



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ARTUR CÉSAR DA SILVA BORGES

**CARACTERIZAÇÃO DE EVENTO DE AFUNDAMENTO DE TENSÃO UTILIZANDO
TRANSFORMADA WAVELET**

Recife
2023

ARTUR CÉSAR DA SILVA BORGES

**CARACTERIZAÇÃO DE EVENTO DE AFUNDAMENTO DE TENSÃO UTILIZANDO
TRANSFORMADA WAVELET**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador(a): Prof. Dr. Sc. Milde Maria da Silva Lira

Recife
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Borges, Artur César da Silva.

CARACTERIZAÇÃO DE EVENTO DE AFUNDAMENTO DE TENSÃO
UTILIZANDO TRANSFORMADA WAVELET / Artur César da Silva

Borges. - Recife, 2023.

44 : il., tab.

Orientador(a): Milde Maria da Silva Lira

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Elétrica -
Bacharelado, 2023.

1. Afundamento de Tensão. 2. Distúrbio. 3. Transformada Wavelet. 4.
Qualidade de Energia Elétrica. I. Lira, Milde Maria da Silva. (Orientação). II.
Título.

620 CDD (22.ed.)

ARTUR CÉSAR DA SILVA BORGES

**CARACTERIZAÇÃO DE EVENTO DE AFUNDAMENTO DE TENSÃO UTILIZANDO
TRANSFORMADA WAVELET**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em: 05/05/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Sc. Milde Maria da Silva Lira (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Geraldo Leite Torres (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Vicente Ribeiro Simoni (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico esse trabalho primeiramente a Deus e minha família com todo apoio para concluir o curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado saúde e condições de realizar esse trabalho. Agradeço a minha família e a todos que me ajudaram a ter dedicação e empenho durante toda a minha trajetória na graduação. Agradeço a minha orientadora Prof(a). Dr(a) Milde Maria da Silva Lira, por todo empenho e direcionamento fornecido para a realização desse trabalho de conclusão de curso.

“Conhecereis a verdade e a verdade vos libertará.” (JOÃO 8:32).

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre Transformada Wavelet aplicada à Qualidade da Energia Elétrica com o objetivo de detectar e caracterizar eventuais distúrbios de afundamentos de tensão que ocorrem no Sistema Elétrico. Inicialmente é apresentado um estudo teórico da Transformada Wavelet, que serve como uma ótima ferramenta matemática na área de análise de sinais, a partir da qual podem ser extraídas informações de tempo e frequência, diferentemente da Transformada de Fourier. Em seguida, é apresentada uma introdução breve sobre a Qualidade da Energia Elétrica, enfatizando os conceitos e normas técnicas das VTCD (Variação de Tensão de Curta Duração). Na caracterização da duração da VTCD, observou-se que os monitores de qualidade de energia podem determinar a duração de forma errônea. Sendo assim, neste trabalho foi desenvolvido um algoritmo baseado na transformada wavelet que determina com bastante precisão o instante de início e término do afundamento de tensão. O algoritmo desenvolvido mostrou-se bastante eficiente quando aplicado aos sinais reais de afundamento registrados na rede de distribuição da Neoenergia Pernambuco na ilha de Fernando de Noronha, especificamente na Usina Tubarão.

Palavras-Chave: Afundamento de Tensão, Distúrbio, Transformada Wavelet, Qualidade de Energia Elétrica.

ABSTRACT

This work presents a study on Wavelet Transform applied to Electric Power Quality with the objective of detecting and characterizing possible disturbances of voltage sags that occur in the Electric System. Initially, a theoretical study of the Wavelet Transform is presented, which serves as a great mathematical tool in the area of signal analysis, from which time and frequency information can be extracted, unlike the Fourier Transform. Next, a brief introduction on Electric Power Quality is presented, emphasizing the concepts and technical standards of VTCD (Short Duration Voltage Variation). In the characterization of the duration of the VTCD, it was observed that the power quality monitors can erroneously determine the duration. Therefore, in this work an algorithm based on the wavelet transform was developed that determines with great precision the instant of beginning and end of the voltage sag. The developed algorithm proved to be very efficient when applied to real sink signals recorded in the distribution network of Neoenergia Pernambuco on the island of Fernando de Noronha, specifically in Usina Tubarão.

Keywords: Voltage Sag, Disturbance, Wavelet Transform, Power Quality.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Demonstração do fator de escala da função seno	19
Figura 2 – Exemplo de Translação de uma função Wavelet.	20
Figura 3 – Cálculo do coeficiente C de relação entre a wavelet mãe e o sinal.....	20
Figura 4 – Translação da wavelet.	21
Figura 5 – Escalonamento da wavelet.	21
Figura 6 – Representação da Wavelet Haar.	22
Figura 7 – Wavelet Daubechies	23
Figura 8 – Decomposição Wavelet Symlet.....	24
Figura 9 – Distúrbios de Variação de Tensão de Curta Duração (VTCD).	26
Figura 10 – Afundamento de tensão devido a um curto-circuito em uma fase no domínio do tempo.....	31
Figura 11 – Estimativa da duração do afundamento pelo monitor de qualidade de energia elétrica.....	32
Figura 12 – Tensão eficaz de meio ciclo junto ao valor absoluto da tensão (linha tracejada) do afundamento mostrado na Figura 10.....	33
Figura 13 – Exemplo de um caso analisado de afundamento de tensão.	36
Figura 14 – Utilização da Transformada Wavelet Symlet4.....	36
Figura 15 – Gráfico do coeficiente de detalhe de nível 2 de um dos sinais de afundamento de tensão.....	37
Figura 16 – Exemplo de frequência de amostragem para um determinado sinal.....	38
Figura 17 – Fluxograma do algoritmo que calcula a duração do Afundamento de tensão.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD).....	26
Tabela 2 – Fatores de ponderação e Fator de Impacto Base de acordo com a tensão nominal (V_n).....	29
Tabela 3 – Estratificação dos parâmetros amplitude e duração para contabilização de eventos de VTCD	29
Tabela 4 – Estratificação das VTCD com base nos níveis de sensibilidade das diversas cargas	30
Tabela 5 – Resultados da Duração do Afundamento de Tensão disponibilizados pelo algoritmo.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Hz	Hertz
RMS	Root Mean Square
VTCD	Varição de Tensão de Curta Duração

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Geral.....	15
1.1.2	Específicos	15
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	TRANSFORMADA WAVELET	17
2.1.1	Transformada Wavelet Contínua (TWC)	19
2.1.1.1	<i>Cálculo da Transformada Wavelet Contínua</i>	20
2.1.2	Transformada Wavelet Discreta	21
2.1.3	Família Wavelet.....	22
2.1.3.1	<i>Wavelet Haar</i>	22
2.1.3.2	<i>Wavelet Daubechies</i>	23
2.1.3.3	<i>Wavelet Symlet</i>	24
2.2	QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA	25
2.2.1	Variação de Tensão de Curta Duração	26
2.2.1.1	<i>Afundamento de tensão</i>	30
	2.2.1.1.1 <i>Medição da duração do Afundamento de Tensão</i>	31
3	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	35
3.1	METODOLOGIA	35
3.1.1	Base de Dados	35
3.1.2	Método de Detecção do Afundamento de Tensão.....	35
3.1.3	Método de Caracterização do Afundamento de Tensão.....	37
3.2	RESULTADOS	40
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	42
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

Devido à grande evolução tecnológica das cargas dos consumidores desde o início do século XXI, que tornaram a exigência de ter um sinal sem distorções, o assunto de Qualidade de Energia Elétrica ganhou bastante notoriedade, principalmente devido a diversas mudanças que ocorreram na estrutura do setor elétrico brasileiro. A partir disso, é de extrema importância monitorar a qualidade da energia elétrica para identificar pontos de maior ocorrência de falhas no sistema e propor meios para mitigar seus efeitos nas cargas dos consumidores.

Afundamentos de Tensão são reduções momentâneas na tensão eficaz causadas por curtos-circuitos, sobrecargas e partidas de grandes motores. O interesse pelo assunto se deve principalmente aos problemas que ele causa em diversos tipos de equipamentos, como conversores de velocidade, equipamentos de controle de processos, dentre outros (Boller, 2005).

Quando a tensão eficaz estiver entre 10% e 90% por mais de um ou dois ciclos, os medidores RDP (Registrador Digital de Perturbação) registram a forma de onda e o valor RMS do sinal de tensão. O afundamento de tensão e a interrupção são distúrbios prejudiciais a indústria, porém, como há muito mais afundamentos que interrupções, o dano total devido aos afundamentos de tensão é ainda maior, pois interrupções curtas e interrupções mais longas vêm da rede de distribuição local e os afundamentos de tensão nos terminais do equipamento podem ocorrer devido a uma falta a centenas de quilômetros de distância no sistema de transmissão. Reduzir o número de afundamentos de tensão requer melhorias em várias ramificações e geralmente até linhas de transmissão remotas (Boller, 2005).

