização de ensaios não-destrutivos magnéticos e sua aplicação na avaliação na degradação microestrutural do aço A516 grau 60**. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza – CE, 2010. Citado na página 25.

QIU, F. et al. Correlation of magnetic field and stress-induced magnetic domain reorientation with barkhausen noise. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 523, 2021. Citado na página 17.

REZAEI, D.; TAHERI, F. Health monitoring of pipeline girth weld using empirical mode decomposition. *Smart Materials and Structures*, v. 19, n. 5, 2010. Citado na página 39.

SANCHEZ, F. L. **Análise Cepstral Baseada em Diferentes Famílias de Transformada Wavelet**. 96 f. Dissertação (Mestrado em Bioengenharia). Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2008. Citado na página 35.

SANTOS, F. L. et al. **Aplicação da Transformada de Hilbert-Huang em um Sistema Inteligente de Classificação de Sinais de Ensaio Não Destrutivo por Ultrassom**. 2019. 9 f. 2019. Citado na página 37.

SERNA-GIRALDO, C. P.; PADOVESE, L. R. Monitoring of carbon steels welded joints by magnetic Barkhausen noise. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, v. 23, n. 3, p. 413–420, 2015. Citado na página 17.

SHARMA, G. K. et al. Ensemble empirical mode decomposition based methodology for ultrasonic testing of coarse grain austenitic stainless steels. *Ultrasonics*, v. 57, p. 167–178, 2015. Citado na página 40.

SHIRADO, W. H. et al. Estudo comparativo entre algoritmos das transformadas discretas de fourier e wavelet. *Revista Brasileira de Computação Aplicada*, v. 7, n. 3, p. 97–107, 10 2015. ISSN 2176-6649. Citado 3 vezes nas páginas 32, 62 e 63.

SILVA, E. et al. Análise do ruído magnético de barkhausen por meio da transformada wavelet discreta para detecção de microestrutura fragilizante em um aço. *XXXVIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento DE Sinais*, 2020. Citado na página 27.

SILVA, E. et al. Evaluation of the magnetic permeability for the microstructural characterization of a duplex stainless steel. *Journal of Testing and Evaluation*, v. 44, 12 2014. Citado na página 28.

SILVA, E. de M. et al. Induced magnetic field used to detect the sigma phase of a 2205 duplex stainless steel. *Journal of Nondestructive Evaluation*, v. 35, p. 1–10, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 50.

SILVA, E. M. et al. Detection of the magnetic easy direction in steels using induced magnetic fields. *Metals - Open Access Metallurgy*, v. 6, n. 12, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 17, 18 e 21.

SILVA, R. et al. A comprehensive study of the pitting corrosion mechanism of lean duplex stainless steel grade 2404 aged at 475 °C. *Corrosion Science*, v. 191, p. 109–138, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 23.

SOUZA, W. G. de. **Identificação de Falhas em Rolamentos Aplicados em Motores de Indução por meio de Sensores de Corrente de Efeito Hall, Técnicas de Processamento de Sinais e Sistemas Inteligentes**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho. Bauru – SP, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.

STUPAKOV, A.; PEREVERTON, A.; NESLUSAN, M. Reading depth of the magnetic barkhausen noise. i. one-phase semi-hard ribbons. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 533, 2020. Citado na página 17.

TAVARES, S. et al. Magnetic detection of sigma phase in duplex stainless steel UNS S31803. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 322, n. 17, p. L29–L33, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 21.

