

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - EESC  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE  
COMPUTAÇÃO

**MONITORAMENTO REMOTO DAS VARIAÇÕES  
DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO EM UM  
SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO POR MEIO DA  
TRANSFORMADA WAVELET E ANFIS.**

Ciro Boudaher de Camargo

São Carlos

2013



**CIRO BOUDAHER DE CAMARGO**

**MONITORAMENTO REMOTO DAS  
VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA  
DURAÇÃO EM UM SISTEMA DE  
DISTRIBUIÇÃO ATRAVÉS DA  
TRANSFORMADA WAVELET E  
ANFIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de  
Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em  
Sistemas de Energia e Automação

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ivan Nunes da Silva

São Carlos

2013

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Camargo, Ciro Boudaher de

C172m Monitoramento remoto das variações de tensão de curta duração em um sistema de distribuição por meio da transformada Wavelet e ANFIS / Ciro Boudaher de Camargo; orientador Ivan Nunes da Silva. São Carlos, 2013.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

1. Sistema elétrico de distribuição. 2. Variações de tensão de curta duração. 3. Qualidade da energia elétrica. 4. Monitoramento remoto. 5. Transformada Wavelet. 6. ANFIS. I. Título.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Ciro Boudaher de Camargo

Título: "Monitoramento remoto das variações de tensão de curta duração em um sistema de distribuição através da transformada Wavelet e Anfis"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado  
em 10/12/2015,

com NOTA 9,4 (Méd. 800), pela Comissão Julgadora:

*Prof. Associado Ivan Nunes da Silva - (Orientador - SEL/EESC/USP)*

*Mestre Silas Franco dos Reis Alves - (Doutorando - SEL/EESC/USP)*

*Mestre Diego Rafael Moraes - (Doutorando - SEL/EESC/USP)*

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:

Prof. Associado Homero Schiabel



Aos meus pais pelo suporte à vida acadêmica.

À minha noiva Poliana pelo apoio durante todo o trabalho.



## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente à Deus por ter me abençoado durante todo o trabalho e auxiliado nos momentos de dificuldade.

A todo o corpo docente por ter me ajudado a construir uma base sólida durante o curso de engenharia elétrica. Ao prof. Mário Oleskovicz e ao aluno Fernando Bottura Bambozzi pela inspiração do tema do trabalho. Ao prof. Ivan pelo suporte e direção para que eu pudesse concluir com êxito esse projeto.

À minha segunda família da república Alcatraz que me acompanhou durante toda a jornada acadêmica, em especial ao “Gagá” Gabriel, “Bixão” André, “Pepe” Pedro, “Barbicha” Carlos Augusto, “Balança” Raphael e ao “Doc” Marcelo.

Aos meus amigos Pedro, Ícaro, Leonardo e João Paulo pela amizade incrível que sempre esteve presente na minha vida. Aos amigos Murilo e Ronan pela motivação a seguir a carreira de engenharia.

Ao casal Kátia e Tadeu, primeiro pela amizade e segundo pelo fim de semana de revisão do trabalho.

Finalmente agradeço à minha noiva querida Poliana, por ter passado por todo o processo, sendo muito compreensiva e atenciosa.



“No meio da confusão, encontre a simplicidade. A partir da discórdia, encontre a harmonia. No meio da dificuldade reside a oportunidade.”

**Albert Einstein**



## Resumo

**CAMARGO, C. B. Monitoramento remoto das variações de tensão de curta duração em um sistema de distribuição através da transformada Wavelet e ANFIS. 2013. p 48.** Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) – Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2013.

O presente trabalho foi elaborado com o objetivo de se desenvolver um sistema inteligente baseado em um ANFIS que fosse capaz de monitorar remotamente os níveis de tensão em pontos específicos de um sistema de distribuição de energia elétrica. Este sistema elétrico de potência (SEP) foi modelado previamente com o uso de um software de simulação para que gerasse uma base de dados a ser utilizada posteriormente no treinamento da rede inteligente. Esta rede, por sua vez, foi capaz de produzir resultados que estimaram remotamente os níveis de tensão das três fases em um ponto específico dentro do SEP. A grande diferença desse para outros trabalhos da área é a inspeção do uso da transformada Wavelet como alternativa à Transformada de Fourier, verificando-se o desempenho e custo computacional para tal, e também a utilização de uma ferramenta inteligente híbrida. Após implementação e testes da metodologia proposta, gerou-se uma ferramenta que torna o sistema de monitoramento independente de módulos físicos fixos instalados em pontos de difícil determinação da rede, o que pode proporcionar economia financeira para as concessionárias de energia elétrica. A ferramenta obteve um desempenho satisfatório devido tanto à precisão no domínio do tempo, em detectar o instante de acontecimento do distúrbio, e, também, à correta simulação do comportamento do sinal esperado, mesmo com a apresentação de erros significativos.

**Palavras Chave:** Sistemas elétricos de distribuição, variações de tensão de curta duração, qualidade da energia elétrica, ANFIS, monitoramento remoto, transformada Wavelet.



## Abstract

**CAMARGO, C. B. Remote monitoring of short duration voltage variations in a distribution system by Wavelet transform and ANFIS. 2013. p 57.** Monography (Electrical engineering with emphasis in energy systems and automation) – Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2013.

The present work was elaborated with the objective to develop an intelligent system based on ANFIS that is able to remotely monitor the voltage levels at specific points of an electric power distribution system. This electric power system (SEP) was modeled using a simulation software to generate a database to be used later in the training of the intelligent system. This network was able to produce results that remotely estimated voltage levels of the three phases at a specific point within the system. The major difference from other research in the area is the experimentation of Wavelet transform as an alternative to the Fourier transform, analysing the performance and computational cost for such, and also the use of a hybrid intelligent tool. After its completion the project generated a tool that makes the monitoring system independent of fixed physical modules installed on points of the network which are difficult to determinate, which may provide financial savings for the electric power utilities. The tool has a very good performance due to accuracy in the time domain as for the moment of occurrence of the disorder and also the correct identification of the expected signal behavior.

**Key words:** Electrical distribution systems, short duration voltage variations, power quality, ANFIS, remote monitoring, Wavelet transform.



## Lista de figuras

Tabela 1 - Medidas estatísticas dos resultados da simulação .....	58
Figura 1 - Classificação das variações de tensão referente à duração e tensão remanescente.....	30
Figura 2 - Curva de tolerância de tensão CBEMA, adaptado de Kyei et al. (2002).....	30
Figura 3 - Curva de tolerância de tensão ITIC, adaptado de Kyei et al. (2002).....	31
Figura 4 - Análise multirresolução. ....	39
Figura 5 - Wavelet Haar.....	40
Figura 6 - Wavelet Daubechies.....	41
Figura 7 - Wavelet Chapéu Mexicano. ....	42
Figura 8 - Wavelet Meyer.....	42
Figura 9 - Grau de Pertinência. ....	43
Figura 10 - Arquitetura ANFIS.....	44
Figura 11 - Localização geográfica dos alimentadores da concessionária regional. ....	47
Figura 12 - Modelagem do SEP no ATP e pontos de aplicação de falta e monitoramento de tensão. ....	48
Figura 13 - ANFIS para sinais de aproximação. ....	50
Figura 14 - ANFIS para sinais de detalhes.....	50
Figura 15 - Esquemático da Simulação em Simulink. ....	51
Figura 16 - Diagrama completo do sistema inteligente de monitoramento remoto.....	52
Figura 17 -Fase A - tensão desejada e tensão simulada sobrepostas .....	53
Figura 18 – Fase B - tensão desejada e tensão simulada sobrepostas.....	53
Figura 19 - Fase C- tensão desejada e tensão simulada sobrepostas .....	54
Figura 20 - Detalhe das tensões sobrepostas para a Fase A .....	54
Figura 21 - Análise de um caso específico - Fase A.....	55
Figura 22 - Detalhe das tensões sobrepostas da fase A.....	55
Figura 23 - Ruído na tensão desejada .....	56
Figura 24 - Módulo do erro obtido na simulação da fase A .....	56
Figura 25 - Módulo do erro obtido na simulação da fase B .....	57
Figura 26 - Módulo do erro obtido na simulação da fase C .....	57
Figura 27 - Análise dos erros de simulação.....	58



## **Lista de abreviaturas e siglas**

*ANFIS – Adaptive network with Fuzzy Inference system*

*CBEMA - Computer Business Equipment Manufacturers Associations*

*ITIC - Information Technology Industry Council*

QEE – Qualidade da energia elétrica

RNA – Rede neural artificial

SEP – Sistema elétrico de potência

VTCD – Variação de tensão de curta duração

VTLD – Variação de tensão de longa duração

p.u. – por unidade

*ATP - Alternative Transients Program*

*DWT – Discrete Wavelet Transform (Transformada Wavelet Discreta)*



## Sumário

<b>Resumo</b> .....	13
<b>Abstract</b> .....	15
<b>Lista de figuras</b> .....	17
<b>Capítulo 1 – Introdução</b> .....	23
<b>1.1 – Objetivos</b> .....	25
<b>1.2 - Justificativa</b> .....	25
<b>1.3 - Motivação</b> .....	26
<b>Capítulo 2 – Fundamentação teórica</b> .....	27
<b>2.1 – Revisão bibliográfica</b> .....	27
<b>2.2 – Transformada Wavelet</b> .....	37
<b>2.2.1 - Embasamento teórico</b> .....	37
<b>2.2.2 - Wavelet Discreta</b> .....	38
<b>2.2.3 - Análise Multirresolução</b> .....	39
<b>2.2.4 - Famílias Wavelets</b> .....	39
<b>2.3 - ANFIS (<i>Adaptive Network with Fuzzy Inference System</i>)</b> .....	43
<b>2.3.1 - Treinamento em duas fases</b> .....	45
<b>Capítulo 3 - Metodologia</b> .....	47
<b>3.1 – Procedimentos</b> .....	49
<b>Capítulo 4 - Resultados</b> .....	53
<b>Capítulo 5 - Conclusões</b> .....	61
<b>Referências Bibliográficas</b> .....	63



## Capítulo 1 – Introdução

Devido à modernização da sociedade e o desenvolvimento acentuado da tecnologia, principalmente na área eletrônica, temos a presença desta em praticamente todos os equipamentos em alguma parte de seu processo ou funcionamento. Dessa forma, a introdução desses produtos com sistema eletrônico acarretou em um elevado distúrbio da qualidade da energia elétrica, devido ao aparecimento de distorções harmônicas. Além disso, o crescimento industrial trouxe a instalação de máquinas cada vez mais robustas e potentes, que ao serem inicializadas produzem um fluxo de potência elevado na rede, gerando distorções na amplitude da tensão.

Qualidade da energia elétrica (QEE) diz respeito principalmente aos aspectos da forma de onda das correntes trifásicas de uma rede de distribuição. As variações quanto à forma pura, que seria uma onda senoidal na frequência de 60 Hz, são classificadas de acordo com as suas características, como por exemplo as variações de amplitude, frequência natural e distorções harmônicas. Portanto, a energia elétrica deve ser fornecida na forma de uma onda senoidal pura, sem alterações tanto na amplitude quanto na frequência (DUGAN et al. 2003).

Dentre os distúrbios que ocorrem em um sistema de distribuição de energia elétrica, destaca-se os afundamentos de tensão, que correspondem a 87% de todos os fenômenos que ocorrem nos sistemas de potência (OLESKOVICZ, 2007). Ao inspecionar os afundamentos é possível identificar, na maioria das vezes, a ocorrência de uma falta no SEP como causa do mesmo, devido à propagação ao longo da linha.

Cargas sensíveis instaladas na mesma rede que sofreu a falta, mas em pontos distintos, podem começar a apresentar operações incorretas ou danos à sua estrutura (BOLLEN et al. 2006). Sendo assim, quando os afundamentos acarretam em níveis de tensão abaixo do especificado em norma, devem ser extintos o mais rapidamente, e quando isso não é possível, amenizados. É por esse motivo que há um aumento nas exigências, em termos de qualidade da energia elétrica, quando se trata de normas internacionais de regulamentação da distribuição de energia elétrica pelas concessionárias.

Portanto, conhecer a área de vulnerabilidade das cargas, que é a área próxima à carga na qual é possível sentir-se os efeitos de uma falta na rede de forma acentuada a ponto de causar danos tornou-se fundamental para garantir a operação em uma faixa ótima desses equipamentos. Isto é ainda mais importante quando a carga mencionada corresponde a computadores, robôs industriais, máquinas elétricas, dispositivos eletrônicos de partida, entre outros, que possuem baixa tolerância às variações de tensão fornecida, levando assim a possíveis prejuízos.

Consumidores industriais, comerciais e residenciais, cada vez mais, informam-se sobre seus direitos referente a um fornecimento adequado de energia elétrica dentro das conformidades da QEE, exigindo o cumprimento das normatizações com maior frequência. É por isso que as complicações, além de financeiras, são legais também, demonstrando assim um campo muito importante de pesquisa.

É por esse motivo que aprimorar as técnicas de monitoramento de distúrbios em uma rede de distribuição de energia elétrica é fundamental, bem como reduzir o tempo e esforço computacional exigido para tal tarefa. Com esta premissa, desenvolver uma metodologia para se obter os melhores resultados torna-se ainda mais desafiador.

O primeiro obstáculo para tal objetivo é o de posicionar o equipamento no melhor lugar do sistema elétrico de potência, pois seria necessário um conhecimento prévio sobre o mesmo a respeito de qual ponto obtém-se a melhor visão da área a ser monitorada.

O trabalho de Kempner (2012) mostra que através da observação da Matriz de Tensão Durante a Falta (MTDF) e, utilizando o algoritmo *branch and bound*, é possível obter uma otimização para o problema de alocação de medidores de qualidade de energia elétrica.

Ainda como obstáculo, tem-se que os fenômenos que atingem a rede são de caráter estocástico, sendo assim, além dos dados estruturais e topológicos é necessário estudar-se outros parâmetros de menor controlabilidade (DUGAN et al. 2003).

Para ajudar a resolver esse problema encontra-se os diversos avanços nas pesquisas envolvendo inteligência artificial e ferramentas inteligentes, como por exemplo, Lógica *Fuzzy*, as RNA's ou híbridas (em que ambos os conceitos são aplicados). Em conjunto com essas ferramentas também deve-se citar os desenvolvimentos na área matemática que contribui na etapa de pré-processamento do sinal, visando conseguir informações e características úteis aos sistemas inteligentes, como por exemplo, a Transformada de Fourier e Transformada Wavelet.

A motivação principal para se desenvolver um sistema desses é a diminuição dos custos econômicos que decorrem dos distúrbios de qualidade da energia elétrica devido os problemas causados aos sistemas de produção, onde a energia elétrica é fundamental. Por tal motivo buscou-se nesse trabalho desenvolver um sistema de monitoramento inteligente que considere a diminuição de custos com esta operação em relação à quantidade de equipamentos dessa categoria instalados na rede de distribuição de energia elétrica, bem como a agilidade na apresentação dos resultados.

A metodologia a ser utilizada inclui a aquisição dos dados das correntes trifásicas ou tensões trifásicas por um monitor de QEE instalado em uma subestação, assim como o processamento dos mesmos por meio de um software proposto a partir de uma arquitetura inteligente. O fato de se instalar o monitor na subestação do sistema de potência é a presença

dos transformadores de potencial e corrente, o que ajuda a minimizar gastos na aquisição dos dados.

