



Ibernon Pereira de Barros Neto

Análise do Ruído Magnético de Barkhausen por Meio da Transformada Wavelet Discreta para Detecção de Microestrutura Fragilizante em Aço

**João Pessoa - PB
Dezembro de 2021**



Ibernon Pereira de Barros Neto

Análise do Ruído Magnético de Barkhausen por Meio da Transformada Wavelet Discreta para Detecção de Microestrutura Fragilizante em Aço

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

Área de Concentração: Telecomunicações

Linha de Pesquisa: Eletromagnetismo Aplicado

Edgard de Macedo Silva, Dr.
Orientador

Suzete Élide Nóbrega Correia, Dra.
Coorientadora

João Pessoa – PB, dezembro de 2021
©Ibernon Pereira de Barros Neto – ibernonneto@gmail.com

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

B277a Barros Neto, Ibernon Pereira de.
Análise do ruído magnético de Barkhausen por meio da transformada wavelet discreta para detecção de microestrutura fragilizante em aço / Ibernon Pereira de Barros Neto. – 2021.
72 f. : il.
Dissertação (Mestrado – Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação da Paraíba / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), 2021.
Orientação : Prof^o D.r Edgard de Macedo Silva.
Coorientação : Prof^a D.ra Suzete Élide Nóbrega Correia.

1. Ruído magnético de Barkhausen. 2. Transformada de Wavelet. 3. Análise de sinais. 4. Aço inoxidável duplex. 5. Transformada Wavelet discreta. I. Título.

CDU 537.8:621.391(043)

Lucrecia Camilo de Lima
Bibliotecária – CRB 15/132

Análise do Ruído Magnético de Barkhausen por Meio da Transformada Wavelet Discreta para Detecção de Microestrutura Fragilizante em Aço

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

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 21 / 12 / 2021.

BANCA EXAMINADORA



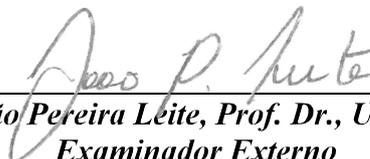
Edgar de Macedo Silva, Prof. Dr., IFPB
Orientador



Suzete Élide Nobrega Correia, Prof.^a Dr.^a, IFPB
Coorientadora



Alfredo Gomes Neto, Prof. Dr., IFPB
Examinador Interno



João Pereira Leite, Prof. Dr., UFPB
Examinador Externo

Este trabalho é dedicado à Maria das Graças, minha mãe. Quando era criança minha mãe dizia que eu iria ser chamado de doutor, quando crescesse, e tudo dependeria apenas do meu esforço. Este é mais um degrau rumo a realização do grande sonho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus. Toda honra e toda glória sejam dadas ao Senhor!

Agradeço à minha família, sobretudo aos meus pais, por todo o esforço e sacrifício para investir nos meus estudos desde a minha infância.

Agradeço à minha noiva, Emannuele Costa, pelo apoio incondicional e incentivo nos momentos mais difíceis.

Agradeço aos meus estimados professores, sobretudo aos meus orientadores, Edgard Macedo da Silva e Suzete Correia. Lembro-me perfeitamente de cada um de todos os meus professores do ensino primário, médio, técnico, graduação e pós-graduação. Todos que contribuíram para minha trajetória, até este momento, têm minha profunda admiração. Alguns marcaram de tal maneira, que levo seus métodos como modelo de inspiração na minha carreira de jovem professor.

Agradeço a todos os meus colegas de sala por terem compartilhado momentos de dificuldades e alegrias, sem eles o caminho teria sido muito mais árduo. Obrigado meus amigos: Diego Cássio, Rávilla Silva, Sara Fragoso, Anderson Oliveira, Arthuci Francis, Laryssa Maria, Ítalo Pessoa, Tainá Oriente, Alysson, Rayssa Sousa e Ana Isabel.

Agradeço ao IFPB por ter me acolhido mais uma vez. Sinto-me uma pessoa privilegiada por ter estudado nessa grandiosa instituição.

RESUMO

Ensaio eletromagnético não destrutivo vêm sendo desenvolvidos para acompanhamento de formação de microestruturas deletérias em materiais ferromagnéticos. No presente trabalho, o ruído magnético de Barkhausen (RMB) resultante da interação entre ondas emissoras de 5 Hz, 25 Hz e 50 Hz em um aço inoxidável duplex SAF 2205 é avaliado por meio da Transformada Wavelet Discreta (TWD), uma ferramenta de processamento de sinais que possibilita exibir o comportamento de um sinal em diferentes frequências. O aço inoxidável duplex SAF 2205 é utilizado para o estudo por apresentar, após tratamento térmico, a formação de precipitados finos no interior dos grãos que levam à fragilização do mesmo. No caso do RMB, que é um sinal não-estacionário e possui características de alta frequência, a TWD se torna útil em sua análise, uma vez que a decomposição permite a análise multirresolução, em que é possível obter informações dos sinais em diferentes faixas de frequências. Através de diferentes níveis de resolução, as wavelets são capazes de analisar as componentes de alta frequência de um sinal e gerar informações características mais precisas. A primeira fase dos experimentos foi realizada utilizando-se as Transformadas Wavelets Discretas com a famílias Daubechies de ordem 1 (Db1) e cinco níveis de detalhes. Assim, foi verificado que apenas três níveis de detalhes eram necessários para prosseguir. Após isso, outras famílias foram introduzidas, Db5 e Db10, e percebeu-se que a Daubechies de maior ordem, utilizando um nível de resolução, apresentava um melhor resultado em relação as outras. Concluiu-se neste trabalho que a análise do ruído magnético de Barkhausen utilizando a técnica de processamento de sinais pelo uso da Transformada Wavelet Discreta mostrou-se eficaz na detecção da formação de precipitados nanométricos no interior do material, que levam à fragilização do mesmo. Os resultados obtidos com a utilização de ondas emissoras de 5 Hz e 25 Hz foram satisfatórios, entretanto as ondas de 50 Hz não lograram êxito para estas aplicações.

ABSTRACT

Non-destructive electromagnetic tests have been developed to monitor the formation of deleterian microstructures in ferromagnetic materials. In the present work, Barkhausen magnetic noise (RMB) resulting from the interaction between waves efering 5 Hz, 25 Hz and 50 Hz in a duplex stainless steel SAF 2205 is evaluated by means of the Discrete Wavelet Transform (TWD), a signal processing tool that allows to display the behavior of a signal at different frequencies. SAF 2205 duplex stainless steel is used for the study because it presents, after heat treatment, the formation of fine precipitates inside the grains that lead to the weakening of the same. In the case of RMB, which is a non-stationary signal and has high frequency characteristics, TWD becomes useful in its analysis, since decomposition allows multiresolution analysis, in which it is possible to obtain information from signals in different frequency ranges. Through different resolution levels, wavelets are able to analyze the high frequency components of a signal and generate more accurate characteristic information. The first phase of the experiments was performed using the Discrete Wavelets Transforms with the Daubechies families of order 1 (Db1) and five levels of detail. Thus, it was verified that only three levels of detail were needed to proceed. After that, other families were introduced, Db5 and Db10, and it was noticed that the higher order Daubechies, using a resolution level, presented a better result compared to the others. It was concluded in this work that the analysis of Barkhausen magnetic noise using the signal processing technique by the use of the Discrete Wavelet Transform proved to be effective in detecting the formation of nanometric precipitates inside the material, which lead to the weakening of the same. The results obtained with the use of waves ether 5 Hz and 25 Hz were satisfactory, however the 50 Hz waves were not successful for these applications.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de sinais aleatórios (a) estacionários e (b) não-estacionários	21
Figura 2 - Ciclo de histerese característico do ruído magnético de Barkhausen	22
Figura 3 - Experimento realizado por Barkhausen	23
Figura 4 - Modelo experimental para produzir o ruído magnético de Barkhausen	23
Figura 5 - Exemplo de sinal do ruído magnético de Barkhausen.	24
Figura 6 - Análise tempo-frequência de um sinal através da STFT	26
Figura 7 - Análise tempo-frequência de um sinal através da Transformada Wavelet	27
Figura 8 - Comparativo entre uma wavelet finita (a) e uma senoide infinita (b).....	28
Figura 9 - Variação contínua do valor da escala: (a) baixa escala e (b) alta escala.....	30
Figura 10 - Deslocamento contínuo da wavelet no tempo.....	30
Figura 11 - Menor coeficiente (a); maior coeficiente (b).	31
Figura 12 - Processo de dilatação e deslocamento na TWD.....	33
Figura 13 - Bloco básico para decomposição de um sinal.....	35
Figura 14 - Estrutura típica de decomposição em três níveis	35
Figura 15 - Exemplo de um sinal com ruído de Barkhausen decomposto em níveis de detalhe de D1 a D5.	37
Figura 16 - Aplicação da TWD em um sinal com dois senos de frequências distintas	38
Figura 17 - Microestrutura típica de um aço inoxidável duplex SAF 2205.....	39
Figura 18 - Diagrama de TTP de um aço inoxidável duplex SAF 2205.....	40
Figura 19 - Precipitado de α' em uma amostra de aço inoxidável duplex.....	41
Figura 20 - Amostra de aço inoxidável duplex SAF 2205	43
Figura 21 - Forno tipo mufla utilizado no envelhecimento das amostras.....	44
Figura 22 - Esquema da bancada experimental.	45
Figura 23 - Bancada desenvolvida no laboratório GSCMat no IFPB.....	46

Figura 24 - Guia dos procedimentos a serem realizados.	47
Figura 25 - Variação RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db1 e cinco níveis de detalhes.	50
Figura 26 - Sinais resultantes da interação da onda emissora de 5 Hz e amplitude de 9 V. a) Sinal obtido na bobina receptora. b) Sinal com a família Db1 e um nível de resolução. c) Sinal reconstruído para um nível de resolução. d) Sinal com a família Db1 e cinco níveis de resolução. e) Sinal reconstruído para cinco níveis de resolução.....	51
Figura 27 - Variação RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db1 e três níveis de detalhes.	53
Figura 28 - Quadro comparativo entre amostra de sinal de 1 V com frequência de 5 Hz.	54
Figura 29 - Quadro comparativo entre amostra de sinal de 9 V com frequência de 5 Hz.	55
Figura 30 - Variação RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db5 e cinco níveis de detalhes.	56
Figura 31 - Variação RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db5 e quatro níveis de detalhes.	57
Figura 32 - Variação RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db10 e cinco níveis de detalhes.	58
Figura 33 - Variação RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db10 e quatro níveis de detalhes.	59
Figura 34 - Variação RMS do sinal de 25 Hz obtido da bobina receptora com a família Db1 e três níveis de detalhes.	60
Figura 35 - Variação RMS do sinal de 25 Hz obtido da bobina receptora com a família Db5 e três níveis de detalhes.	61
Figura 36 - Variação RMS do sinal de 25 Hz obtido da bobina receptora com a família Db10 e três níveis de detalhes.	62
Figura 37 - Variação RMS do sinal de 25 Hz obtido da bobina receptora com um nível de detalhes e as famílias Db1, Db5 e Db10.	63
Figura 38 - Variação RMS do sinal de 25 Hz obtido da bobina receptora com um nível de detalhes e as famílias Db5 e Db10.	64

Figura 39 - Variação RMS do sinal de 50 Hz obtido da bobina receptora com a família Db10 e dois níveis de detalhes.	65
Figura 40 - Variação RMS do sinal de 5 Hz para amostras com e sem precipitados, obtidos por Carvalho Filho (2018).....	66
Figura 41 - Variação RMS do sinal de 5 Hz para amostras com e sem precipitados, através da TWD com a família Db10 e um nível de decomposição.	66
Figura 42 - Onda quadrada com ruído antes da aplicação da TWD	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Famílias wavelets mais comuns.....	27
Tabela 2 - Composição do SAF 2205, como recebido, em % de peso.....	44
Tabela 3 - Características das ondas emisoras a serem utilizadas.....	46
Tabela 4 - Níveis de resolução e suas respectivas faixas de frequência.	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AID	Aço Inoxidável Duplex
Bior	Biorthogonal
A	Coefficiente de Aproximação
D	Coefficiente de detalhe
Coif	Coiflets
Db	Daubechies
DFT	Transformada Discreta de Fourier
D1	Detalhe um
D2	Detalhe dois
D3	Detalhe três
D4	Detalhe quatro
D5	Detalhe cinco
END	Ensaio não destrutivo
Gaus	Gaussian
Hz	Hertz
Mexh	Mexican Hat
Meyr	Meyer
Morl	Morlet
N	Número de amostras
RMB	Ruído magnético de Barkhausen
RMS	Root Means Square
SAF	Sandvik Austenite Ferrite
STFT	Short-time Fourier Transform
TF	Transformada de Fourier
TTP	Tempo-Temperatura-Precipitação

TW	Transformada Wavelet
TWC	Transformada Wavelet Contínua
TWD	Transformada Wavelet Discreta
TWR	Transformada Wavelet Rápida
V	Volts

SUMÁRIO

SUMÁRIO	16
1. INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivos	18
1.1.1 Objetivo geral	18
1.1.2 Objetivos específicos.....	18
1.2 Organização do trabalho	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 Caracterização do sinal	20
2.2 Ruído magnético de barkhausen	21
2.3 Análise dos sinais	24
2.4 Transformada Wavelet	25
2.4.1 Transformada Wavelet Contínua	28
2.4.2 Transformada Wavelet Discreta.....	31
2.5 Aço inoxidável duplex	39
2.6 Trabalhos relacionados.....	41
3. METODOLOGIA	43
3.1 Material de estudo	43
3.2 Bancada de teste para medida do ruído magnético de Barkhausen	45
3.3 Procedimentos Experimentais	46
3.3.1 Características dos sinais a serem utilizados.....	46
3.3.2 Procedimentos	47
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
5. CONCLUSÕES	67
5.1 Propostas para trabalhos futuros	68
5.2 Trabalhos publicados	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70
ANEXO A	73

1. INTRODUÇÃO

Ensaaios praticados em um material ou equipamento, que não altere de forma permanente suas propriedades físicas, químicas, mecânica ou dimensionais são considerados Ensaaios Não Destrutivos (END). Esses ensaios são utilizados tanto para detectar e avaliar discontinuidades nos materiais, como também para controle da qualidade de produtos, contribuindo para reduzir os custos e aumentar a confiabilidade dos processos associados. Pesquisas acadêmicas têm utilizado os END para acompanhamento de formação de microestruturas, que provoquem a fragilização dos materiais devido a imposição de ciclos térmicos, como em processo de soldagem. Dentre os Ensaaios Não Destrutivos, podem ser citados o ultrassom, líquidos penetrantes, raios X, correntes parasitas, permeabilidade magnética, ensaios eletromagnéticos baseados na análise do ruído magnético de Barkhausen e permeabilidade na região de reversibilidade do movimento dos domínios magnéticos (MIESOWICZ et al., 2016; NORMANDO et al., 2010; SILVA et al., 2016a, 2016b).

As interações entre um campo magnético gerado por uma onda e material na região de irreversibilidade dos domínios magnéticos geram um ruído denominado de Barkhausen. Esse ruído deve-se aos saltos abruptos causados pelo desprendimento das paredes dos domínios, ao passarem por pontos de ancoragem como contornos de grãos, discordâncias, heterogeneidades ou outras imperfeições. A superação das paredes de domínio sobre esses pontos produz saltos discretos na indução magnética, gerando pulsos magnéticos conhecidos como ruído magnético de Barkhausen (QUEIROZ, 2008; YAMAZAKI et al., 2019).

Ensaaios não destrutivos baseados na análise do ruído magnético de Barkhausen vêm sendo utilizados para acompanhamento de fases e análise de anisotropia magnética de materiais (SILVA et al., 2016b). Porém, o método baseado nesse ruído ainda não foi padronizado devido à variedade de dispositivos utilizados, frequências e tensões magnetizantes, bem como características da bobina receptora, como forma e frequência de reposta, que resultam em diferenças no sinal do ruído recebido (YAMAZAKI et al., 2019). Para analisar os efeitos do ruído magnético de Barkhausen existe uma técnica já difundida através da obtenção de valores RMS (*Root Mean Square*) do sinal, contudo, essa técnica apresenta limitações. Segundo Maass (2000) a relação existente entre o valor RMS do ruído e as características do material é evidenciada apenas em alguns casos, o que significa que pode haver perda de informações pela análise baseada apenas no valor RMS do ruído.

A decomposição de sinais através da Transformada Wavelet Discreta (TWD) permite a análise multirresolução em que é possível obter informações dos sinais em diferentes faixas de frequências. Uma vez que o ruído magnético de Barkhausen (RMB) é um sinal aleatório e não-estacionário que possui características de alta frequência, a Transformada Wavelet torna-se útil na sua análise. Trabalhos na literatura empregam as funções wavelets para analisar se o componente de alta frequência pode ser capaz de fornecer informações mais eficazes e refinadas do RMB, através de diferentes níveis de decomposição (WANG et al., 2013; YAMAZAKI et al., 2019).

Neste trabalho é analisada a capacidade de diferenciação das condições com e sem precipitados no aço inoxidável duplex SAF 2205, através da análise do ruído magnético de Barkhausen por meio da Transformada Wavelet Discreta. O aço SAF 2205 é utilizado para o estudo por apresentar, após tratamento térmico, a formação de precipitados de tamanho nanométrico no interior dos grãos, que levam à sua fragilização. Assim, a metodologia será testada em situação de difícil detecção. Outros trabalhos se mostraram promissores com a aplicação da TWD para diversos ensaios mecânicos, como processo de fadiga e espectroscopia mecânica (MAGALAS, 2000; MIESOWICZ et al., 2016), no entanto ainda não foi proposto a detecção de microestruturas fragilizantes de ordem nanométrica na revisão da literatura realizada.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é aplicar a Transformada Wavelet Discreta na análise do ruído magnético de Barkhausen para detectar a presença de microestrutura fragilizante em aço.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar os melhores níveis de decomposição da Transformada Wavelet Discreta capazes de detectar a formação de precipitados finos no aço SAF 2205;
- Determinar as melhores famílias wavelets capazes de detectar a formação de precipitados finos no aço SAF 2205;

- Determinar através da aplicação da Transformada Wavelet Discreta as características da onda emissora para detecção dos precipitados nanométricos fragilizantes.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Os capítulos deste trabalho estão divididos de maneira que no Capítulo 1 é feita uma introdução sobre ensaios eletromagnéticos não destrutivos e são discriminados os objetivos: geral e específicos.

No Capítulo 2 são abordadas as características do sinal do ruído magnético de Barkhausen, os conceitos de Transformada Wavelet Contínua (TWC) e Transformada Wavelet Discreta (TWD), o efeito Barkhausen, métodos de análise do ruído, aspectos gerais do aço inoxidável duplex e trabalhos relacionados que utilizaram a decomposição wavelet para análise do sinal de RMB.

No Capítulo 3 é descrita a metodologia utilizada, contendo informações detalhadas sobre o material utilizado, aço SAF 2205, determinação da onda, frequência e amplitudes para obtenção do RMB, a bancada de testes experimentais e o método de aquisição e tratamento dos dados.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados e discussões obtidos para a análise do RMB aplicando a Transformada Wavelet Discreta com as famílias Db1, Db5 e Db10, com cinco níveis de decomposição, para amostras de aço inoxidável duplex com precipitados finos e sem precipitados e ondas emissoras de 5 Hz, 25 Hz e 50 Hz.