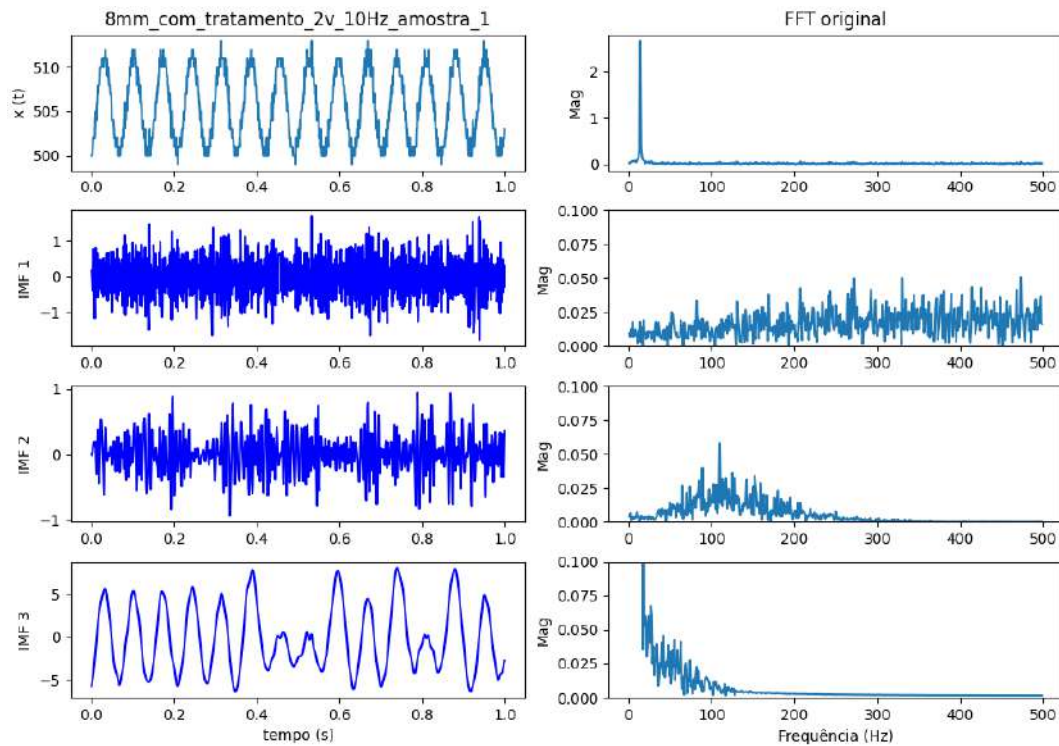
TAVARES, S. S. M. et al. Temper embrittlement of supermartensitic stainless steel and non-destructive inspection by magnetic barkhausen noise. *Engineering Failure Analysis*, v. 100, p. 322–328, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 17, 18 e 20.

- TAVARES, S. S. M. et al. Magnetic detection of sigma phase in duplex stainless steel UNS S31803. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 322, p. 175–191, 2010. Citado na página 43.
- VIANNA, C. R. L. **Estudo da Cinética de Formação da Fase Sigma em um Aço Inoxidável Duplex 2205**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica). Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda – RJ, 2013. Citado na página 22.
- VIEIRA, V. J. D. **Análise de Variações Acústicas Não Estacionárias e seu Efeito na Detecção de Múltiplas Emoções e Condições de Estresse**. 2001. 119 f. Tese (Doutorado em ciências no domínio da Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 46, 48 e 57.
- WANG, P. et al. Stratified analysis of the magnetic barkhausen noise signal based on wavelet decomposition and back propagation neural network. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 201, p. 421–427, 2013. ISSN 0924-4247. Citado na página 35.
- XU, X. et al. Nanostructure, microstructure and mechanical properties of duplex stainless steels 25cr-7 ni and 22cr-5ni (wt.%) aged at 325 °c. *Materials Science & Engineering A*, v. 754, p. 512–520, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 17, 20 e 23.
- YAN, X.; TANG, X. A novel method for early fatigue damage diagnosis in 316l stainless steel formed by selective laser melting technology. *Materials*, v. 16, 2023. Citado na página 40.