Sendo assim, pretende-se demonstrar que com apenas um monitor de QEE instalado na rede e uma ferramenta inteligente híbrida é possível obter uma estimativa satisfatória da qualidade da tensão, ou seja, os níveis, que está sendo fornecida a um cliente específico ou ponto de acoplamento.

## **1.1 – Objetivos**

O objetivo principal desse trabalho é desenvolver um sistema de monitoramento que a partir dos valores de tensão ou corrente trifásica, pré-processados (através de transformada *Wavelet*), adquiridos em uma subestação, possa prever os níveis de tensão em determinado ponto de interesse em uma rede de distribuição de energia elétrica.

Como objetivo secundário, os valores obtidos da simulação serão utilizados para gerar um banco de dados possível de ser utilizado em um mapeamento da rede mencionada em relação aos níveis de sensibilidade da mesma e, assim, determinar as áreas de vulnerabilidade em relação ao barramento escolhido.

A rede citada foi simulada usando-se dados reais de uma concessionária local. Todos os resultados obtidos foram utilizados na implementação de um sistema inteligente híbrido que processasse os objetivos do trabalho, com desenvolvimento auxiliado por meio do *toolbox* do Matlab®.

## **1.2 - Justificativa**

A presença de uma regulamentação mais rigorosa e também de um consumidor mais consciente da QEE que deve ser fornecida leva a concessionária a buscar maior agilidade na detecção, localização e correção dos distúrbios que ocorrem no SEP. Esse trabalho propõe uma solução que dispensa o uso de diversos monitores físicos espalhados ao longo do SEP, e de um estudo de otimização de suas localizações, para monitorá-lo. Sendo assim, gera uma economia para a empresa.

Finalmente, pretende-se gerar um conhecimento em relação à QEE e aos sistemas inteligentes, principalmente híbridos, servindo assim de base para posteriores investigações acerca do assunto.

### **1.3 - Motivação**

A motivação para início desse estudo foi o trabalho de conclusão de curso do aluno Fernando B. Bottura, intitulado “Um método alternativo e inteligente para o monitoramento remoto das variações de tensão de curta duração em um sistema de distribuição de energia elétrica” o qual foi apresentado durante a disciplina de qualidade de energia elétrica e inspirou-me pelo estudo da utilização de ferramentas inteligentes no monitoramento do SEP.

## Capítulo 2 – Fundamentação teórica

### 2.1 – Revisão bibliográfica

No universo conhecido pelo homem podem-se definir cinco grandes fontes de energia, sendo elas água, terra, ar, fogo e espaço. A sexta fonte de energia que pode ser citada para agregar-se ao grupo mencionado anteriormente, foi descoberta pelo homem e é chamada eletricidade, tendo papel fundamental em todos os aspectos da sobrevivência humana. Isso se deve ao fato de ter-se grande necessidade de bens elétricos na vida cotidiana e por essa razão deve ser estudada e desvendada (RAMESH et. al, 2010).

Eletricidade pode ser definida em termos de corrente elétrica que, de acordo com as pesquisas modernas, significa fluxo de elétrons. É gerada através da remoção de elétrons dos átomos e pode ser obtida por meio de fricção, luz, calor, pressão, ação química ou magnetismo (RAMESH et. al, 2010).

Analisando-se como a sociedade evolui, pode-se relacionar o aumento da população com, necessariamente, um aumento no consumo de energia, que implica em maior necessidade de geração de energia elétrica, porém sem esquecer-se que a mesma deve seguir padrões de desenvolvimento sustentável e de responsabilidade (LEÃO, 2009).

Um sistema elétrico de potência pode ser definido como um sistema cujo objetivo principal seja gerar, transmitir e distribuir a energia elétrica, para que a população possa ter acesso a esse bem, sempre atentando-se para os padrões de confiabilidade, disponibilidade, qualidade, segurança e custos (LEÃO, 2009).

A energia produzida em unidades de geração tem a necessidade de atingir os centros de consumo e para isso são implementadas as linhas de transmissão, onde a tensão de operação é muito mais alta do que a fornecida na estação geradora, pois com isso reduz-se as correntes e consequentemente as perdas durante o processo. Essa operação é efetuada utilizando-se equipamentos chamados transformadores (PANSINI, 2005).

Ao atingir o centro de consumo de energia elétrica, o sistema de transmissão é integrado ao de distribuição através de uma subestação de energia, onde ocorre a redução dos elevados níveis de tensão para valores mais baixos fornecidos aos consumidores (PANSINI, 2005).

Além de operar na redução no nível de tensão, uma subestação também provê os pontos onde os equipamentos de segurança serão instalados para que haja a desconexão do sistema quando ocorrer falhas. A tensão fornecida à rede de distribuição de energia elétrica também é regulada através da subestação. Por fim, ainda é um ótimo ponto para se fazer medições dos valores de tensão e corrente para análise da condição da rede (PANSINI, 2005).

A qualidade da energia elétrica ganhou extrema importância no cenário mundial atual, pois quando atingida em níveis satisfatórios garante um serviço de distribuição de energia elétrica coerente com as normas especificadas, tanto brasileiras quanto mundiais, atraindo assim o interesse de diversas áreas para os estudos acerca do tema.

Sendo assim, uma das grandes preocupações quanto à QEE é a conformidade com os níveis de tensão estabelecidos, sendo caracterizados os distúrbios como: variação do nível de tensão; distorções da forma de onda; distorções em frequência, entre outros.

As variações de tensão correspondem aos principais casos de problemas causados ao sistema de distribuição. São denominados assim quando o nível de tensão permanece fora de uma faixa especificada por um período de tempo.

Classificam-se essas variações de tensão a partir do tempo de duração do distúrbio e da faixa que se encontra a tensão remanescente da rede durante a ocorrência do mesmo. Assim, têm-se as variações de tensão de longa duração (VTLD), quando o fenômeno permanece na rede por um período de tempo superior a 1 minuto; e, as variações de tensão de curta duração (VTCD), quando a duração é inferior a 1 minuto. Dentro das variações de curta duração ainda é possível subdividi-las em outras três categorias, novamente de acordo com o tempo de permanência do distúrbio na rede, classificadas como variações instantâneas quando se estende de 0,5 a 30 ciclos, momentâneas para intervalos de 30 ciclos a 3 segundos e temporárias quando duram de 3 segundos a 1 minuto.

Dentro de cada uma dessas categorias determinadas em função do tempo dividem-se os fenômenos, levando-se em conta a tensão remanescente durante o distúrbio. Dessa forma temos, para o caso das variações de longa duração, o que se denomina sobretensão, onde a tensão se eleva para valores entre 1,1p.u. e 1,2p.u. Contrariamente, quando a tensão permanece abaixo da nominal (abaixo de 0,9 p.u.) classifica-se como subtensão. Caso haja permanência da tensão remanescente após a falta em zero p.u. por mais de 1 minuto, temos a chamada interrupção sustentada, um distúrbio mais danoso para a rede (DUGAN et al. 2003).

As VTLD's são geralmente causadas pelas variações de carga do sistema (desligamento de grandes cargas), bem como chaveamentos de bancos de capacitores na rede de distribuição, ou ainda, causadas pela sustentação das situações de falta. Os danos causados por esse distúrbio

enquadram a redução da vida útil dos equipamentos, parada dos mesmos, perda da isolação, entre outros.

Para a subtensão, podemos identificar como causa o excesso de carregamento dos circuitos alimentadores do sistema de distribuição de energia elétrica, ou entrada de grandes cargas na rede. Entre os efeitos negativos dessa condição adversa do sistema pode-se citar a interrupção da operação de equipamentos eletrônicos, elevação do tempo de resposta e, conseqüentemente, a corrente de partida das máquinas de indução, entre outros danos potenciais.

No que tange às VTCD's, têm-se na sua subclassificação as interrupções, em que a tensão remanescente está entre 0 (zero) e 0,1 p.u. do valor da tensão nominal (as elevações de tensão) em que a magnitude permanece entre 0,1 p.u. e 0,9 p.u. (DUGAN et al., 2003), e as elevações de tensão, quando se eleva de 0,1 a 0,8 p.u. da tensão nominal (DUGAN et al., 2002).

É importante lembrar que a duração de uma falta no sistema elétrico de potência em uma rede de distribuição está intrinsecamente relacionada com o tempo de atuação dos dispositivos de proteção utilizados pelas concessionárias de energia, pois são estes que possuem a função de isolar ou eliminar o distúrbio do restante do sistema (OLESKOVICZ, 2007).

Em se tratando do sistema elétrico brasileiro, é importante mencionar como é a classificação dos distúrbios mencionados no país. Para isso tem-se o módulo 8 do PRODIST ("procedimentos de distribuição de energia elétrica") (ANEEL, 2009) que aborda especialmente a questão da qualidade de energia elétrica (QEE), normatizando intervalos para os fenômenos ocorridos na rede de distribuição diferentes dos encontrados na literatura, sendo que esse manual amplia o intervalo de tempo para os afundamentos de tensão para até 3 minutos, ao contrário do 1 minuto corrente da norma internacional. Portanto, este documento retifica a duração dos distúrbios mencionados para até 1 ciclo para instantâneos, de 1 ciclo a 3 segundos para momentâneos e de 3 segundos a 3 minutos para os temporários.

A Figura 1 mostra um quadro-resumo da classificação dos distúrbios que ocorrem em uma rede de distribuição de energia elétrica.

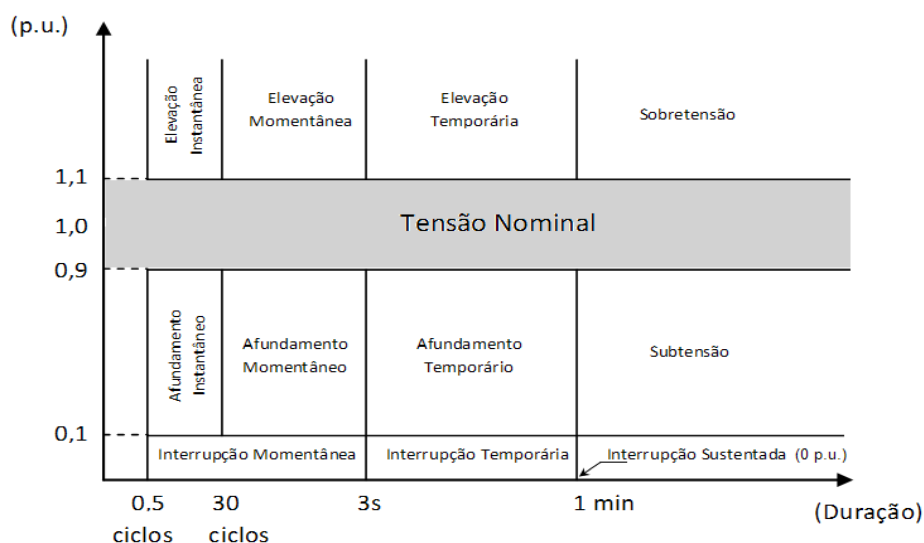


Figura 1 - Classificação das variações de tensão referente à duração e tensão remanescente.

É possível elaborar-se curvas, denominadas curvas de sensibilidade, para se especificar zonas de operação em tensões fora da nominal, em questão da tolerância de equipamentos micro processados de acordo com a magnitude e duração do distúrbio. A primeira curva relativa a esse assunto a ser confeccionada foi a curva CBEMA (*Computer Business Equipment Manufacturers Associations*) (DUGAN et al. 2003) que foi desenvolvida por fabricantes de computadores e se tornou referência na área como especificação de tolerância para esses produtos. Uma réplica da curva é mostrada na Figura 2 abaixo.

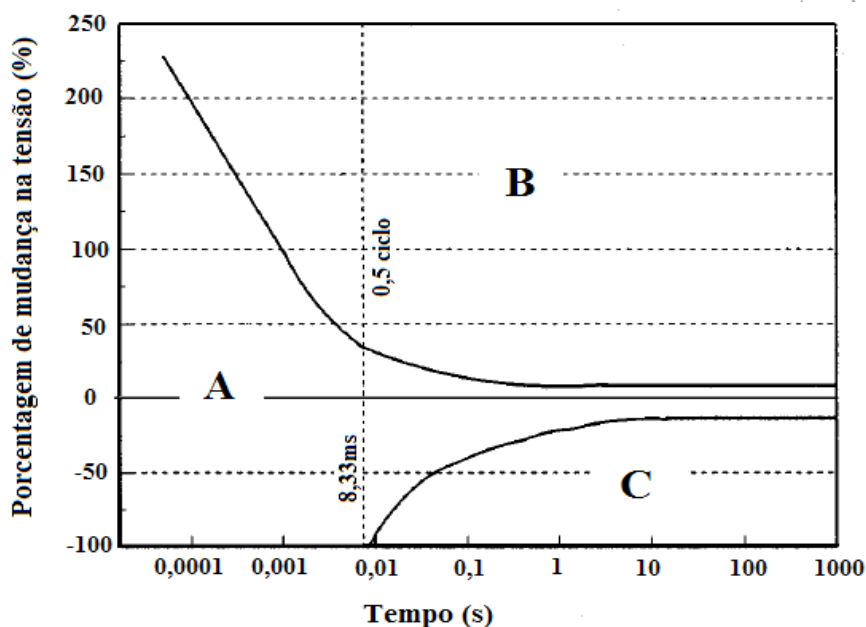


Figura 2 - Curva de tolerância de tensão CBEMA, adaptado de Kyei et al. (2002).

Identificam-se nessa figura três áreas distintas demarcadas pelas letras A, B e C, representando respectivamente: a região normal de trabalho, onde o equipamento pode funcionar normalmente sem riscos de danos à sua estrutura; região perigosa de trabalho, em que pode ocorrer ruptura da isolamento do equipamento; e a região perigosa de trabalho na qual o equipamento em questão pode sofrer alguma paralisação ou disfunção.

A curva CBEMA foi muito utilizada para verificar se um equipamento estava operando em situação de risco de integridade física ou não. Mas com a evolução dos equipamentos eletrônicos, posteriormente se fez necessário o desenvolvimento de uma nova curva que representasse melhor as condições de operação crítica e informasse com maior acuidade as regiões de operação com possibilidade de falha do equipamento. Assim, surgiu-se a curva ITIC (*Information Technology Industry Council*), que teve um maior rigor com as magnitudes e durações das VTCD's (DUGAN et al. 2003). A Figura 3 traz a curva ITIC em detalhes.