No Capítulo 5 estão as conclusões deste trabalho, enfatizando qual a melhor família wavelet e os níveis de resolução para análise do ruído magnético de Barkhausen na detecção de microestruturas fragilizantes em aço.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

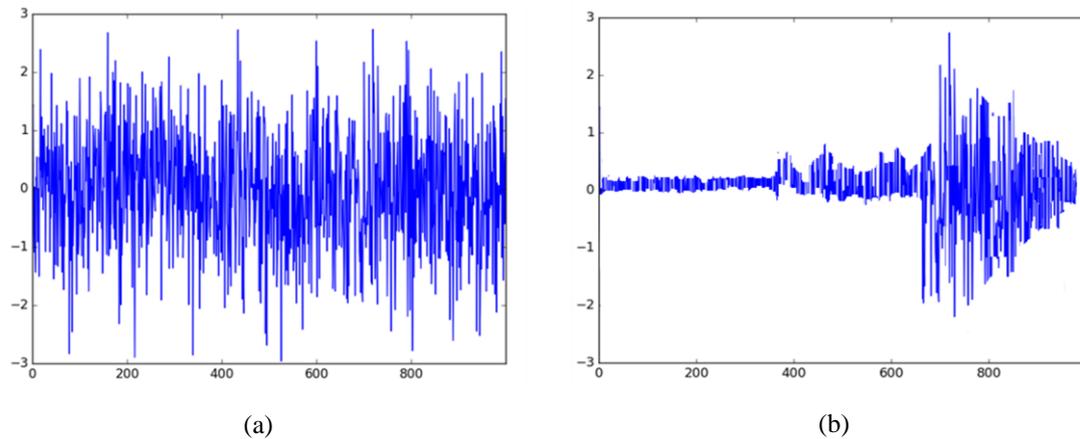
Este capítulo contém uma revisão da literatura acerca de assuntos pertinentes ao problema analisado no trabalho, por exemplo: aspectos qualitativos do Ruído Magnético de Barkhausen (RMB), parâmetros de avaliação do RMB, o modelo experimental para reproduzir o efeito Barkhausen, a Transformada Wavelet Contínua (TWC), Transformada Wavelet Discreta (TWD) e o Aço Inoxidável Duplex. Por fim, é feita uma análise das publicações abordadas por alguns autores, inclusive de trabalhos precursores a este aqui.

2.1 CARACTERIZAÇÃO DO SINAL

O ruído magnético de Barkhausen (RMB) é um sinal que pode ser analisado através do cálculo de sua potência média (RMS). Entretanto, para esta análise é conveniente ter uma ideia da natureza do fenômeno que origina o ruído. A princípio, trata-se de um sinal aleatório e não-estacionário. Devido a isso deve ser tratado por cálculos estatísticos (GRIJALBA, 2010).

Diferentemente dos sinais determinísticos, que podem ser perfeitamente reproduzidos, caso sejam aplicadas as mesmas condições utilizadas na sua geração, os sinais aleatórios, também chamados de estocásticos, possuem uma variabilidade que dificulta a predição dos seus valores por funções analíticas e que também não possuem periodicidade aparente. Sinais dessa natureza normalmente são originados a partir de eventos reais, tal como o ruído magnético de Barkhausen (RMB). Além de estocástico, o RMB pertence a um grupo chamado não-estacionário (MAGALAS, 2000), onde suas propriedades estatísticas podem sofrer alterações durante toda sua duração. A Figura 1 exemplifica os sinais aleatórios estacionários e não-estacionários.

Figura 1 - Exemplo de sinais aleatórios (a) estacionários e (b) não-estacionários



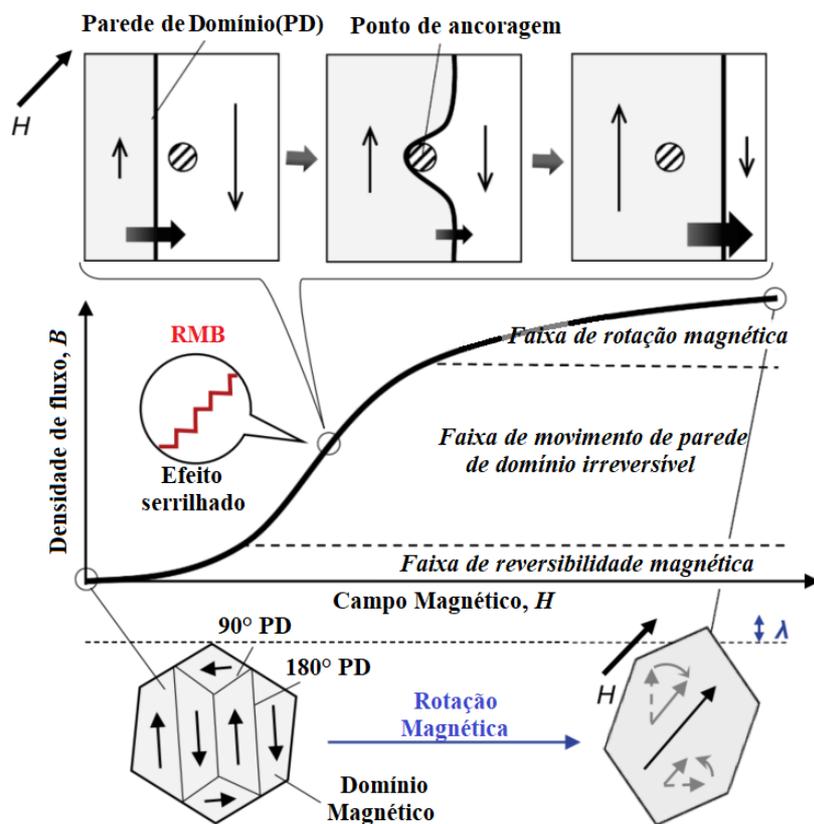
Fonte: Própria

2.2 RUÍDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN

Para os materiais ferromagnéticos e ferrimagnéticos, o contorno que separa as regiões que possuem diferentes direções de magnetização é conhecido como uma parede de domínio. Na faixa inicial de magnetização, na zona de reversibilidade magnética, os domínios magnéticos estão arranjados aleatoriamente uns em relação aos outros. Conforme o campo magnético aumenta, os domínios tendem a assumir uma única orientação (CALLISTER, 2007).

O efeito Barkhausen é um fenômeno complexo de mudanças bruscas na magnetização de elementos ferromagnéticos sob variação de um campo magnético externo (JILES, 1998). As principais fontes dessas mudanças são movimentos irreversíveis, irregulares e descontínuos das paredes de domínios magnéticos em um trecho da curva de histerese (STEFANITA, 2000), causados por barreiras na estrutura cristalina do material, conhecidas como pontos de ancoragem. No momento em que uma parede de domínio se depara com um ponto de ancoragem no processo de magnetização, é necessário demandar mais energia para ultrapassá-lo. Ao encontrar um novo ponto de ancoragem, será imposta à parede uma nova barreira, e assim, em função da movimentação das paredes, são produzidos pequenos saltos abruptos. Estas discontinuidades demonstram que o fenômeno é um processo intrinsecamente discreto, o que gera um efeito serrilhado na faixa de irreversibilidade magnética (YAMAZAKI et al., 2019). como é ilustrado na Figura 2, que mostra a evolução do RMB durante um ciclo de histerese.

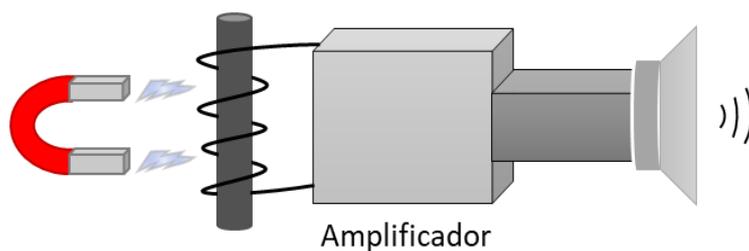
Figura 2 - Ciclo de histerese característico do ruído magnético de Barkhausen



Fonte: Adaptado de (YAMAZAKI et al., 2019)

O ruído magnético de Barkhausen (RMB) foi descoberto há 102 anos pelo cientista Heinrich Barkhausen e hoje é empregado para desenvolvimento de técnicas de ensaios eletromagnéticos não destrutivos para a caracterização de materiais e a determinação de defeitos de tratamento térmico (CARVALHO FILHO, 2018; ARAÚJO, 2019). Ele realizou um experimento utilizando um ímã, uma barra de ferro e um amplificador de sinal acoplado a um alto falante, e percebeu que durante a magnetização da barra de ferro, pulsos de tensão elétrica eram induzidos na bobina enrolada na barra. A bobina foi conectada a um amplificador e através do alto falante os pulsos eram detectados como estalos audíveis, conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Experimento realizado por Barkhausen

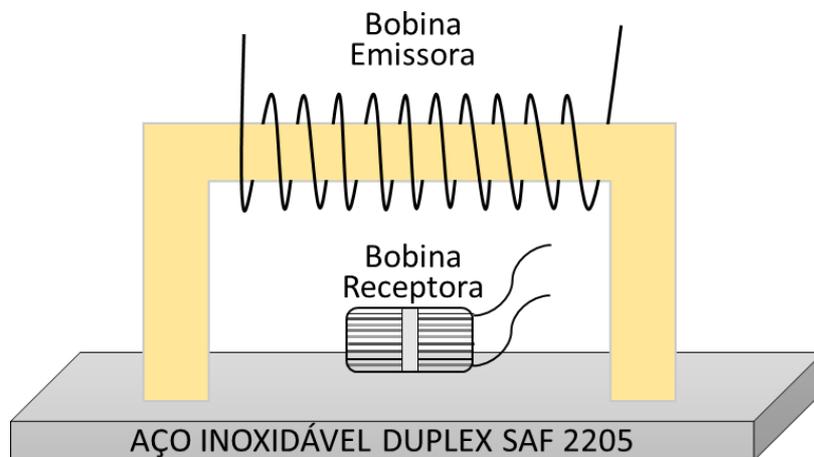


Fonte: Própria

O RMB é sensível a diversos fatores, como a microestrutura do material, discordâncias, estados de tensão ou composição do material (JILES, 1998; STEFANITA, 2000), que influenciam a estrutura de domínios dos ferromagnéticos. Portanto, o efeito foi usado para análise e degradação de várias propriedades do material. As pesquisas anteriores nessa área incluem principalmente estados de detecção de novas microestruturas nos aços (OLIVEIRA, 2016), fragilização nos aços (BARRETO, 2016), transformações microestruturais (CARVALHO FILHO, 2018) e detecção de precipitados por ensaios não destrutivos (ARAUJO, 2019).

O ruído magnético de Barkhausen pode ser gerado através de um equipamento magnetizante, composto por uma bobina emissora que produz um campo magnético alternado sobre uma amostra e uma bobina receptora que detectará o sinal do RMB. Os parâmetros de medição dependem de fatores como frequência e forma da onda emitida na excitação. Um experimento típico utilizado para produzir o RMB é visto na Figura 4.

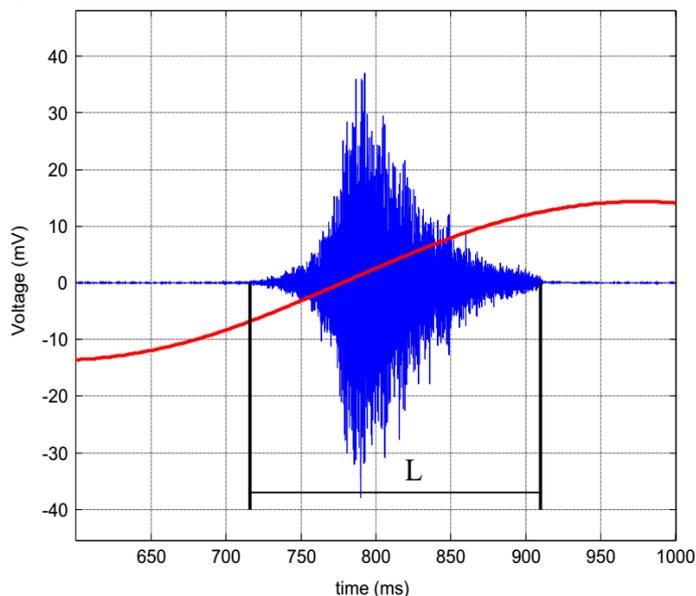
Figura 4 - Modelo experimental para produzir o ruído magnético de Barkhausen



Fonte: Própria

A bobina receptora, que está próxima da amostra durante o movimento das paredes do domínio magnético, recebe pulsos de induções eletromagnéticas gerados através das mudanças na magnetização. O sinal é colhido por meio de uma placa de aquisição de dados e é tratado no computador. A Figura 5 ilustra um sinal capturado do ruído magnético de Barkhausen puro, com duração finita no tempo, sem qualquer tratamento computacional, em que a curva vermelha é a excitação e a azul é o RMB.

Figura 5 - Exemplo de sinal do ruído magnético de Barkhausen.



Fonte: (GRIJALBA, 2010)

2.3 ANÁLISE DOS SINAIS

O ruído magnético de Barkhausen (RMB) pode ser analisado através de diferentes parâmetros calculados a partir do mesmo, como a raiz quadrada do valor quadrático médio e a entropia. Com o auxílio de modelagens matemáticas, os parâmetros são relacionados às propriedades ou características que tenham interesse em investigar no material. Por se tratar de uma grandeza que varia com o tempo, para realizar a medição e caracterizar a informação contida no sinal RMB é necessário quantificar as componentes do sinal através do desvio padrão, que é uma medida de quanto a flutuação se afasta do valor médio do sinal. Como o sinal de RMB é simétrico em amplitude, sua componente média é igual a zero, logo, o desvio padrão se torna idêntico ao valor RMS do sinal. Devido a isso, na literatura, o principal parâmetro avaliado para o ruído magnético de Barkhausen é o seu valor RMS (GHANEI, S. et al., 2014).

O valor RMS representa a raiz quadrada do valor quadrático médio. No ruído de Barkhausen, esse valor é dado na grandeza de tensão elétrica, em volts. De acordo com essa relação, o valor RMS pode ser definido por:

$$RMB_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_i^N (V_i - V_m)^2}{N}} \quad (1)$$

em que:

V_i = tensão elétrica

V_m = valor médio do sinal

N = número de amostras do sinal

O estudo do ruído magnético de Barkhausen no domínio do tempo apresenta limitações, pois captura o sinal como um todo, enquanto que no domínio da Transformada Wavelet se analisa em faixas de frequências distintas, podendo identificar o quanto de energia há em cada componente de frequência. Com a extração do valor RMS dos coeficientes wavelets, a TWD tem um grande potencial para obter um maior número de informações do ruído de Barkhausen, com características mais eficazes e precisas (WANG et al., 2013).

2.4 TRANSFORMADA WAVELET

Na engenharia, domínio da frequência designa a análise de funções matemáticas com respeito à frequência, enquanto o domínio do tempo apresenta os cálculos e teorias com base no tempo. Ambos são dados equivalentes, porém diferentes. Logo, um gráfico no domínio do tempo mostra como um sinal varia ao longo do tempo, enquanto que no domínio da frequência, comumente chamado de espectro de frequências, mostra o quanto do sinal compõe cada faixa de frequência (OLIVEIRA, 2007).

Uma das técnicas mais conhecidas em processamento de sinais é a Transformada de Fourier (TF), criada em 1807, por Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830). Nela um sinal é expresso pelo somatório de uma série infinita de componentes senoidais. A transformada inversa correspondente converte esse espectro de volta para o domínio do tempo, ou seja, para

a função original. Uma desvantagem da TF é que ela, apesar de fornecer os conteúdos de frequência que compõem um sinal, não apresenta no tempo o local em que essas frequências ocorrem. Quando aplicada a sinais estacionários, a utilização da análise de Fourier é bastante precisa, todavia, ao tratar um sinal não estacionário, que apresenta características importantes que não se repetem ao longo do tempo, a decomposição por componentes senoidais não se adequa (PENHA, 1999).

A fim de sanar o problema existente na transformada de Fourier (TF), em 1946, o Húngaro Dennis Gabor, propôs uma análise simultânea do sinal no domínio do tempo e da frequência para eventos não-estacionários. A transformada proposta trata somente de uma pequena parte do sinal no tempo e, a esse “janelamento” foi dado o nome de *Short-Time Fourier Transform* (STFT). O processo descrito por Gabor é ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Análise tempo-frequência de um sinal através da STFT



Fonte: (MATHWORKS, 2020)

A técnica de STFT é vista como uma solução para corrigir a deficiência da TF, entretanto, apresenta severas limitações devido ao janelamento de tamanho fixo (MATHWORKS, 2020). Ao definir o tamanho das janelas no tempo e na frequência, este tamanho será constante, assim, para todo o plano de tempo-frequência terá uma mesma resolução. Muitas aplicações, como por exemplo, na análise do ruído magnético de Barkhausen (RMB), as harmônicas de frequências mais baixas não necessitam ter a mesma exatidão que as informações carregadas nas frequências mais altas. Desse modo, é necessário variar o tamanho da janela a fim de determinar com maior precisão uma desejada faixa de frequência ou tempo do sinal (OLIVEIRA, 2007).

Uma ferramenta eficiente para contornar as limitações apresentadas pela STFT é a Transformada Wavelet (TW). Com ela é possível implementar uma análise de janelamento variável, num plano de múltiplas escalas, ao longo do sinal, fornecendo janelas mais longas para os componentes de baixa frequência e janelas mais curtas, que se enquadrem melhor às regiões de alta frequência. A TW é capaz de entregar de forma mais precisa resultados para sinais não estacionários, tal como o RMB. A análise tempo-frequência da Transformada Wavelet é ilustrada na Figura 7.

Figura 7 - Análise tempo-frequência de um sinal através da Transformada Wavelet



Fonte: (MATHWORKS, 2020)

Um fator importante é que a função de base wavelet não é especificada, diferentemente do que ocorre na Transformada de Fourier (TF), em que a base são sinais senoidais. Isso é porque tal base pode ser escolhida dentre várias possibilidades, as famílias wavelets (OLIVEIRA, 2007). Algumas dessas famílias podem ser vistas na Tabela 1.

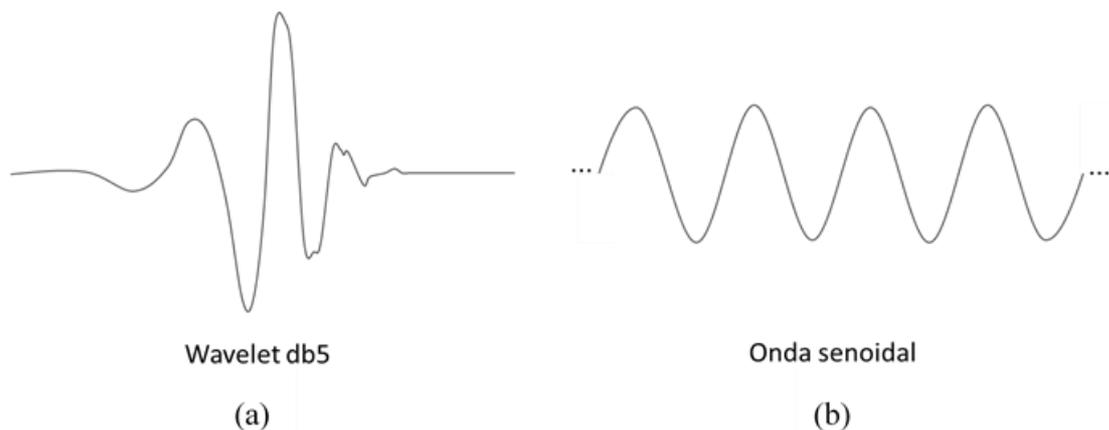
Tabela 1 - Famílias wavelets mais comuns

Família wavelet	Abreviação
Symlets	Sym
Daubechies	Db
Coiflets	Coif
Biorthogonal	Bior
Mexican Hat	Mexh
Meyer	Meyr
Gaussian	Gaus
Morlet	Morl

As wavelets de Daubechies são uma família formada por várias funções, que possuem 45 ordens de filtros de comprimento diferentes e são ortogonais (FONSECA et al., 2007). Segundo Wang et al. (2013), as wavelets de Daubechies de ordem 5 são indicadas para análise do ruído magnético de Barkhausen.

Uma wavelet é uma forma de onda pequena, de curta duração, oscilatória, que possui valor médio igual a zero quando o tempo tende ao infinito (OLIVEIRA, 2007). Na Figura 8a é ilustrada uma wavelet pertencente à família Daubechies 5. Nota-se que a função wavelet ocorre de maneira irregular e assimétrica, diferentemente da função senoidal, que é a base da Transformada de Fourier, que não possui uma duração limitada e ocorre de forma suave e determinada de menos a mais infinito. Uma senoide infinita é representada na Figura 8b.

Figura 8 - Comparativo entre uma wavelet finita (a) e uma senoide infinita (b)



Fonte: (ARAÚJO, 2011)

2.4.1 TRANSFORMADA WAVELET CONTÍNUA

A Transformada Wavelet Contínua (TWC) relaciona o sinal em análise $s(t)$ com a função elementar, chamada wavelet mãe $\psi(t)$. A variação da escala na Transformada Wavelet é obtida através da expansão ou compressão da wavelet mãe no tempo (SHENG, 2000), o que gera uma família wavelet $\psi_{a,b}(t)$ dada por:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

em que a é o fator de escalonamento, relacionado à resolução, e b é o fator de translação no tempo. A partir da variação dos parâmetros a e b , uma série de funções derivadas da wavelet mãe são geradas.