A APÊNDICE - FIGURAS DOS RESULTADOS DA APLICAÇÃO DA EMD AOS SINAIS COM RMB

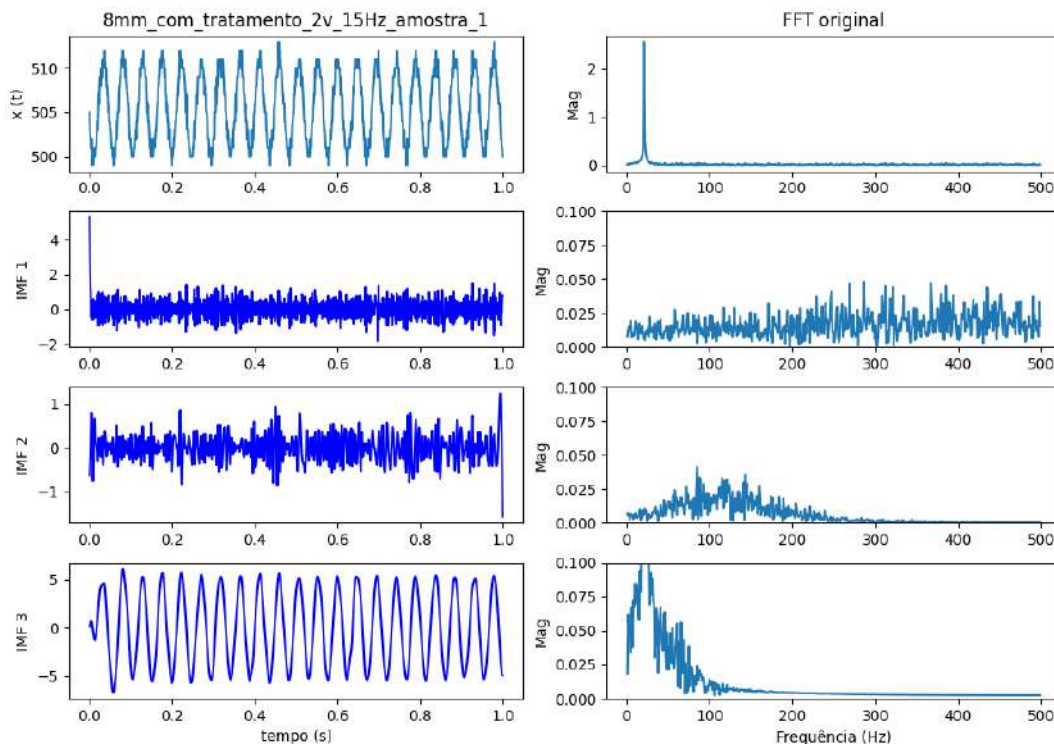
A.1 EMD aplicada aos sinais com RMB da amostra com fase sigma

Figura 40 – Decomposição do sinal medido com RMB coletado da amostra com tratamento térmico, submetida à frequência de 10 Hz e amplitude de 2 V



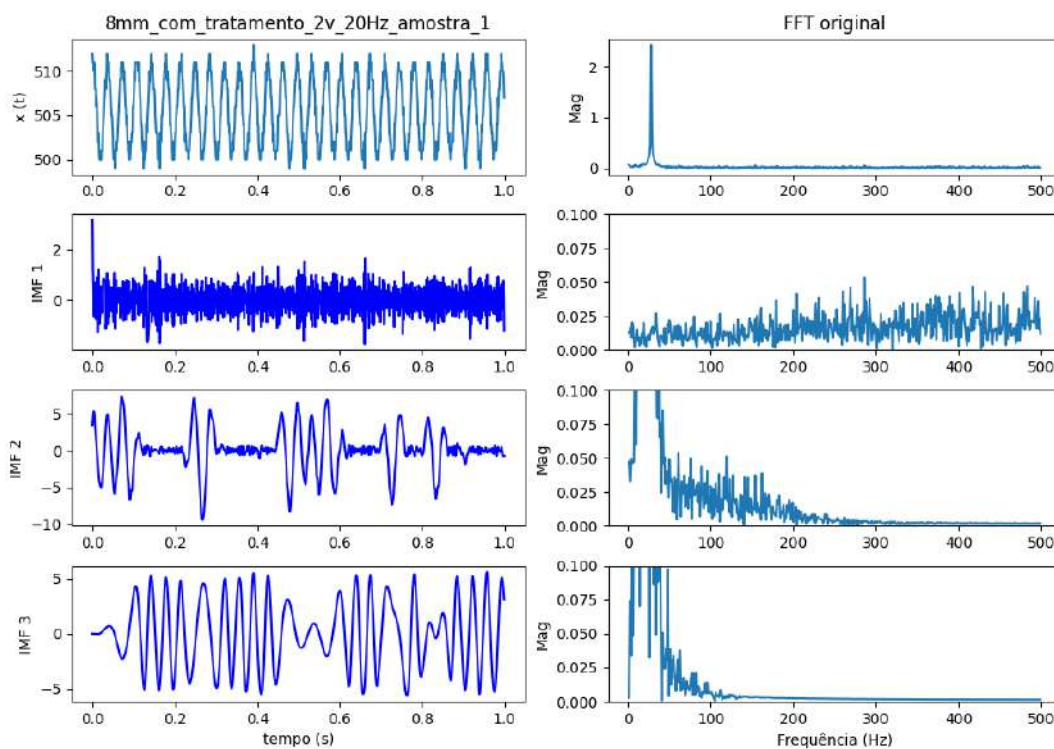
Fonte: elaborado pela autora, 2024

Figura 41 – Decomposição do sinal medido com RMB coletado da amostra com tratamento térmico, submetida à frequência de 15 Hz e amplitude de 2 V