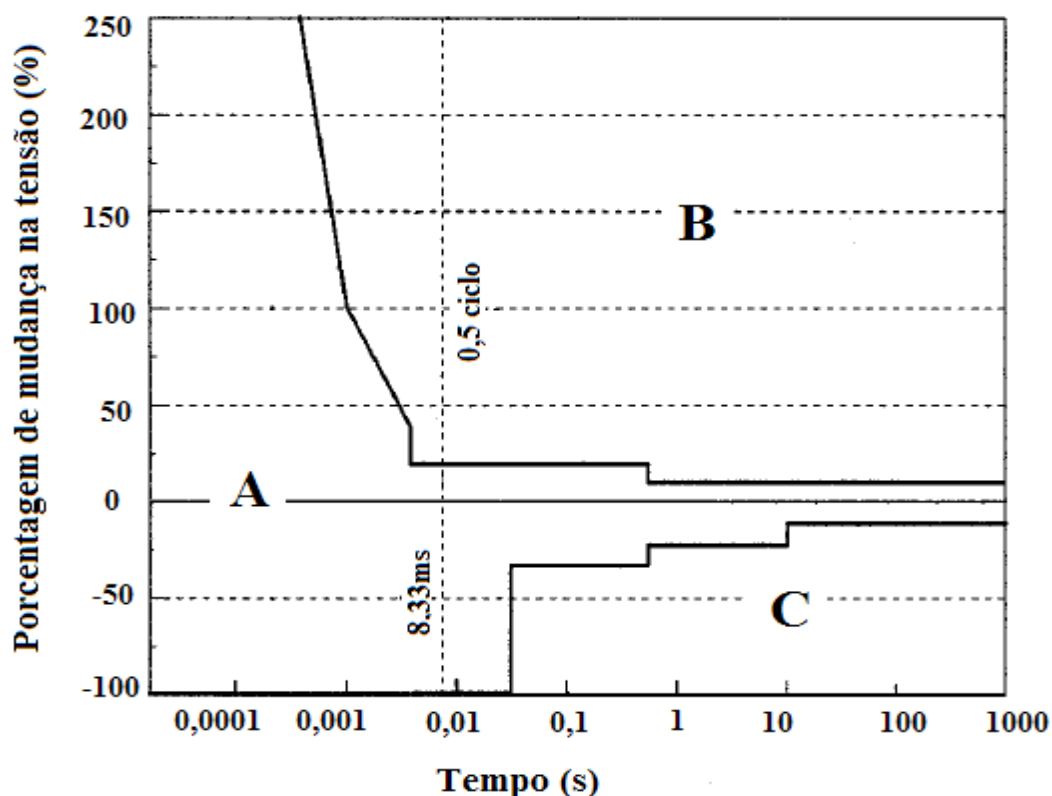


Figura 3 - Curva de tolerância de tensão ITIC, adaptado de Kyei et al. (2002).

A interpretação dessa nova curva segue o mesmo da curva CBEMA. A região A de funcionamento normal, região B onde existe o risco de perda de isolamento e desligamento por sobretensão, e região C em que pode ocorrer desligamento ou mau funcionamento de cargas sensíveis.

Ainda no tocante à robustez do sistema elétrico e qualidade de energia elétrica, existe o conceito de área de vulnerabilidade e área afetada de uma rede de distribuição devida a uma falha do sistema.

A área de vulnerabilidade é, por definição, toda a área de um sistema elétrico de potência (barramentos e segmentos de linha) que ao ser atingida por um defeito ou falha pode gerar um afundamento de tensão em um barramento específico, os quais possuem magnitude inferior ao limiar de tensão (tensão mínima de operação), especificado para uma carga elétrica sensível (GOSWAMI et al. 2008).

Sendo assim, a área afetada pode ser explicada como um conceito complementar à área de vulnerabilidade. Assim, quando da ocorrência de uma falta elétrica em um determinado barramento do sistema elétrico de potência, determinam-se quais outros barramentos que compõem o sistema terão seu nível de tensão reduzido para além do limiar de tensão ou tensão mínima de operação.

A partir dessa análise preliminar é possível selecionar diversos estudos relacionados à qualidade de energia elétrica, mas com novas interpretações. Exemplo disto é a pesquisa de Won et al. (2005), onde é proposta uma nova abordagem relativa à caracterização de um afundamento de tensão, utilizando para isso uma função de aproximação para esse perfil de distúrbio do tipo raiz  $k$ -ésima, a qual geraria, segundo os autores, um perfil de tensão de determinada carga. Esse método, então, eliminaria a superestimação da duração de afundamentos de tensão, pois mostra um perfil mais fiel ao distúrbio e não retangular, considerando assim as características dinâmicas inerentes da carga analisada, como por exemplo, da reaceleração de um motor de indução de grande porte após uma queda de tensão de alimentação (BOLLEN, 1995 *apud* WON et al. 2005). Ainda segundo os autores, isso é possível utilizando-se apenas os dados padrões fornecidos pelos medidores de qualidade de energia elétrica. O parâmetro ( $k$ ) mencionado é então obtido experimentalmente por diversas aproximações sucessivas, o que leva a obtenção de um perfil do efeito de um afundamento de tensão mais exato e verdadeiro, além de ser um método mais prático para tal aplicação.

Outro estudo que contempla o mesmo pensamento é o de Kyei et al. (2002), que propõe o estudo dos fenômenos relacionados a afundamentos de tensão sugerindo um método para, dada uma determinada carga, caracterizá-la com curvas de tolerância de tensão, complementando as curvas CBEMA e ITIC (DUGAN et al. 2003). A pesquisa mostra a modelagem de uma falta ocorrida através de um retificador monofásico de tensão, em que a tensão de entrada é a tensão fornecida pela rede e a tensão retificada, a tensão fornecida à carga. Ao solucionar-se a equação diferencial desse circuito é obtido uma curva ( $VDC_{xt}$ ) similar à

curva CBEMA. É importante ressaltar que esse resultado pode ser estendido para o caso trifásico.

Em Lee et al. (2004) também existe a preocupação em analisar as características de sensibilidade das cargas em operação. É discutida a necessidade de desenvolver um índice de qualidade de energia elétrica que consiga associar o custo financeiro envolvido na gravidade do dano causado ao equipamento devido às faltas no serviço de distribuição de diferentes classes (k) de magnitude e duração.

Para quantificar-se a gravidade dos danos, é utilizado uma medida de média  $[E(k)]$  a qual é composta da frequência e intensidade dos distúrbios mencionados de cada classe especificada (k). Com isso tem-se a obtenção de curvas de sensibilidade para diversas cargas de interesse, semelhantes às curvas CBEMA (KYEI et al., 2002).

Pelo padrão IEE standard 1159-1995 subdivide-se o eixo relativo ao tempo em função das classes (k), fazendo-se possível prever o dano causado às cargas devido às falhas do sistema de distribuição. A partir de registros estatísticos e do fator  $C_k$ , que representa a média de custo financeiro de uma classe k, é determinado o custo. Portanto, a utilização desse índice vem ajudar o consumidor e o fornecedor de energia elétrica a conhecer o aspecto financeiro por trás dos efeitos negativos da má qualidade do sistema de fornecimento e distribuição de energia elétrica.

Outro estudo derivado dessa premissa, desenvolvido por Bollen et al. (2008) introduz um conceito importante, que seria a elaboração de uma curva, chamada curva de compartilhamento de responsabilidade (*responsability-sharing curve*), em que tanto as concessionárias quanto os consumidores de energia elétrica são responsabilizados, de acordo com suas competências, quanto aos defeitos elétricos da rede, principalmente os afundamentos de tensão. Além da semelhança com as curvas de sensibilidade, os autores trazem à luz as especificações de algumas normas internacionais já existentes em alguns países, como a África do Sul, que possui a norma NRS 048-2, (NRS 048-2:2003, 2003 *apud* BOLLEN et al, 2008), que responsabiliza o consumidor por afundamentos nos quais a tensão remanescente permanece acima de 0,7 p.u. e tem duração de até 150ms, os que a tensão remanescente esteja acima de 0,8 p.u. com duração de até 600ms e nos de maior duração quando a tensão remanescente fica acima de 0,85 p.u. da tensão nominal.

Propõe-se nesse caso, no entanto, a padronização da escolha da curva de responsabilidade a ser utilizada baseando-se na norma internacional IEC Std. 61000-4-11 (IEC Std. 61000-4-11, 2001 *apud* BOLLEN et al, 2008). Porém, destaca-se a influência de características locais das regiões de distribuição de energia elétrica na elaboração de uma regulamentação local, ao que se conclui que uma generalização, tendo as disposições mundiais

atuais quanto às normativas referentes à distribuição de energia elétrica, seria precipitada, mas os estudos acerca do assunto são importantes e incentivados.

Tratando-se de encontrar uma solução baseada em análise estatística, têm-se o trabalho de Wang et al. (2005) como um dos destaques no assunto, que estima o comportamento dos afundamentos de tensão em uma rede de distribuição de energia elétrica predizendo as magnitudes e duração dos distúrbios. Para isso é proposto que se substitua as medições, processo caro e dispendioso de tempo, por um algoritmo que tem a função de calcular o comportamento dos afundamentos de tensão através de uma tabela onde se registra a densidade de probabilidade de ocorrer um evento desses. Essa tabela baseia-se nos diversos aspectos do sistema elétrico de potência para mostrar se uma carga sensível conectada a um ponto específico da rede está mais susceptível a um afundamento de tensão.

Assim, define-se que naquele ponto temos a possibilidade de, com a ocorrência do fenômeno, danificar ou não a carga, aplicando-se aqui o conceito de área de vulnerabilidade (DUGAN et al. 2003). Com a intenção de confirmar a gravidade do dano na carga devemos comparar os dados obtidos com a curva de tolerância da mesma (KYEI et al. 2002).

Na literatura encontram-se dois métodos propostos que visam excluir a dependência em dados estatísticos: o método da posição de falta (fault-position – FP) e o método da distância crítica (critical distance – CD), conforme se encontra em Carpinelli et al. (2009).

Primeiramente, o método da distância crítica analisa a partir de um divisor de tensão no ponto de acoplamento comum da rede, onde está conectada a carga que se deseja inspecionar, a tensão no instante em que ocorre a falta. Para isso é necessário conhecer a impedância da fonte vista a partir do ponto de acoplamento, o valor da tensão da fonte e a impedância entre o local da falta e o ponto de acoplamento comum.

Em paralelo, o método da posição da falta permite construir uma matriz capaz de conter todas as tensões de todos os barramentos do sistema no momento em que ocorre uma, essa matriz recebe o nome de matriz de afundamento. Para se obter a matriz de afundamento é preciso primeiramente construir a matriz de impedâncias (ZBus) do sistema elétrico a ser estudado, de posse desses dados é possível calcular computacionalmente a matriz procurada seguindo três etapas. A primeira é simular o curto-circuito para ocorrência de uma falta em um determinado barramento do sistema. Em segundo, deve-se calcular todas as tensões remanescentes nos barramentos da rede de distribuição. E por fim, construir a matriz de afundamentos. É necessário se atentar para o fato de que as duas primeiras etapas devem ser repetidas para vários pontos de falta, considerando-se todas as barras do sistema. Esse método proporciona uma visão ampla de como a rede de distribuição de energia elétrica se comporta

diante de um distúrbio elétrico, como um afundamento de tensão, pois mostra as tensões remanescentes nos barramentos durante a falta.

No trabalho de Goswami et al. (2008) pode-se encontrar um método analítico que pode ser usado na previsão de afundamentos de tensão, obtendo-se assim áreas de vulnerabilidade de importância dentro de um sistema de distribuição de energia elétrica.

Para isso, tem-se o equacionamento de uma matriz chamada Matriz de Afundamentos de Tensão (VSM) que é a mesma calculada pelo método da posição de falta mencionada anteriormente, a partir da matriz de impedâncias (ZBus).

A partir da matriz VSM pode-se fazer uma correlação entre as linhas desta e o diagrama unifilar do sistema elétrico de distribuição, identificando-se assim a área de vulnerabilidade de interesse, mais claramente, uma linha  $k$  da matriz representa um determinado barramento do sistema e ainda mais, pode-se deduzir o potencial de uma carga conectada nesse barramento ser afetada por um afundamento de tensão decorrente de um defeito incidente na rede de distribuição. Portanto, de acordo com os resultados obtidos, tem-se um método de obter a área de vulnerabilidade para um barramento específico a partir da matriz VSM derivada da matriz ZBus, independentemente de um registro estatístico, o que economiza processamento e agiliza o processo.

Outra matriz que pode ser obtida para representar as tensões de pós falta na rede de distribuição pode ser encontrada no trabalho de Carpinelli et al. (2009), a matriz de afundamentos de tensão (during fault voltage matrix - DFV), semelhante ao trabalho de Goswami et al. (2008). Para se obter essa nova matriz utiliza-se o método da posição de falta combinando-se as tensões dos afundamentos da DFV com dados estatísticos sobre a taxa de falha do sistema, que se refere à robustez do mesmo.

Com esses dados gerados os autores sugerem uma interpretação gráfica dos mesmos utilizando-se de uma escala graduada de cores, que representa quão severo é o afundamento de tensão em questão, o que permite através de uma rápida análise verificar como se comporta o sistema de distribuição de energia elétrica escolhido, visualizando-se as tensões remanescentes nos barramentos após uma falta elétrica. Ainda nesse trabalho tem-se o cálculo da capacidade de curto-circuito como em Kagan et al. (2005) alinhado com a matriz de afundamentos de tensão como uma característica apontada como importante pelos autores para se demonstrar a robustez do sistema.

Assim, quanto maior a capacidade de curto-circuito, maior será o efeito da falta elétrica e, portanto, maiores os afundamentos de tensão nas barras restantes do sistema de distribuição. Em contrapartida, quanto menor a capacidade de curto-circuito da barra, mais propensa a sofrer afundamentos de tensão decorrentes de faltas ocorridas em outros nós do sistema. Além disso,

quando essa mesma barra for alvo da falta, levará uma menor quantidade de barras adjacentes a sentirem um afundamento de tensão.

Aliando as ferramentas acima ao método da posição de falta pode-se obter um panorama mais acurado da situação das tensões de uma rede de distribuição do sistema elétrico de potência quando o mesmo é atingido por uma falta elétrica em um determinado barramento.

Para melhorar as condições e resultados dos monitoramentos de faltas e afundamentos de tensão em uma rede de distribuição de energia elétrica, podem-se utilizar ferramentas inteligentes, como as RNA's e sistemas Fuzzy, ou até mesmo situações híbridas, junto com os conhecimentos de extração de informações através de um processamento de sinais, como por exemplo, a utilização da Transformada Wavelet ou Fourier.

Para o presente trabalho foi utilizado um *Adaptive Network-based Fuzzy Inference System* (ANFIS), sistema criado por Roger Jang tendo como base teórica a inferência de Takagi-Sugeno. A ferramenta inteligente combina a capacidade de se expressar os diversos relacionamentos não-lineares entre entradas/saídas através de uma coleção de regras “se-então” qualitativas com a maior vantagem de uma rede neural, que seria a capacidade de aprender algo para se adaptar aumentando sua eficiência (GHADIMI, 2013).

Othman et al (2004) demonstra a eficiência de três redes neurais, entre elas a ANFIS, na detecção, classificação e localização de uma falta, utilizando-se como método de pré-processamento de dados a transformada Wavelet. Já nos trabalhos de Etemadi et al (2008), Rasli (2012), Tag Eldin (2010) pode-se observar diversos métodos em que a principal ferramenta é a combinação entre a ANFIS e a transformada Wavelet, demonstrando sua grande aplicabilidade no assunto e sua eficiência quando trata-se da detecção, classificação e localização de faltas em uma rede elétrica.

A escolha da transformada Wavelet, ao invés de Fourier, tem em vista a característica da mesma não possuir informações no domínio do tempo, o que não acontece com a Wavelet (ISMAIL, 2010). É válido ressaltar que a diminuição do tamanho da janela de amostragem na transformada de Fourier permite uma análise mais relevante em relação ao domínio do tempo, porém esse método introduz um maior custo computacional e perda da capacidade de processamento em tempo real. Esse mesmo trabalho demonstra a eficácia na utilização da transformada Wavelet discreta para decomposição e recomposição dos sinais de tensão quando da ocorrência de interrupções, afundamentos e elevação de tensão, utilizando-se diferentes Wavelets mães.