O produto interno da Equação 3 define a Transformada Wavelet Contínua (TWC) (ARAÚJO, 2011):

$$TWC(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int s(t) \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad a \neq 0 \quad (3)$$

A wavelet deve obedecer a algumas premissas, começando pela condição de energia finita (LIRA, 2004):

$$\int |\psi(t)|^2 dt < \infty \quad (4)$$

Exige-se ainda que seja totalmente integrável (LIRA, 2004):

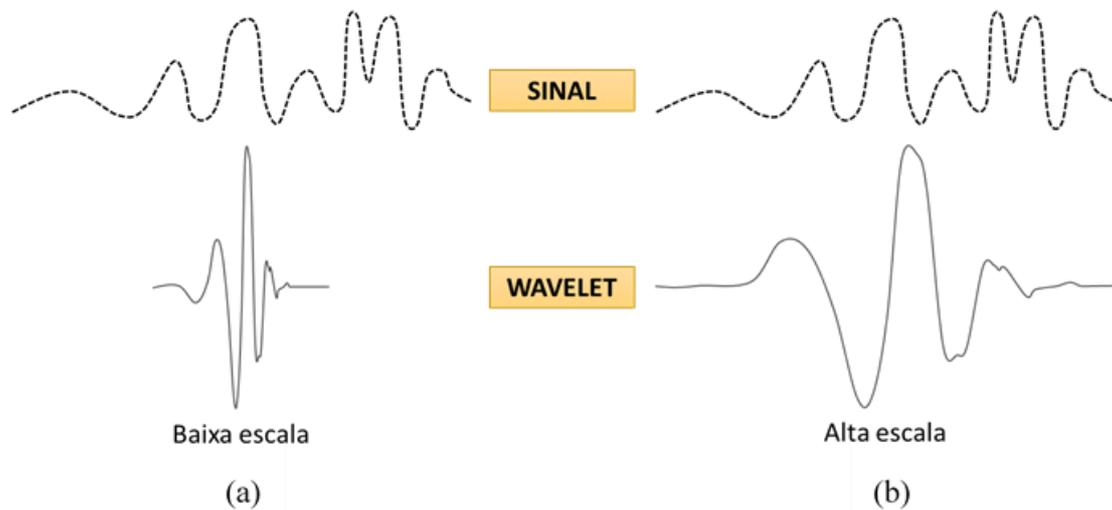
$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)dt| < \infty \quad (5)$$

E para que o sinal possa ser perfeitamente reconstruído, a wavelet mãe deve satisfazer a condição de admissibilidade (LIRA, 2004):

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t)dt = 0 \quad (6)$$

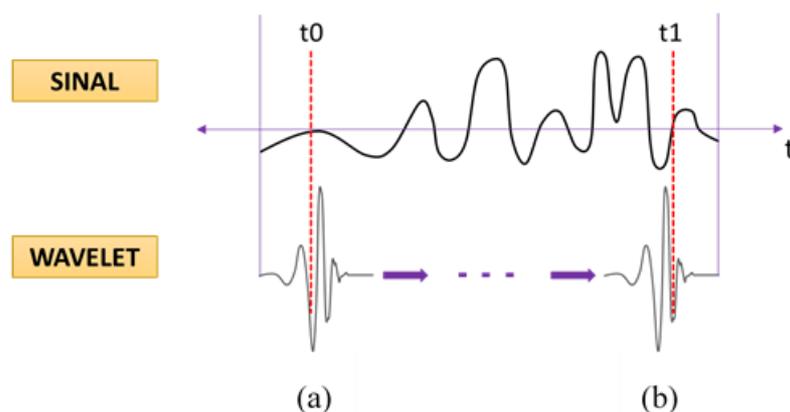
Os efeitos da dilatação a e translação b de uma wavelet contínua é ilustrado na Figura 9. Percebe-se que a wavelet se move de forma contínua no eixo do tempo, se dilatando ou se comprimindo, ao mesmo tempo em que se desloca ou translada, como ilustra a Figura 10.

Figura 9 - Variação contínua do valor da escala: (a) baixa escala e (b) alta escala



Fonte: (PENHA, 1999)

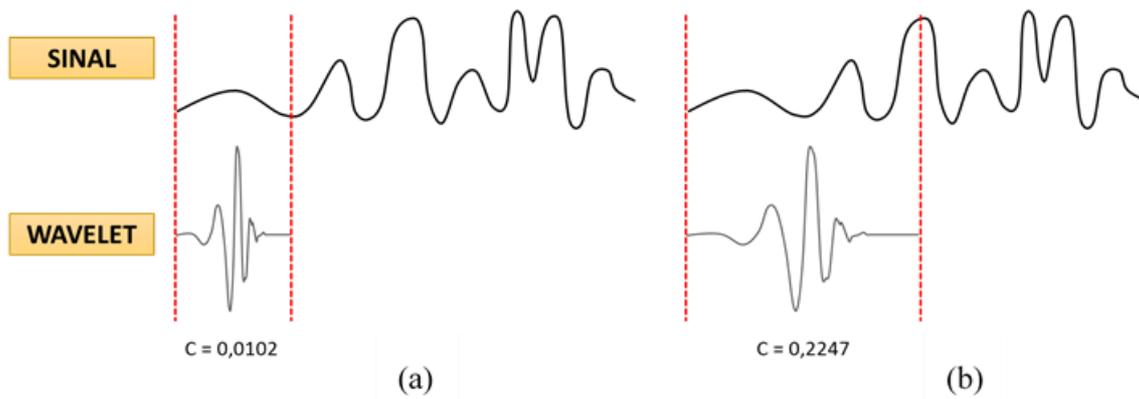
Figura 10 - Deslocamento contínuo da wavelet no tempo



Fonte: (MISITI, 2000)

A wavelet realiza comparações de todas as componentes do sinal, fornecendo um valor de coeficiente C que representa a correlação das várias partes do sinal com a própria wavelet, pois a TWC nada mais é que o resultado de todos os tempos de um sinal multiplicado por uma wavelet escalonada e deslocada. Ou seja, à medida que o coeficiente C é elevado, maior será a semelhança do sinal com a wavelet mãe, conforme ilustra na Figura 11, em (a) tem-se um menor coeficiente devido a uma menor aproximação e em (b) um maior valor do coeficiente devido a uma melhor aproximação do sinal.

Figura 11 - Menor coeficiente (a); maior coeficiente (b).



Fonte: (MISITI, 2000)

2.4.2 TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA

A Transformada Wavelet Contínua (TWC) é uma representação redundante, isso quer dizer que o deslocamento da wavelet no domínio do tempo é contínuo, desse modo haverá uma sobreposição parcial destas funções. Dependendo da resolução requerida, pode-se escolher um valor mínimo e máximo para definir a dilatação, sabendo que o valor máximo resultará numa melhor resolução, mas também num aumento de esforço computacional necessário para o cálculo dos coeficientes das wavelets. Essa situação de redundância na representação do sinal, através da TWC, caracteriza um quadro, em que o sinal é representado por mais informações que o suficiente. Uma alternativa para os casos em que seja necessário um número mínimo de coeficientes é utilizar uma versão amostrada da TWC, em que são utilizados apenas determinados valores para os parâmetros a e b , diminuindo ou eliminando a redundância. Logo, a Transformada Wavelet Discreta (TWD) utiliza parâmetros de escalonamento e translação discretos, sendo definida como (PENHA, 1999):

$$TWD_{(m,p)} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \psi_{m,p} dt < \infty \quad (7)$$

A partir da função wavelet mãe, de acordo com os parâmetros de escalonamento e translação discretos (m e p , respectivamente), $\psi_{m,p}$ forma uma base de funções wavelets dada por:

$$\psi_{(m,p)} = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \psi \left(\frac{t}{a_0^m} - p \cdot b_0 \right) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \psi \left(\frac{t - p \cdot a_0^m \cdot b_0}{a_0^m} \right) \quad (8)$$

em que m e p pertencem ao conjunto dos inteiros e a_0 e b_0 são constantes. Sendo m e p os parâmetros de dilatação e translação, respectivamente, a constante a_0 dá a variação da dilatação e b_0 dá o passo da translação.

A TWC é amostrada escolhendo-se valores de escalas e posições (parâmetros a e b) baseados em potência de dois. Essa variação é denominada diádica, assim a wavelet diádica é amostrada a uma taxa de 2^m e as constantes a_0 e b_0 assumem os valores $a_0 = 2$ e $b_0 = 1$.

A reconstrução do sinal é dada através da equação (9) (SHENG, 2000)

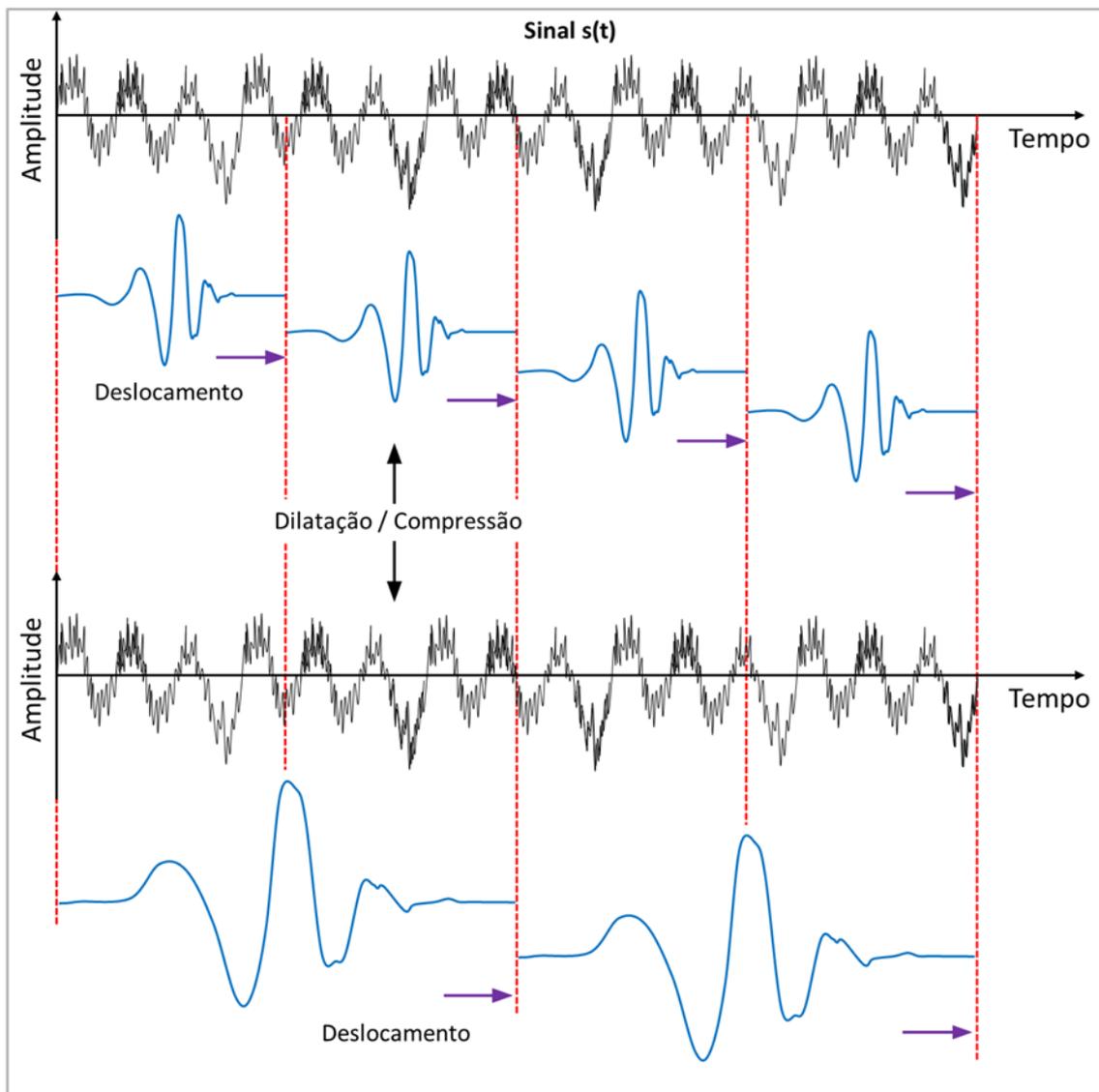
$$s(t) = \frac{2}{a+b} \sum_m \sum_p \psi_{m,p}(t) \quad (9)$$

Desde que a componente $\psi_{m,p}$ do conjunto de funções wavelet seja uma função real e ortogonal será dada por:

$$\psi_{m,p} = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \psi \left(\frac{t - 2^m \cdot p}{2^m} \right); m, p \in \text{inteiros} \quad (10)$$

O processo de dilatação e deslocamento da wavelet mãe na TWD é ilustrado na Figura 12, em que o sinal é decomposto em blocos como uma potência de dois $a_m = 2^m$. Para um determinado valor de escala 2^m , a wavelet é transladada ao longo do eixo do tempo em p intervalos de tempo de duração 2^m . O próximo valor de escala será o dobro da anterior ($2^{m+1} = 2 \cdot 2^m$), e a wavelet é transladada ao longo do eixo do tempo em intervalos de tempo 2^{m+1} . O índice m , representa o fator de escalonamento, podendo ser denominado como o nível de decomposição da Transformada Wavelet Discreta (TWD).

Figura 12 - Processo de dilatação e deslocamento na TWD



Fonte: Adaptado de (PENHA, 1999)

Mallat (1989) desenvolveu um algoritmo eficiente para calcular os coeficientes da TWD, que reduz significante o esforço computacional. O processo é similar ao que ocorre na utilização da transformada rápida de Fourier (FFT), em alternativa à transformada discreta de Fourier (DFT). Tal algoritmo resulta então, na Transformada Wavelet Rápida (TWR). O maior benefício é que os coeficientes da transformada são calculados sem a necessidade do cálculo explícito da função wavelet, sendo decomposta em uma análise multirresolução, que permite analisar sinais em múltiplas bandas de frequência.

A decomposição multirresolucional funciona retirando de um dado sinal as componentes de baixa e alta frequência, através de filtros passa-baixas e passa-altas digitais, decompondo o referido sinal e implementando a análise multirresolução, permitindo, assim, analisar o sinal em várias faixas de frequências (LIRA, 2004).

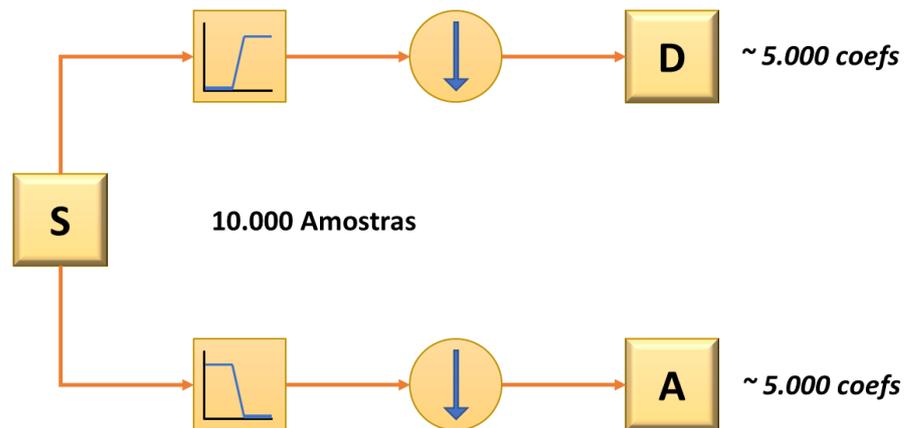
Na análise multirresolução a função wavelet $\psi(t)$ está relacionada a um filtro passa-alta, o qual produz os coeficientes de detalhes da decomposição. Há uma função relacionada ao filtro passa-baixa, chamada de escalonamento $\varphi(t)$, associada aos coeficientes de aproximação da decomposição wavelet (PENNA, C., 2002).

Teoricamente esta decomposição pode seguir indefinidamente, em vários níveis, até que um detalhe ou aproximação atinja o valor limite de uma única amostra. Na prática escolhe-se o número de decomposições (ou nível de decomposição) com base na natureza do sinal, faixas de escala de interesse, ou num critério de entropia (ARAÚJO, 2011). Em muitos sinais, as componentes de baixa frequência apresentam a maior quantidade de informação, logo estabelece a identidade do sinal, ao passo que as componentes de alta frequência são aquelas que possuem a maior quantidade de detalhes do sinal.

Dois conceitos são amplamente colocados na análise multirresolucional da Transformada Wavelet Discreta (TWD): aproximação e detalhes. A aproximação são as altas escalas que abrangem as componentes de baixa frequência. Os detalhes são as baixas escalas e compreendem as componentes de alta frequência no sinal.

Segundo Penna (2002), decimar um sinal significa eliminar dados ou pontos intercalados. Na TWD este procedimento é feito por um fator de 2, isto implica que a cada dois pontos um é eliminado, logo restará apenas metade do sinal original e por consequência o período amostrado será elevado. Na Figura 13 (BACK, et al., 2015), o processo de decomposição sucessiva é aplicado apenas às aproximações do sinal, gerando novas aproximações e detalhes. O sinal original, representado pelo bloco S, é composto por 10.000 amostras e, após passar pelos filtros passa-baixa e passa-alta sofrem a decimação de 2 para gerar os coeficientes wavelets de detalhes, bloco D, e de aproximação, bloco A.

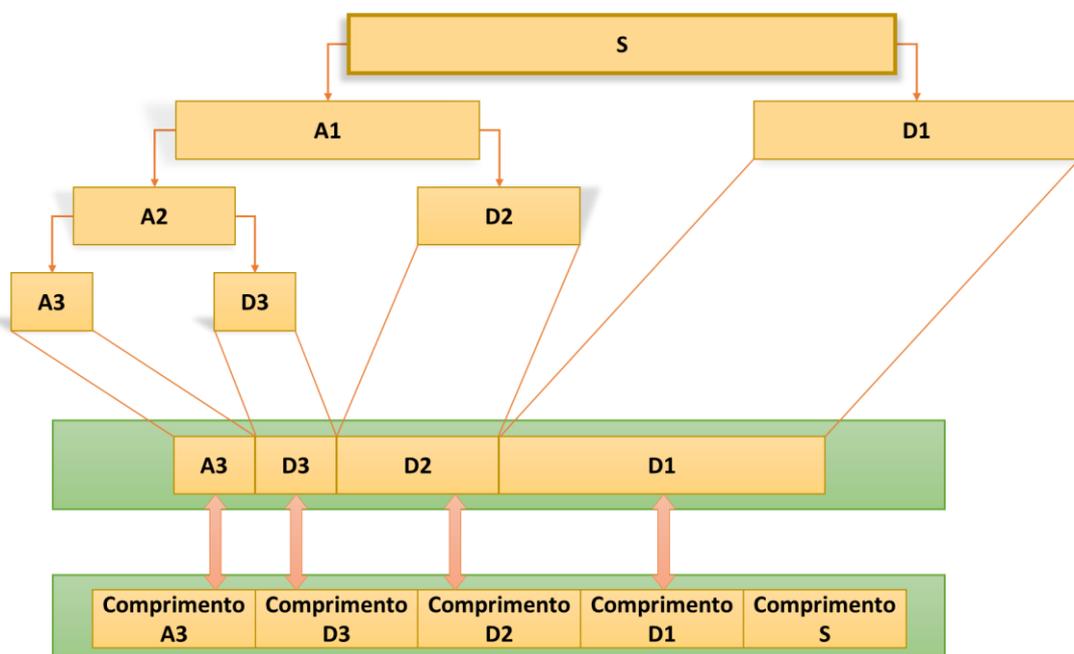
Figura 13 - Bloco básico para decomposição de um sinal



Fonte: Adaptado de (BACK, et al., 2015)

Após seguidas decomposições será configurado uma estrutura chamada de banco de filtros, conhecida como decomposição por sub-banda, originando uma árvore de decomposição wavelet, conforme é ilustrado na Figura 14, em que um sinal é decomposto em três níveis de resolução, sendo os blocos A os coeficientes de aproximação e D os coeficientes de detalhes.