Até o final do século XX, a análise dos sinais que afetam a qualidade de energia elétrica era realizada utilizando a Transformada de Fourier. Sabe-se que essa ferramenta matemática utiliza um sinal de base no domínio do tempo e transforma para o domínio da frequência. Atualmente, uma poderosa ferramenta matemática pode ser utilizada para análise de sinais, a Transformada Wavelet. Esta transformada tem como principal vantagem obter informações tanto no domínio do tempo, quanto no domínio da frequência (Burrus, 1998). Com isso, neste trabalho tem um tópico na fundamentação teórica dedicado apenas sobre o assunto (Transformada Wavelet),

onde tem uma série de informações utilizadas como base teórica para discussão dos resultados obtidos.

Portanto, sabendo-se dos problemas que causam os Afundamentos de Tensão em um determinado sistema, é importante estabelecer um plano de precaução para possíveis consequências que afetam seriamente o funcionamento do sistema. Com isso, além de conhecer o determinado fenômeno e seus efeitos, é de extrema importância monitorar e determinar a duração do afundamento de tensão.

Neste trabalho de conclusão de curso, a atenção será focada para a duração do afundamento de tensão utilizando a Transformada Wavelet, pois o método automático utilizado pelos monitores de qualidade de energia realiza uma contagem que pode causar uma subestimação ou sobrestimação dessa duração que depende do *threshold* (limiar de afundamento) e do cálculo do valor eficaz da tensão, ou seja, se é de 1 (um) ou $\frac{1}{2}$ (meio) ciclo. Vários métodos têm sido sugeridos para medir o início e fim do afundamento da tensão com maior precisão e um desses métodos é a utilização da Transformada Wavelet. Ao final do estudo, é realizado a comparação dos valores de duração disponíveis pela rede distribuidora com o resultado do estudo desenvolvido.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Desenvolvimento de um algoritmo utilizando o *toolbox* do *software* Matlab da Transformada Wavelet para caracterização da duração do afundamento de tensão.

1.1.2 Específicos

- Revisão teórica sobre o estudo da Transformada Wavelet e suas aplicações para análise de sinais;
- Estudo sobre a Variação de Tensão de Curta Duração, especificando suas normas e procedimentos;

- Análise de sinais de Afundamento de Tensão a partir de uma base de dados reais disponibilizados;
- Comparação dos resultados do algoritmo com os disponibilizados nos monitores de qualidade de energia.

1.2 Organização do Trabalho

Para a realização da pesquisa deste trabalho de conclusão de curso, foi estabelecida uma pesquisa bibliográfica contendo normas técnicas, artigos, monografias, dissertações, regulamentações e livros buscando criar um embasamento teórico nos temas tratados neste trabalho. A pesquisa bibliográfica foi feita com o objetivo de descobrir métodos alternativos para medir, com maior precisão, o início do afundamento de tensão e a recuperação da tensão nominal.

Este trabalho foi dividido em três partes principais: Fundamentação teórica, desenvolvimento e conclusões. Na fundamentação teórica, são incluídos um estudo teórico da Transformada Wavelet, englobando algumas de suas famílias. Ainda na fundamentação teórica, são incluídos conceitos sobre a Variação de Tensão de Curta Duração, suas normas de acordo com o módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST) e dos indicadores de qualidade de energia elétrica a partir do submódulo 9.7 do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). No desenvolvimento do trabalho, a partir da base de dados registrados pela empresa Neoenergia, em Fernando de Noronha, foi desenvolvido um algoritmo para buscar a duração do evento dos sinais de afundamento de tensão utilizando Transformada Wavelet. No quarto capítulo é apresentada a conclusão deste trabalho com indicações de projetos que podem ser desenvolvidos para continuar o estudo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 TRANSFORMADA WAVELET

O comportamento de diversos sistemas é monitorado e avaliado usando sinais no domínio do tempo. Informações adicionais sobre as características do sinal no domínio do tempo podem ser obtidas a partir de uma representação com uma série de coeficientes baseados na função de análise. Um exemplo de transformação de sinal é uma transformação do domínio do tempo para o domínio da frequência. O método mais antigo e provavelmente o mais conhecido para isso é a Transformada de Fourier desenvolvida por Joseph Fourier em 1807. Um método alternativo com propriedades atraentes é a Transformada Wavelet, mencionada pela primeira vez por Alfred Haar em 1909. Desde então, ondas e transformações de ondas têm sido amplamente estudadas (Merry, 2005).

Diversos pesquisadores denotam que a utilização da teoria que envolve a Transformada Wavelet mostra uma nova perspectiva para análise de sinais. A partir da década de 1980, essa teoria vem despertando um interesse comum de diversas áreas, como por exemplo a música, astronomia, física e matemática (DOVICCHI, 1999).

Apesar de J. Morlet introduzir o termo wavelet, a base matemática foi formalizada pelo físico teórico Alex Grossmann. Como a transformada de Fourier não permite uma análise local do conteúdo da frequência do sinal, ou seja, eventos que possam ocorrer em intervalos de tempo distintos, Morlet realizou um estudo de dados sísmicos que exibiam conteúdos de frequência que mudavam ao longo do tempo, sendo assim a transformada de Fourier não adequada para esse estudo. A Equação (2.1) define a transformada de Fourier de um sinal contínuo $f(t)$, na qual podemos notar exatamente na integração de todo o sinal de seu espectro (GROSSMANN, 1984 e SCHMIDT, 2001).

$$F(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i2\pi ut} dt \quad (2.1)$$

Baseado nisso, Morlet introduziu uma transformada na qual o tamanho dos intervalos era variável, fazendo com que os eventos de alta frequência pudesse ser localizados com uma maior resolução no tempo.

A Transformada Wavelet pode ser definida como contínua ou discreta. Segundo a referência de Daubechies (1990), a Equação (2.2) define exatamente a transformada wavelet contínua:

$$F(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi_{a,b}(t)dt \quad (2.2)$$

onde,

$F(a, b)$: Transformada Wavelet

$\psi_{a,b}(t)$: Wavelet-mãe

$f(t)$: Função temporal a qual se deseja utilizar a transformada

a : Parâmetro de expansão/compressão

b : Parâmetro de translação

Observa-se que na Equação (2.2), os parâmetros a e b variam continuamente em \Re , sendo que a função $\psi_{a,b}$, denominada de wavelet mãe, é definida como:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2.3)$$

Na Equação (2.3), a transformada wavelet depende de dois parâmetros a e b , que indicam respectivamente as informações de escala e tempo, ou dilatação e translação.

Em relação a Transformada Wavelet Discreta, os parâmetros a e b indicarão a discretização, ou seja, tornar toda a análise do sinal em partes com menor complexidade. Essa discretização do parâmetro de translação depende da escala da wavelet mãe. Para altas frequências, as wavelets mães são transladadas por pequenos passos. Então, para frequências baixas, a translação é feita com passos maiores (SCHMIDT, 2001 e DAUBECHIES, 1990).

2.1.1 Transformada Wavelet Contínua (TWC)

A Definição de Transformada Wavelet para um determinado sinal $f(t)$ é genericamente demonstrada como (AGGARWAL, 2000):

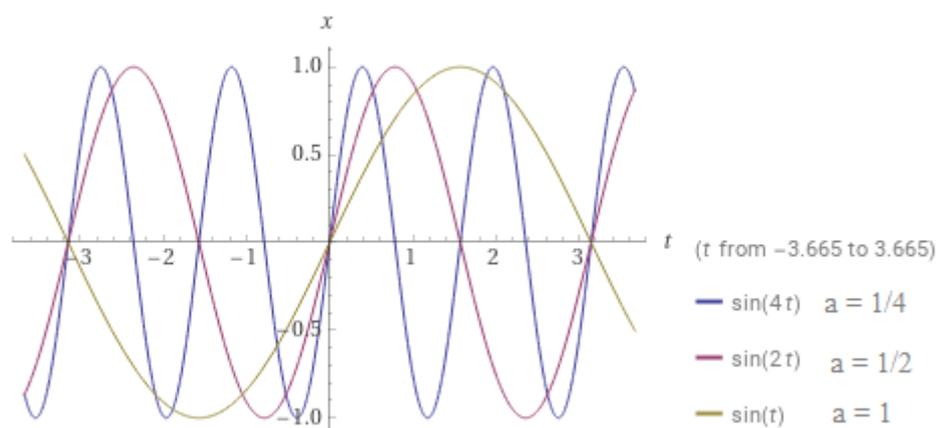
$$(TWC)(b, a) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \cdot dt \quad (2.4)$$

onde a é o fator de escala e b é o fator de translação, e ambas são variáveis contínuas.