Outro trabalho digno de comentário é o de Bravo (2005) que demonstra uma aplicação conjunta das transformadas discretas de Fourier e Wavelet visando obter resultados ainda mais

expressivos na detecção de distúrbios da rede, aproveitando as melhores características de cada metodologia.

Ainda em relação à transformada Wavelet utilizada na classificação de faltas na rede elétrica tem-se o trabalho de Costa et al (2009), no qual a medição das entradas utilizadas no sistema proposto advém de uma análise oscilográfica. Ao ser processada através da transformada Wavelet obtém-se a energia dos seus coeficientes, os quais são analisados e seus resultados aplicados na classificação de faltas tanto simples quanto entre fases.

Os estudos acima foram considerados como base para desenvolvimento do estudo que se segue nesse trabalho de conclusão de curso, sendo que muitos outros que serviram de amparo científico serão mencionados posteriormente, durante o decorrer do mesmo.

## **2.2 – Transformada Wavelet**

O uso da teoria das Wavelets é amplamente difundido na área de engenharia quando aplicada na análise multirresolução no processamento de sinais, expansão Wavelet ou decomposição de sinal devido à sua importante característica que é a eficiência na análise de sinais discretos. Pode-se dizer que o início dos estudos relacionados a esse assunto está no algoritmo de Mallat (1998) pois foi só a partir deste que a aplicação da ferramenta se fez possível.

Assim como na decomposição em séries de Fourier, em que os senos e cossenos são as funções basais, a decomposição em Wavelets visa utilizar outras funções para compor as séries, porém a diferença fundamental entre as duas está no fato das Wavelets estarem relacionadas à escala do sinal principal enquanto Fourier relaciona-se à frequência.

O objetivo da análise Wavelet é ver a floresta e as árvores (GRAPS, 1995), em outras palavras quando se utiliza o algoritmo no domínio das Wavelets é possível, com diferentes configurações de escala e resolução, observar o sinal e seus detalhes. Para isso, tem-se o conceito de janelas deslizantes com regiões de diferentes tamanhos, assim, podem-se observar maiores detalhes em baixa frequência, com janelas maiores, em contrapartida em altas frequências utilizando menores janelas. Desse modo, devido à característica transitória não estacionária dos fenômenos que ocorrem em uma rede de distribuição de energia elétrica (MALLAT, 1998), torna-se ideal o uso das Wavelets para aplicações na área de qualidade de energia elétrica.

### **2.2.1 - Embasamento teórico**

A Equação 1 define a transformada Wavelet:

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

É possível simplificar a equação acima da seguinte forma:

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

Pode-se assim escrever-se a transformada Wavelet como sendo um produto interno de duas funções,  $f(t)$  e  $\Psi_{a,b}(t)$ :

$$W(a, b) = (f(t), \Psi_{a,b}(t)) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi_{a,b}(t) dt \quad (3)$$

Com essas manipulações aplicadas podem-se classificar as funções  $\Psi_{a,b}(t)$  em duas: Wavelet mãe (*mother* Wavelet) que corresponde à  $\Psi(t)$ , ou seja  $\Psi_{1,0}(t)$ ; e as Wavelet filhas, que são as outras funções  $\Psi_{a,b}(t)$ . Dessa forma, identificam-se dois parâmetros muito importantes. O parâmetro  $a$  rege a escala da Wavelet formada, ou seja, quando  $a > 1$  aumenta-a ou, caso contrário, quando  $a < 1$  diminui-a. Já o  $b$  da função indica a distância em relação ao eixo  $t$  da qual a função  $\Psi(t)$  foi transladada, determinando assim a translação da Wavelet (GRAPS, 1995).

### 2.2.2 - Wavelet Discreta

Para o uso eficaz da transformada Wavelet é necessário discretizá-la, com o intuito de eliminar redundâncias causadas pela equação característica da mesma, gerando assim a Transformada Wavelet Discreta (TWD), onde apenas os parâmetros de escala,  $a$ , e de translação,  $b$ , são variados, permitindo-se assim uma análise mais eficiente tendo em vista que esses parâmetros variam dentro de um conjunto bem definido e em potências de dois (TIWARI; SHUKLA, 2002).

Como mencionado anteriormente, ao utilizar os procedimentos característicos de uma análise dessa categoria, pode-se dividir um sinal qualquer em dois componentes, as baixas frequências e as altas frequências, com o uso de filtros passa-baixa e passa-alta. Os componentes de baixa frequência representam as aproximações do sinal, ou seja, são os que definem a identidade deste, enquanto que os componentes de alta frequência referem-se aos detalhes do mesmo, de modo a caracterizá-lo e distingui-lo (MALLAT, 1998).

Esse procedimento assemelha-se a uma filtragem do sinal com o uso de dois filtros, um passa-baixa e outro passa-alta, e por ser iterativo pode ser repetido quantas vezes for necessário,

até que os detalhes individuais sejam reduzidos a uma amostra simples (no caso de imagens, um pixel). Porém, para efeitos práticos deve-se selecionar um número finito de iterações conforme a natureza do sinal ou um critério viável (MISITI et al., 1997).

### 2.2.3 - Análise Multirresolução

A análise multirresolução consiste em subdividir o sinal através da transformada Wavelet em diversos níveis pela implementação contínua de filtros passa-alta e passa-baixa, que será novamente decomposto, resultando novamente em um sinal detalhado e outro aproximado. Esse processo é repetido continuamente até o nível desejado de solução, desse modo, obtém-se  $n$  níveis de detalhamento, provenientes dos filtros passa altas e um nível de aproximação, proveniente da última filtragem por um passa baixas.

Na Figura 4 é possível observar melhor essa relação de sucessivas decomposições e todos os componentes resultantes da sua implementação.

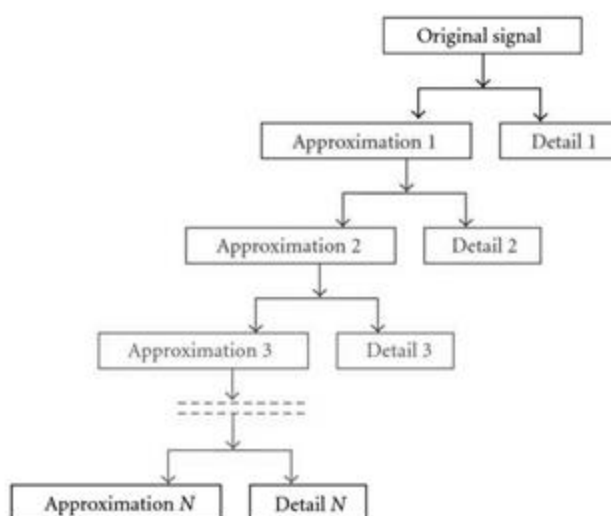


Figura 4 - Análise multirresolução.

Mallat (1998) demonstra em seu trabalho de modo eficiente a utilização dessa disposição de filtros para decomposição do sinal base. Esse procedimento consiste em escolher uma família Wavelet para se definir qual Wavelet mãe será utilizada.

### 2.2.4 - Famílias Wavelets

a) Haar

É a Wavelet mais simples, sendo também chamada de função escala (Figura 5). Construída a partir de operações de mudança de escala e translação assemelha-se à função degrau unitário. São de uso limitado, pois não são continuamente diferenciáveis.

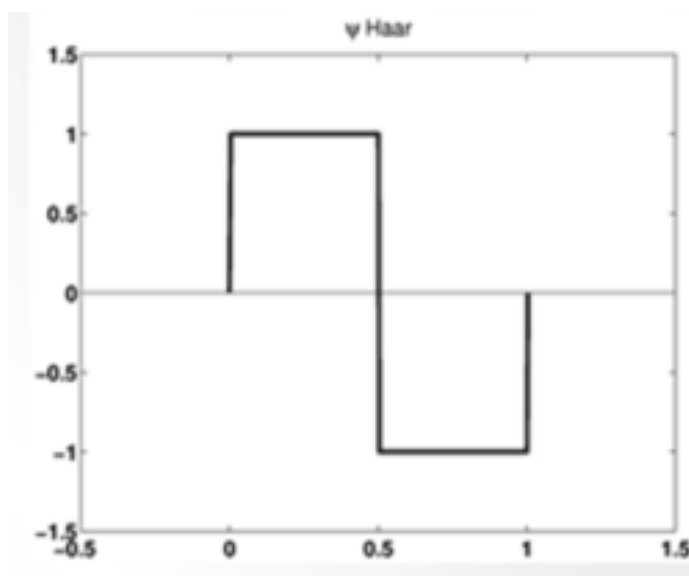


Figura 5 - Wavelet Haar.

#### b) Daubechies

Ingrid Daubechies foi quem construiu essa família Wavelet (Figura 6), à qual deu seu nome, também chamada de Wavelet ortonormal suportada compactamente, ou seja, o aspecto compacto diz respeito ao fato de serem definidas sobre um intervalo definido, sendo necessário que apenas um número finito de coeficientes de filtro seja diferente de zero. É por isso que se pode dizer, que com as Wavelets de Daubechies, a análise Wavelet discreta é possível (DAUBECHIES, 1992).

Uma família Wavelet pode ser definida com valor N compreendido entre 2 e 10, e portanto, qualquer polinômio de grau igual a N ou inferior tem sua forma representativa através de uma combinação linear da função escala e de todas as suas translações inteiras.

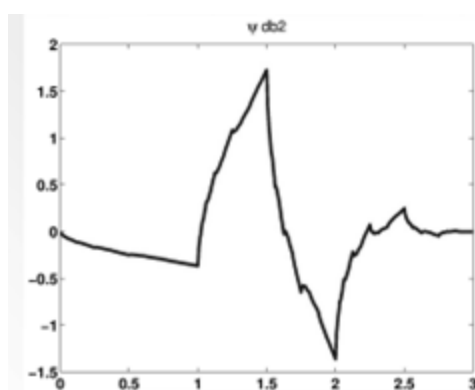


Figura 6 - Wavelet Daubechies.

c) Symlets

Modificação proposta para a família db (Daubechies) pela própria criadora, apresentando um aspecto quase simétrico. Possui propriedades similares à família anterior (DAUBECHIES, 1992).

d) Morlet

Função Wavelet não ortogonal que não possui função escala. É caracterizada por uma função gaussiana modulada e levemente ajustada (MORLET, 1984).

e) Chapéu mexicano

A família Wavelet chapéu mexicano não possui função escala, sendo proporcional à segunda derivada da função de probabilidade Gaussiana (MALLAT, 1998). É possível visualizar a função na Figura 7.

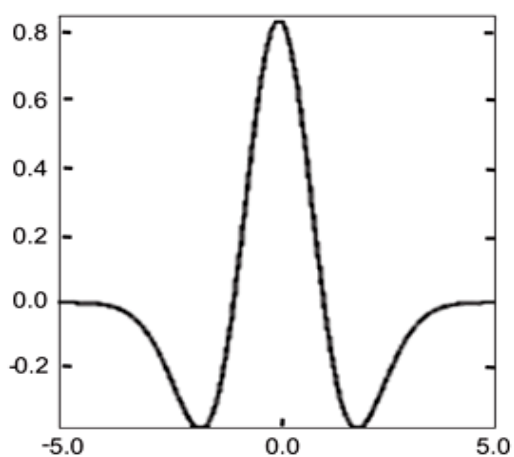


Figura 7 - Wavelet Chapéu Mexicano.

f) Meyer

Meyer (1993) foi o primeiro a desenvolver uma Wavelet trivial que fosse diferente da Wavelet de Haar, porém que é continuamente diferenciável em todo seu domínio, desse modo pode-se chama-la de base Wavelet suave. É possível visualizá-la na Figura 8.

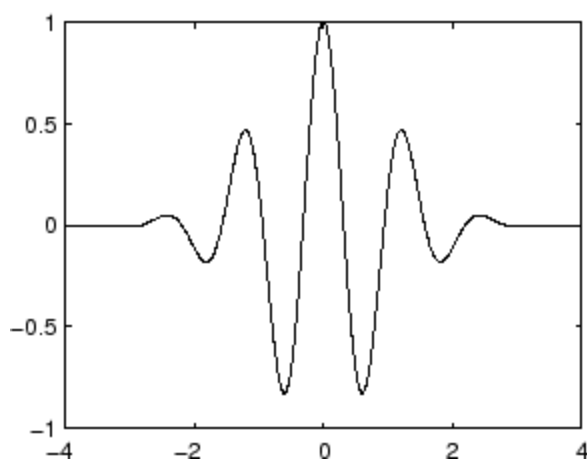


Figura 8 - Wavelet Meyer.

No trabalho de Daubechies (1992) podem ser encontradas maiores informações destas e outras famílias Wavelets que podem ser utilizadas como Wavelet mãe nos diversos problemas a serem solucionados por meio dessa importante ferramenta nas áreas de engenharia, física, medicina, também se mostrando muito eficaz no processamento de imagens.

### 2.3 - ANFIS (*Adaptive Network with Fuzzy Inference System*)

Representa um sistema que se destina a aproximar através de uma rede neural, um sistema de inferência Fuzzy (JANG, 1993), baseada no modelo de Takagi-Sugeno para lógicas Fuzzy, sendo considerado em diversos trabalhos propostos na literatura e aplicado eficientemente em vários problemas que envolvem classificações de padrões, reconhecimento de padrões, controles de processos, entre outros.

Considerando-se o modelo de primeira ordem de Takagi-Sugeno e tendo um sistema de duas entradas ( $x$  e  $y$ ) e uma saída ( $z$ ) pode-se definir um conjunto de regras para se estabelecer as relações das entradas com as saídas de modo a demonstrar suas interações. Sendo assim, definindo-se dois conjuntos de funções de pertinência ( $A_1$  e  $B_1$ , e  $A_2$  e  $B_2$ ) pode-se atribuir os graus de pertinência de cada variável de entrada através dos coeficientes  $p_1$  e  $q_1$  e  $p_2$  e  $q_2$ , como demonstrado abaixo e ilustrado na Figura 9.

Se  $x$  é  $A_1$  e  $y$  é  $B_1$ , então  $f_1 = p_1 * x + q_1 * y + r_1$ ; e

Se  $x$  é  $A_2$  e  $y$  é  $B_2$ , então  $f_2 = p_2 * x + q_2 * y + r_2$ ;

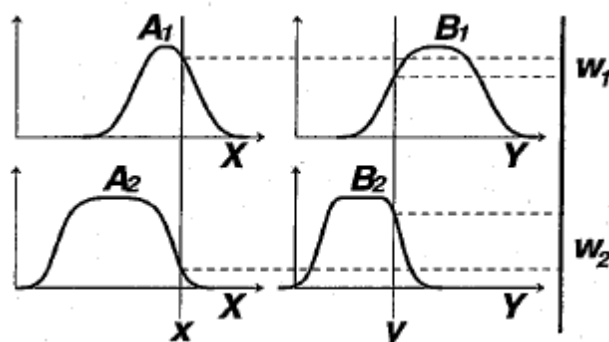


Figura 9 - Grau de Pertinência.

Tem-se então que  $f = \frac{w_1 * f_1 + w_2 * f_2}{w_1 + w_2}$  ou, simplificando,  $f = \bar{w}_1 * f_1 + \bar{w}_2 * f_2$

A arquitetura de uma ANFIS para as regras e variáveis definidas acima está representada na figura 10.