Figura 14 - Estrutura típica de decomposição em três níveis



Fonte: (WANG et al., 2013)

Os coeficientes wavelet designam o sinal no domínio transformado, bem como as versões aproximadas e detalhadas do sinal original, em diversos níveis de resolução no domínio tempo. Determinar tais coeficientes é o processo que envolve o cálculo da TWD de um sinal. Matematicamente, para um dado sinal s , os coeficientes do primeiro nível de decomposição são definidos a partir da equação 12 (ARAÚJO, 2011):

$$A_1 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(n) \cdot h_d(-n + 2k) \text{ e } D_1 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(n) \cdot g_d(-n + 2k) \quad (11)$$

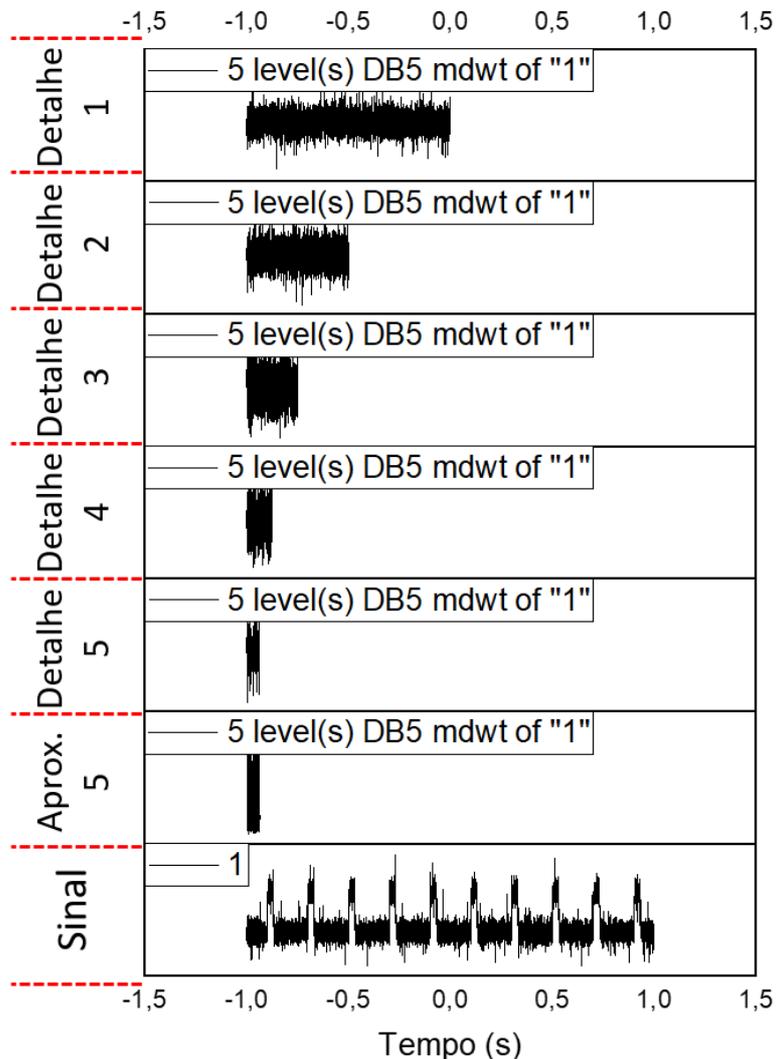
em que $h_d(n)$ e $g_d(n)$ correspondem aos filtros digitais passa-baixa e passa-alta, respectivamente.

Os coeficientes wavelet relacionados à aproximação e ao detalhe do segundo nível da decomposição, são obtidos através dos coeficientes wavelet de aproximação de nível 1, $A_1(n)$. Os novos coeficientes, representados por $A_2(n)$ e $D_2(n)$, serão determinados pela decimação da convolução entre os coeficientes wavelet da aproximação de nível 1 e as demais respostas a impulso dos mesmos filtros passa-baixa e passa-alta, utilizados no início do processo. Matematicamente serão expressos através da seguinte equação:

$$A_2(n) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_1(n) \cdot h_d(-n + 2k) \text{ e } D_2(n) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_1(n) \cdot g_d(-n + 2k) \quad (12)$$

Para dar continuidade à análise multirresolucional, os coeficientes wavelet da aproximação de nível 2 determinarão os coeficientes wavelet correspondentes à aproximação e ao detalhe de nível 3, que passam a ser, respectivamente, $A_3(n)$ e $D_3(n)$. Para estabelecer os coeficientes da aproximação e do detalhe do próximo nível, serão sempre utilizados os coeficientes wavelet da aproximação anterior. A Figura 15 mostra a decomposição em cinco níveis empregando a família Db5 de um sinal com o ruído magnético de Barkhausen criado por uma amostra de aço inoxidável duplex SAF 2205 tratado à temperatura de 475 °C por 100 horas.

Figura 15 - Exemplo de um sinal com ruído de Barkhausen decomposto em níveis de detalhe de D1 a D5.



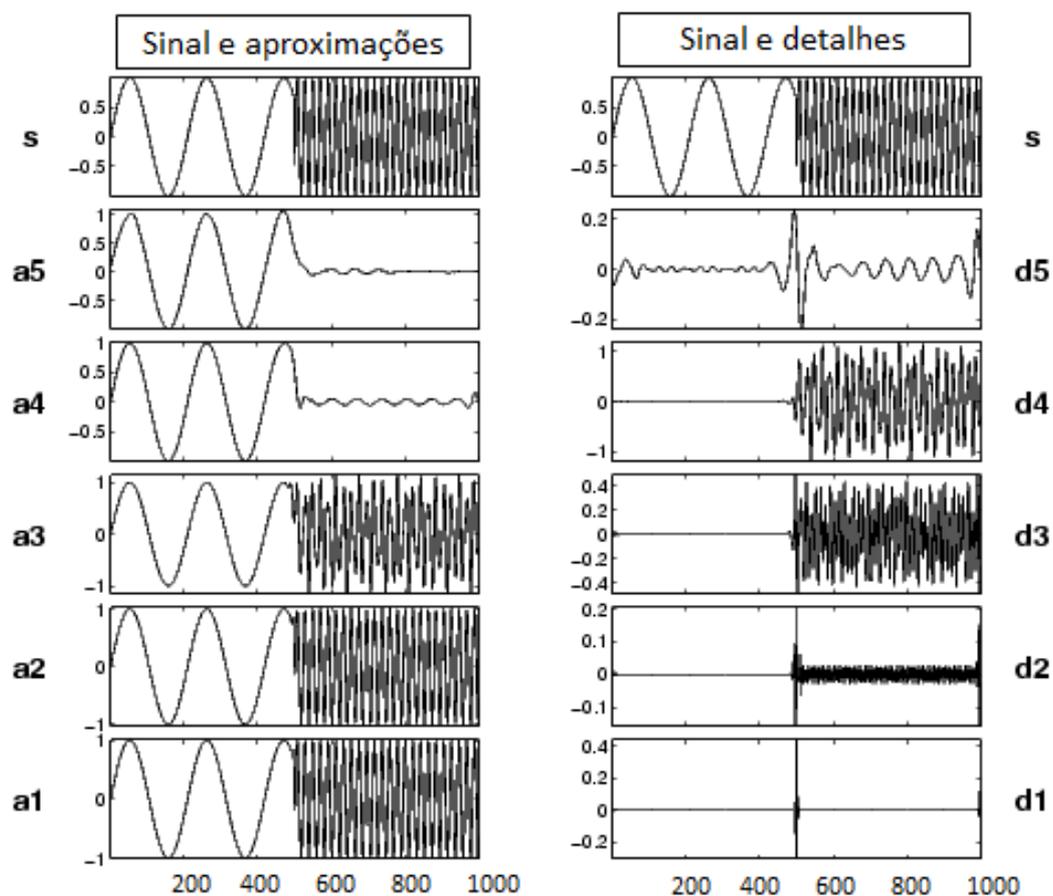
Fonte: Própria

Para reconstruir o sinal a partir dos os coeficientes wavelet é necessário caminhar em sentido contrário no diagrama da decomposição multirresolução. Neste processo, os filtros de decomposição passa-alta $g_d(n)$ e passa-baixa $h_d(n)$ são substituídos por outros de reconstrução, definidos, por $g_r(n)$ e $h_r(n)$. Além disso, as operações de sub-amostragem de dois são trocadas por outras de sobre-amostragem de dois (PENNA, C., 2002). A Figura 16 ilustra o comportamento da TWD no tratamento de um sinal conhecido, no caso dois senos de frequências distintas.

O sinal é formado por um seno de baixa frequência e um seno de média frequência, em ambos os lados da faixa de 500 Hz. Estes dois senos não estão conectados de forma contínua. D1 e D2 podem ser utilizados para detectar essa descontinuidade, pois é localizado com precisão apenas um pequeno domínio em torno dos 500 Hz. Isso acontece porque a ruptura contém a parte de alta frequência, e as demais frequências no resto do sinal não são tão altas. Deve-se notar que se o interesse for apenas identificar a descontinuidade, o D1 é mais útil que o D5. O primeiro seno pode ser observado de maneira isolada nos detalhes de níveis três e quatro, enquanto o seno de baixa frequência aparece sozinho em A5.

Se o mesmo sinal tivesse sido analisado pela transformada de Fourier, não seria possível detectar o instante correspondente à mudança de frequência do sinal, enquanto este fenômeno é claramente observável com a Transformada Wavelet Discreta.

Figura 16 - Aplicação da TWD em um sinal com dois senos de frequências distintas

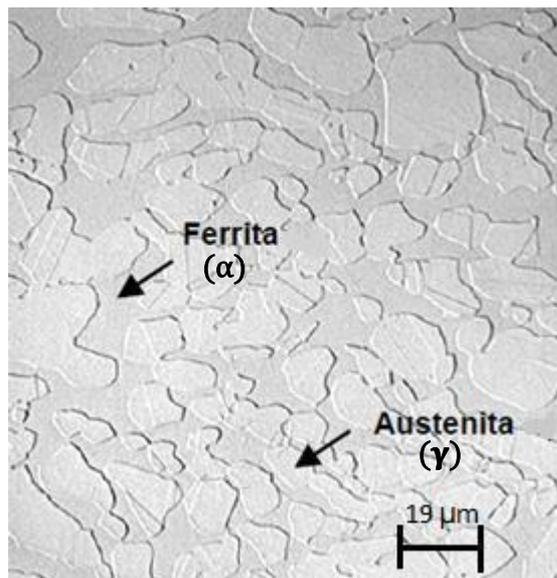


Fonte: (MATHWORKS, 2020)

2.5 AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX

Os aços inoxidáveis duplex existem há mais de 80 anos e são ligas bifásicas que possuem propriedades de alta resistência à corrosão e de resistência mecânica, devido à composição de sua microestrutura formada de fases ferrita (α) e austenita (γ), presentes em frações de volume aproximadamente iguais. A fase ferrítica eleva o limite de resistência mecânica e de resistência à corrosão, já a fase austenítica favorece a tenacidade do material. Essas características fazem com que o aço duplex seja muito utilizado na indústria petroquímica, papel e celulose, plantas de dessalinização e setores de óleo e gás (BARRETO, 2016). Na Figura 17 é vista a microestrutura de um aço inoxidável duplex com as suas duas fases em proporções praticamente iguais, sendo aproximadamente 50% de ilhas de austenita em uma matriz ferrítica próxima também de 50%.

Figura 17 - Microestrutura típica de um aço inoxidável duplex SAF 2205

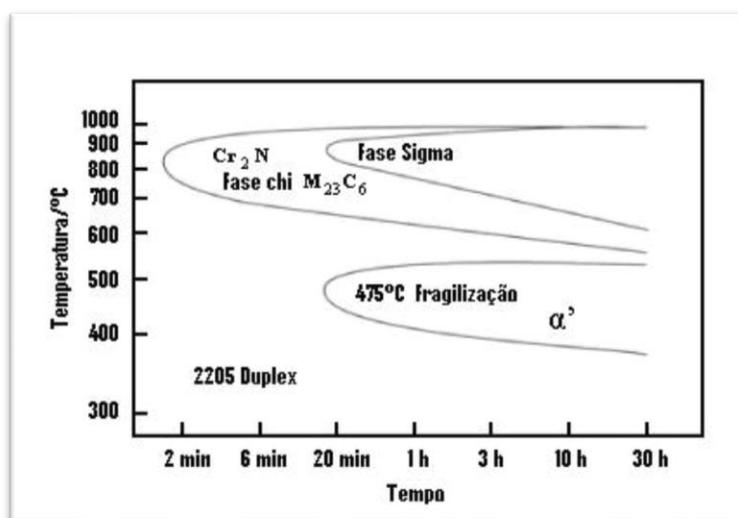


Fonte: (GENEROSO, 2014)

No entanto, quando esses aços são aquecidos durante um tratamento térmico, processos de soldagem, ou até mesmo em trabalhos a elevadas temperaturas, ocorre um processo de transformação de fases capazes de comprometer a dureza do material, tornando-o frágil (SILVA et al., 2016a). Estas fases se precipitam por causa da concentração de elementos de ligas constituintes do aço, como cromo e molibdênio, e são comumente apresentadas utilizando o diagrama tempo-temperatura-precipitação (TTP).

A Figura 18 mostra o diagrama TTP específico ao aço SAF 2205, objeto de estudo para este trabalho. No processo de formação deste fenômeno ocorre a decomposição da matriz ferrítica em outras duas fases, uma rica em ferro (α) e outra rica em cromo (α'). Esta segunda fase que surge com o aquecimento do aço duplex, conhecida por alfa linha (α'), é responsável por causar a fragilização do material (ALBUQUERQUE et al., 2010). A etapa mais crítica se dá na temperatura de 475 °C, devido a uma cinética de precipitação mais acelerada, e por este motivo recebe o nome de “fragilização a 475°C” (GUNN, 2003).

Figura 18 - Diagrama de TTP de um aço inoxidável duplex SAF 2205

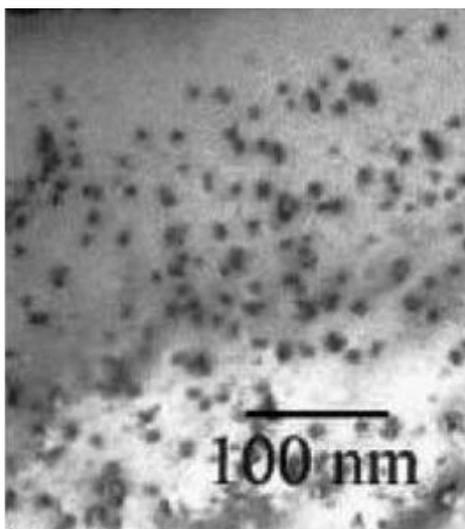


Fonte: (SEDRIKS, 1996)

Uma característica para escolha desse material é que quando submetido a tratamentos térmicos de envelhecimento para temperaturas acima de 300°C e abaixo de 550°C, apresenta a formação de uma única fase fragilizante, no caso, alfa linha (α') rica em cromo (HATTESTRAND et al., 2009).

A fase α' origina precipitados muito pequenos, em torno de 15 a 30 nm de diâmetro, no interior da matriz e dificulta a movimentação das paredes dos domínios magnéticos durante a magnetização (CALLISTER, 2007). As partículas nanométricas destes precipitados, apesar da ordem de grandeza, podem ser visualizadas por microscopia eletrônica de transmissão conforme ilustra a Figura 19.

Figura 19 - Precipitado de α' em uma amostra de aço inoxidável duplex.



Fonte: (OTÁROLA, T. et al., 2005)

2.6 TRABALHOS RELACIONADOS

Wang et al. (2013) estudaram a aplicação da Transformada Wavelet Discreta da família Daubechies 5 (Db5), com níveis de decomposição variando de um a seis, para detectar o efeito de tensões mecânicas compressivas em um aço estrutural do tipo A3, através da análise do ruído magnético de Barkhausen. Após a aplicação da wavelet, o valor de RMS (raiz quadrada da média quadrática) foi determinado de cada sinal. Notou-se que a aplicação da wavelet DB5 em seis níveis de decomposição era capaz de detectar o efeito dessas tensões no material, variando os resultados de acordo com cada nível de detalhe.

Queiroz (2008) aplicou a Transformada Wavelet Discreta (TWD) com as famílias Daubechies nas ordens de 4, 12 e 20, elegendo, ao final, a Db4 para estudar um modelo de interface conhecido por fornecer boas características das propriedades de materiais ferromagnéticos macios através do ruído magnético de Barkhausen (RMB). Utilizando a análise individual e de médias posicionais dos coeficientes wavelet. Contrapondo a análises do espectro de potência de Fourier, empregados em trabalhos anteriores, constatou-se uma análise positiva com relação ao RMB em amostras da liga amorfa $\text{Fe}_{21}\text{Co}_{64}\text{B}_{15}$.

Magalas (2000) utilizou a Transformada Wavelet Contínua (TWC) e a transformada rápida de Fourier (FFT) para analisar, por meio do ruído magnético de Barkhausen (RMB) a qualidade do sinal de resposta à deformação a fim de melhorar a precisão do cálculo tanto do decréscimo logarítmico quanto do ângulo de perda mecânica. A TWC do sinal de resposta de

deformação produz uma representação tridimensional, ou seja, tempo-escala-frequência. A ferramenta se mostrou muito eficiente para testar a qualidade da deformação e de tensões mecânicas em um espectrômetro mecânico operando no modo ressonante ou sobressonante, trazendo resultados mais precisos do que o outro meio normalmente utilizado, o parâmetro magnetoelástico (MP).

Carvalho Filho (2018) realizou um ensaio eletromagnético que estudava o efeito da presença de precipitados finamente distribuídos dentro de um material ferromagnético capazes de gerar o ruído magnético de Barkhausen (RMB). O seu estudo visava o acompanhamento de transformações microestruturais em aço inoxidável duplex (AID) SAF 2205. Chegou-se à conclusão de que os sinais com frequências inferiores a 25 Hz e ondas em formato triangulares são ideais para avaliar o RMB. Araújo (2019) deu continuidade à pesquisa citada a fim de completar a determinação dos parâmetros básicos do ruído magnético de Barkhausen para acompanhamento de formação de microestrutura no material em questão, AID SAF 2205. Para tanto, utilizou em seu trabalho, além de ondas triangulares, ondas senoidais, que são amplamente recorridas na literatura.

Como a Transformada Wavelet tem a característica de análise multirresolução e pode discriminar características locais de sinais, este trabalho usa o método de decomposição baseado em wavelets para avaliar a sensibilidade de diferentes componentes de tempo-frequência do sinal de ruído magnético de Barkhausen gerado no aço inoxidável com e sem a presença de microestruturas fragilizantes. A principal contribuição está na escolha da melhor família wavelet e nos melhores níveis de resolução para essa finalidade.

3. METODOLOGIA

O presente trabalho faz uma análise do ruído magnético de Barkhausen através da Transformada Wavelet Discreta, para detectar microestrutura fragilizante. Inicialmente é apresentado o material a ser utilizado na pesquisa, bem como a bancada de teste usada para aquisição dos dados. As características dos sinais a serem usados são descritas em seguida e um fluxograma das etapas é apresentado. Depois são descritas as etapas de aplicação da transformada nos sinais a serem analisados.

3.1 MATERIAL DE ESTUDO

O material utilizado foi o aço inoxidável duplex SAF 2205 recebido na forma de barra, de onde foram retiradas amostras com dimensões 30x20x8 mm, as quais foram usinadas por França Neto (2011). Tais amostras são apresentadas na Figura 20.

Figura 20 - Amostra de aço inoxidável duplex SAF 2205



Fonte: (CARVALHO FILHO, 2018)

Esse material na condição como recebido é formado por 50% de uma microestrutura ferromagnética conhecida por ferrita e 50% de uma paramagnética denominada austenita. Duas amostras foram analisadas, uma na condição original e outra submetida a uma temperatura de

475 °C por 100 horas. Para esse tratamento foi utilizado um forno do tipo mufla, marca Jung, capacidade máxima de 1200 °C, medindo 160 x 160 x 350 mm, conforme a Figura 21.

Figura 21 - Forno tipo mufla utilizado no envelhecimento das amostras



Fonte: (CARVALHO FILHO, 2018)

Nessa condição, tem-se a formação de precipitados finamente dispersos no interior da matriz ferrita que leva à fragilização do material, entretanto, a austenita neste material não sofre transformações SILVA et al., (2016c). A composição química do material foi determinada através da técnica de espectrômetro de emissão óptica. A Tabela 2 traz informações da composição química do material.

Tabela 2 - Composição do SAF 2205, como recebido, em % de peso.