A Equação (2.4) mostra que, para o sinal unidimensional $f(t)$, é montada uma nova função em um espaço bidimensional em escala para a e b pela Transformada wavelet. Desse modo, o coeficiente $TWC(b, a)$ representa um determinado grupo de coeficientes associados a função original $f(t)$ em relação a uma família wavelet.

Para entender melhor a escala wavelet, podemos citar por exemplo a função no domínio do tempo $f(t) = \text{sen}(at)$. A Figura 1 mostra exemplos de compressão e dilatação desta função. A letra a da Equação (2.3) é o fator da escala da transformada wavelet que identifica sua dilatação ou compressão no eixo do tempo.

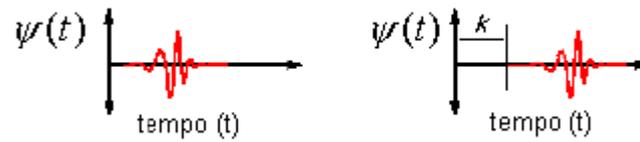
Figura 1 – Demonstração do fator de escala da função seno



Fonte: Autoria própria.

Quando se fala em transladar uma wavelet, significa deslocar a função no domínio do tempo, onde matematicamente se escreve como $f(x-k)$, sendo k um valor constante (MISITI, 1997). Vejamos um exemplo com a Figura 2:

Figura 2 – Exemplo de Translação de uma função Wavelet.



Fonte: Delmont, 2003.

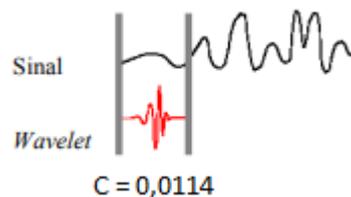
2.1.1.1 Cálculo da Transformada Wavelet Contínua

Como vimos nos tópicos anteriores, a Transformada Wavelet Contínua constitui em um processo que produz coeficientes wavelet para funções de escala e posição. Baseado na referência MISITI (1990), é mostrado a seguir os passos para o cálculo da Transformada Wavelet Contínua:

Passo 1: Selecionar um trecho inicial do sinal original e alinhar com uma wavelet mãe;

Passo 2: Calcular o coeficiente C que representa o quanto está intimamente relacionada a wavelet com o trecho do sinal, onde $C = TWC(a,b)$. Os maiores valores de C (coeficientes) significam uma maior aproximação do sinal com a wavelet. É válido notar que o resultado vai depender da forma da wavelet mãe escolhida. A Figura 3 é um exemplo disto.

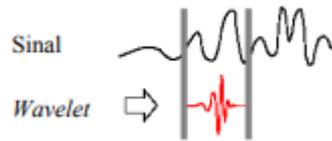
Figura 3 – Cálculo do coeficiente C de relação entre a wavelet mãe e o sinal.



Fonte: Adaptado Delmont, 2003.

Passo 3: Transladar a wavelet à direita e repetir os dois passos anteriores, conforme mostra a Figura 4.

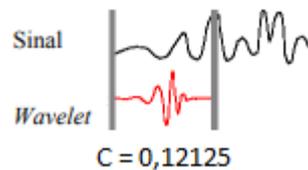
Figura 4 – Translação da wavelet.



Fonte: Delmont, 2003.

Passo 4: Dilatar a wavelet como mostra a Figura 5, e repetir todos os passos anteriores.

Figura 5 – Escalonamento da wavelet.



Fonte: Adaptado Delmont, 2003.

2.1.2 Transformada Wavelet Discreta

A Transformada Wavelet discreta utiliza banco de filtros para análise e reconstrução de sinais. A Transformada Wavelet Contínua realiza uma análise de multiresolução que analisa um determinado sinal em diferentes frequências e resoluções. Para frequências altas (escalas baixas), que duram pouco tempo, deseja-se uma boa resolução temporal. Para frequências baixas (escalas altas) uma boa resolução de frequência é mais importante. Essa multiresolução também pode ser obtida por meio de bancos de filtros, resultando na Transformada Wavelet Discreta (Merry, 2005).

A Transformada Wavelet Discreta é uma generalização da função de expansão representada pela série (BURRUS, 1998):

$$f(t) = \sum_{j,k} a_{j,k} 2^{j/2} \psi(2^j t - k) \quad (2.5)$$

ou também simplificando:

$$f(t) = \sum_{j,k} a_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (2.6)$$

onde a bidimensão dos coeficientes $a_{j,k}$ é a transformada wavelet Discreta de $f(t)$.

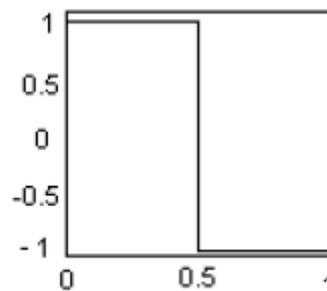
2.1.3 Família Wavelet

2.1.3.1 Wavelet Haar

A Wavelet Haar é o tipo mais simples de wavelet com relação a determinação de seus coeficientes. Este tipo de wavelet é utilizada como modelo para todas as outras transformadas wavelet. Uma desvantagem da transformada wavelet de Haar é que ela não é continuamente diferenciável, limitando suas aplicações, porém ela possui suporte compacto. A Figura 6 indica a sua representação (GOMES, 1997):

Figura 6 – Representação da Wavelet Haar.

$$\psi(t) = \begin{cases} +1 & 0 \leq t < 1/2 \\ -1 & 1/2 \leq t < 1 \end{cases}$$



Fonte: Gomes, 1997.

2.1.3.2 Wavelet Daubechies

A wavelet de Daubechies recebeu esse nome em homenagem à pesquisadora Ingrid Daubechies, que discriminou a wavelet ortonormal com suporte compacto, tornando possível a análise da wavelet em tempo discreto. A wavelet Daubechies de primeira ordem também é conhecida como wavelet Haar na qual se assemelha a uma função degrau. A figura abaixo mostra as funções daubechies de ordem 1 a 8 (Merry, 2005).

Figura 7 – Wavelet Daubechies

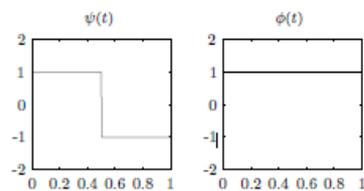


Figure A.1: db1

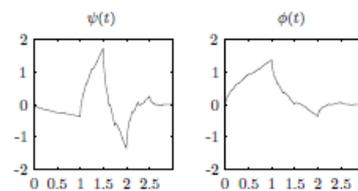


Figure A.2: db2

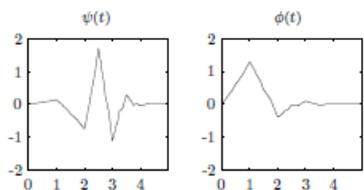


Figure A.3: db3

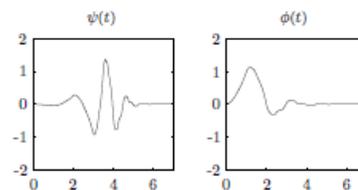


Figure A.4: db4

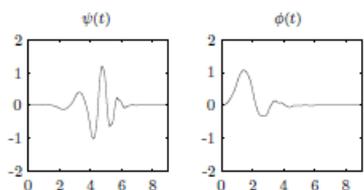


Figure A.5: db5

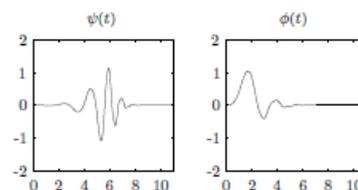


Figure A.6: db6

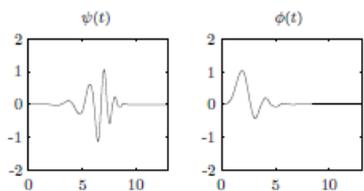


Figure A.7: db7

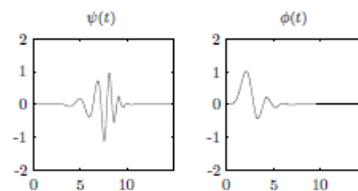


Figure A.8: db8

Fonte: Merry, 2005.

2.1.3.3 Wavelet Symlet

A wavelet da família Symlet é uma transformada ortogonal e com suporte compacto. Ela também foi proposta por Ingrid Daubechies como modificações da wavelet daubechies. Essa transformada possui menor número de assimetria e maior número de decaimento em comparação com a wavelet de Daubechies. Essa família apresenta vários modelos, variando da sym2 até sym45 (Merry, 2005). A Figura 8 apresenta alguns exemplos de decomposição da wavelet Symlet:

Figura 8 – Decomposição Wavelet Symlet.