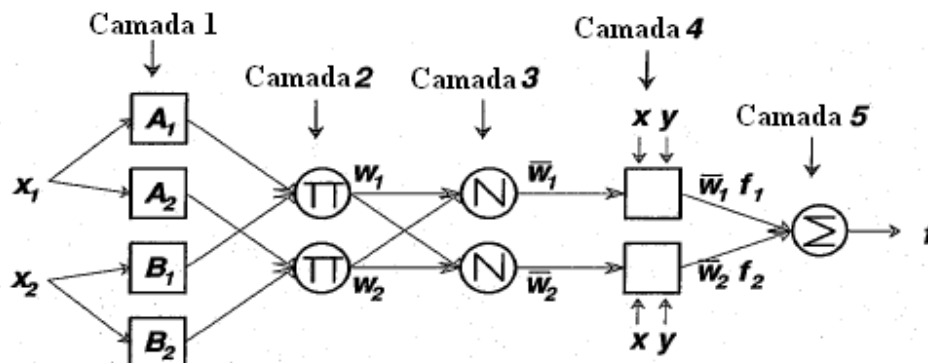


Figura 10 - Arquitetura ANFIS.

Analisando-se a topologia identifica-se a camada 1 que representa o conjunto das funções de pertinência às quais pertencem as entradas analisadas. Nessa camada calcula-se o grau de pertinência ( $\mu_{(A,B)}(x_i)$ ) das variáveis de entrada aos termos linguísticos associados em  $A_i$  (alto) e  $B_i$  (baixo).

Já na segunda camada da rede, tem-se o cálculo do nível de disparo da regra, ou seja, com que grau esta está sendo atendida, sendo que cada neurônio desta camada possui uma regra, e geralmente executam a operação T-norm.

Para o caso apresentado anteriormente tem-se um exemplo da operação efetuada nessa camada:

$$w_1 = \mu_{A1}(x_1) * \mu_{B1}(x_2) \quad (4)$$

$$w_2 = \mu_{A2}(x_1) * \mu_{B2}(x_2) \quad (5)$$

Na terceira camada da ANFIS ocorre a normalização dos níveis de disparo calculados pela camada anterior, ou seja, nessa camada cada nó calcula a razão do nível de disparo da regra da camada anterior pela somatória de todos os níveis de disparo apresentados pela segunda camada.

$$\bar{w}_1 = \frac{w_1}{w_1 + w_2} \quad (6)$$

$$\bar{w}_2 = \frac{w_2}{w_1 + w_2} \quad (7)$$

Quando o sinal correspondente ao nível de disparo normalizado atinge a quarta camada é efetuado o produto entre este e o consequente da regra ( $f_i$ ) que simboliza o consequente singletons ou consequente de Sugeno de primeira ordem. Obtém-se assim as saídas  $\bar{w}_1 * f_1$  e  $\bar{w}_2 * f_2$  que serão utilizadas na última camada da rede no somatório para obtenção da saída precisa desta, onde, juntamente com os nós das camadas 3 e 4 é responsável pela defuzzificação do sinal. Portanto, a saída do ANFIS pode ser escrita como:

$$z = f = \bar{w}_1 * f_1 + \bar{w}_2 * f_2 \quad (8)$$

### 2.3.1 - Treinamento em duas fases

O treinamento de uma ANFIS é supervisionado e consiste em duas etapas a serem realizadas no intuito de ‘ensinar’ a rede os aspectos do problema a ser resolvido pela mesma. O primeiro passo a ser realizado consiste no passo *forward*, ou seja, um treinamento no sentido tradicional, da entrada para a saída, em que os valores da camada um da ANFIS são fixados enquanto os pesos da camada quatro são ajustados pelo método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO). Após essa etapa tem-se o passo *backward*, ou seja, treinamento de trás para frente, da saída para a entrada, em que os pesos da camada quatro são fixados enquanto os pesos da camada um são ajustados pelo algoritmo do Gradiente Descendente.



### Capítulo 3 - Metodologia

Este trabalho implementa um sistema inteligente capaz de efetuar o monitoramento remoto de um ponto de interesse em uma rede de distribuição de energia elétrica através de um pré-processamento dos dados com o uso da transformada Wavelet e uma ferramenta inteligente híbrida do tipo ANFIS.

Para isso é necessário definir o método utilizado para atingir o objetivo mencionado e avaliar a eficiência deste.

Amostragem: Para este trabalho foi utilizado um sistema de distribuição de energia elétrica de uma concessionária regional que possui uma parceria com o Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica (LSEE) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP), visando estudos e aprimoramentos dentro da área.

A Figura 11 mostra a localização geográfica dos dois alimentadores do sistema elétrico a ser estudado que partem da mesma subestação.

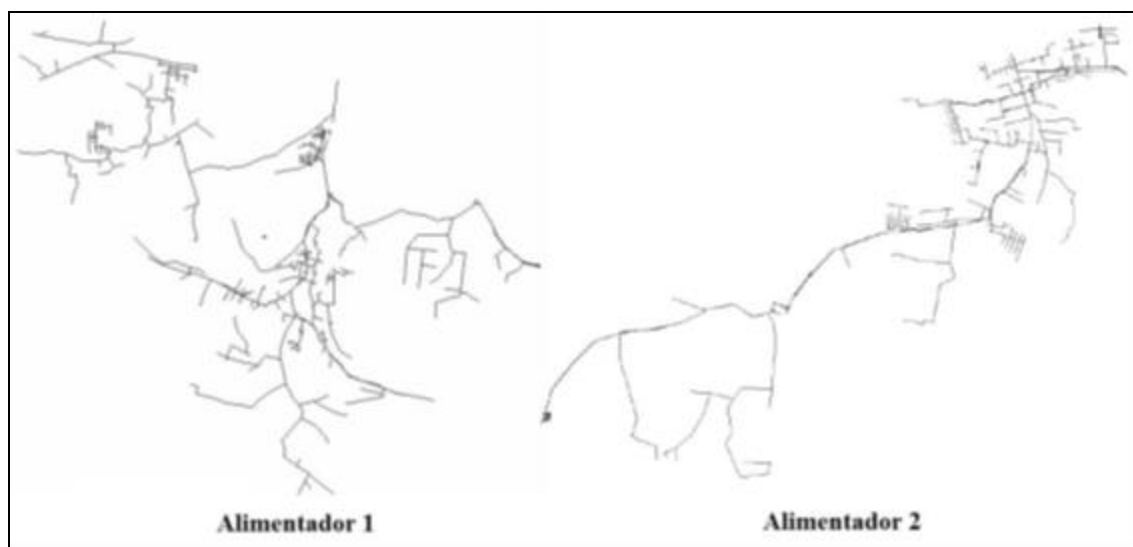


Figura 11 - Localização geográfica dos alimentadores da concessionária regional.

É importante ressaltar que o desenvolvimento da metodologia e os resultados obtidos na simulação do sistema de distribuição mencionado estão apresentados no trabalho de conclusão de curso de Bottura (2010).

Através do software ATP o sistema foi modelado e simulado (BOTTURA, 2010) utilizando-se as características do SEP e da subestação fornecidas pela concessionária. É possível observar a modelagem destes na tela do programa na Figura 12. A figura mostra os pontos em verde onde foram medidos os valores de tensão e em vermelho os pontos onde foram aplicadas as faltas.

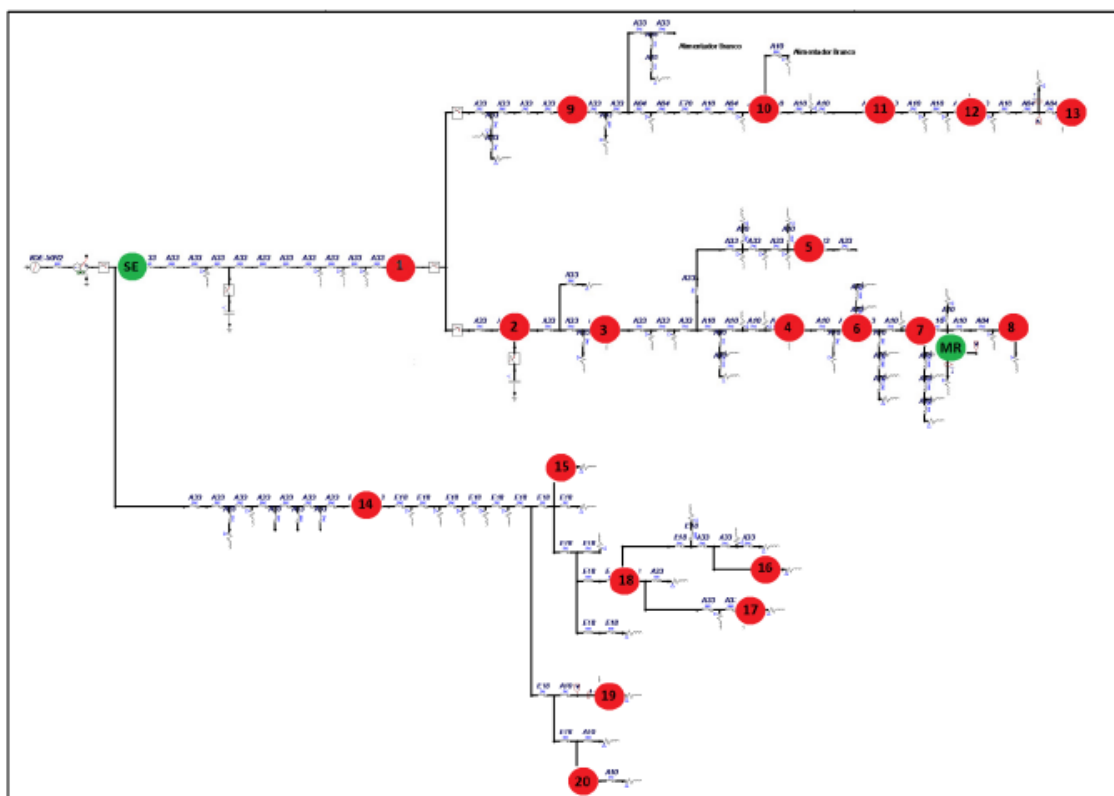


Figura 12 - Modelagem do SEP no ATP e pontos de aplicação de falta e monitoramento de tensão.

Em cada um dos 20 pontos vermelhos foram simuladas 10 faltas, sendo elas com ângulo de inserção de  $0^\circ$  ou  $90^\circ$  e ainda para cada uma dessa configuração variou-se a impedância nos valores de 0, 10, 20, 30,  $40\Omega$ , totalizando assim 200 casos a serem analisados.

Os valores de entrada para o sistema serão as tensões trifásicas da subestação enquanto as saídas serão as tensões trifásicas no ponto de interesse (em verde).

Instrumento: utilizou-se para ferramenta de pré-processamento a transformada Wavelet auxiliado pelo toolbox correspondente do software Matlab©. Como ferramenta inteligente utilizou-se a ANFIS também pelo do toolbox correspondente do Matlab©.

### 3.1 – Procedimentos

Os dados recebidos foram organizados em uma matriz mestra de forma que estivessem distribuídos aleatoriamente de modo que ao dividi-los em subconjuntos possa se ter casos de cada uma das situações especificadas.

Desse total de dados selecionou-se 70% do total para constituir o conjunto de treinamento e o restante para que pudesse ser feita a validação do método desenvolvido. Dentro do conjunto de treinamento houve ainda a divisão entre os valores que seriam utilizados no treinamento propriamente dito (80%) da rede inteligente e o que seria para teste de *overfitting* da mesma (20%).

Devido à restrição da ANFIS de se ter somente uma saída de dados, será necessário utilizar uma rede para cada fase da tensão do ponto de monitoramento remoto.

Posteriormente, houve a familiarização com a transformada Wavelet e o correspondente toolbox do software Matlab, sendo definida a utilização da Wavelet mãe “*Daubechies 4*” ou “*db4*” até o primeiro nível de decomposição.

O uso da transformada Wavelet no pré-processamento do sinal de entrada implica na utilização do dobro de redes inteligentes, pois, agora tem-se o conjunto de sinais correspondentes às aproximações das fases A, B e C e também os seus detalhes. Desse modo, utilizar-se-á seis redes inteligentes a serem treinadas para solução do problema.

Para arquitetura do ANFIS foi utilizada a sugestão do orientador em definir três funções de pertinência para cada entrada, tanto para análise do sinal de detalhes como para o sinal de aproximação. A função de pertinência escolhida para ambos os casos foi a Gaussiana. As Figuras 13 e 14 ilustram o ANFIS utilizado após treinamento.

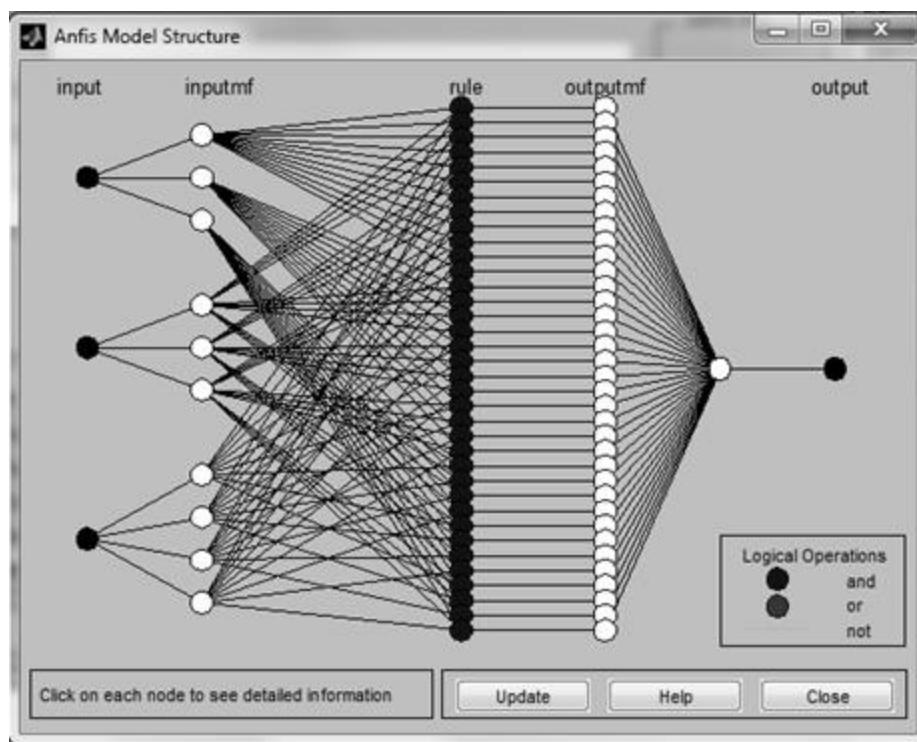


Figura 13 - ANFIS para sinais de aproximação.