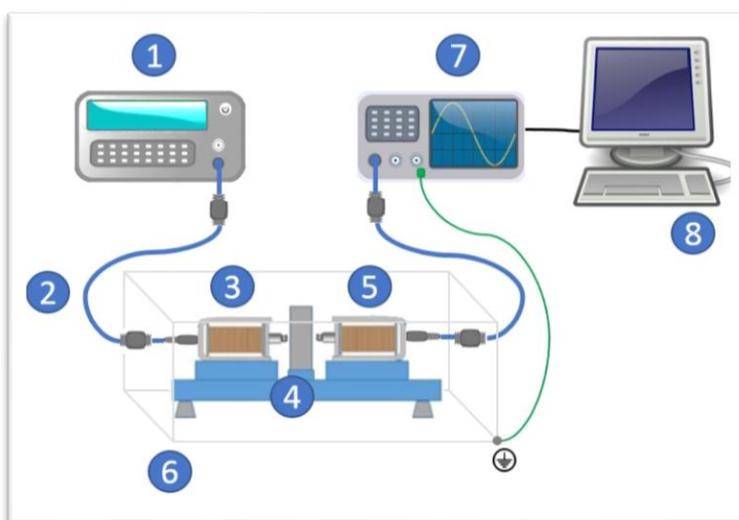
C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Co
0,055	1,333	0,019	0,002	0,458	21,823	6,085	0,130
Cu	Mo	N	Nb	Al	Sn	Ce	Fe
0,191	3,609	0,180	0,028	0,013	0,012	0,020	66,496

Fonte: (FRANÇA NETO, 2011)

3.2 BANCADA DE TESTE PARA MEDIDA DO RUÍDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN

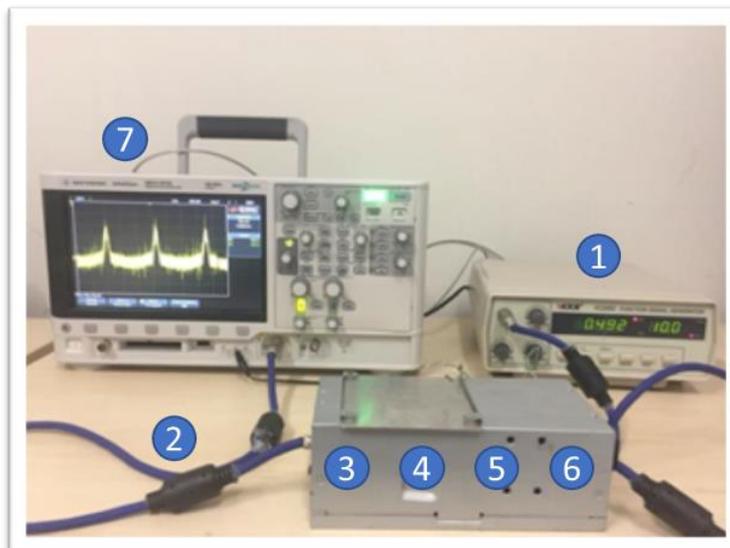
Os dados utilizados nesse trabalho foram coletados por Carvalho Filho (2018). A Figura 22 mostra o esquema da bancada de medida utilizada para aquisição dos sinais e na Figura 23 a sua foto. A bobina emissora em conjunto com o gerador de função Minipa MFG-4205B formam o módulo de emissão. O gerador de sinais (1) é o responsável por transmitir à bobina a onda com características definidas. A bobina emissora (3), por sua vez, incide um campo magnético na amostra (4) de aço inoxidável duplex SAF 2205. No lado oposto tem-se o módulo de aquisição, constituído pela bobina receptora (5), o osciloscópio digital (7) e o computador (8). O osciloscópio Agilent DSO-X 2012A receberá o sinal da bobina receptora localizada no lado oposto da peça, que é proveniente do campo induzido gerado pela bobina emissora. Os dados então são colhidos, transferidos a um *pen drive* e posteriormente descarregados no computador. Foram projetadas bobinas idênticas medindo cada uma com 19,5 mm de comprimento, 6000 espiras de fios de cobre esmaltado nº 38 envoltas sobre um núcleo de aço AISI 4104.

Figura 22 - Esquema da bancada experimental.



Fonte: (ARAUJO, 2019)

Figura 23 - Bancada desenvolvida no laboratório GSCMat no IFPB.



Fonte: (CARVALHO FILHO, 2018)

3.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.3.1 CARACTERÍSTICAS DOS SINAIS A SEREM UTILIZADOS

Na Tabela 3 têm-se as características das ondas emissoras a serem utilizadas na pesquisa. Para cada tipo, cinco sinais foram adquiridos, com taxa de amostragem de 10.000 amostras por segundo e tempo de aquisição de 2 segundos, para as condições com e sem precipitado.

Tabela 3 - Características das ondas emissoras a serem utilizadas.

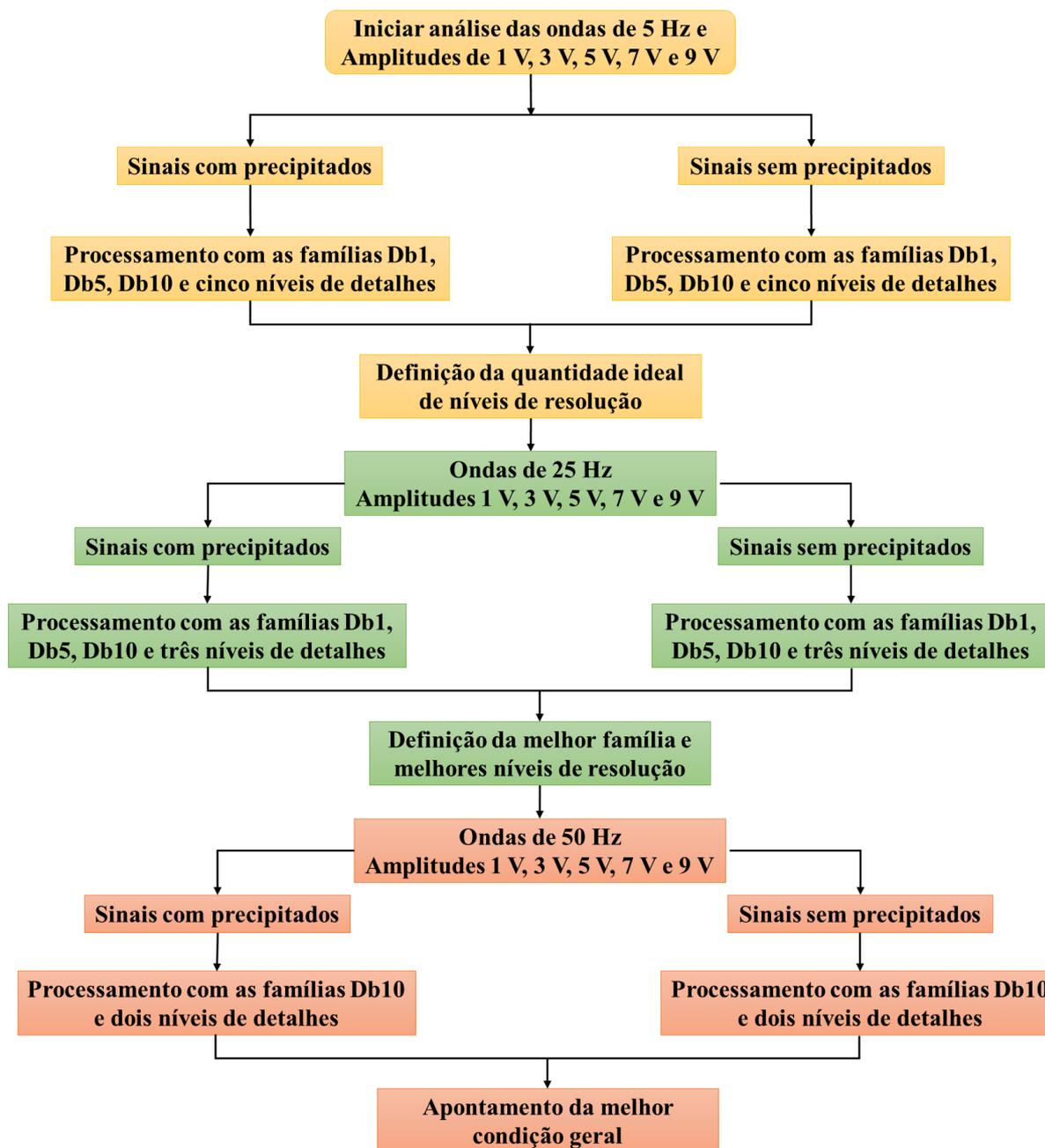
Tipo de onda	Frequências	Amplitudes	Condição do material
Triangular	5 Hz, 25 Hz e 50 Hz	1 V, 3 V, 5 V, 7 V e 9 V	Com precipitado Sem precipitado

Fonte: Própria

3.3.2 PROCEDIMENTOS

No guia da Figura 24 é apresentado a sequência de experimentos a serem realizados nos sinais a fim de analisar a aplicação da Transformada Wavelet Discreta.

Figura 24 - Guia dos procedimentos a serem realizados.



3.3.2.1 DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE NÍVEIS ÓTIMOS

Baseado no estudo de (WANG et. al., 2013) que utilizaram a família Db5 com seis níveis de resolução para detectar o efeito de tensões mecânicas compressivas em um aço, este trabalho utilizará cinco níveis, um a menos, para acompanhar a formação de precipitados finos de tamanho nanométrico em um aço inoxidável duplex. Os experimentos iniciarão com ondas emissoras de 5 Hz e cinco níveis de resolução, a partir disso, será determinada a quantidade de níveis ideais para esta frequência. Uma vez definidos, os melhores níveis serão adotados para as ondas de 25 Hz. Por sua vez, a condição que obtiver maior desempenho na segunda etapa, será aplicada na última frequência proposta, no caso, 50 Hz.

Para cada etapa, será extraído o valor RMS dos coeficientes de detalhes através da seguinte equação:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i^2} \quad (13)$$

Em que N corresponde ao número de elementos na sequência de entrada e x_i é a amplitude do sinal.

Segundo o Teorema de Nyquist, para que todas as frequências de um sinal possam ser restituídas após este ter sido convertido analógico-digitalmente, a taxa de amostragem do conversor A/D deve ser pelo menos duas vezes maior que a máxima componente de frequência presente no espectro desse sinal (NYQUIST, 1924). Como os sinais do ruído magnético de Barkhausen foram amostrados a 10.000 pontos por segundo, considera-se para análise frequências até 5.000 Hz. Dado que cinco níveis de resolução são empregados, as medidas de energia extraídas fornecem informações dos sinais em diferentes faixas de frequência. A Tabela 4 apresenta as faixas de frequência dos coeficientes de detalhe para cada um dos níveis de resolução considerados.

Tabela 4 - Níveis de resolução e suas respectivas faixas de frequência.

Nível de resolução	Faixa de frequência (Hz)
1	2.500 a 5.000
2	1.125 a 2.500
3	625 a 1.250
4	312,5 a 625
5	156,25 a 312,5

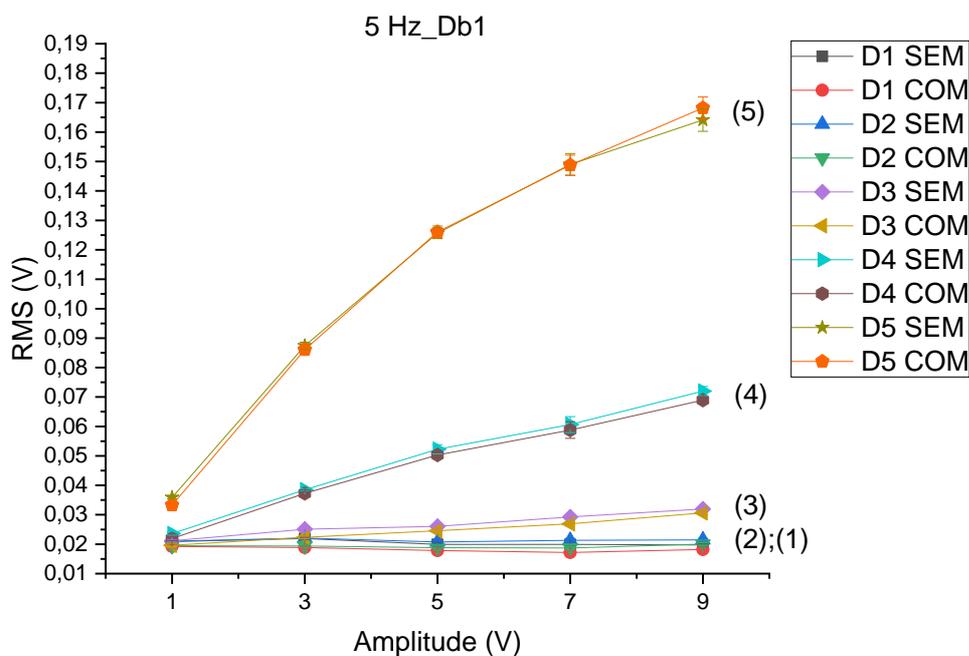
3.3.2.2 DETERMINAÇÃO DA MELHOR FAMÍLIA DE WAVELET

Na literatura, não é adotada especificamente uma única família wavelet para análise do ruído magnético de Barkhausen. A partir dos resultados obtidos com a família Db5 no estudo de (WANG et. al, 2013), neste trabalho serão aplicadas outras duas famílias Daubechies, além da que foi relatada. Na onda de 5 Hz serão empregadas a Db1, Db5 e Db10 com cinco níveis de resolução. A onda de 25 Hz já receberá os melhores níveis explorados, contudo, ainda serão utilizadas as mesmas três famílias. Após uma análise comparativa, a família que obtiver melhor desempenho, será adotada para a frequência de 50 Hz.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 25 mostra a variação do valor RMS, com um intervalo de confiança de 95%, dos sinais captados na bobina receptora após a aplicação da Transformada Wavelet Discreta (TWD) com a família Db1 e cinco níveis de resolução, em função da amplitude da onda emissora de 5 Hz e amostras com e sem a presença de precipitados finos. Nota-se um aumento dos valores RMS a partir do terceiro nível de decomposição, sendo mais intensificados no quinto nível. Além disso, o mesmo comportamento é observado para as curvas com e sem a presença de precipitados.

Figura 25 - Variação RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db1 e cinco níveis de detalhes.



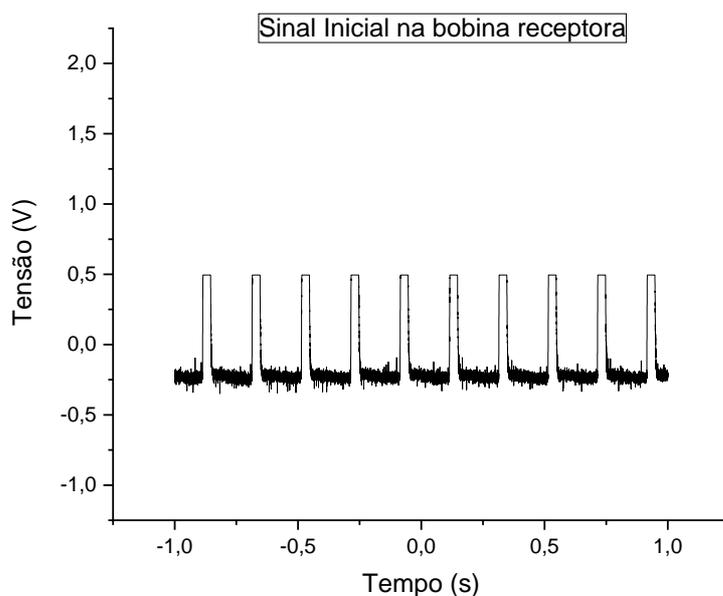
Fonte: Própria

Para melhor compreensão do motivo do aumento dos valores RMS, em função dos níveis de resolução aplicados, foi realizada uma comparação da condição dos sinais com amplitude de 9 V, com a presença de precipitados finos sob decomposição em um e cinco níveis de detalhes, respectivamente. Estes resultados estão presentes na Figura 26, bem como o sinal da onda emissora de 5 Hz antes de receber a Transformada Wavelet Discreta.

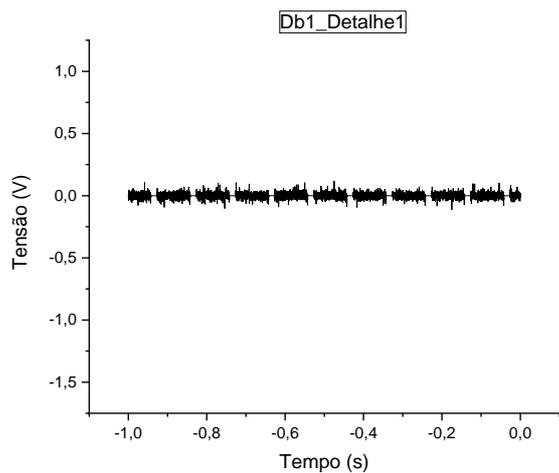
Nas Figura 26a e 26b tem-se o sinal original para a condição do material com precipitados nanométricos e o sinal quando submetido à Transformada Wavelet Discreta com um nível de detalhes, respectivamente. Após a aplicação dos procedimentos de decomposição, foi aplicada a Transformada Wavelet Inversa, como pode ser visto na figura 25c. Isto resulta na reconstrução deste sinal, e como pode ser notado, entrega um sinal similar ao original (MADAN *et al.*, 2009).

Percebe-se que a amplitude do sinal obtido pela bobina receptora das Figuras 26a e 26c não mudam para o primeiro nível de decomposição. Contudo, ao analisarmos os sinais da aplicação da TWD em seu quinto nível de detalhes, Figuras 26d e 26e, é observado que a amplitude do sinal reconstruído aumentou para 2 V. Ao acompanhar os ruídos do primeiro e quinto níveis pode-se perceber uma amplitude de valor máximo igual a 1,5 V correspondente às posições dos picos principais da onda de 5 Hz. Isto indica que a análise com a TWD acima de três níveis de detalhes, para o estudo do ruído magnético de Barkhausen, gera interferência nas amplitudes dos ruídos, pois, à medida que aumenta a quantidade de camadas de decomposição, menor será a faixa de frequência e mais influência terão os harmônicos sobre a região ruidosa (OLIVEIRA, 2007).

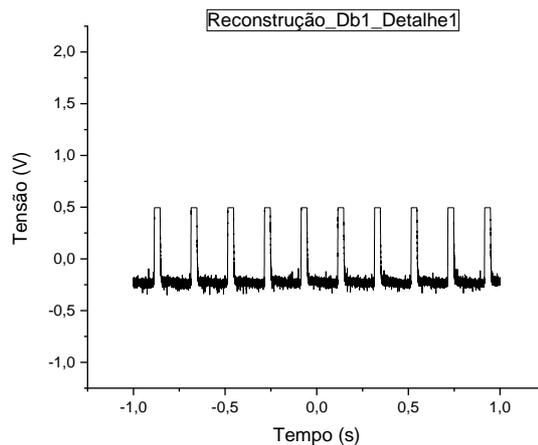
Figura 26 - Sinais resultantes da interação da onda emissora de 5 Hz e amplitude de 9 V. a) Sinal obtido na bobina receptora. b) Sinal com a família Db1 e um nível de resolução. c) Sinal reconstruído para um nível de resolução. d) Sinal com a família Db1 e cinco níveis de resolução. e) Sinal reconstruído para cinco níveis de resolução.