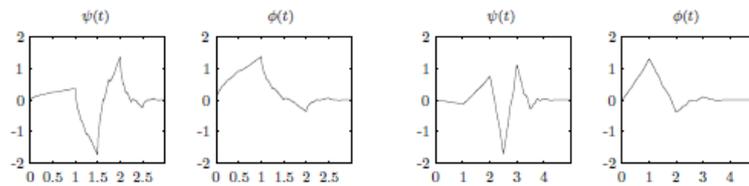


Figure A.14: sym2

Figure A.15: sym3

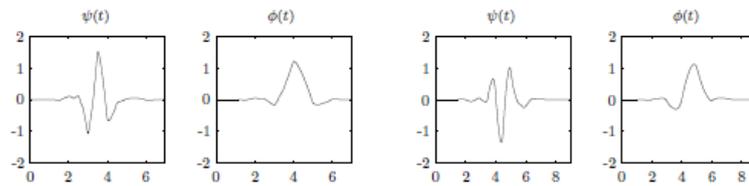


Figure A.16: sym4

Figure A.17: sym5

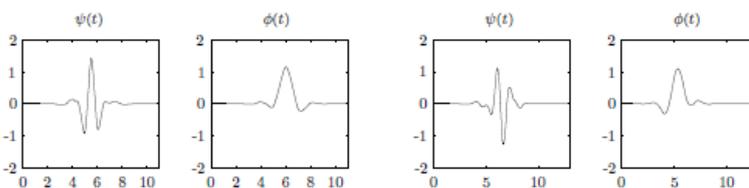


Figure A.18: sym6

Figure A.19: sym7

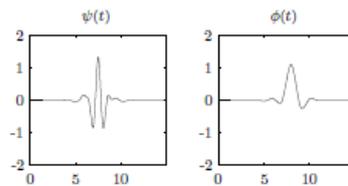


Figure A.20: sym8

Fonte: Merry, 2005.

2.2 Qualidade de Energia Elétrica

A Qualidade da Energia Elétrica pode ser definida como qualquer problema manifestado na tensão, corrente ou desvio de frequência, que resulte em falha ou má operação dos equipamentos de consumidores (DUGAN, 1997).

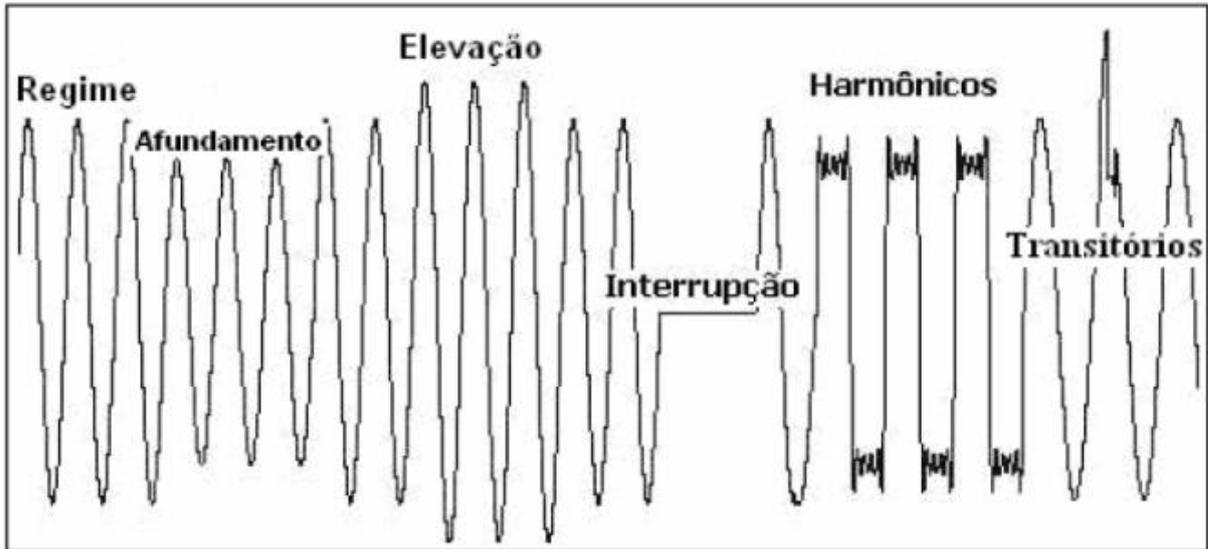
Além de garantir um funcionamento contínuo, seguro e adequado dos equipamentos elétricos e processos associados, a energia elétrica de boa qualidade, por definição, tem que garantir o bem-estar das pessoas, sem afetar o meio ambiente (CORREA 2007).

Tensões senoidais, sendo elas equilibradas e com amplitudes e frequências constantes, são objetos de estudo de avaliação da qualidade da energia quanto à qualidade do serviço, onde esses são observados durante o fornecimento de energia. Para o consumidor final, há apenas o interesse do uso contínuo e eficiente do produto e serviço de energia elétrica, desconhecendo qualquer um dos parâmetros relacionados à qualidade do produto (BARROS, 2016).

Fenômenos aleatórios ou naturais no sistema de potência causam alterações nas grandezas avaliadas e reduzem a qualidade da energia fornecida. Tais fenômenos estão relacionados a descargas atmosféricas, curtos-circuitos, funções de entrada ou saída de grandes blocos de carga, chaveamento de bancos de capacitores e até mesmo características de cargas na instalação que causam distorções na forma de onda em relação à forma de onda teórica e puramente senoidal (BARROS, 2016).

Como podemos ver na Figura 9, é destacado alguns tipos de perturbações na forma de onda de tensão das VTCD (Variação de Tensão de Curta Duração), tais como: afundamento de tensão, elevação de tensão, interrupção, distorções harmônicas e transitórios. Para este trabalho, será tratado com maiores detalhes sobre o distúrbio de Afundamento de Tensão.

Figura 9 – Distúrbios de Variação de Tensão de Curta Duração (VTCD).



Fonte: CORRÊA, 2007

2.2.1 Variação de Tensão de Curta Duração

Segundo o módulo 8 da norma do PRODIST (Procedimento de Distribuição), a Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) são desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a 3 minutos. Estas, são classificadas de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD)

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de tensão	Interrupção Momentânea de Tensão – IMT	Inferior ou igual a 3 segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão – AMT	Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão – EMT	Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de tensão	Interrupção Temporária de Tensão – ITT	Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos	Inferior a 0,1 p.u

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
	Afundamento Temporário de Tensão – ATT	Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão – ETT	Superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos	Superior a 1,1 p.u

Fonte: PRODIST, 2022

Ainda em sua definição, pela documentação dos Indicadores de qualidade de energia elétrica da Rede Básica, no submódulo 9.7 do ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), a VTCD é definida como um evento aleatório de tensão caracterizado por desvio significativo, por curto intervalo de tempo, do valor eficaz da tensão. Esse cálculo do valor eficaz é feito a partir da média quadrática dos valores instantâneos da tensão, em período mínimo de meio ciclo e máximo de um ciclo (Regulamentação ONS, 2020).

Os indicadores da VTCD, segundo o módulo 8 a norma do PRODIST são:

- Amplitude do evento (V_e)
- Duração do evento (Δt_e)
- Frequência de ocorrência de eventos (f_e)
- Fator de Impacto (FI)
- Fator de Impacto base (FI_{BASE})

Todas as equações a seguir são dos indicadores da VTCD conforme se encontra no módulo 8 da norma vigente do PRODIST.

A Equação (2.7) mostra o cálculo da amplitude da VTCD.

$$V_e = \frac{V_{res}}{V_{ref}} \times 100[\%] \quad (2.7)$$

onde:

V_e = amplitude do evento de VTCD (em %);

V_{res} = tensão residual do evento de VTCD (em Volts); e

V_{ref} = tensão de referência (em Volts).

A Equação (2.8) mostra o cálculo para a duração do evento.

$$\Delta t_e = t_f - t_i \quad (2.8)$$

sendo:

Δt_e = duração do evento de VTCD (em milissegundos);

t_f = instante final do evento de VTCD; e

t_i = instante inicial do evento de VTCD.

A Equação (2.9) mostra o cálculo para a frequência de eventos durante a VTCD.

$$f_e = n \quad (2.9)$$

sendo:

f_e = frequência de ocorrência de eventos de VTCD; e

n = quantidade de eventos de VTCD registrados no período de avaliação.

O fator de impacto (FI) caracteriza a severidade da incidência de eventos da VTCD (PRODIST, 2022). É calculado conforme a Equação (2.10).

$$FI = \frac{\sum_{i=A}^I (f_{ei} \times f_{pond_i})}{FI_{BASE}} \quad (2.10)$$

onde:

f_{ei} = frequência de ocorrência de eventos de VTCD, apurada por meio de medição apropriada, em um período de 30 dias consecutivos, para cada região de sensibilidade i , sendo $i = A, B, C, D, E, F, G, H$ e I ;

f_{pondi} = fator de ponderação para cada região de sensibilidade i , estabelecido de acordo com a relevância do evento, correlacionando sua amplitude e duração;

FI_{BASE} = Fator de Impacto base, obtido do somatório dos produtos dos fatores de ponderação pelas frequências máximas de ocorrência em um período de 30 dias de VTCD para cada região de sensibilidade.