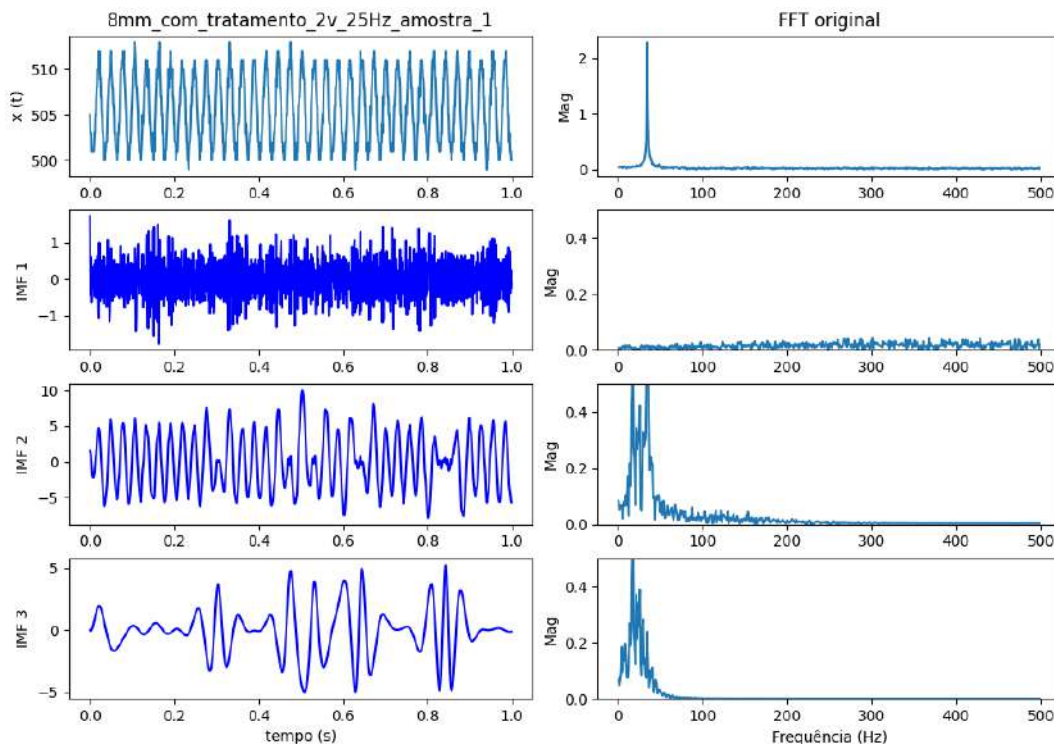
Fonte: elaborado pela autora, 2024

Figura 42 – Decomposição do sinal medido com RMB coletado da amostra com tratamento térmico, submetida à frequência de 20 Hz e amplitude de 2 V