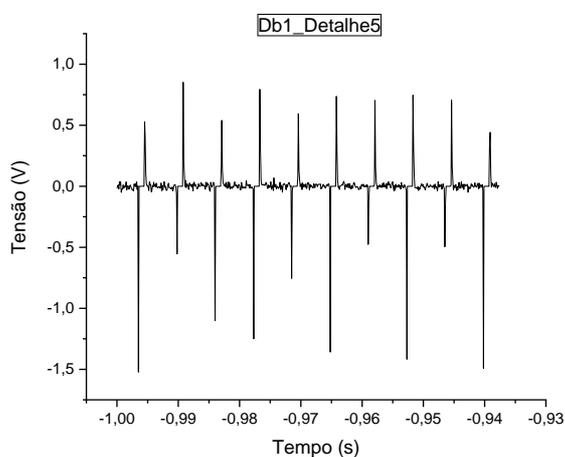
a)



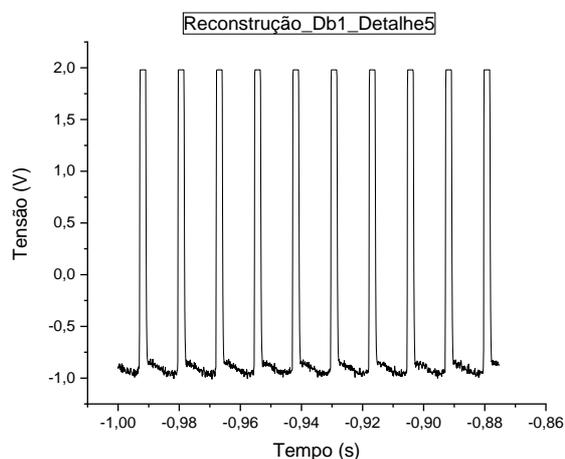
b)



c)



d)

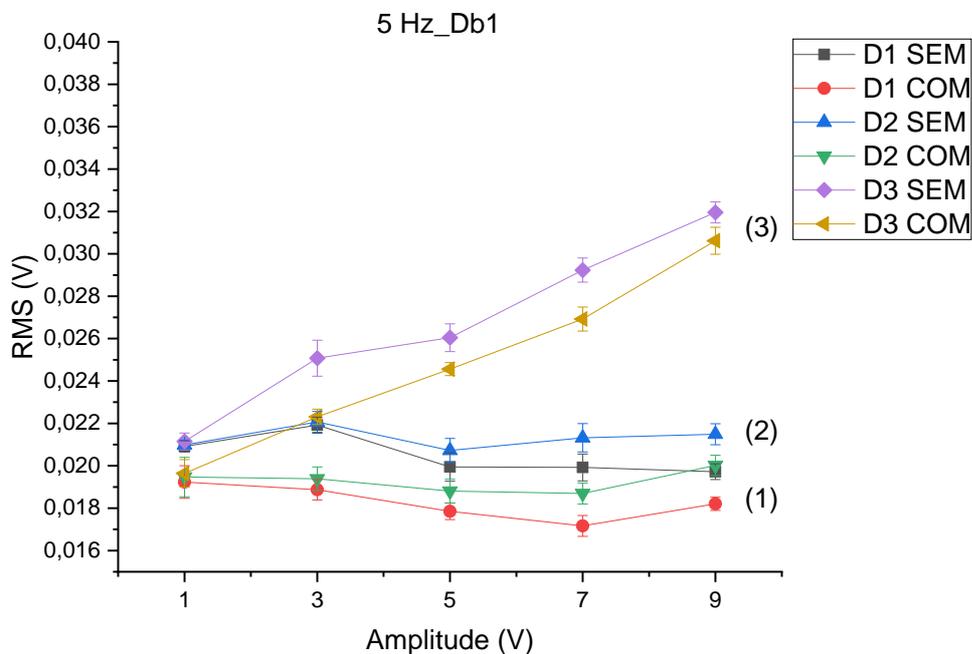


e)

Fonte: Própria

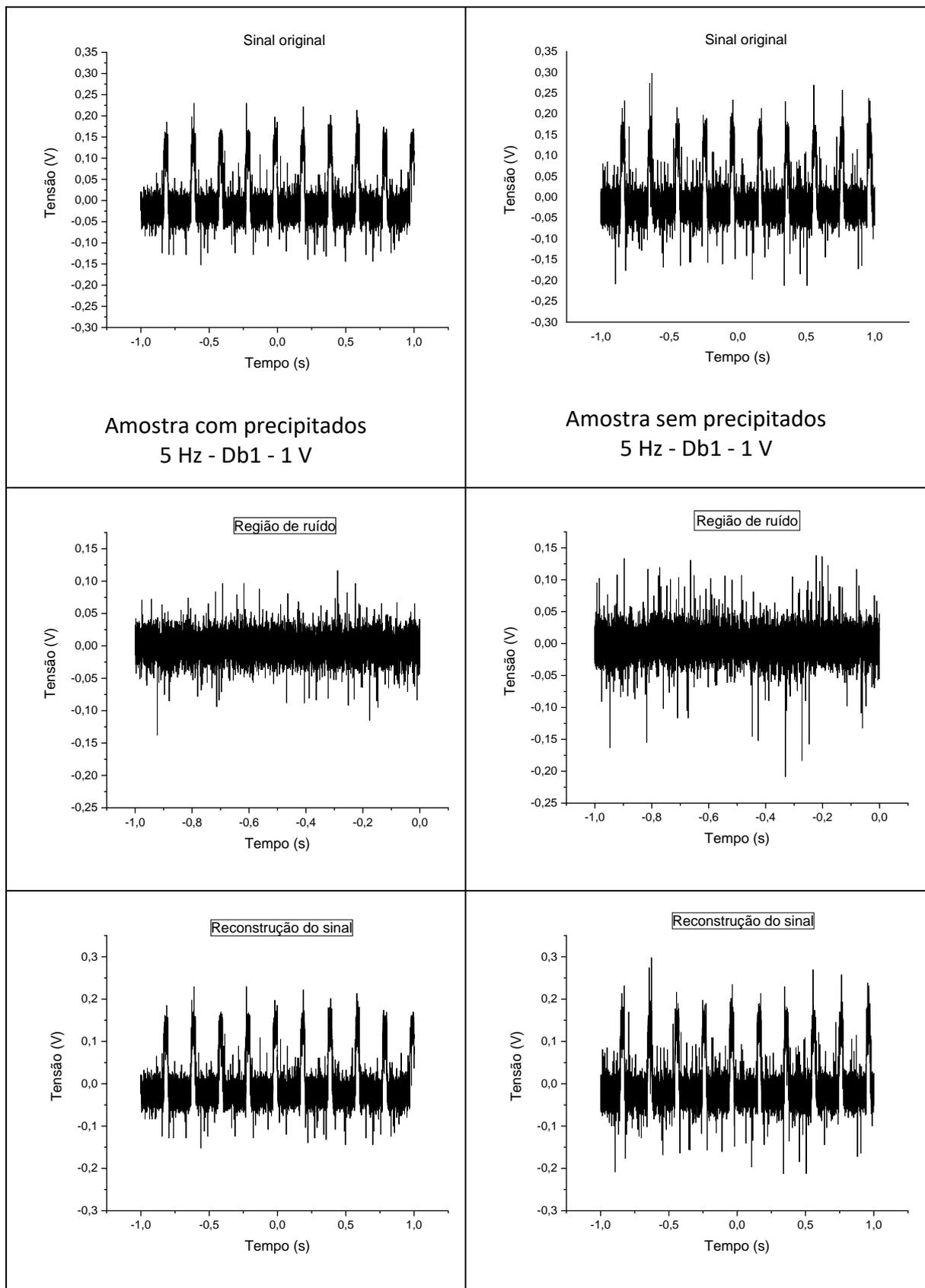
A Figura 27 mostra a variação do valor RMS, com um intervalo de confiança de 95%, dos sinais captados na bobina receptora após a aplicação da Transformada Wavelet Discreta (TWD) com a família Db1 e três níveis de detalhes, em função da amplitude da onda emissora de 5 Hz e amostras com e sem a presença de precipitados finos. Todavia, as curvas resultantes para os detalhes de níveis um e dois apresentam comportamento semelhante, ou seja, os valores RMS para as condições com e sem a presença de precipitados mostram serem independentes da amplitude da onda emissora aplicada, dentro do intervalo de confiança utilizado. Além disso, observa-se que os valores RMS da condição com precipitados são inferiores. Isto se deve ao bloqueio do movimento das paredes dos domínios magnéticos pela presença de precipitados finamente dispersos no interior da fase ferrita desse material. (TAVARES, 2018; SILVA, 2016).

Figura 27 - Variação RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db1 e três níveis de detalhes.

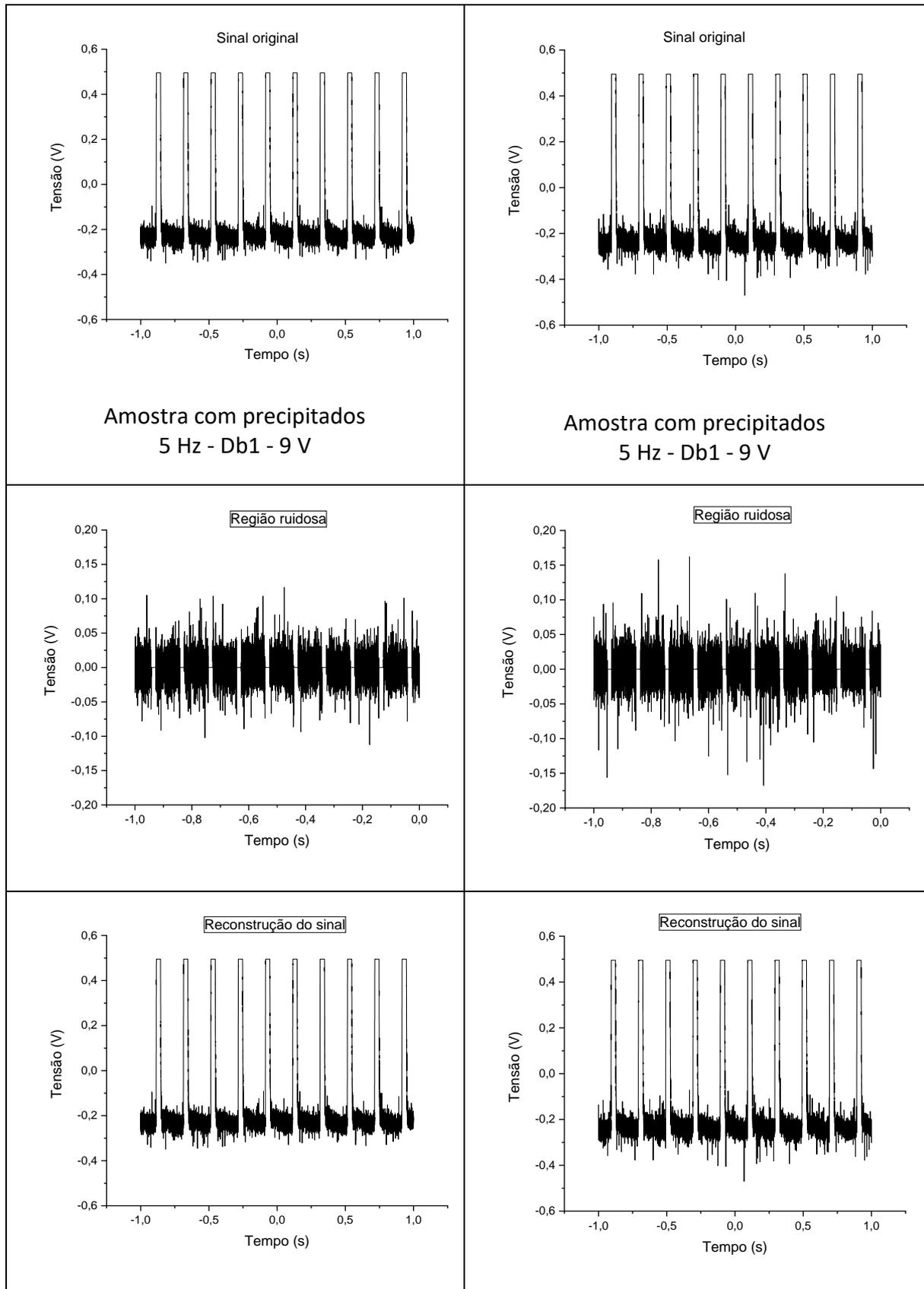


Fonte: Própria

A partir das curvas da Figura 27, ficou estabelecido que, para a família wavelet Daubechies 1, os detalhes de nível três em diante causam interferências indesejadas para a avaliação do ruído magnético de Barkhausen. Dessa forma, as zonas de interesse ficam reservadas a dois níveis de resolução. Após isso, levantou-se um quadro comparativo acerca do primeiro nível de resolução, para amostras com precipitados e sem precipitados, nas regiões de 1 V e 9 V de amplitude, que pode ser visto na Figura 28 e na Figura 29. É possível verificar nas referidas imagens que nitidamente há uma redução do ruído nas amostras com precipitados em relação às amostras sem precipitados. Nota-se também que a reconstrução destes sinais resulta em sinais similares aos originais, por se tratar de uma decomposição em apenas um nível de detalhe, assim, preserva-se a região ruidosa, que é a faixa desejada.

Figura 28 - Quadro comparativo entre amostra de sinal de 1 V com frequência de 5 Hz.

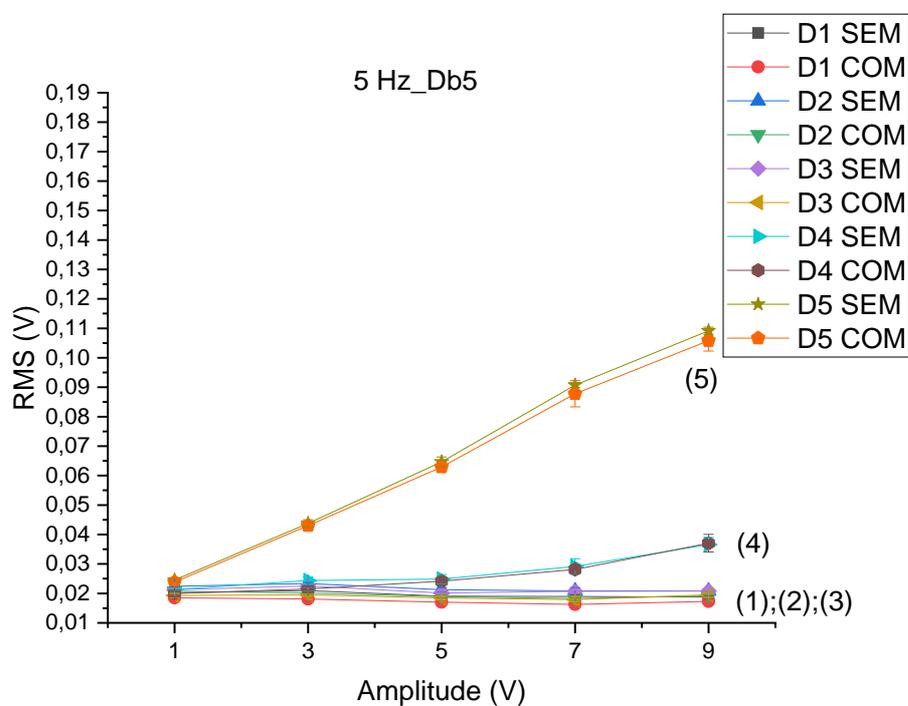
Fonte: Própria

Figura 29 - Quadro comparativo entre amostra de sinal de 9 V com frequência de 5 Hz.

Fonte: Própria

A Figura 30 mostra a variação do valor RMS, dos sinais captados na bobina receptora após a aplicação da Transformada Wavelet Discreta (TWD) com a família Db5 e cinco níveis de resolução, em função da amplitude da onda emissora de 5 Hz e amostras com e sem a presença de precipitados finos. Diferentemente do caso em que se tinha a família Db1, aqui percebe-se um aumento mais significativo dos valores RMS a partir do quarto nível de decomposição, e não no terceiro, como anteriormente. Além disso, o mesmo comportamento é observado para as curvas com e sem a presença de precipitados.

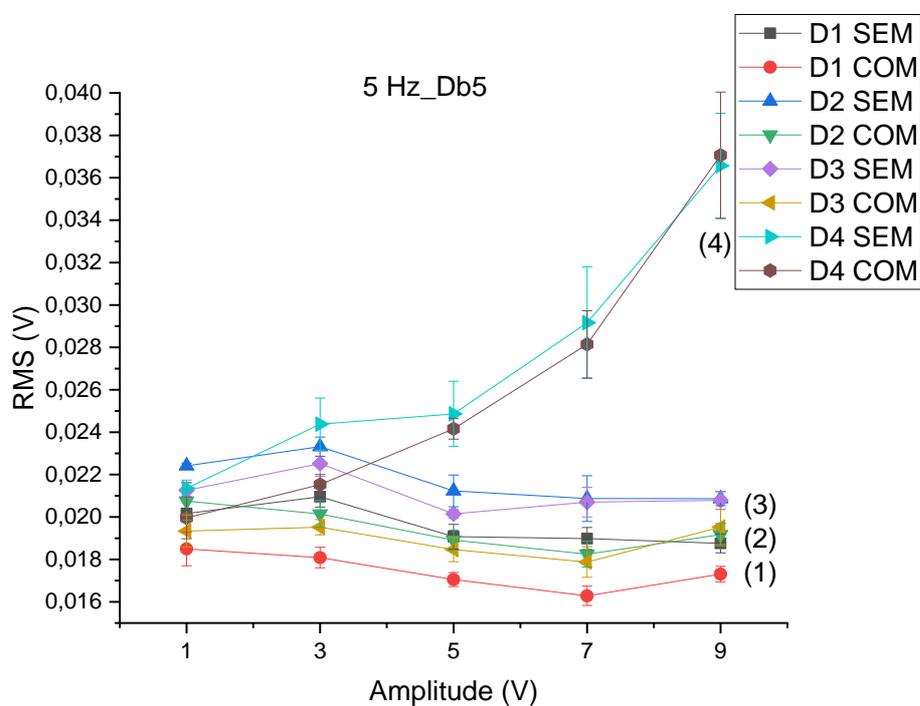
Figura 30 - Variação RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db5 e cinco níveis de detalhes.



Fonte: Própria

A Figura 31 traz a mesma informação que a figura 30, entretanto, evidencia de forma mais perceptível a semelhança de comportamento entre os detalhes de níveis um, dois e três. Consequentemente, leva a conclusão que de fato, a Daubechies de ordem 5 admite o emprego de três níveis de decomposição para caracterizar o ruído magnético de Barkhausen com êxito. Apenas os detalhes quatro destoam do restante, assim, já não servirá para o propósito almejado. Porém, ainda se observa que os valores RMS da condição com precipitados são inferiores em todos os casos.

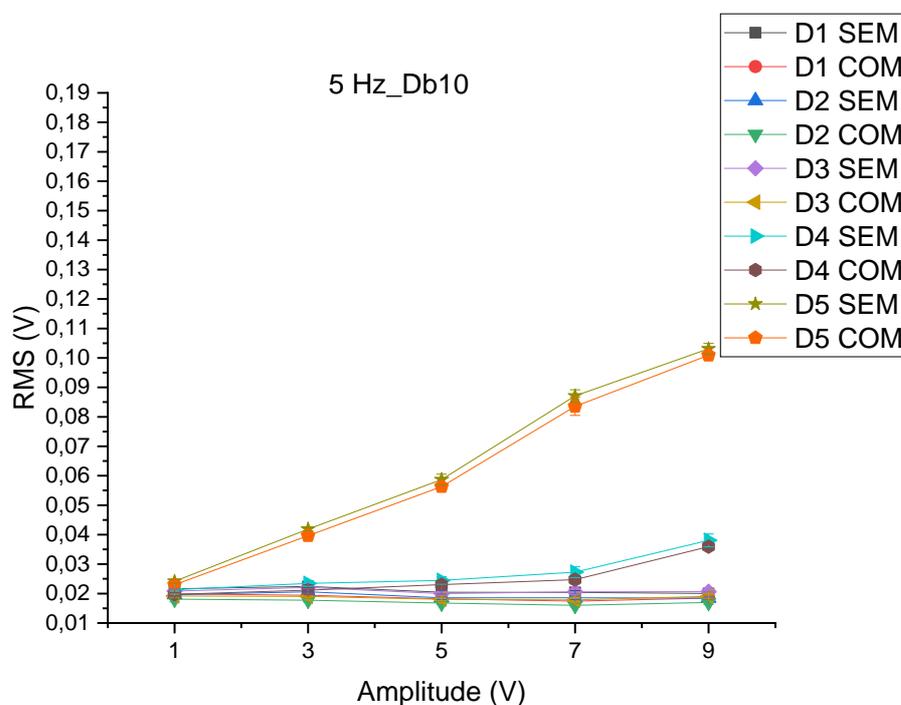
Figura 31 - Variação RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db5 e quatro níveis de detalhes.



Fonte: Própria

A Figura 32 mostra a variação do valor RMS, com um intervalo de confiança de 95%, dos sinais captados na bobina receptora após a aplicação da Transformada Wavelet Discreta (TWD) com a família Db10 e cinco níveis de resolução, em função da amplitude da onda emissora de 5 Hz e amostras com e sem a presença de precipitados finos. Assim como no caso da família Db5, nota-se um aumento mais significativo dos valores RMS a partir do quarto nível de decomposição, porém, naquele caso, a curva D4 iniciava uma subida abrupta a partir dos 5 V de amplitude, e no gráfico a seguir, isso ocorre apenas de 7 V para 9 V. As curvas com e sem a presença de precipitados continuam a seguir o mesmo comportamento.