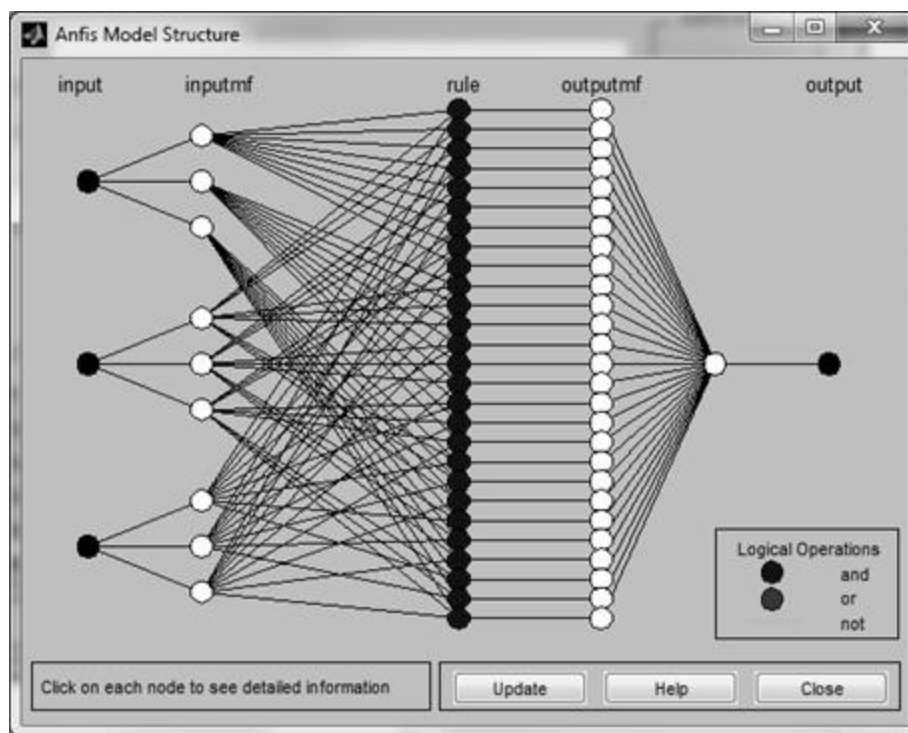


Figura 14 - ANFIS para sinais de detalhes.

Após o treinamento dos seis ANFIS foi montado um sistema no Simulink do Matlab como mostrado na Figura 15. O conjunto de validação, correspondendo às tensões trifásicas medidas na subestação, separado em subconjunto de aproximação(wa) e de detalhes (wd), já pré-processado através da DWT, é então alimentado às seis redes ANFIS e cada saída respectiva, representando uma fase da tensão no ponto remoto, separada ainda em aproximação e detalhe, e serve como entrada para a etapa de pós-processamento.

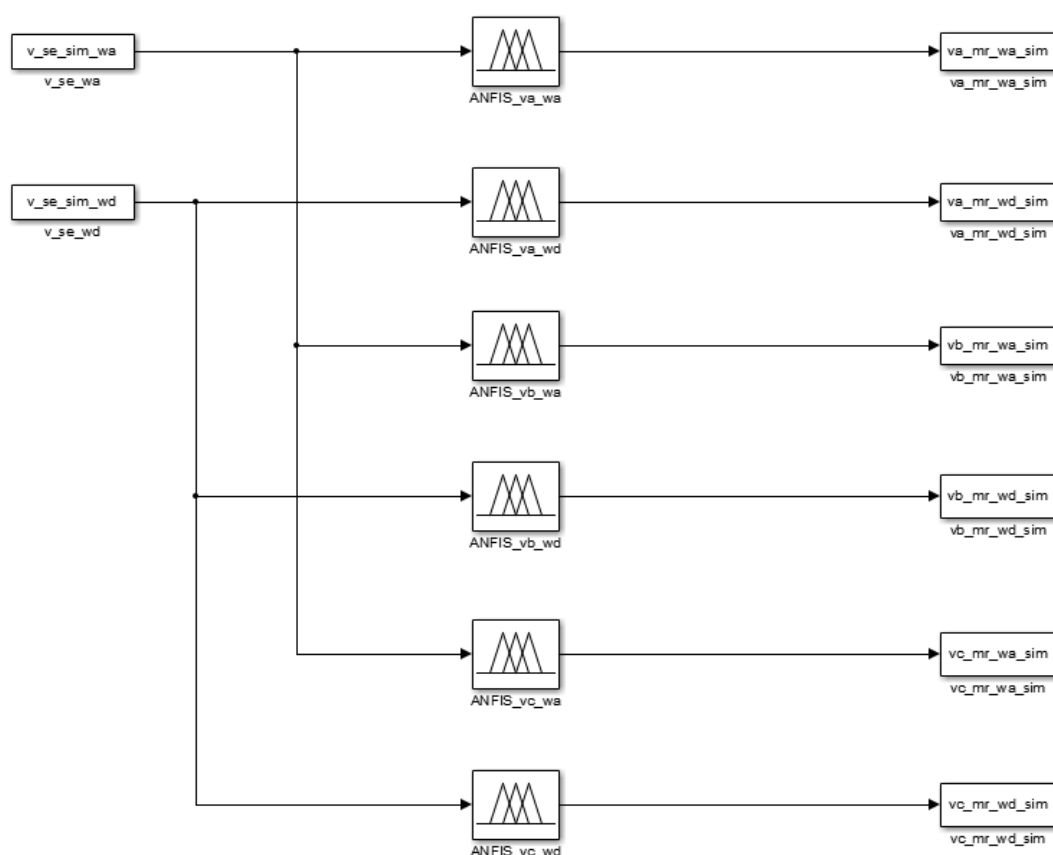


Figura 15 - Esquemático da Simulação em Simulink.

Na etapa de pós-processamento, tem-se o uso da transformada discreta inversa Wavelet para cada dupla de valores de saída que representam cada uma das fase do ponto de monitoramento.

Esses valores são confrontados com os valores desejados para o ponto de interesse, os quais são oriundos da real medição in loco. Efetua-se o cálculo de medidas estatísticas para avaliação do desempenho, sendo elas erro médio absoluto, desvio padrão e também diagnóstico por meio da porcentagem de erro abaixo de valores estipulados.

A Figura 16 contém o diagrama completo do sistema concebido para este trabalho.

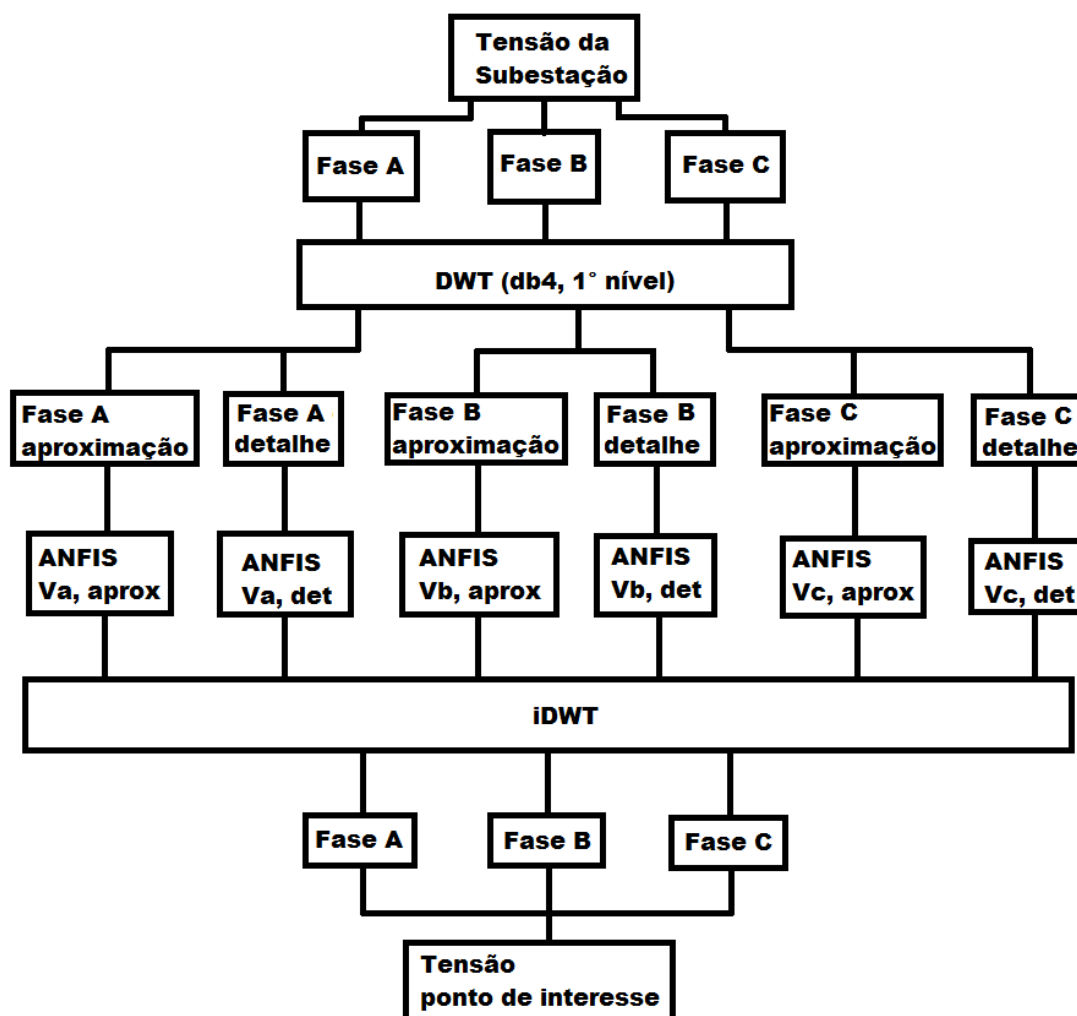


Figura 16 - Diagrama completo do sistema inteligente de monitoramento remoto.

## Capítulo 4 - Resultados

Os dados obtidos do Simulink foram processados, a partir destes foram gerados gráficos nos quais se sobrepõem os valores de tensão obtidos pela simulação (ANFIS) e os valores desejados (medidos) para cada uma das fases analisadas (A, B, C), do ponto de monitoramento remoto. Essa abordagem permite verificar em uma visão ampla o desempenho geral do sistema inteligente implementado. Esses gráficos são exibidos nas Figuras 17, 18 e 19. O traçado azul representa o valor de tensão desejado para o ponto de interesse, já o vermelho indica o valor de tensão obtido pela simulação da ferramenta inteligente.

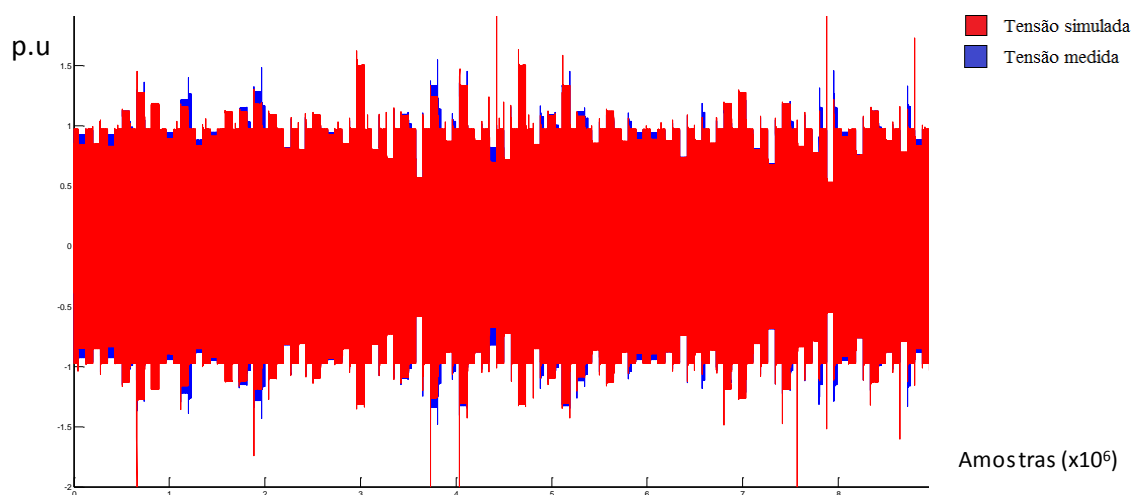


Figura 17 -Fase A - tensão desejada e tensão simulada sobrepostas

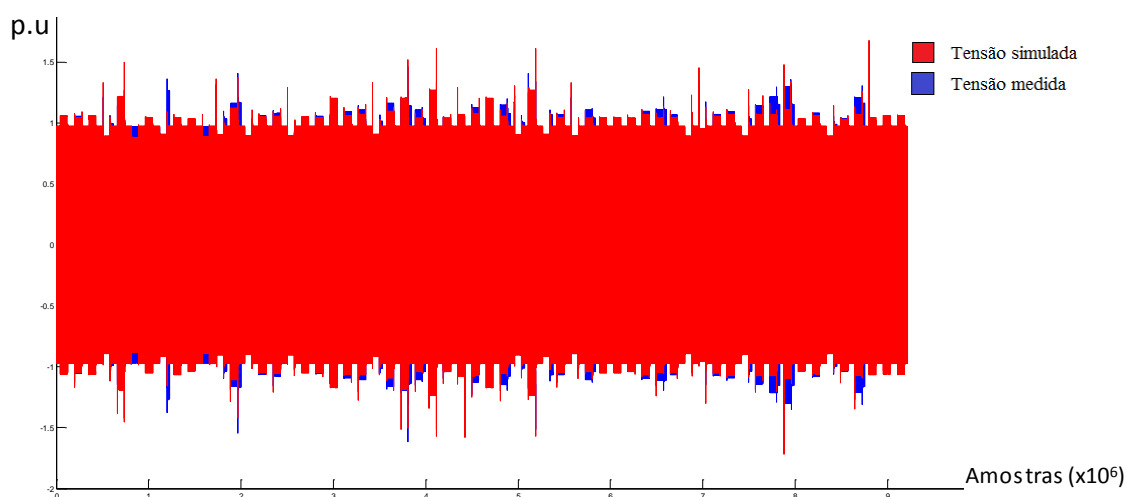


Figura 18 – Fase B - tensão desejada e tensão simulada sobrepostas

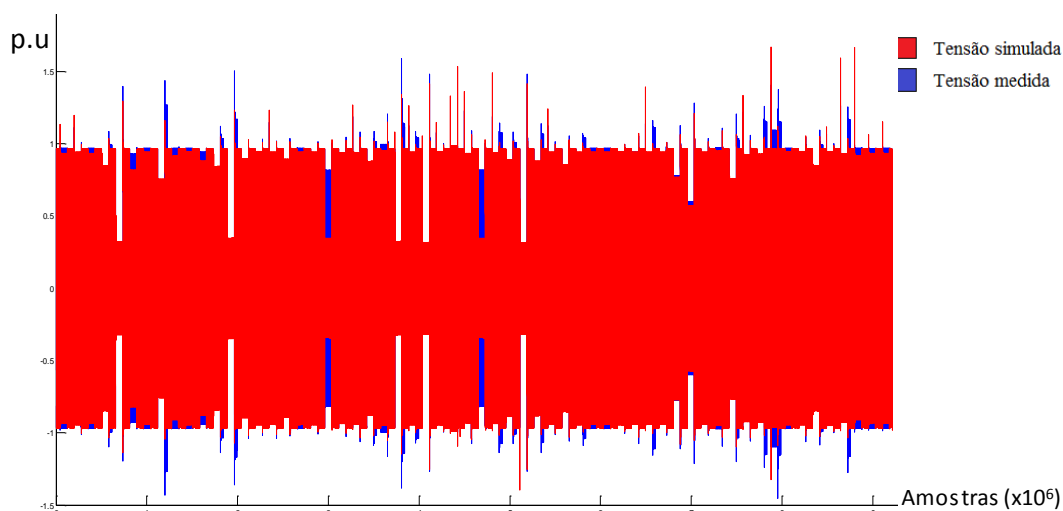


Figura 19 - Fase C- tensão desejada e tensão simulada sobrepostas

É possível perceber algumas discrepâncias de valores quando observam-se os pontos da cor azul não encobertos pelos pontos vermelhos ou ainda, quando o traçado vermelho ultrapassa os valores do traçado azul. Porém, pode-se afirmar que há excelente semelhança entre os valores de tensão simulados pelo sistema proposto e os desejados como resposta, uma vez que, como será apontado a seguir, na maioria dos casos ambos os sinais de tensão apresentam o mesmo comportamento.