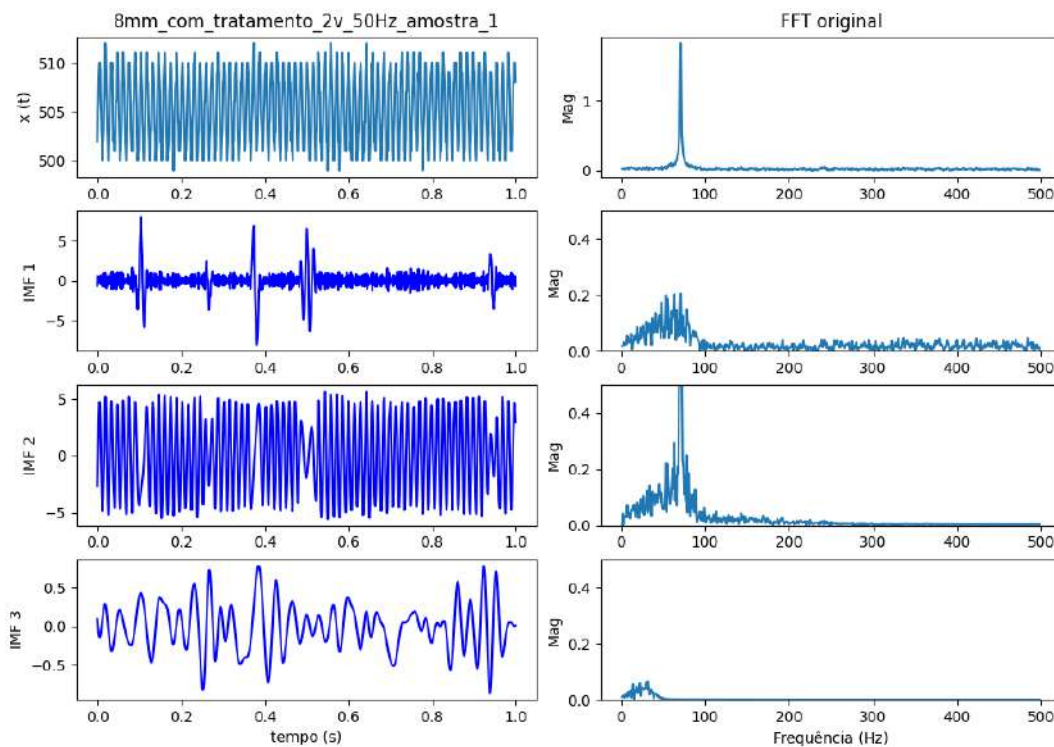
Fonte: elaborado pela autora, 2024

Figura 43 – Decomposição do sinal medido com RMB coletado da amostra com tratamento térmico, submetida à frequência de 25 Hz e amplitude de 2 V



Fonte: elaborado pela autora, 2024

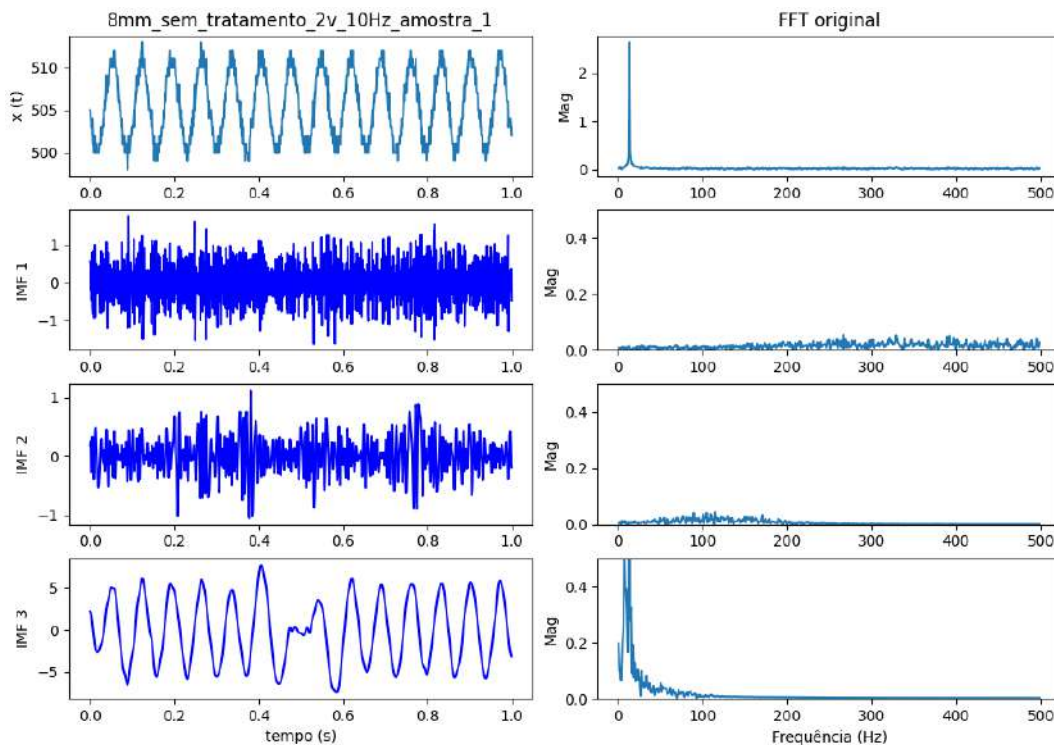
Figura 44 – Decomposição do sinal medido com RMB coletado da amostra com tratamento térmico, submetida à frequência de 50 Hz e amplitude de 2 V