Figura 32 - Variação RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db10 e cinco níveis de detalhes.

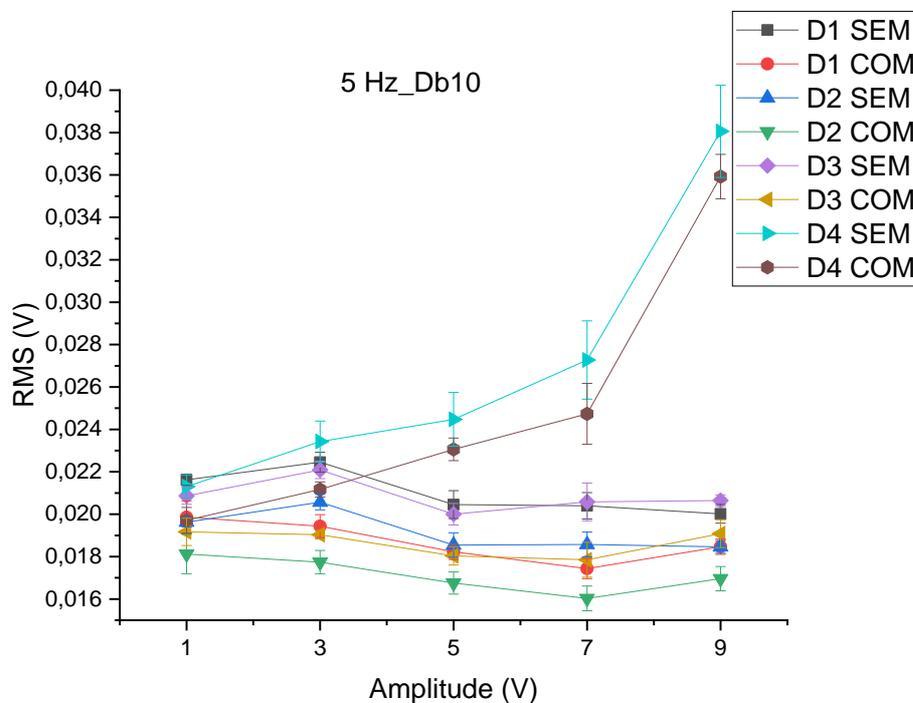


Fonte: Própria

A Figura 33 traz a mesma informação que a Figura 32, entretanto, evidencia de forma mais perceptível a semelhança de comportamento entre os detalhes de níveis um, dois e três. Da mesma forma que a família wavelet Db5, a Daubechies de ordem 10 também admite o emprego de três níveis de decomposição para caracterizar o ruído magnético de Barkhausen com êxito, de modo que apenas os detalhes quatro destoam do restante, assim, já não servirá para o propósito almejado. Como em todos os casos, os valores RMS da condição com precipitados são inferiores em todos os pares de curvas.

Ao analisar estas situações, em que se empregou apenas ondas emissoras de 5 Hz, conclui-se previamente que a análise do ruído magnético de Barkhausen (RMB) por meio da Transformada Wavelet Discreta com a família Daubechies de ordem um (Db1), obtém sucesso apenas para os dois primeiros níveis de resolução. Tratando-se das famílias (Db5) e (Db10), estas são capazes de atingir até três níveis de detalhes para avaliação do RMB, isto demonstra que as famílias de ordens superiores possuem maior sensibilidade para detectar a o ruído de Barkhausen (WANG *et al.*, 2013). Contudo, dentre as estudadas, a Db10 obteve os melhores resultados.

Figura 33 - Variação RMS do sinal de 5 Hz obtido da bobina receptora com a família Db10 e quatro níveis de detalhes.

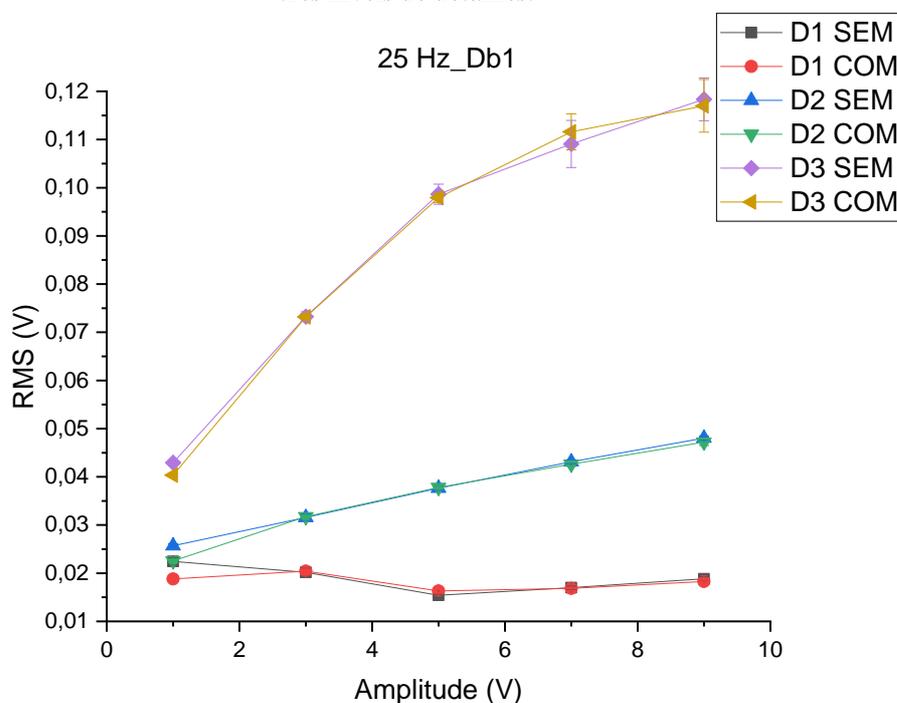


Fonte: Própria

A partir do exposto, serão utilizadas agora ondas emissoras na frequência de 25 Hz, tratadas apenas com três níveis de resolução e as famílias wavelets Db1, Db5 e Db10, em função da amplitude da onda emissoras de 25 Hz e amostras com e sem a presença de precipitados finos. A Figura 34 mostra a variação do valor RMS dos sinais captados na bobina receptora com um intervalo de confiança de 95%.

Nessa condição, quando aplicada a Db1, nota-se que apenas a curva D1 mantém uma tendência constante em toda a escala de amplitude (V). O segundo nível de detalhes sofre uma grande interferência a partir dos 3 V, e o terceiro nível se comporta de maneira ainda mais súbita. Assim, conclui-se que para essa família, na análise do ruído magnético de Barkhausen para detecção de microestruturas fragilizantes, apenas um nível de resolução pode ser utilizado.

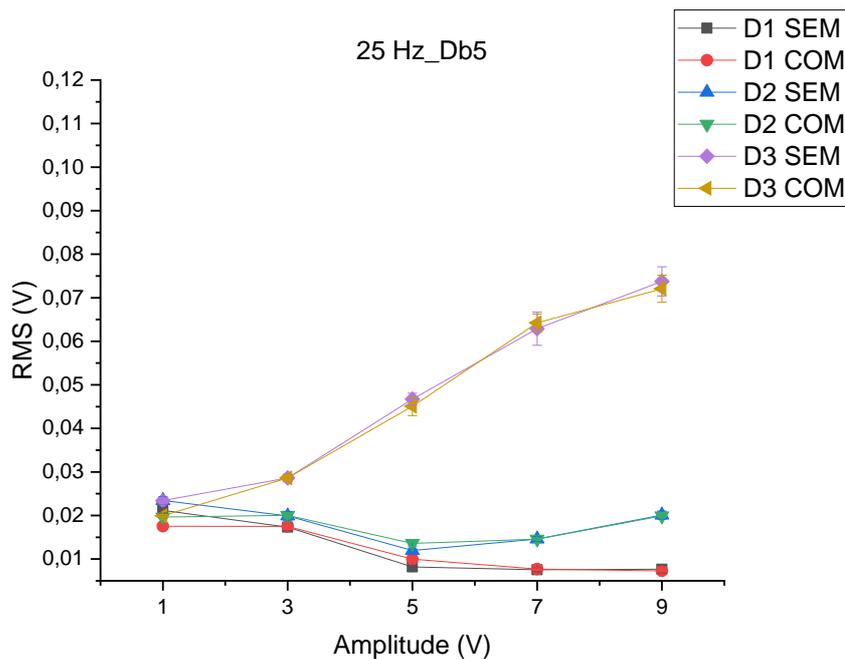
Figura 34 - Variação RMS do sinal de 25 Hz obtido da bobina receptora com a família Db1 e três níveis de detalhes.



Fonte: Própria

Ao analisar a Figura 35, agora com a família Db5, percebe-se uma aproximação entre os níveis de detalhes D1 e D2, em comparação com a família Db1. O terceiro nível continua distante, e realmente pode ser descartado por apresentar uma discrepância muito acentuada entre as amplitudes de 1 V e 9 V.

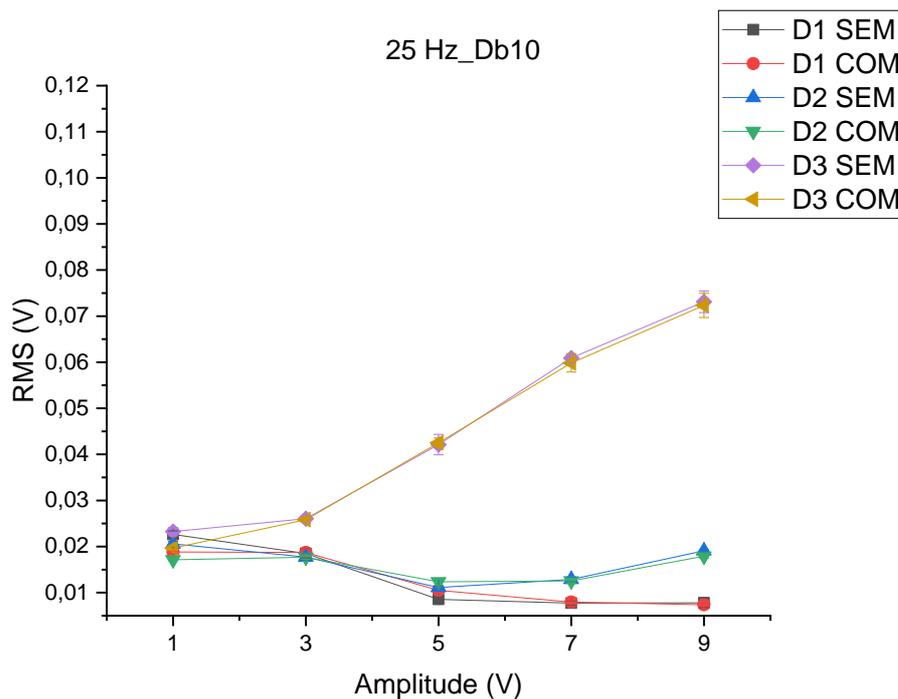
Figura 35 - Variação RMS do sinal de 25 Hz obtido da bobina receptora com a família Db5 e três níveis de detalhes.



Fonte: Própria

Esta análise segue uma tendência comprovada na Figura 36 para família Db10, pois as curvas D1 e D2 se aproximam ainda mais, porém ainda continuam divergindo nos dois últimos pontos da curva. Com isso, conclui-se que, para ondas emissoras na frequência de 25 Hz, é melhor a família wavelet de ordem 10 (Db10) com apenas um nível de resolução.

Figura 36 - Variação RMS do sinal de 25 Hz obtido da bobina receptora com a família Db10 e três níveis de detalhes.

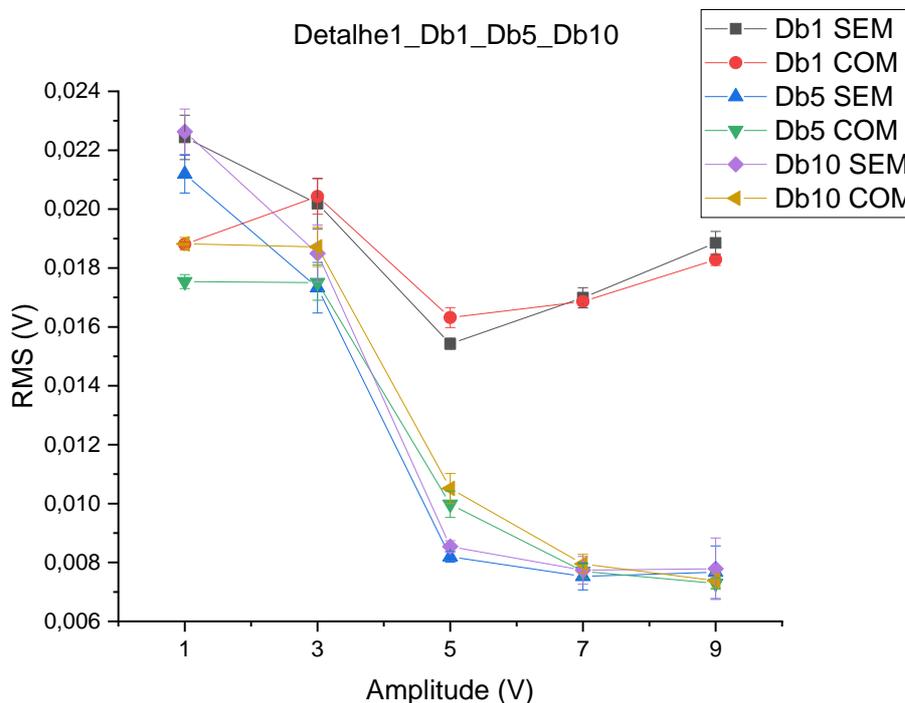


Fonte: Própria

A Figura 37 mostra a variação do valor RMS dos sinais captados na bobina receptora após a aplicação da Transformada Wavelet Discreta (TWD) com as famílias Daubechies de ordem um (Db1), cinco (Db5) e dez (Db10), e apenas um único nível de resolução, em função da amplitude da onda emissora de 25 Hz e amostras com e sem a presença de precipitados finos.

Com uma escala ampliada, percebe-se que as famílias Db5 e Db10 mantêm o mesmo comportamento, enquanto a Db1 tem sutis diferenças para 5 V, 7 V e 9 V de amplitude. Isto significa que, para a frequência de 25 Hz, não é interessante trabalhar com a família Db1, ainda que seja com um nível de detalhes. Logo, tais resultados apontam que as famílias Db5 e Db10 são adequadas para a avaliação do ruído magnético de Barkhausen (RMB) na detecção de microestruturas fragilizantes.

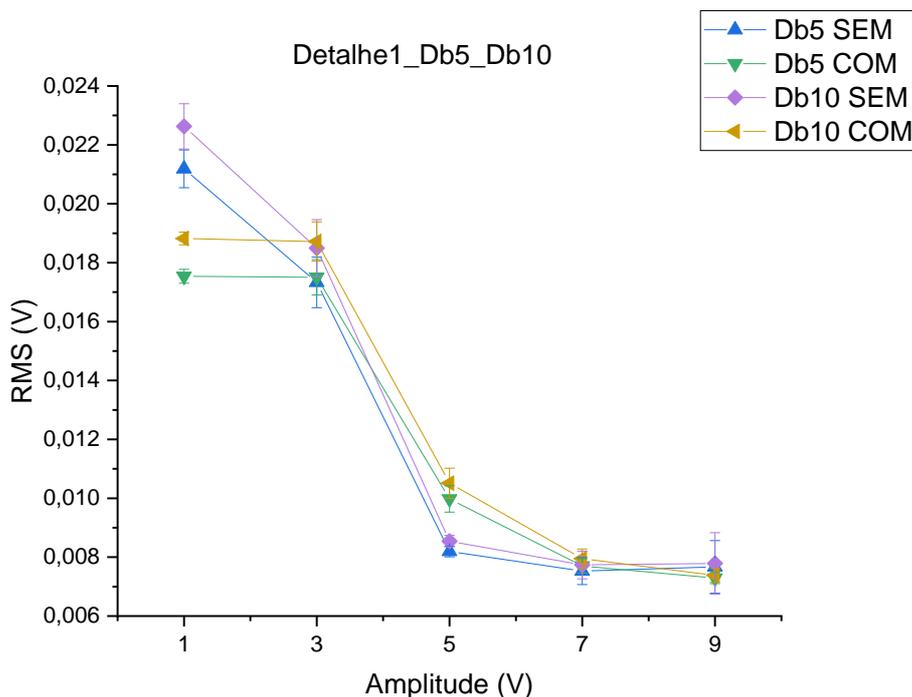
Figura 37 - Variação RMS do sinal de 25 Hz obtido da bobina receptora com um nível de detalhes e as famílias Db1, Db5 e Db10.



Fonte: Própria

A Figura 38 traz a mesma informação que a Figura 37, entretanto, evidencia de forma isolada a semelhança de comportamento entre as famílias Db5 e Db10. Além disso, é possível perceber que, dentre as amplitudes estudadas, a de 1 V é a que melhor consegue diferenciar as condições das amostras com precipitados e sem precipitados. Para as zonas de 3 V, 5 V, 7 V e 9 V, os valores RMS do sinal são muito próximos, e as curvas estão praticamente sobrepostas. De acordo com Carvalho Filho (2018), ondas geradas pela bobina emissora com frequência até 25 Hz são capazes de diferenciar as amostras com e sem precipitados para amplitudes inferiores a 3V, sendo assim recomendadas para trabalhar com o ruído de Barkhausen.

Figura 38 - Variação RMS do sinal de 25 Hz obtido da bobina receptora com um nível de detalhes e as famílias Db5 e Db10.

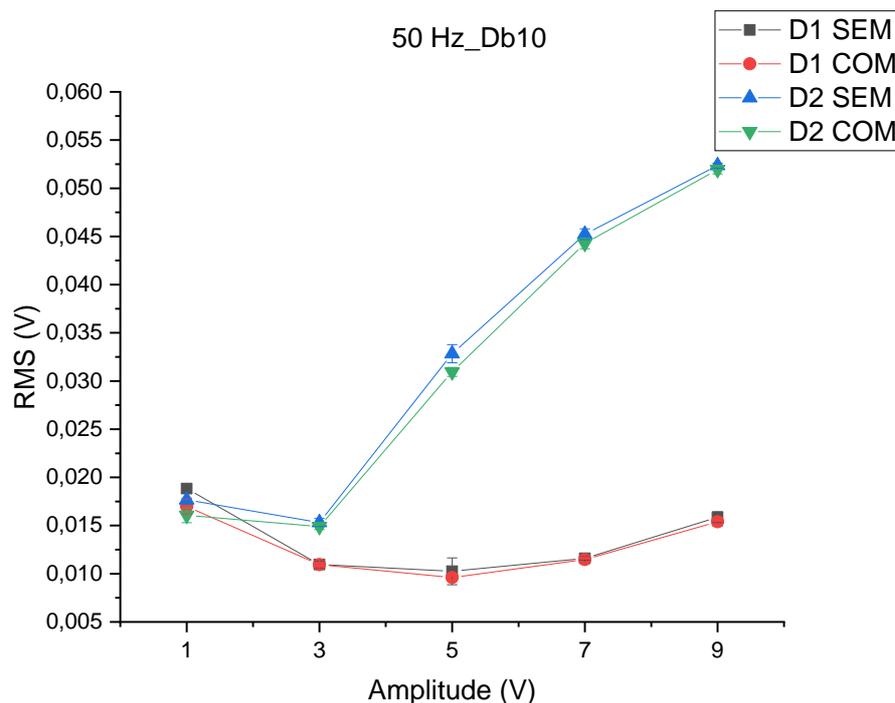


Fonte: Própria

Por fim, serão utilizadas agora ondas emissoras na frequência de 50 Hz, tratadas apenas com a família wavelet Db10 e dois níveis de resolução, em função da amplitude da onda emissora de 50 Hz e amostras com e sem a presença de precipitados finos. A Figura 39 mostra a variação do valor RMS dos sinais captados na bobina receptora.

Nessa condição, nota-se que a curva D2 sobe abruptamente, e a curva D1, ainda que de maneira menos acentuada, também não se mantém estável. A partir dos 5 V de amplitude, a onda de 50 Hz sofre grandes influências devido a frequência elevada e os valores RMS sobem de maneira indesejada. Logo, é visto que não é possível utilizar ondas emissoras de 50 Hz para detecção de microestruturas fragilizantes através do ruído magnético de Barkhausen por meio da Transformada Wavelet Discreta, uma vez que os resultados mostraram ser eficientes apenas quando utilizadas ondas de 5 Hz e 25 Hz. De toda forma, as medidas RMS entre as condições com e sem precipitados não apresentam variação dentro da faixa de erro estudada.