O Fator de Ponderação para cada região de sensibilidade e o Fator de Impacto base são indicados na Tabela 2.

Tabela 2 – Fatores de ponderação e Fator de Impacto Base de acordo com a tensão nominal (V_n)

Região de Sensibilidade	Fator de Ponderação (f_{pond})	Fator de Impacto Base (FI_{BASE})	
		$2,3 \text{ kV} \leq V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
A	0,00	2,13	1,42
B	0,04		
C	0,07		
D	0,15		
E	0,25		
F	0,36		
G	0,07		
H	0,02		
I	0,04		

Fonte: PRODIST, 2022

O registro dos eventos de variação de tensão de curta duração, em termos de duração e amplitude, deve ser realizado conforme estratificação apresentada na Tabela 6.

Tabela 3 – Estratificação dos parâmetros amplitude e duração para contabilização de eventos de VTCD

Amplitude (pu)	Duração						
	[16,67 ms - 100 ms]	(100 ms - 300 ms]	(300 ms - 600 ms]	(600 ms - 1 seg)	(1 seg - 3 seg)	(3 seg - 1 min)	(1 min - 3 min)
> 1,15							
(1,10 - 1,15]							
(0,85 - 0,90)							
(0,80 - 0,85]							
(0,70 - 0,80]							
(0,60 - 0,70]							

Amplitude (pu)	Duração						
	[16,67 ms - 100 ms]	(100 ms - 300 ms]	(300 ms - 600 ms]	(600 ms - 1 seg)	(1 seg - 3 seg)	(3 seg - 1 min)	(1 min - 3 min)
(0,50 - 0,60]							
(0,40 - 0,50]							
(0,30 - 0,40]							
(0,20 - 0,30]							
(0,10 - 0,20]							
≤ 0,10							

Fonte: PRODIST, 2022

A Tabela 4 apresenta a estratificação da Tabela 3 em nove regiões de sensibilidade, visando correlacionar a importância de cada evento de VTCD com os níveis de sensibilidade das diferentes cargas conectadas aos sistemas de distribuição, em média e alta tensão (PRODIST, 2022).

Tabela 4 – Estratificação das VTCD com base nos níveis de sensibilidade das diversas cargas

Amplitude (pu)	Duração						
	[16,67 ms - 100 ms]	(100 ms - 300 ms]	(300 ms - 600 ms]	(600 ms - 1 seg]	(1 seg - 3 seg]	(3 seg - 1 min]	(1 min - 3 min)
> 1,15	REGIÃO H			REGIÃO I			
(1,10 - 1,15]	REGIÃO H			REGIÃO I			
(0,85 - 0,90]	REGIÃO A						
(0,80 - 0,85]	REGIÃO A			Região G			
(0,70 - 0,80]	REGIÃO B	REGIÃO D		REGIÃO F			
(0,60 - 0,70]	REGIÃO C						
(0,50 - 0,60]	REGIÃO C						
(0,40 - 0,50]	REGIÃO E			REGIÃO F			
(0,30 - 0,40]	REGIÃO E			REGIÃO F			
(0,20 - 0,30]	REGIÃO E			REGIÃO F			
(0,10 - 0,20]	REGIÃO E			REGIÃO F			
≤ 0,10	REGIÃO E			REGIÃO F			

Fonte: PRODIST, 2022

2.2.1.1 Afundamento de tensão

Segundo o submódulo 9.7 do ONS, para variações de tensão de curta duração, o Afundamento de Tensão é classificado como momentâneo e temporário.

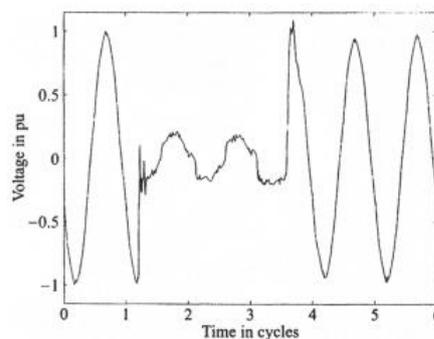
O Afundamento Momentâneo de Tensão (AMT) é definido como evento em que o valor eficaz da tensão é igual ou superior a 0,1 e inferior a 0,9 pu da tensão nominal, durante um intervalo de tempo com duração superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a 3 segundos. Afundamento Temporário de Tensão (ATT) é definido como evento em que o valor eficaz da tensão é igual ou superior a 0,1 e inferior a 0,9 pu da tensão nominal, durante um intervalo de tempo com duração superior a 3 segundos e inferior ou igual a 1 minuto (Regulamentação ONS, 2020).

2.2.1.1.1 Medição da duração do Afundamento de Tensão

A medição da duração do Afundamento de Tensão não é tão simples ou trivial. Há um conjunto de procedimentos normalizados que orientam a maneira de como se deve realizar essa medição.

Uma definição muito usada para a duração do afundamento de tensão é o número de ciclos durante os quais a tensão eficaz está abaixo de um determinado limite (neste caso, entre 10% e 90% do valor nominal), onde este será um pouco diferente para cada monitor (BOLLEN, 2005). Note que na Figura 10 é mostrado um afundamento de tensão com amplitude de cerca de 20% da tensão nominal e duração de 2,5 ciclos.

Figura 10 – Afundamento de tensão devido a um curto-circuito em uma fase no domínio do tempo.

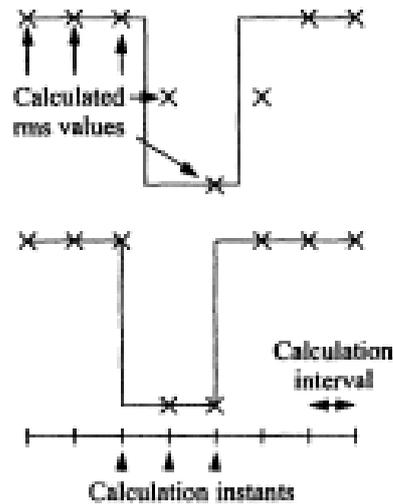


Fonte: BOLLEN, 2005

Um monitor de qualidade de energia normalmente calcula o valor eficaz uma vez a cada ciclo. A Figura 11 mostra um afundamento de dois ciclos pelo monitor de

qualidade, onde o gráfico superior mostra uma sobrestimativa de um ciclo e o gráfico inferior mostra a estimativa correta (BOLLEN, 2005).

Figura 11 – Estimativa da duração do afundamento pelo monitor de qualidade de energia elétrica.

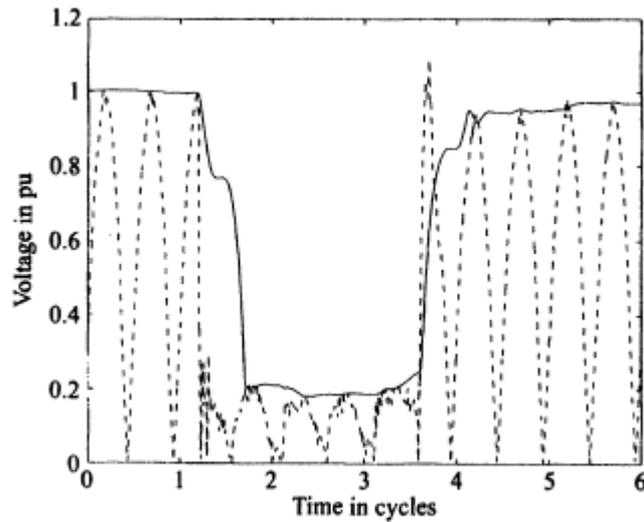


Fonte: BOLLEN, 2005

O cálculo do valor eficaz é realizado em instantes regulares no tempo e o afundamento de tensão começa em algum lugar entre os dois instantes.

Quando se calcula a tensão eficaz uma vez por ciclo, conseqüentemente a duração do afundamento resultante é um número inteiro de ciclos, e se for para um afundamento de dois ciclos e meio, a duração estará entre dois ou três ciclos. Porém, mesmo quando há uma janela deslizante para calcular a tensão eficaz em função do tempo, pode ocorrer um erro do monitor para a duração da VTCD. Para ser discutido esse possível erro, a Figura 12 mostra o valor absoluto da tensão em relação ao gráfico mostrado na Figura 10 (BOLLEN, 2005).

Figura 12 – Tensão eficaz de meio ciclo junto ao valor absoluto da tensão (linha tracejada) do afundamento mostrado na Figura 10.