Fonte: elaborado pela autora, 2024

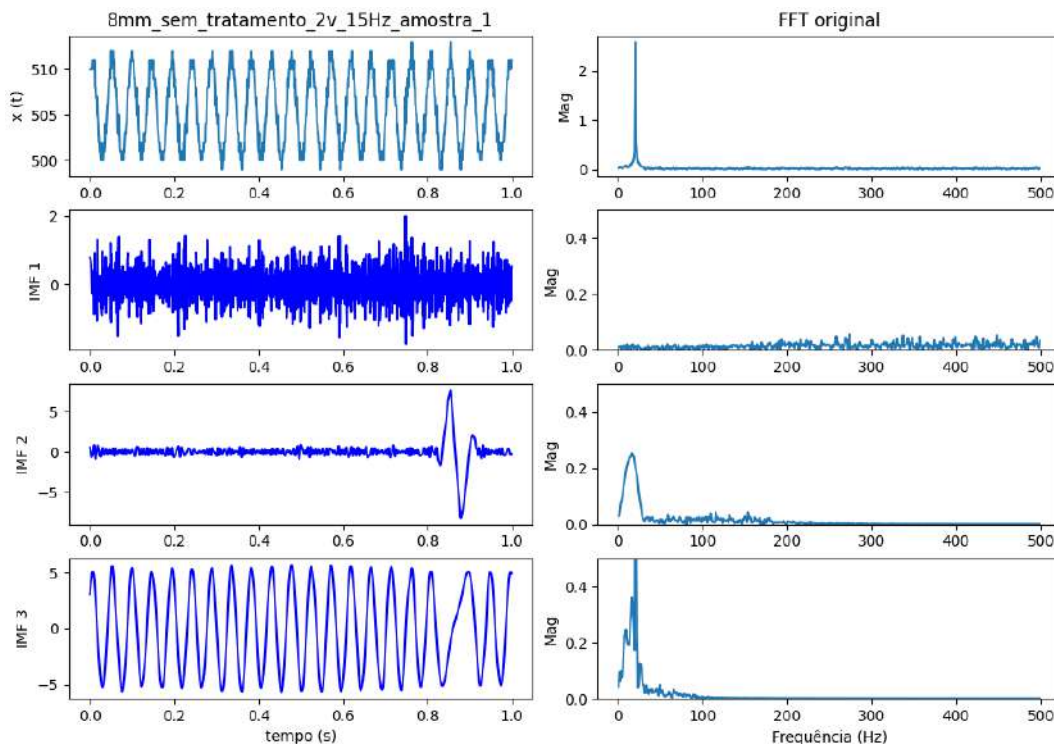
A.2 EMD aplicada aos sinais com RMB da amostra sem fase sigma

Figura 45 – Decomposição do sinal medido com RMB coletado da amostra sem tratamento térmico, submetida à frequência de 10 Hz e amplitude de 2 V