Análises mais detalhadas foram realizadas e serão apresentadas nas Figuras 20, 21 e 22, referentes à fase A do ponto de monitoramento remoto, e permitindo ser estendidas às demais fases simuladas. A linha destacada nas figuras indica o instante de ocorrência da falta no SEP.

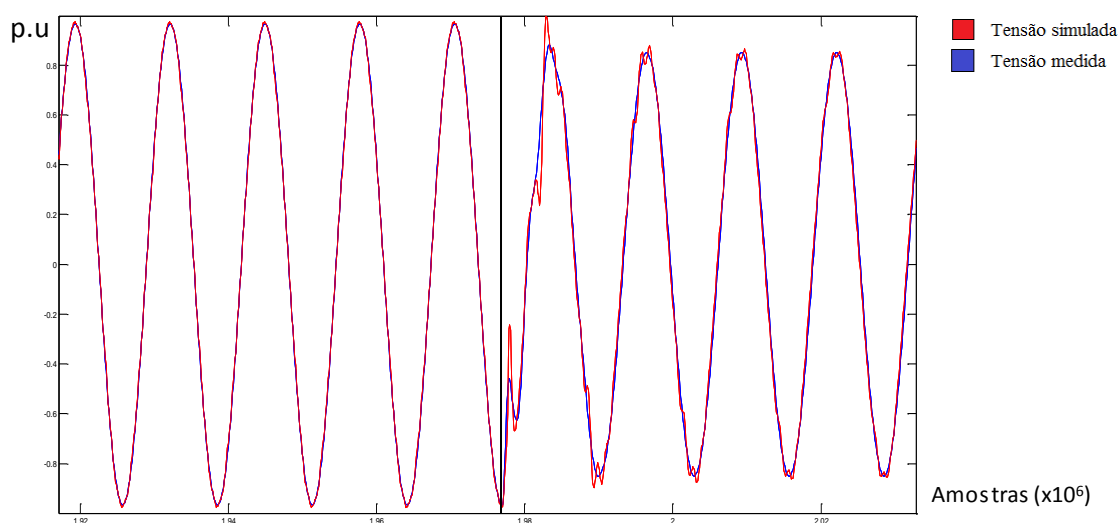


Figura 20 - Detalhe das tensões sobrepostas para a Fase A

Na Figura 20 pode-se observar a importância de utilizar a transformada Wavelet, pois o sistema mostra uma grande precisão em indicar o instante em que ocorre o distúrbio na rede elétrica. Esse fato caracteriza a rede inteligente como um ótimo meio de detecção de distúrbios de um sistema de energia. Além disso é possível notar a significativa congruência dos sinais medido e simulado.

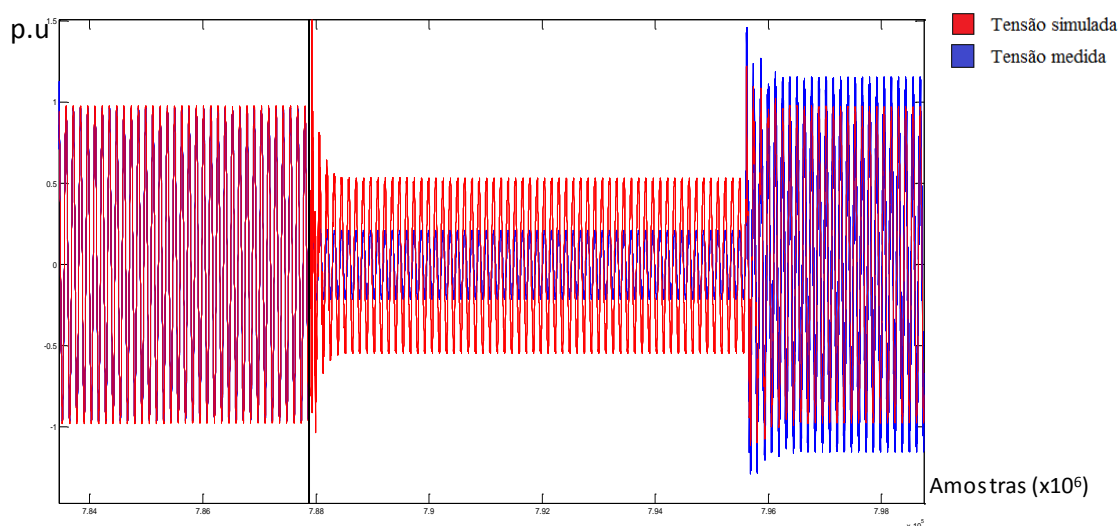


Figura 21 - Análise de um caso específico - Fase A

Já na Figura 21 tem-se um caso em que a ferramenta apresentou uma resposta com um erro significativo, porém, mesmo assim o comportamento do sinal de tensão simulado é semelhante em forma ao desejado, sendo importante ressaltar que o instante de início do distúrbio é detectado, isso é observável na Figura 22.

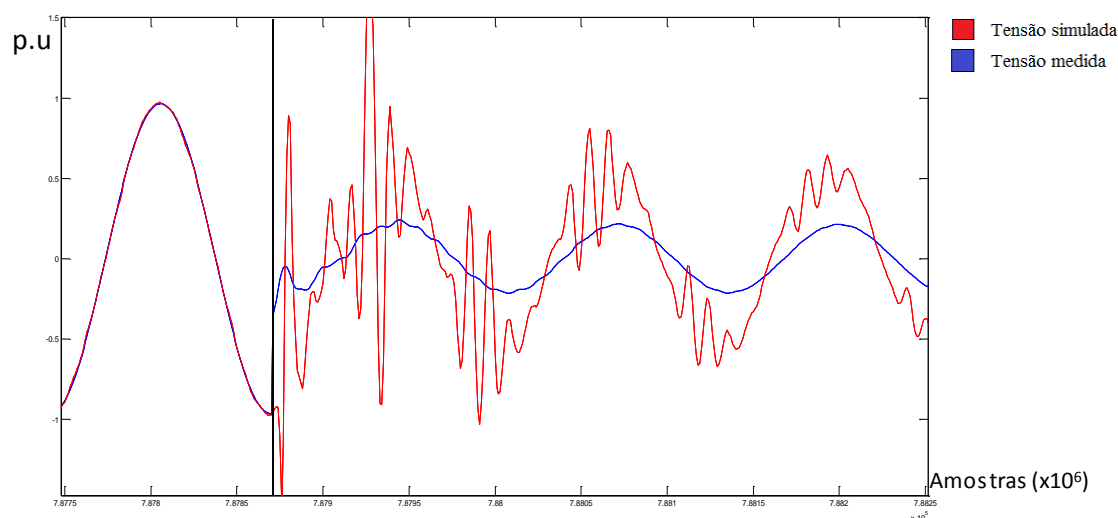


Figura 22 - Detalhe das tensões sobrepostas da fase A

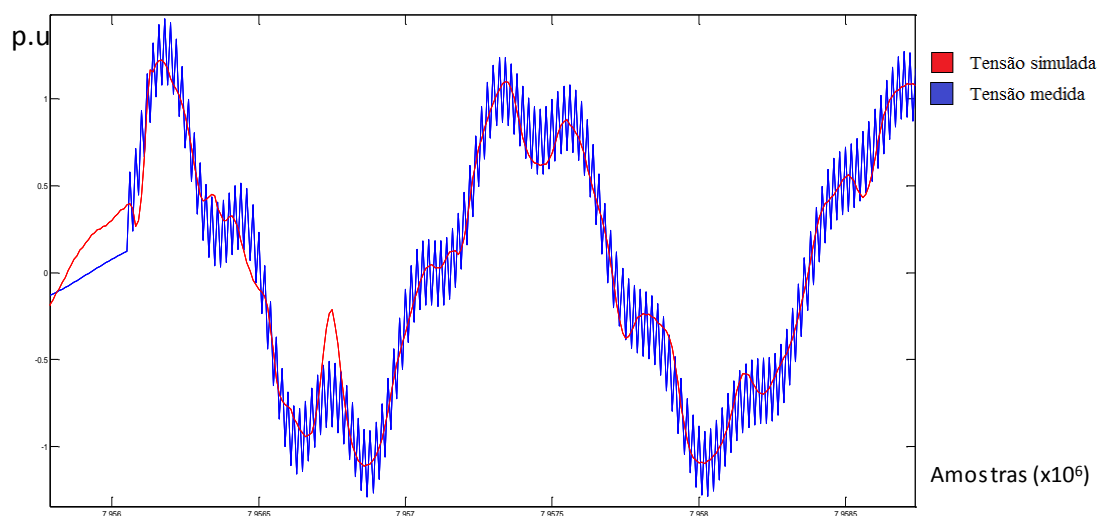


Figura 23 - Ruído na tensão desejada

No caso da Figura 23 os valores desejados são ruidosos, o que contribui para o aumento no número de erros obtidos pelo sistema inteligente, porém pode-se observar uma boa precisão da ferramenta utilizada para obter uma média do sinal e mesmo assim representar com grande fidelidade seu comportamento.

Nas Figuras 24, 25 e 26 são mostrados os gráficos do módulo dos erros pontuais obtidos para cada fase analisada do ponto de interesse do sistema de distribuição de energia elétrica.

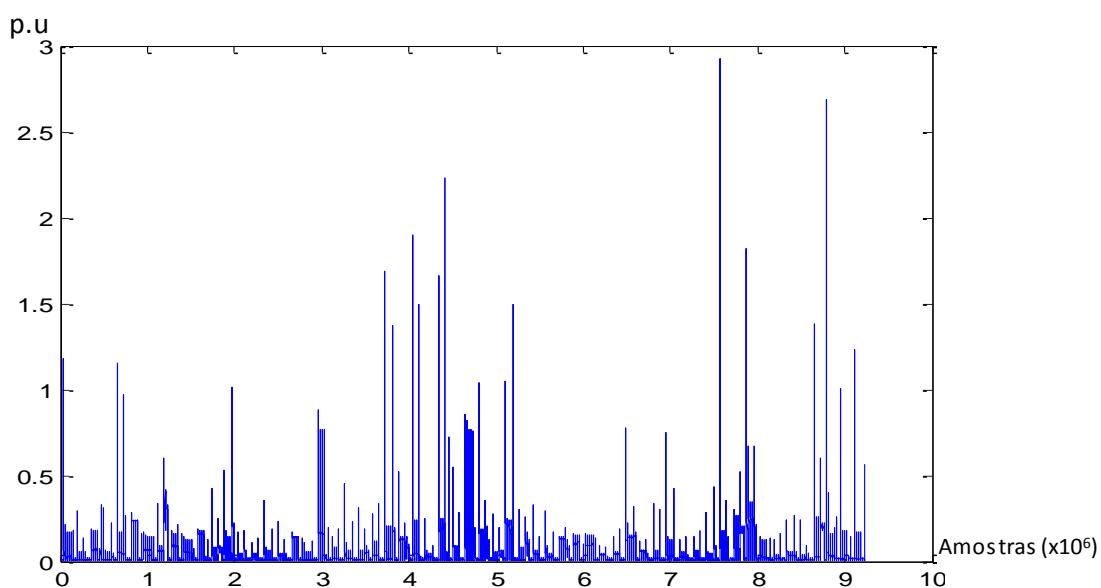


Figura 24 - Módulo do erro obtido na simulação da fase A

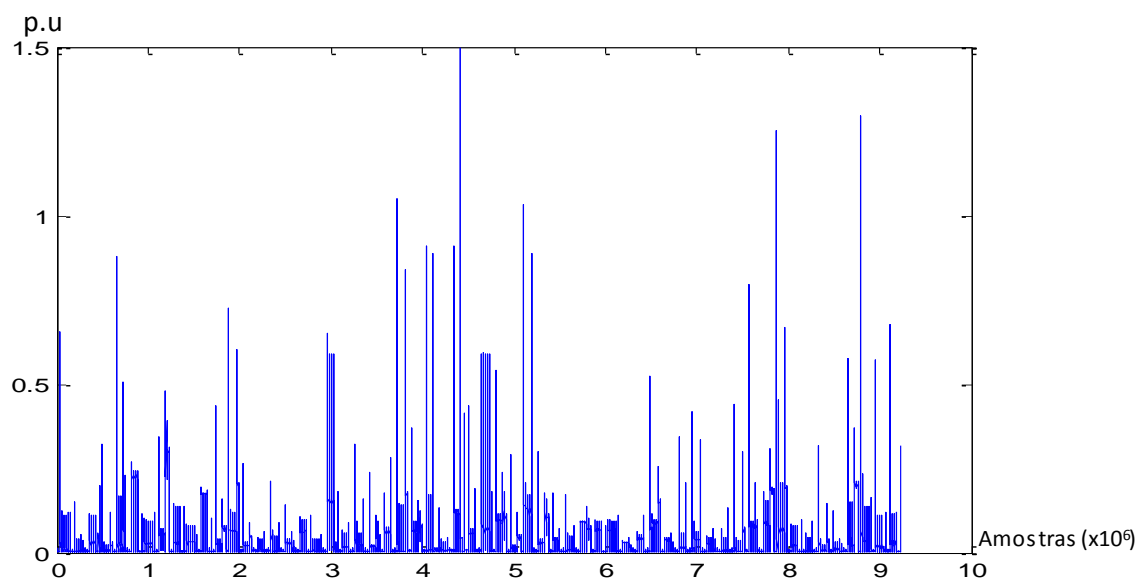


Figura 25 - Módulo do erro obtido na simulação da fase B

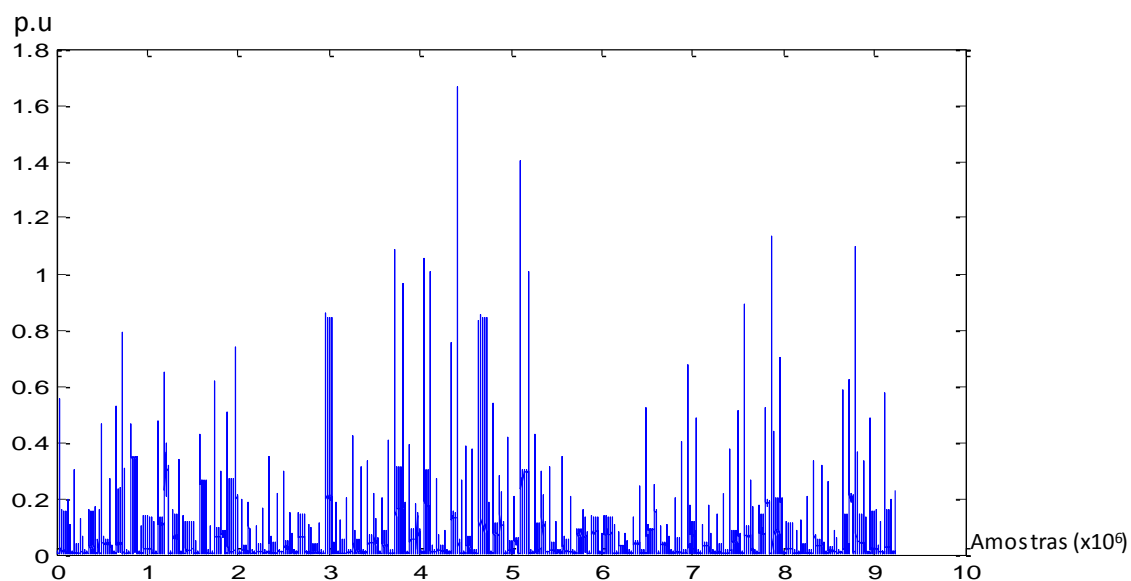


Figura 26 - Módulo do erro obtido na simulação da fase C

A análise dos gráficos relativos aos erros absolutos obtidos pelo sistema inteligente simulado permite observar que a rede possui, em pontos específicos, erros muito altos, o que levaria a uma conclusão errônea de que a rede está muito fora da resposta esperada. Ao contrário do que foi apresentado, a rede possui um bom índice de acerto em relação aos valores de tensão desejados e responde bem ao comportamento do sinal de entrada. Isso pode ser notado na análise estatística que será feita acerca do sistema proposto.