Fonte: BOLLEN, 2005

Como pode-se observar na Figura 12, a duração real do afundamento é de aproximadamente 2,4 ciclos. Para limiares mais elevados, a duração do afundamento registrada será superestimada. Um limiar de 90% o monitor registra uma duração de afundamento de 2,8 ciclos e um limiar de 80% uma duração de 2,5 ciclos. Porém, para limiares mais baixos, a duração do afundamento registrada no monitor é uma subestimação. Quando ocorre um limiar de 60%, é registrado uma duração de 2,1 ciclos e um limiar de 40% uma duração de 2 ciclos. Na prática, limites tão baixos não são utilizados, porém o mesmo efeito é obtido quando houver variação da profundidade do afundamento e o limite for mantido constante. Portanto, para afundamentos de tensão “profundos”, a sua duração será superestimada e para afundamentos de tensão “rasos”, a sua duração será subestimada (BOLLEN, 2005).

Devido aos passos apresentados em que o monitor de qualidade de energia elétrica realiza para calcular a duração do afundamento de tensão, estimando este valor, esse trabalho mostra uma alternativa matemática bastante poderosa para analisar os sinais de afundamento de tensão, chamada Transformada Wavelet, que através do sinal da forma de onda, realiza o cálculo com melhor precisão da duração do afundamento de tensão.

No quesito de instrumentação e metodologia de medição e qualidade do produto determinado pelo módulo 8 do PRODIST, mostra uma série de indicadores e pontos que valem a pena ser considerados:

- Em um determinado ponto de monitoração, uma VTCD é caracterizada a partir da agregação dos parâmetros amplitude e duração de cada evento, com os eventos simultâneos sendo primeiramente agregados compondo um mesmo evento no ponto de monitoração (agregação de fases);
- A agregação de fases deve ser feita pelo critério de união das fases, ou seja, a duração do evento é definida como o intervalo de tempo decorrido entre o instante em que o primeiro dos eventos transpõe determinado limite e o instante em que o último dos eventos retorna para determinado limite;
- Agregação por parâmetros críticos – a duração do evento é definida como a máxima duração entre os três eventos e o valor de magnitude que mais se distanciou da tensão de referência;
- Agregação pela fase crítica – a duração do evento é definida como a duração do evento de amplitude crítica, ou seja, amplitude mínima para afundamento e máxima para elevação.

3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

3.1 METODOLOGIA

Na metodologia serão apresentados os materiais e métodos utilizados no projeto. Na primeira seção será citada a base de dados utilizadas nesse trabalho, onde foram disponibilizados dados referentes a Usina Tubarão. Na segunda e terceira sessão são descritas as etapas de detecção e caracterização, respectivamente. Para ambos, foram utilizadas a Transformada Wavelet Symlet4.

3.1.1 Base de Dados

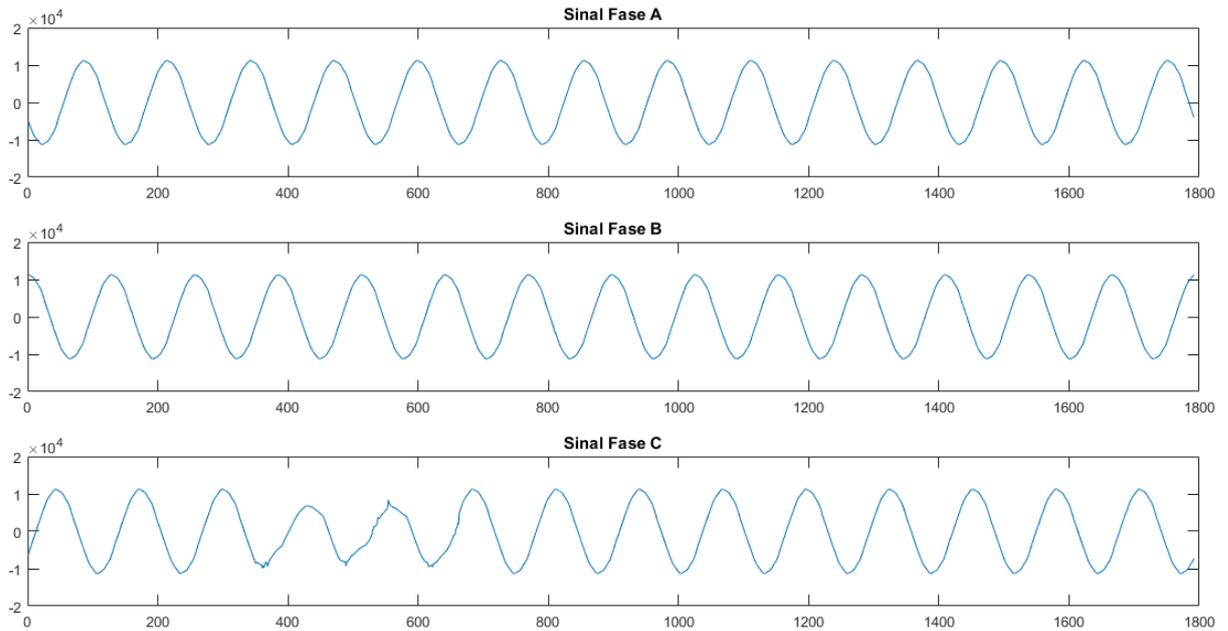
A metodologia aplicada neste trabalho teve como base os dados disponíveis pela Usina Tubarão, em Fernando de Noronha durante o ano de 2013. São disponíveis 1792 pontos para cada fase de tensão. Os sinais apresentam 7680 Hz de frequência de amostragem, com 128 pontos por ciclo.

Esses sinais disponibilizados estavam no formato padrão do *software* Excel, com extensão de arquivo xls. Para que o *software* Matlab pudesse utilizar os sinais disponibilizados, foi necessário aplicar cada um deles em uma extensão de arquivos de texto, ou seja, em formato txt.

3.1.2 Método de Detecção do Afundamento de Tensão

Para detecção do afundamento de tensão, foi realizada uma análise para o sinal de cada fase do sistema. Antes de utilizar o *toolbox* para analisar a decomposição da transformada wavelet, foi necessário realizar a plotagem do sinal para identificar se o mesmo possuía o distúrbio de afundamento de tensão. A Figura 13 mostra um exemplo dos gráficos para os sinais de cada fase de tensão. O sinal possui tensão nominal de 13,8 kV, medido com valor fase-neutro.

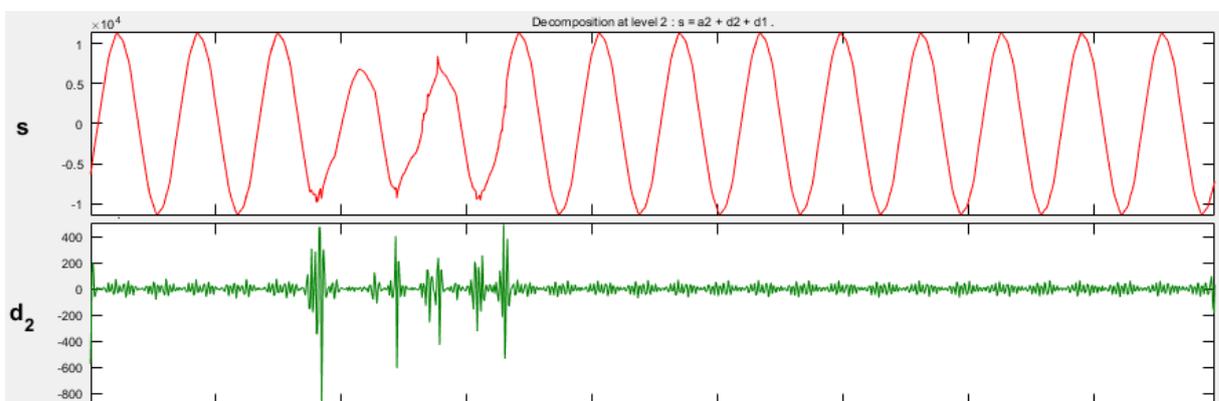
Figura 13 – Exemplo de um caso analisado de afundamento de tensão.



Fonte: Próprio autor.

Durante a análise do sinal de afundamento, o gráfico do nível de detalhes selecionado apresentou picos de amplitude do coeficiente de detalhe bastante consideráveis. A Figura 14 mostra a decomposição do sinal da fase C (plotado na Figura 13), destacando o nível 2 de detalhes da wavelet symlet4.

Figura 14 – Utilização da Transformada Wavelet Symlet4.



Fonte: Próprio autor.