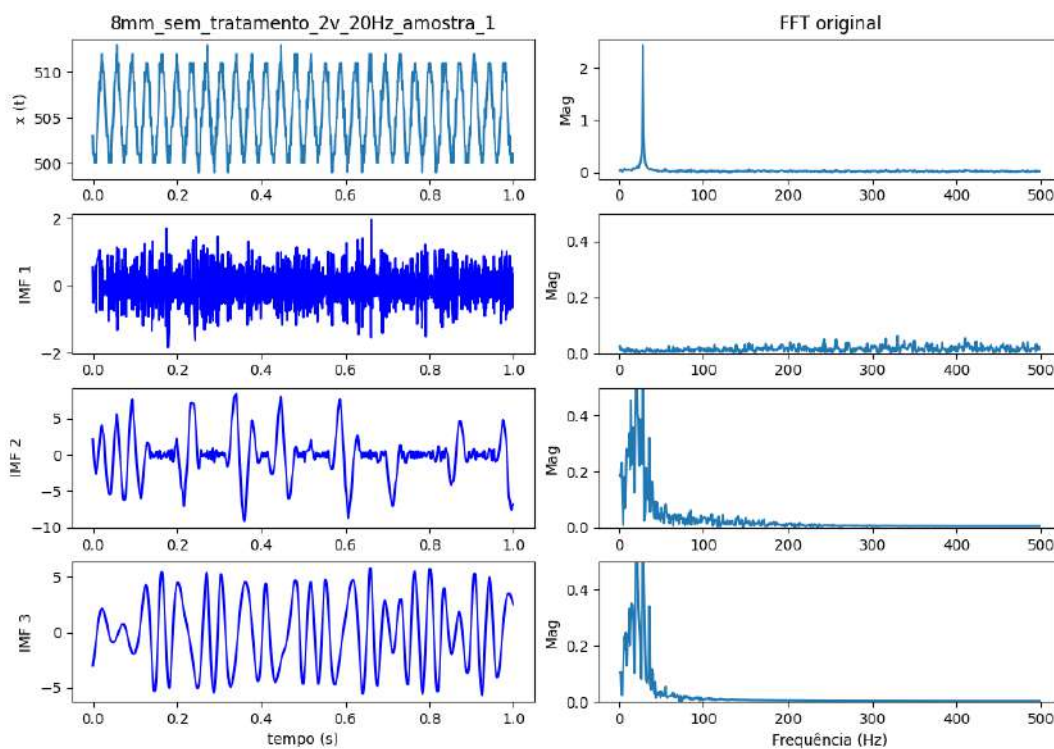
Fonte: elaborado pela autora, 2024

Figura 46 – Decomposição do sinal medido com RMB coletado da amostra sem tratamento térmico, submetida à frequência de 15 Hz e amplitude de 2 V



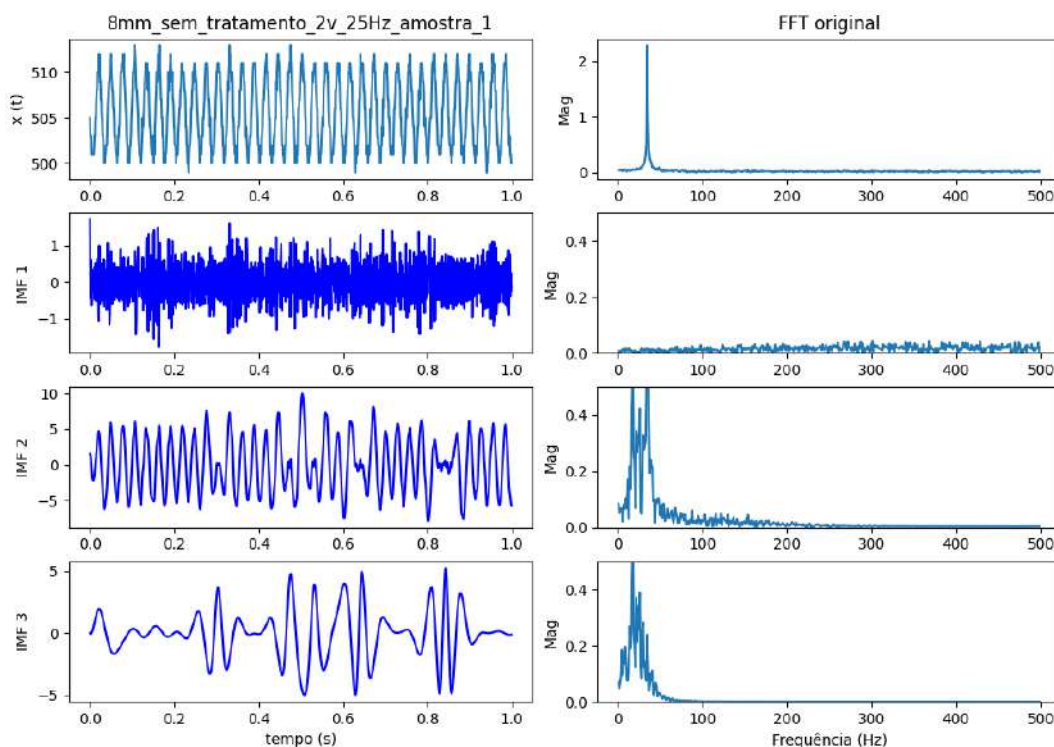
Fonte: elaborado pela autora, 2024

Figura 47 – Decomposição do sinal medido com RMB coletado da amostra com tratamento térmico, submetida à frequência de 20 Hz e amplitude de 2 V



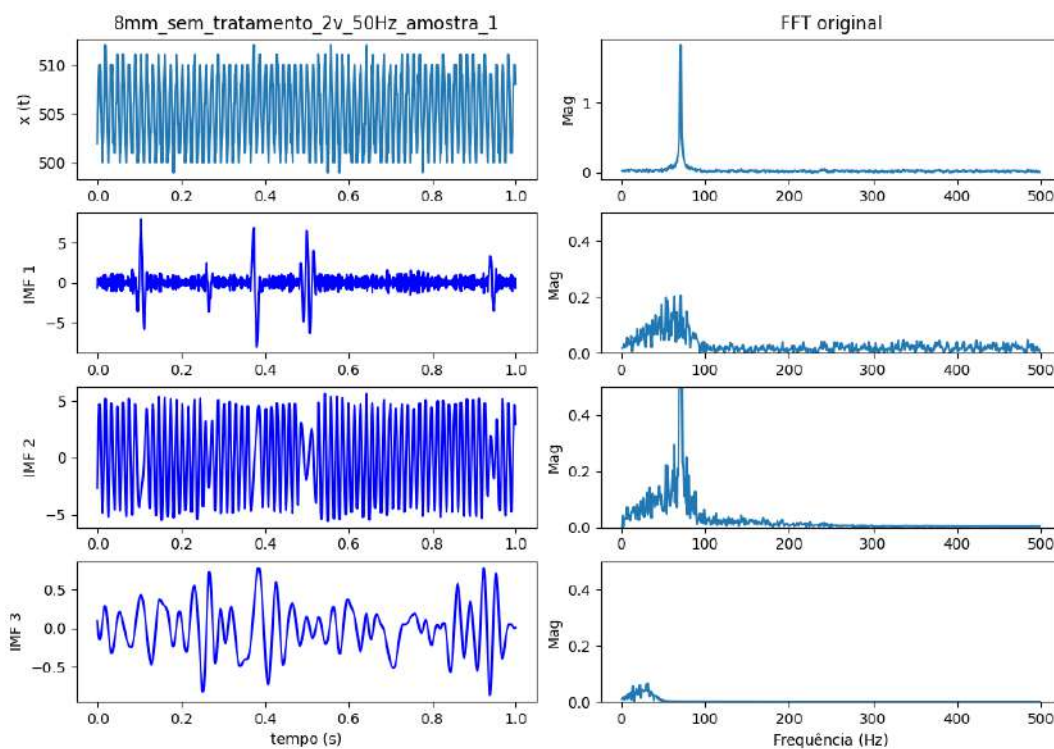
Fonte: elaborado pela autora, 2024

Figura 48 – Decomposição do sinal medido com RMB coletado da amostra sem tratamento térmico, submetida à frequência de 25 Hz e amplitude de 2 V




Fonte: elaborado pela autora, 2024

Figura 49 – Decomposição do sinal medido com RMB coletado da amostra sem tratamento térmico, submetida à frequência de 50 Hz e amplitude de 2 V



Fonte: elaborado pela autora, 2024

| | |
|---|---|
|  | INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA |
| | Campus João Pessoa - Código INEP: 25096850 |
| | Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, CEP 58015-435, Joao Pessoa (PB) |
| | CNPJ: 10.783.898/0002-56 - Telefone: (83) 3612.1200 |

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Dissertação

| | |
|-----------------------------|---------------------|
| Assunto: | Dissertação |
| Assinado por: | Emilly Barbosa |
| Tipo do Documento: | Dissertação |
| Situação: | Finalizado |
| Nível de Acesso: | Ostensivo (Público) |
| Tipo do Conferência: | Cópia Simples |

Documento assinado eletronicamente por:

- Emilly Josy Bezerra Duarte, DISCENTE (20221630018) DE MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - JOÃO PESSOA, em 20/11/2024 21:17:44.

Este documento foi armazenado no SUAP em 20/11/2024. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1314932

Código de Autenticação: 0b227355a0