Os dados relativos às medidas estatísticas foram compilados na Tabela 1 para que possa ser feita uma comparação entre as fases, e para que o método empregado possa ser validado.

Na Figura 27 apresenta-se o gráfico de barras comparativamente dos valores dos erros obtidos para cada fase simulada, dividindo-os em categorias de intensidade.

Tabela 1 - Medidas estatísticas dos resultados da simulação

Medida \ Fase	Desvio Padrão	Erro Médio Absoluto
A	0,0839	0,0452
B	0,0723	0,0354
C	0,0934	0,0431

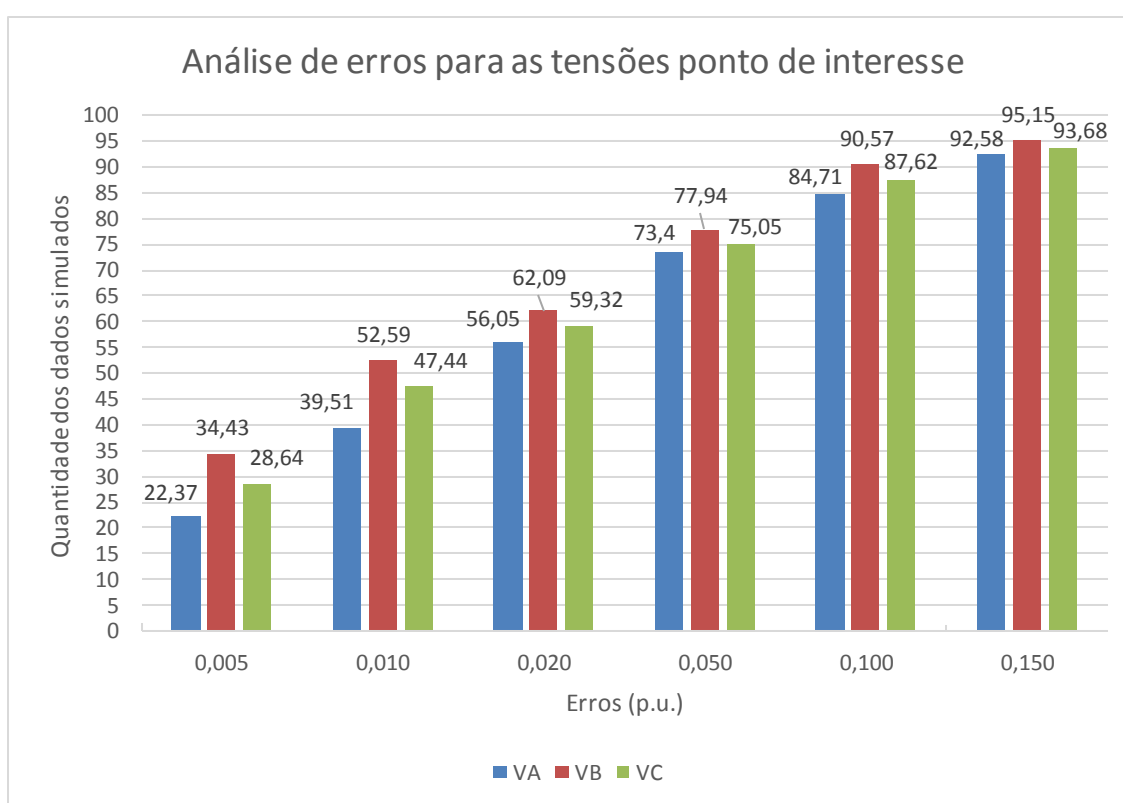


Figura 27 - Análise dos erros de simulação

A Figura 27 mostra a quantidade, em porcentagem, dos valores simulados que possuem erro menor do que o especificado, 0,5% a 15% ou por unidade.

Analisando os dados registrados na Tabela 1 e na Figura 27, identifica-se que a rede possui valores que podem ser considerados baixos quanto ao desvio padrão e erro médio absoluto. Nota-se nesse caso a propagação do erro obtido da simulação das componentes de aproximação e detalhe da transformada Wavelet nos valores finais do sinal de tensão de saída. Na questão da quantificação e qualificação dos erros pode-se dizer que a rede possui grande eficiência no papel para o qual foi projetada, pois tem-se mais de 70% dos valores simulados com erro abaixo de 5%, além da detecção, na maioria dos casos, do instante de início do distúrbio.



## Capítulo 5 - Conclusões

Este trabalho possibilitou a utilização de uma ferramenta inteligente desenvolvida a partir do método de pré-processamento transformada Wavelet combinada com um sistema inteligente híbrido, ANFIS, para que, por meio do fornecimento dos sinais de tensão, se monitorasse remotamente os valores dos sinais de tensão das três fases em um determinado ponto de interesse em um sistema de distribuição de energia elétrica.

A escolha do uso da transformada Wavelet foi importante, pois trouxe ao método precisão no domínio do tempo, o que, de acordo com os trabalhos apresentados não foi possível ou não totalmente preciso, utilizando outras ferramentas de pré-processamento. Desse modo é possível concluir que usar a transformada Wavelet para detectar distúrbios da rede elétrica é imprescindível quando procura-se respostas instantâneas. Isso valida o método de pré-processamento implementado para aplicações semelhantes à apresentada nesse trabalho.

Em contrapartida, o uso desta ferramenta fez-se necessário dobrar o número de sistemas a serem treinados e implementados, o que contribui para um aumento no gasto computacional quando da implantação do método, o que pode gerar custos que inviabilizem o projeto.

O desempenho do ANFIS foi satisfatório, pois conseguiu atingir um nível bem satisfatório de similaridade (>70%) com o sinal desejado para erros inferiores a 0,05p.u., representando em diversos casos valores bem próximos dos reais ou até muito próximo do valor real esperado.

Finalmente, pode-se validar o método proposto como um sistema de detecção de distúrbios da rede elétrica excelente, devido ao uso da transformada Wavelet, e de monitoramento remoto satisfatório, utilizando-se o ANFIS, sendo que a eliminação de ruídos no sinal de entrada pode melhorar esses resultados.

Vale ressaltar que para uma aplicação de qualidade de energia elétrica, utilizando a ferramenta proposta no trabalho como monitor de QEE, é necessário que as melhorias propostas sejam verificadas, pois os erros apresentados podem induzir a uma conclusão equivocada de que o nível de fornecimento encontra-se fora do especificado, ou em casos extremos, a identificação de uma interrupção do fornecimento de energia elétrica como sendo apenas um afundamento de tensão. Desse modo identifica-se o potencial da implantação prática deste sistema.

Como melhorias para esse trabalho propõe-se a utilização de outras famílias de Wavelet-mãe para extrair outras características importantes que melhorem o desempenho da ANFIS na simulação das componentes de aproximação e detalhe. Pode-se investigar outras funções de pertinência para o estágio Fuzzy do ANFIS visando minimizar a propagação dos

erros obtidos com a simulação das componentes da transformada Wavelet para a resposta final do sistema.

## Referências Bibliográficas



AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, (2009) Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. [S.l.: s.n.], 2009.

BOLLEN, M.H.J. (1995) The Influence of Motor Reacceleration on Voltage Sags. IEEE Transactions on Industry Applications, v.31, 4, p. 667-674, julho/agosto, 1995.

BOLLEN, M.H.J; GU, I.Y.H. (2006) Signal Processing of Power Quality Disturbances. Hoboken, John Wiley & Sons, Inc, 2006, 861p.

BOLLEN, M.H.J; VERDE, P. A (2008) Framework for Regulation of RMS Voltage and Short-Duration Under and Overvoltages. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 23, 4, p. 2105-2112, outubro, 2008.

BOTTURA, F. B. (2010), “Um método alternativo e inteligente para o monitoramento remoto das variações de tensão de curta duração em um sistema de distribuição de energia elétrica”, Trabalho de conclusão de curso, Universidade de São Paulo – USP, Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, Departamento de Engenharia Elétrica, São Carlos, 2010

BRAVO, J. C., BORRÁS, D., CASTILLA, M., MONTAÑO, J. C., LÓPEZ, A., & GUTIÉRREZ, J. (2005). Joint Wavelet–Fourier analysis of power system disturbances. Proc. of the 9CHLIE05, Marbella, Spain.

CARPINELLI, G.; PERNA, D. C.; CARAMIA, P.; VARILONE, P.; VERDE, P. (2009) Methods for Assessing the Robustness of Electrical Power Systems Against Voltage Dips. IEEE Transactions on Power Delivery, v.24, 1, p. 43-51, janeiro, 2009.

COSTA, F. B., SOUZA, B. A., e BRITO, N. S. D. (2009) "A Wavelet-based Method for detection and classification of single and cross-country fault in Transmission lines," International Conference on Power Systems Transients, Kyoto, Japan, jun 2009.

DAUBECHIES, I. (1992) Ten lectures on wavelets. SIAM, Philadelphia, PA

DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H. W. (2003) Electrical Power Systems Quality. 2.ed. Nova Iorque, McGraw-Hill, 2003, 568p.

ELDIN, EL SAYED MOHAMED TAG (2010), "Fault Location for a Series Compensated Transmission Line Based on Wavelet Transform and an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, " International Review of Electrical Engineering (IREE), Vol.5, n.3: 1165-1171, MAY-JUN 2010.

ETEMADI, A. H. et al. (2008), High-impedance fault detection using multi-resolution signal decomposition and adaptive neural fuzzy inference system, IET Gener. Transm. Distrib., 2008, 2, (1), pp. 110–118

GHADIMI, N et al. (2013), Adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) islanding detection based on wind turbine simulator, International Journal of Physical Sciences, Vol. 8(27), pp. 1424-1436, 23 July, 2013

GOSWAMI, A. K.; GUPTA, C. P.; SINGH, G. K. (2008) Area of Vulnerability for Prediction of Voltage Sags by an analytical Method in Indian Distribution Systems. In: ANNUAL IEEE INDIA CONFERENCE, 2008, Kanpur, vol.2, p. 406 – 411.

GRAPS, A. (1995). An introduction to Wavelets. Computational Science & Engineering, IEEE, 2(2), 50-61.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS – IEEE (1995), Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality: IEEE Std. 1159-1995. [S.l.: s.n.], 1995.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – IEC (2001), Voltage Dips, Short Interruptions and Voltage Variations Immunity Tests: IEC Std. 61000-4-11. [S.l.: s.n.], 2001.

- JANG, J. S. (1993). ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 23(3), 665-685.
- KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. B. D.; ROBBA, E. J. (2005) *Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. 1ed. São Paulo, Edgard Blücher, 2005.
- KEMPNER, T. R. (2012), *A robustez de um sistema de distribuição e a alocação de medidores de qualidade de energia elétrica frente aos afundamentos de tensão*. Tese de mestrado. São Carlos: USP/EESC. 2012.
- KYEI, J.; AVYANAR, R.; HEYDT, G.; THALLAN, R.; BLEVINS, J. (2002); *The Design of Power Acceptability Curves*. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.17, 3, p. 828-833, julho, 2002.
- LEÃO, R. (2009), *GTD – Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica*, Universidade Federal do Ceara, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, 2009
- LEE, G.; M. ALBU, M.; T. HEYDT (2004), *Gerald. A Power Quality Index Based on Equipment Sensitivity, Cost, and Network Vulnerability*. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.19, 3, p. 1504-1510, julho, 2004.
- MALLAT SG (1998) *A Wavelet tour of signal Processing*. Academic, San Diego, CA
- MEYER Y (1993) *Wavelets, algorithms and applications*. SIAM, Philadelphia, PA
- MISITI, M. et al, (1997): *MATLAB, Wavelet Toolbox*. – The Math Works, Inc., Natick, MA.
- MORLET, J. et al (1984), *Decomposition of Hardy Functions into Square Integrable Wavelets of Constant Shape* *SIAM Journal on Mathematical Analysis* 1984 15:4, 723-736
- OLESKOVICZ, M. (2007). *Apostila do Curso de Qualidade da Energia Elétrica*. EESC – USP, São Carlos – SP, 2007.
- OTHMAN, M. F. et al. (2004), *Transmission lines fault detection, classification and location using an intelligent Power System Stabiliser*, 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies (DRPT2004) April 2004 Hong Kong
- PANSINI, A. J. (2005), *Guide to Electrical Power Distribution Systems*, 6th Ed, The Fairmont Press, 2005

RAMESH, A. (2010), Electrical Engineering (Electrical Machines and Appliances) Theory – I, Vocational Education Higher Secondary – First Year, Tamilnadu Textbook Corporation, Government of Tamilnadu, First Edition, 2010.

RASLI, HUSSAIN AND FAUZI (2012). Fault Diagnosis in Power Distribution Network Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), Fuzzy Inference System - Theory and Applications, Dr. Mohammad Fazle Azeem (Ed.), ISBN: 978-953-51-0525-1, InTech Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/fuzzy-inferencesystem-theory-and-applications/fault-diagnosis-in-power-distribution-network-using-adaptive-neuro-fuzzyinference-system-anfis>>

SILVA, K. M.; SOUZA, B.A.; BRITO, N. S. D. (2006), Fault Detection and Classification in Transmission Lines Based on Wavelet Transform and ANN. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 21, 4, p. 2058-2063, outubro, 2006.

TIWARI, A.K., SHUKLA, K.K., (2002). Wavelet Transform based fuzzy inference system for power Quality classification. LNCS, 2257:148–155.

WANG, J.; CHEN, S.; LIE, T. T. (2005), System Voltage Sag Performance Estimation. IEEE Transactions on Power Delivery, v.20, 2, p. 1738-1747, abril, 2005.

WON, D.; AHN, S.; MOON, S. (2005), Modified Sag Characterization Using Voltage Tolerance Curve for Power Quality Diagnosis. IEEE Transactions on Power Delivery, v.20, 4, p. 2638-2643, outubro, 2005.

YILMAZLAR, I., & KOKTURK, G. (2010). Failure Analysis in Power System by the Discrete Wavelet Transform. WSEAS Transactions on Power Systems, 5, 243-252.