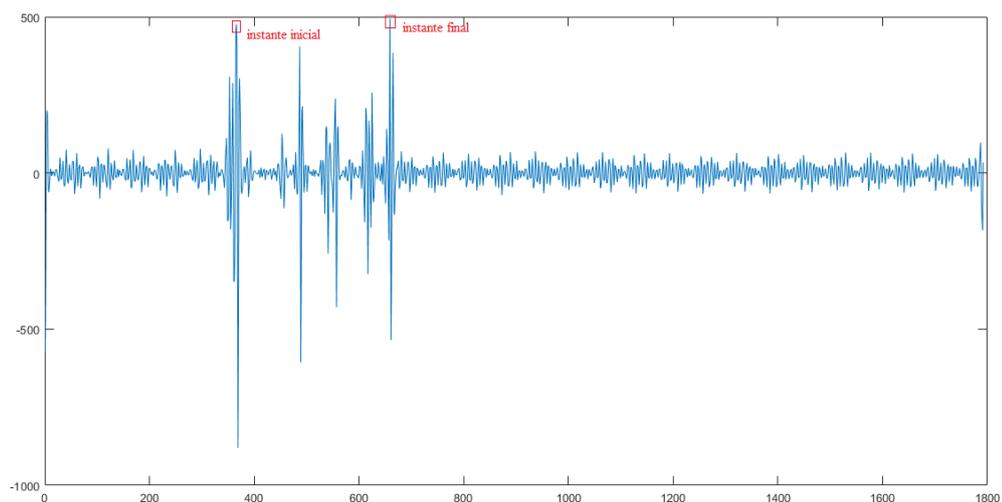
A partir da decomposição do sinal pela Transformada Wavelet, um vetor ou uma matriz com os coeficientes de detalhes de cada nível é exportado para o *workspace* do Matlab. Em seguida, é selecionada a última coluna da matriz dos coeficientes de detalhes, ou seja, o vetor dos coeficientes de detalhes do maior nível, armazenando-o em uma variável. Com isso, seguiremos para o próximo passo, que seria a caracterização do afundamento de tensão.

3.1.3 Método de Caracterização do Afundamento de Tensão

Após a realização da detecção do afundamento de tensão, seguimos para o passo de caracterização, que nada mais é que determinar a duração do afundamento de tensão, com a identificação do instante inicial e final.

Nota-se que no gráfico do coeficiente de detalhes do segundo nível da transformada wavelet da Figura 15, o maior pico e o segundo maior pico em valores reais se destacam, sendo estes pontos a localização inicial e final do afundamento de tensão no gráfico deste coeficiente.

Figura 15 – Gráfico do coeficiente de detalhe de nível 2 de um dos sinais de afundamento de tensão.

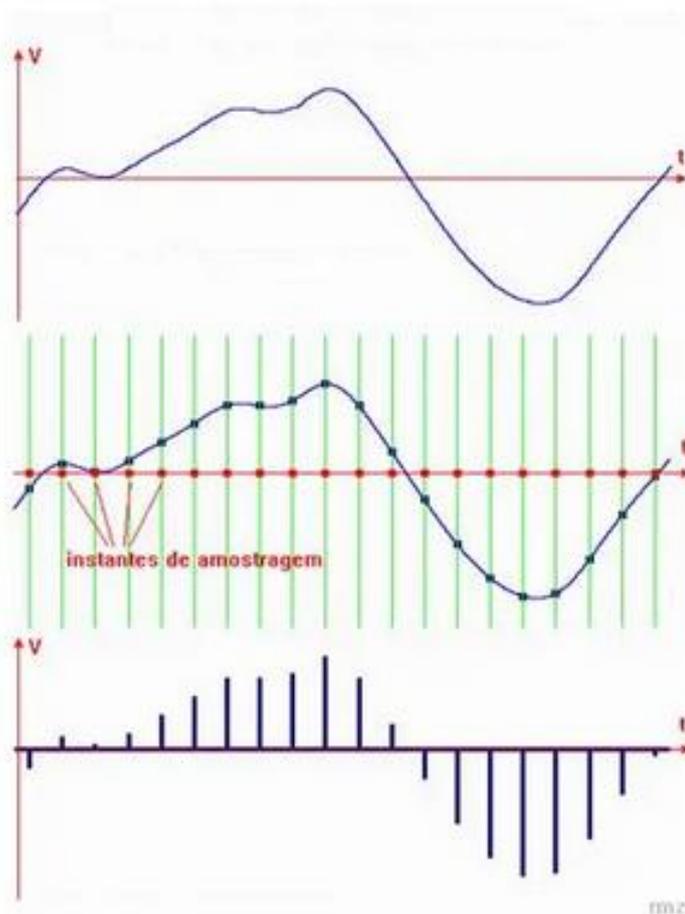


Fonte: Próprio autor

Quando o algoritmo exporta o vetor de coeficiente de detalhes, a referência do eixo da abscissa identifica a posição dos pontos em que o programa determinou como instante inicial e final, sendo eles o primeiro e segundo valor máximo no eixo da ordenada. Porém, é necessário encontrar o tempo a partir desse intervalo, na posição inicial e final do vetor.

Segundo a Regulamentação disponível na referência do submódulo 9.7 do ONS, o sistema elétrico brasileiro está padronizado para suportar em condições normais de operação uma oscilação de frequência de 60 Hz. Conforme citado anteriormente, os dados possuem 128 pontos para cada ciclo, resultando em 7680 pontos para uma frequência de 60 Hz em 1 segundo. A Figura 16 mostra um exemplo de frequência de amostragem de um determinado sinal, indicando os instantes de amostragem.

Figura 16 – Exemplo de frequência de amostragem para um determinado sinal.



Fonte: Disponível em: <<https://www.efagundes.com>>

Como a distância de um ponto a outro é igual no eixo da abscissa, como mostra a Figura 16, logo a posição p do ponto encontrado no sinal resulta na Equação (3.1):

$$t_p = \frac{p}{7680} \quad (3.1)$$

onde,

t_p é o valor do instante de tempo em segundos no coeficiente de detalhe;

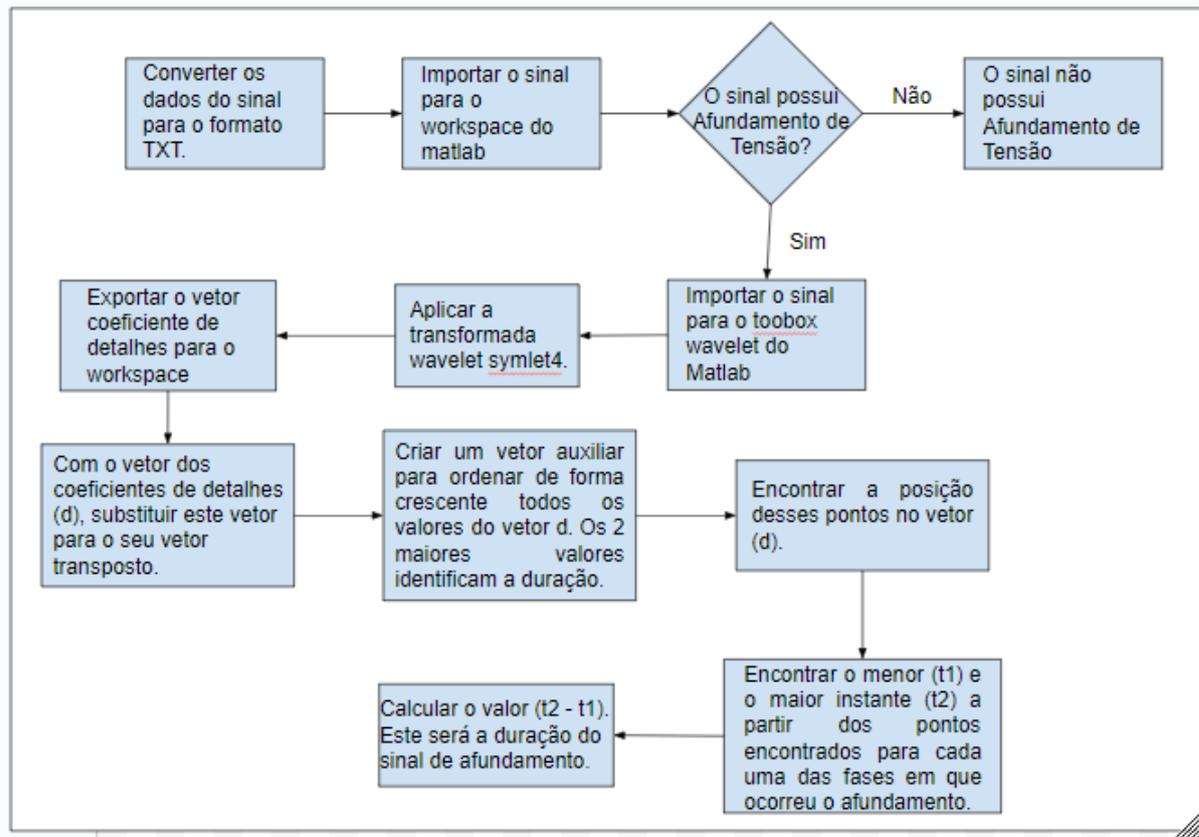
p é a posição do ponto no vetor de coeficiente de detalhes.

Sendo assim, para cada valor encontrado a partir do coeficiente de detalhes de cada sinal (ou seja, de cada fase), a Equação 3.1 encontra o instante inicial e final de cada fase onde ocorreu o distúrbio.