Figura 39 - Variação RMS do sinal de 50 Hz obtido da bobina receptora com a família Db10 e dois níveis de detalhes.

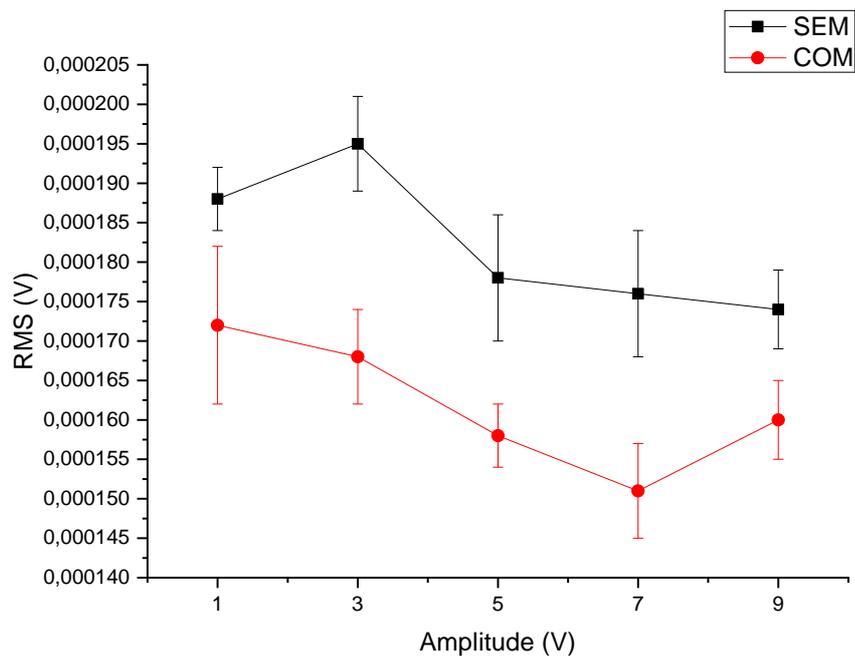


Fonte: Própria

Este trabalho avaliou a aplicabilidade da Transformada Wavelet Discreta (TWD) no ruído magnético de Barkhausen para detecção de precipitados nanométricos no aço inoxidável duplex SAF 2205.

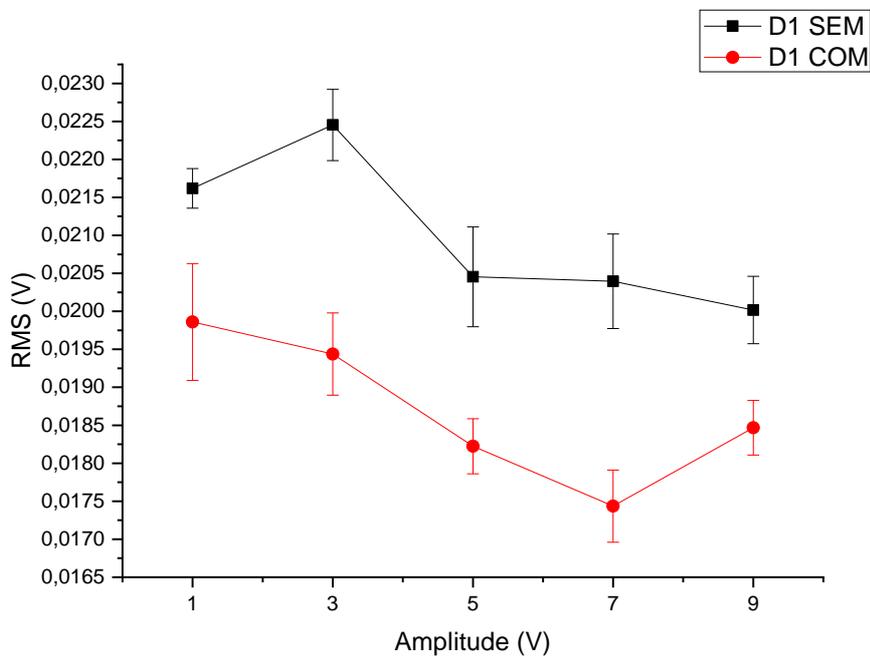
A Figura 40 mostra o gráfico produzido com os resultados de Carvalho Filho (2018), que admitiu apenas o corte de frequência para dissociar o ruído de Barkhausen do sinal como um todo, enquanto que a Figura 41 mostra o gráfico obtido através da Transformada Wavelet Discreta, aplicando a família Db10 com um nível de resolução, ambos para ondas emissoras de 5 Hz. Os dois gráficos possuem o mesmo aspecto e as curvas têm comportamento semelhantes, entretanto, percebe-se que a TWD contribuiu positivamente aumentando a ordem de grandeza dos resultados em cem vezes em relação ao trabalho anterior, sem causar interferências ou distorções. Isto implica que ao invés de realizar medições na escala de tensão em 10^{-4} V, de agora em diante poderá ser feita em 10^{-2} V. Além disso, diminuiu a faixa de erro em cada ponto, o que torna mais precisa a informação.

Figura 40 - Variação RMS do sinal de 5 Hz para amostras com e sem precipitados, obtidos por Carvalho Filho (2018).



Fonte: (CARVALHO FILHO, 2018)

Figura 41 - Variação RMS do sinal de 5 Hz para amostras com e sem precipitados, através da TWD com a família Db10 e um nível de decomposição.



Fonte: Própria

5. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi abordada uma nova metodologia para tratamento do sinal do ruído magnético de Barkhausen por meio da Transformada Wavelet Discreta para detecção de microestruturas fragilizantes em aço. Do trabalho realizado podem ser retiradas as seguintes conclusões:

- 1) A aplicação de ondas emissoras de 5 Hz foram capazes de gerar o efeito Barkhausen em amostras com e sem a presença de precipitados nanométricos, sendo possível diferenciar as duas condições;
- 2) O ruído magnético de Barkhausen (RMB) também pode ser gerado através de ondas emissoras de 25 Hz e 50 Hz, entretanto, com o aumento da frequência os resultados tendem a se tornarem menos precisos;
- 3) A Transformada Wavelet Discreta com as famílias Daubechies de ordem 1 (Db1), 5 (Db5) e 10 (Db10) podem ser utilizadas para avaliação do ruído magnético de Barkhausen gerado a partir de ondas emissoras de 5 Hz e 25 Hz;
- 4) Para ondas emissoras de 5 Hz é possível utilizar até dois níveis de detalhes com a família Db1, e três níveis com as famílias Db5 e Db10. Entretanto, a Db10 mostrou-se mais precisa, sendo assim apontada como a melhor opção na caracterização do RMB;
- 5) Para ondas emissoras de 25 Hz é possível utilizar tanto a família Db5, quanto a Db10, ambas com apenas um nível de detalhes. Porém, novamente a Db10 mostrou-se mais precisa, e continua sendo a melhor opção na análise do ruído magnético de Barkhausen;
- 6) Para ondas emissoras de 50 Hz não foi possível utilizar a Transformada Wavelet Discreta, pois nessa faixa de frequência o ruído sofre distorções acentuadas, de modo que inviabiliza a diferenciação entre amostras com e sem precipitados.
- 7) Os valores de RMS para as amostras com precipitados nanométricos são menores em todas as faixas de frequências utilizadas, bem como para todas as famílias wavelets aplicadas. Contudo, as ondas emissoras de 5 Hz apresentam maior capacidade de diferenciação entre as condições com e sem precipitados.

- 8) Utilizando a família Db10 com 1 nível de resolução, aplicada à onda emissora de 5 Hz, a TWD gerou resultados em uma escala cem vezes maior do que em relação a trabalhos anteriores com a mesma frequência, facilitando a sua visualização e a sua medição.

5.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir da pesquisa realizada, a seguir, são feitas algumas sugestões para trabalhos futuros envolvendo as temáticas aqui abordadas:

- a) Partindo dos resultados obtidos, aplicar no ruído de Barkhausen a Transformada Wavelet Discreta com as famílias Daubechies de ordens ainda mais superiores (Db30 e Db40);
- b) Devido a variação de amplitude do ruído a partir do terceiro nível de detalhes com a família Daubechies, sugere-se realizar experimentos com as wavelets Mexican Hat, Coiflets, Symlets e Biorthogonal, a fim de comparar a precisão na análise do ruído Magnético de Barkhausen.

5.2 TRABALHOS PUBLICADOS

Ao longo deste curso, foram publicados os seguintes trabalhos acadêmicos:

- a) E. de M. Silva, S. E. N. Correia, I. P. de B. Neto, R. A. de Carvalho, J. A. de C. Filho, L. G. de Lima, “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 (SBrT)*, Florianópolis, Santa Catarina, 2020.
- b) E. de M. Silva, A. Medeiros, A. Francis, W. Macedo, I. Luiz, I. P. de B. Neto, J. Pereira, “Detection of the Sigma Phase in a Duplex Stainless Steel Through Measurements of Magnetic Permeability”, *19º Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica (SBMO) e o 14º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo (CBMag)*, virtual, 2020.

- c) E. de M. Silva, C. E. B. Lopes, F. E. M. da Silva, I. P. de B. Neto, A. Medeiros, L. G. de Lima, J. Leite, “Non-destructive electromagnetic test for detecting discontinuities in steels”, 26º Congresso Internacional de Engenharia Mecânica – COBEM, virtual, 2021.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, V. H. C.; SILVA, E. M.; PEREIRA, L. J.; MOURA, E. P.; ARAÚJO, V. L.; TAVARES, J. M. R. S. Spinodal decomposition mechanism study on the duplex stainless steel UNS-S31803 using ultrasonic speed measurements. **Materials and Design**, v. 31, p. 2147-2150, 2010.

ARAÚJO, B. R. **Caracterização da onda emissora para geração do efeito de Barkhausen para detecção de precipitados nanométricos em um ensaio eletromagnético**, 68 f. Dissertação de mestrado. Instituto Federal da Paraíba - IFPB, 2019.

ARAÚJO, M. 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 de mestrado. Universidade Federal do Pará - UFPA, 2011.

BACK, J. A.; TEDESCO, L.; MOLZ, R. F. Aplicação das transformadas Wavelets na análise da qualidade da energia elétrica em processos industriais. **Revista UNISC Tecno-lógica**, v. 20, n. 1, p. 39, 2015.

BARRETO, J. H. B. **Ensaio eletromagnético para acompanhamento da fragilização a 475 ° C em aços inoxidáveis duplex**, 79 f. Dissertação de mestrado. Instituto Federal da Paraíba - IFPB, 2016.

CALLISTER JR, W. D., **Materials science and engineering an introduction** 7° ed. John Wiley & Sons, 2007.

CARVALHO FILHO, J. A. **Ensaio eletromagnético baseado no ruído de Barkhausen para acompanhamento de formação de transformações microestruturais**, 61 f. Dissertação de mestrado. Instituto Federal da Paraíba - IFPB, 2018.

FONSECA, E. S. *et al.* Wavelet time-frequency analysis and least squares support vector machines for the identification of voice disorders. **Computers in Biology and Medicine**, v. 37, n. 4, p. 571–578, 2007.

FRANÇA NETO, F. A. **Estudo de uma nova técnica não destrutiva, baseada em medidas de permeabilidade magnética, para acompanhamento da fragilização de um aço inoxidável duplex**, 105 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Paraíba - UFPA, 2011.

GENEROSO, D.J; DAMIN,K.V.S, **Aços Inoxidáveis Duplex visão geral: da história à metalurgia física**, 134 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Instituto Federal de Santa Catarina-IFSC, 2014.

GHANEI, S.; KASHEFI, M.; MAZINANI, M. Comparative study of eddy current and Barkhausen noise nondestructive testing methods in microstructural examination of ferrite-martensite dual-phase steel. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v.356, p. 103-110, 2014.

GRIJALBA, F. A. F. **Desenvolvimento de ensaio não destrutivo baseado no ruído magnético de Barkhausen para caracterização de tensões elásticas e deformações plásticas em aços**. 163 f. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP, 2010.

GUNN, R.N. **Duplex stainless steels. Microstructure, properties and applications**. Cambridge – England, Abington Publishing, 2003. 204 p.

HATTESTRAND, M.; LARSSON, P.; CHAI, G., NILSSON, J.; ODQVIST, J. Study of decomposition of ferrite in a duplex stainless steel cold worked and aged at 450–500° C, **Material Science and Engineering**, v. A499, p. 489–492, 2009.

JILES, D. **Introduction to Magnetism and Magnetic Materials**. 2. ed. Ames: Chapman and Hall, 1991. 454 p.

LIRA, M. M. S. **Wavelets na compactação e processamento de sinais de distúrbios em sistemas de potência para classificação via redes neurais artificiais**, 132 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, 2004.

K. H. LO; LAI, J. K. L. Microstructural characterisation and change in a.c. magnetic susceptibility of duplex stainless steel during spinodal decomposition. **Journal of Nuclear Materials**, v. 401, n. 1–3, p. 143–148, 2011.

MAASS, P. *et al.* Detection and classification of material attributes – a practical application of Wavelet analysis, **IEEE Transactions on Signal Processing**, vol. 48, n. 8, p. 2432–2438, August 2000.

MADAN, R.; SUNIL, P.; SINGH, K.; JAIN, N. Signal Filtering Using Discrete Wavelet Transform. **International Journal of Recent Trends in Engineering**, v. 2, n. 3, p. 96–98, 2009.

MAGALAS, L. B. Application of the Wavelet transform in mechanical spectroscopy and in Barkhausen noise analysis. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 310, n. 1-2, p. 269–275, 2000.

MALLAT, S. G. A theory for multiresolution signal decomposition: the Wavelet representation, Pattern Analysis and Machine Intelligence, **IEEE Transactions on Signal Processing**, v. 11, n. 7, p. 674–693, 1989.

MATHWORKS, **Documentation for MathWorks Products**. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/>. Acesso em: 12 Jun. 2020.

MIESOWICZ, K.; STASZEWSKI, W. J.; KORBIEL, T. Analysis of Barkhausen noise using Wavelet-based fractal signal processing for fatigue crack detection. **International Journal of Fatigue**, v. 83, p. 109–116, 2016.

MISITI, M. *et al.* **Wavelet Toolbox For Use With Matlab**. London: MathWorks, 2000.

NORMANDO, P. G. *et al.* Ultrasound, eddy current and magnetic Barkhausen noise as tools for sigma phase detection on a UNS S31803 duplex stainless steel. **Materials Science and Engineering A**, v. 527, n. 12, p. 2886–2891, 2010.

NYQUIST, H. Certain factors affecting telegraph speed. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, XLIII, p. 412–422, Jan 1924. ISSN 0096-3860.

OLIVEIRA, A. V. G. **Ensaio eletromagnético para detecção de fase sigma em aços inoxidáveis duplex**, 102 f. Dissertação de mestrado. Instituto Federal da Paraíba - IFPB, 2016.

OLIVEIRA, H. M. **Análise de Fourier e Wavelets: Sinais Estacionários e não Estacionários**. 1. ed. Recife: Editora Universitária, 2007. 348 p.

OTÁROLA, T. *et al.* Embrittlement of a superduplex stainless steel in the range of 550-700 °C. **Engineering Failure Analysis**, v. 12, n. 6 SPEC. ISS., p. 930–941, 2005.

PENHA, R. M. L. **Análise de sinais em regime transiente aplicando a técnica de Wavelet**, 95 f. Dissertação de mestrado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN, 1999.

PENNA, C. Detecção, localização e identificação de distúrbios da qualidade da energia através da transformada Wavelet. **AES Sul**, p. 1-6, 2002. Apresentado no XV Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica - SENDI, 2002, Porto Alegre, RS.

QUEIROZ, S. L. A. Wavelet transforms in a critical interface model for Barkhausen noise. **Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics**, v. 77, n. 2, p. 1–9, 2008.

SEDRIKS, A.J., **Corrosion of stainless steel**, 2.ed , John Wiley & Sons, NY,1996.

SHENG, Y. Wavelet Transform. *in:* POULARIKAS, A. **The Transforms and Applications Handbook**. Boca Raton: CRC Press LLC, 2000. cap. 10, 89 p.

SILVA, E. M. *et al.* Detection of the magnetic easy direction in steels using induced magnetic fields. **Metals**, v. 6, n. 12, 2016a.

SILVA, E. M. *et al.* Sigma phase detection in duplex stainless steel by induced magnetic field. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 733, n. 1, p. 4–10, 2016b.

SILVA, E. M. *et al.* Classification of induced magnetic field signals for the microstructural characterization of sigma phase in duplex stainless steels. **Metals**, v. 6, n. 7, p. 1–16, 2016c.

STEFANITA, C. G. *et al.* Plastic versus elastic deformation effects on magnetic Barkhausen noise in steel. **Acta Materialia**, v. 48, n. 13, p. 3545–3551, 2000.

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.

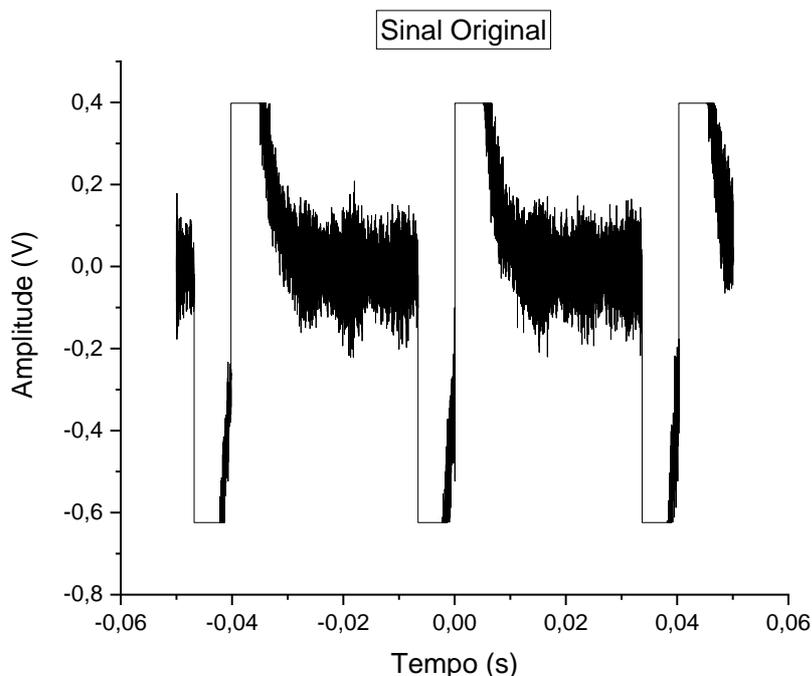
YAMAZAKI, T.; FURUYA, Y.; NAKAO, W. Experimental evaluation of domain wall dynamics by Barkhausen noise analysis in Fe₃₀Co₇₀ magnetostrictive alloy wire. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 475, n. 1, p. 240–248, 2019.

ANEXO A

Paralelamente ao estudo do ruído magnético de Barkhausen, outro levantamento foi realizado para efeitos de demonstração da Transformada Wavelet Discreta (TWD) quando aplicada a um sinal de uma onda conhecida. Baseado no trabalho de (MADAN *et al.*, 2009), que utilizaram a Transformada Wavelet com a família Daubechies para demonstrar a sua eficiência no tratamento de ruídos no sinal de eletrocardiograma (ECG). Aqui neste experimento, uma onda quadrada foi acrescida de um sinal ruidoso e em seguida aplicou-se a TWD com a família Db10 e cinco níveis de detalhes. Estes resultados estão presentes na Figura 42 (a, b, c, d, e, f, g, h, j), bem como o sinal antes da decomposição em múltiplas camadas.

Nota-se que inicialmente o sinal possui um grande ruído atrelado à onda quadrada e no primeiro nível da decomposição é selecionado apenas esse ruído. A reconstrução para esse referido nível entrega um sinal praticamente idêntico ao original. Ao decorrer da trajetória, conforme vai se aplicando mais detalhes, o ruído é cortado cada vez mais, e a respectiva reconstrução gera um resultado cada vez mais próximo do sinal original, no caso, uma onda quadrada (MADAN *et al.*, 2009).

Figura 42 - Onda quadrada com ruído antes da aplicação da TWD



Fonte: própria