Como foi definido no item 2.2.1.1.1 (Medição da duração do Afundamento de Tensão), a duração do afundamento de tensão é caracterizada no primeiro instante em que uma das fases tem a sua amplitude reduzida (entre 10% e 90% do valor nominal) e o último instante em que todas as fases que sofreram o distúrbio retorna ao seu valor nominal. Este processo é denominado agregação de fases.

A partir desse processo, é necessário que o algoritmo armazene os instantes (inicial e final) para cada fase que sofreu o afundamento e selecione o menor e o maior valor encontrado. A partir disso, a diferença entre o maior e o menor valor para os instantes encontrados resultará na duração do afundamento de tensão. O fluxograma da Figura 17 mostra como foi construído o algoritmo.

Figura 17 – Fluxograma do algoritmo que calcula a duração do Afundamento de tensão.



Fonte: Próprio Autor.

3.2 RESULTADOS

De modo a avaliar o mecanismo de caracterização do afundamento de tensão a partir do sinal original utilizado no algoritmo do programa desenvolvido, vários sinais de afundamento de tensão foram analisados, porém iremos apresentar os mais relevantes para determinar sua duração.

A Tabela 5 mostra os resultados obtidos para a duração do afundamento de tensão pelo algoritmo desenvolvido e a duração informada pelo monitor de qualidade de energia. É também apresentado nesta tabela o valor da amplitude do afundamento de tensão para cada fase do sistema que ajudará na análise dos resultados obtidos.

Como pode ser observado na Tabela 5, o caso 4 apresenta um afundamento na fase B de 22,83%. Para este, o algoritmo apresentou uma duração de 46 milissegundos, enquanto a duração registrada pelo monitor de qualidade foi de 48 milissegundos, confirmando dessa forma a sobrestimativa da duração da VTCD.

Tabela 5 – Resultados da Duração do Afundamento de Tensão disponibilizados pelo algoritmo.

Caso	Amplitude Fase A RMS (%)	Amplitude Fase B RMS (%)	Amplitude Fase C RMS (%)	Duração registrada pelo monitor (ms)	Duração calculada pelo Algoritmo (ms)
1	98,80	98,90	66,04	42	38
2	91,34	65,15	83,26	59	64
3	98,89	99,10	88,68	33	47
4	98,85	22,83	98,77	48	42
5	98,71	98,91	88,55	16	27
6	98,84	99,10	78,68	24	29
7	98,86	99,12	82,10	26	30
8	98,86	99,12	76,41	16	20
9	98,84	99,11	65,44	40	34
10	89,90	85,05	89,98	325	386

Fonte: Próprio Autor.

Por outro lado, observou-se que no caso 10, o afundamento de tensão nas três fases do sistema foi raso e conseqüentemente o monitor subestimou a duração desse afundamento que foi de 325 milissegundos, enquanto no algoritmo desenvolvido apresentou uma duração de 386 milissegundos.

Nos afundamentos mais profundos, o monitor calcula incorretamente a duração do afundamento, ou seja, sobrestima esta duração quando este afundamento ocorre instantes depois do cálculo do valor RMS antes do afundamento. Se esse afundamento ocorrer imediatamente depois do cálculo do valor RMS, o monitor calcula corretamente a duração. Para os afundamentos mais rasos, no qual se aproxima de 90% do valor nominal, o afundamento de tensão tem seu valor subestimado.

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

A Qualidade da Energia Elétrica é de extrema importância para medir o quão bem a energia elétrica pode ser usada pelos equipamentos dos consumidores e se precaver das eventuais consequências que podem afetar seriamente o funcionamento do sistema. É de extrema importância identificar a duração de uma VTCD, pois determinados equipamentos são mais sensíveis a duração do que da amplitude do afundamento.

Através desta proposta, realizou-se uma pesquisa a partir da referência do livro de Bollen (2005), onde ele cita artigos como o de Tunaboyla (1996), que utiliza a Transformada Wavelet para quantificar e detectar afundamentos de tensão. Além disso, com a possibilidade de escolha de diversas wavelets mães, a partir dos artigos utilizados como referência durante a pesquisa, verificou-se qual seria a mais adequada para utilização em específico para afundamentos de tensão. Em diversos artigos, a opção da utilização da wavelet db4 é bem aplicada para caracterização de diversos distúrbios de VTCD. Porém, devido a análises realizadas com os sinais disponibilizados para o estudo deste trabalho, selecionou-se a wavelet sym4 por apresentar resultados satisfatórios.

A utilização do *toolbox* do *software* Matlab contribuiu de maneira muito significativa para entendimento prático da análise dos sinais decompostos pela Transformada Wavelet.

O método de caracterização do afundamento de tensão utilizado pelos monitores de qualidade de energia pode realizar tanto uma subestimação, quanto uma sobrestimação da duração real do afundamento de tensão, visto que para sinais onde ocorre afundamentos profundos (ou seja, momento em que a tensão apresenta amplitudes pequenas em relação ao seu valor nominal) há uma grande possibilidade do monitor registrar uma duração com um valor sobrestimado; enquanto que para sinais onde ocorre afundamentos rasos (ou seja, momento em que a tensão apresenta amplitudes próximas ao seu valor nominal), há uma grande possibilidade do monitor registrar uma duração com um valor subestimado.

Para medir com melhor precisão a duração do afundamento de tensão, foi desenvolvido um algoritmo que utiliza a Transformada Wavelet para encontrar esta

duração a partir do sinal da forma de onda senoidal de tensão e não a partir do seu valor RMS utilizado pelos monitores de qualidade. O algoritmo desenvolvido constatou nos sinais reais que os monitores de qualidade sobestimam afundamentos de tensão profundos e subestimam afundamentos de tensão rasos.

Além da caracterização da duração do afundamento de tensão, os detalhes desta análise permitem uma notoriedade para o comportamento do sistema em recuperação, onde é possível determinar o instante em que este (sistema) volte a operar normalmente. O interesse da qualidade da energia elétrica não é somente identificar o instante em que ocorre determinado distúrbio, e sim classificar os distúrbios presentes na forma de onda do sinal. Porém, este objetivo não fazia parte do escopo deste trabalho, o que requer uma pesquisa mais detalhada, com a possibilidade de utilizar Redes Neurais, que serve de sugestão para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

- BARROS, B; BORELLI, R; GEDRA, R. **Gerenciamento de Energia: Ações administrativas e técnicas de uso adequado da energia elétrica**. 2ª Ed. São Paulo: Editora Érica, 2016. 177 p.
- BURRUS, C. S.; GOPINATH, R. A.; GUO, H. (1998). **Introduction to wavelets and wavelet transforms: a primer**. New Jersey, Prentice Hall.
- CORRÊA, F. I. M. (2007). **Estudo de um Sistema de Distribuição com Enfoque na Qualidade da Energia Elétrica**. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2007.
- DAUBECHIES, I. (1990). **The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis**. IEEE Transactions on Information Theory, v.36, n.5, p.961-1005.
- DELMONT, O. F. **Utilização da transformada wavelet para caracterização de distúrbios na qualidade da energia elétrica**. Dissertação (Mestrado). 2003
- DOVICCHI, J.C.L. (1999). **Novos coeficientes wavelet baseados em intervalos musicais para análise de timbres de instrumentos acústicos**. Uberlândia. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia.
- EFAGUNDES: networking, c2021. Frequências de amostragem. **Efagundes**, 2021. Disponível em: <https://efagundes.com/networking/teoria-da-transmissao-e-meios-magneticos/frequencias-de-amostragem/>. Acesso em: 01 de maio de 2023.
- GOMES, J., VELHO, L., GOLDENSTEIN, S. (1997). **Wavelets: Teoria, Software e Aplicações**. In: 21º Colóquio Brasileiro de Matemática, Rio de Janeiro, IMPA, p.216.
- GROSSMANN, A.; MORLET, J. (1984). **Decomposition of hardy functions into squared integrable wavelets of constant shape**. SIAM J. Math. Analysis, v.15, p.723-736.
- LOPEZ, R. A. Qualidade na Energia Elétrica. **Efeitos dos distúrbios, diagnósticos e soluções**. 2ª edição. 2001.
- MATH H. J. BOLLEN. Understanding power quality problems. **Voltage Sags and Interruptions**, 2000.
- N. S. Tunaboyla and and E. R. Collins, **The wavelet transform approach to detect and quantify voltage sags**, 7th Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power, October 1996, Las Vegas, NV, pp. 619-624
- ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Indicadores de qualidade de energia elétrica da Rede Básica**. ONS SUBMÓDULO 9.7, 8 de dezembro de 2020.

PRODIST - PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL. **Qualidade do fornecimento de Energia Elétrica.** PRODIST MÓDULO 8, 7 de dezembro de 2021.

R.J.E. MERRY, **Wavelet Theory and Applications:** A literature study, 2005

SCHMIDT, R.F. (2001). **Rastreamento eficiente de faces em um subespaço wavelet.** São Paulo. 74 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo.