

PAULO ROBERTO LIUTHEVICIENE CORDEIRO

**ALGORITMO PARA DETECÇÃO,
LOCALIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO
DE DISTÚRBIOS RELACIONADOS A
QUALIDADE DE ENERGIA
UTILIZANDO A TRANSFORMADA
WAVELET**

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: DENIS VINICIUS COURY

São Carlos
2007

A minha família, em especial a minha mãe Fátima que sempre batalhou muito para eu atingir meus objetivos, e meu irmão Marco, que foi com quem eu compartilhei todos os momentos da minha vida durante a graduação. E a minha namorada Diana por ter proporcionado todo amor e carinho alicerçando e motivando as minhas conquistas

AGRADECIMENTOS

- A minha família, por ter me apoiado em todos os momentos da minha vida.
- Aos professores Denis V. Coury e Mário Oleskovicz por terem acreditado no meu trabalho e estarem sempre dispostos a me auxiliar em todas as vezes que eu necessitei.
- A todos os companheiros do LSEE, que me apoiaram no desenvolvimento deste trabalho, em especial o Leandro R. da Silva Pires, Odilon Delmont Filho e Silvio A. de Souza.
- A todos os funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, e em especial a Jussara Ramos Zoia e José Carlos de Oliveira, por todo o apoio durante a minha graduação.
- A EESC – Escola de Engenharia de São Carlos, e em especial o LSEE - Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica , por fornecer toda a infra-estrutura para o desenvolvimento deste trabalho e para o meu aperfeiçoamento pessoal.
- A primeira turma do curso de Engenharia Elétrica com Enf. em Sist. de Energia e Automação, pelo companheirismo e aprendizado.
- E a CNPq pelo financiamento no desenvolvimento deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS.....	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2 A QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA.....	3
2.1. Fenômenos Transitórios.....	3
2.1.1. Transitório Impulsivo	3
2.1.2. Transitório Oscilatório.....	4
2.2. Variações de Tensão de Curta Duração	4
2.2.1 Interrupção de Curta Duração	4
2.2.2. Afundamento de tensão de Curta Duração.....	5
2.2.3. Elevação de tensão de Curta Duração.....	6
2.3. Variações de Tensão de Longa Duração	7
2.3.1. Interrupção Sustentada.....	7
2.3.2. Subtensão	8
2.3.3. Sobretensão.....	9
2.4. Desequilíbrio de Tensão.....	9
2.5. Distorção na Forma de Onda.....	10
2.5.1. Nível CC.....	10
2.5.2. Harmônico	10
2.5.3. Interharmônico.....	10
2.5.4. Notching.....	11
2.5.5. Ruídos	11
2.6. Flutuação de Tensão	11
2.7. Variações na Freqüência do Sistema.....	12
3. A TRANSFORMADA WAVELET	13

3.1. <i>Conceitos Básicos de Wavelet</i>	14
3.2. <i>A Transformada Discreta Wavelet (TDW)</i>	15
4. ALGUNS APONTAMENTOS SOBRE A LÓGICA IMPLEMENTADA	17
4.1. <i>ANÁLISE POR MULTIRESOLUÇÃO</i>	17
4.2. <i>A DETECÇÃO DOS DISTÚRBIOS</i>	18
4.3. <i>CLASSIFICAÇÃO DE DISTÚRBIOS</i>	19
5. O ALGORITMO IMPLEMENTADO PARA DETECÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE DISTÚRBIOS RELACIONADOS A QEE	21
5.1. <i>MÓDULO PRINCIPAL</i>	21
5.1.1. <i>SUB-ROTINA DE DETECÇÃO</i>	22
5.1.2. <i>SUB-ROTINA DE DECOMPOSIÇÃO</i>	23
5.1.3. <i>MÓDULO DE LOCALIZAÇÃO NO TEMPO</i>	24
5.1.4. <i>AMPLITUDE DO DISTÚRPIO</i>	25
5.2. <i>DADOS DE SAÍDA DO ALGORITMO</i>	25
6. CONCLUSÃO	29
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30

LISTA DE FIGURAS

<i>FIGURA 1 – Interrupção Momentânea Devido a um Curto-Circuito.....</i>	<i>8</i>
<i>FIGURA 2 – Afundamento de Tensão Causado por uma Falta Fase-Terra</i>	<i>9</i>
<i>FIGURA 3 – Elevação de Tensão Ocasionada por uma Falta Fase-Terra.....</i>	<i>9</i>
<i>FIGURA 4 – Deconposição do Sinal por AMR.....</i>	<i>21</i>
<i>FIGURA 5 – Janelamento do Sinal de Entrada.</i>	<i>26</i>

LISTA DE TABELAS

<i>TABELA 1 – Resultados Oriundos da Análise Automática Quando da Aplicação do Algoritmo Implementado.</i>	<i>29</i>
<i>TABELA 2 – Valores Máximos e Mínimos do Distúrbio para os Casos de Oscilação Transitória.</i>	<i>31</i>
<i>Erro! Indicador não definido.</i>	

RESUMO

CORDEIRO, P. R. L. *Algoritmo para Detecção, Localização e Classificação de Distúrbios Relacionados a Qualidade de Energia Utilizando a Transformada Wavelet, 2007.*

Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

O algoritmo proposto utiliza a Transformada Wavelet para o monitoramento do sistema elétrico no que diz respeito à Qualidade da Energia, através da Análise de Multiresolução (AMR), empregando como wavelet mãe a Db4.

A técnica AMR divide o sinal distorcido em diferentes níveis de resolução, desta maneira o sinal a ser analisado pode ser decomposto em outros sinais, em diferentes níveis de frequência, fornecendo informações diretas no domínio do tempo e da frequência. Estes sinais decompostos indicam a existência e localização no tempo do distúrbio, uma vez que estes estão em níveis de frequência diferente do nível da frequência fundamental.

O módulo classificador do algoritmo foi implementado decompondo apenas 8 ciclos de pós-falta do sinal de entrada, possibilitando maior rapidez no processamento computacional. Através do sexto detalhe do sinal decomposto em AMR, é realizado o cálculo da diferença de energia do sinal de entrada com a energia do sinal em regime permanente, diferenciando assim o distúrbio em afundamento de tensão, elevação de tensão ou interrupção de energia, classificados de acordo com os limiares característicos para cada distúrbio.

Palavras-chaves: Qualidade da Energia, Transformada Wavelet, Análise por Multirresolução, Detecção de Falhas, Localização de Falhas e Classificação de Falhas

ABSTRACT

CORDEIRO, P. R. L. *Detection, Location and Classifying Algorithm of Power Quality Disturbances by Wavelet Transform, 2007.*
Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos,
Universidade de São Paulo

The proposed algorithm in this work uses the Wavelet Transform (WT) for analyze the electric system in Power Quality, through the Multi Resolution Analysis (AMR), using as mother wavelet the Db4 function.

The MRA technique decomposes the given wave in different resolution levels supplying information in the time and frequency domain, and these decomposed signs indicate the existence and location in the time of the disturbance.

The classifier module of the algorithm was implemented decomposing only 8 cycles of pos-fault of the input wave, allowing more speed in the computer processing. Through the sixth detail of the sign decomposed by MRA, it is accomplished the calculation of the difference between the energy of the entrance sign and the energy of the sign in stead state, differentiating the disturbance in sag, swell or interruption of energy, classified in agreement with the characteristic thresholds for each disturbance.

Keywords: Power Quality, Wavelet Transform, Multi Resolution Analysis, Detection of Disturbances, Location of Disturbances and Classifying of Disturbances

1. INTRODUÇÃO

Os problemas causados pela má qualidade no fornecimento da energia, alguns anos atrás, não eram tão expressivos, uma vez que os equipamentos existentes eram pouco sensíveis aos efeitos dos fenômenos ocorridos [1]. Entretanto, a Qualidade da Energia Elétrica está ganhando, a cada ano, maior atenção devido a crescente modernização do parque industrial brasileiro, com o aumento da utilização de microcomputadores e de outras cargas com características não lineares, sendo utilizadas nas mais diferentes atividades em nossa sociedade [2]. Com isso, os clientes que utilizam os serviços de energia elétrica passaram a exigir uma melhor Qualidade da Energia (QE) para essas novas cargas.

Atualmente, a QE é avaliada pelas concessionárias de energia e órgãos governamentais através de índices específicos como DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora). Porém, estes índices relacionam apenas o intervalo de tempo em que o sistema permanece desligado e a frequência de tais desligamentos. Sendo assim, estes não detectam certas alterações nas formas de onda e na frequência que são, na maioria das vezes, causadas por ruídos, distorções harmônicas, certas condições de falta e chaveamento de capacitores, que podem causar problemas operacionais em equipamentos.

Assim, prevê-se que será de fundamental importância, de agora em diante, um melhor rastreamento da qualidade da energia elétrica tanto em termos de controle de tensão, como do ponto de vista da eliminação de diversos distúrbios que afetam a QE.

Este trabalho, adaptado de ARRUDA [3], apresenta uma nova ferramenta para o monitoramento do sistema elétrico no que diz respeito à Qualidade da Energia, utilizando a Transformada Wavelet, através da Análise de Multiresolução (AMR), técnica que será detalhado no Capítulo 4, empregando como *wavelet* mãe a Db4. A técnica AMR divide o sinal distorcido em diferentes níveis de resolução, desta maneira o sinal a ser analisado pode ser decomposto em outros sinais, em diferentes níveis de frequência, fornecendo informações diretas no domínio do tempo e da frequência. Estes sinais decompostos indicam a existência e localização no tempo do distúrbio, uma vez que estes estão em níveis de frequência diferente do nível da frequência fundamental.

Neste trabalho será apresentado, no Capítulo 2, os diversos distúrbios relacionados à Qualidade da Energia, mostrando as suas origens e ações para mitigá-los. No Capítulo 3 está o aprofundamento bibliográfico referente à Transformada *Wavelet*, apresentando os conceitos matemáticos envolvidos e mostrando a causa da aplicação desta ferramenta em Qualidade da Energia. Os Capítulos 4 e 5 apresentarão a lógica e todos os parâmetros do algoritmo implementado, abordando como foi e feita e os resultados da detecção, localização e classificação dos distúrbios.

2. QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

A Qualidade da Energia Elétrica está relacionada a um conjunto de alterações que podem ocorrer no sistema elétrico. De acordo com os apontamentos da literatura, podemos então apresentar tais alterações como sendo qualquer problema manifestado na tensão, corrente ou desvio de frequência que resulte em falha ou má operação de equipamentos dos consumidores [2].

Os distúrbios relacionados à QE podem ser classificados em categorias que podem variar de acordo com o tempo de duração, efeito e intensidade.

2.1. Fenômenos Transitórios

Entende-se por transitórios as manifestações ou respostas elétricas locais ou nas adjacências, oriundas de alterações súbitas nas condições operacionais de um sistema de energia elétrica [4]. Geralmente, a duração de um transitório é muito pequena, mas de grande relevância, uma vez que equipamentos presentes no sistema elétrico estarão submetidos a grandes solicitações de tensão e/ou corrente.

Os fenômenos transitórios podem ser classificados em dois grupos, os *transitórios impulsivos*, causados por descargas atmosféricas, e os *transitórios oscilatórios*, causados principalmente por chaveamentos.

2.1.1. Transitório Impulsivo

Os transitórios impulsivos são caracterizados por uma repentina alteração não desejável na condição de regime permanente, refletindo-se nas formas de ondas da tensão e/ou corrente, sendo unidirecional na sua polaridade.

São normalmente causados por descargas atmosféricas e definidos geralmente por um tempo de descida e outro de subida do impulso, que podem ser revelados pelo conteúdo espectral do sinal [4].

2.1.2. Transitório Oscilatório

O transitório oscilatório também é uma repentina alteração não desejável na condição de regime permanente nas formas de onda da tensão e/ou corrente, possuindo, no entanto, valores de polaridade positivos ou negativos.

É definido pelo seu conteúdo espectral, duração e magnitude da tensão e são causados por energização de linhas, corte de corrente indutiva, eliminação de faltas, chaveamento de banco de capacitores e transformadores, etc.

2.2. Variações de Tensão de Curta Duração

Variações de Tensão de Curta Duração podem ser caracterizadas como instantâneas, momentâneas ou temporárias, de acordo com a duração. Estas variações são causadas principalmente por condições de faltas, energização de grandes cargas que requerem altas correntes de partida, ou a perda intermitente de conexões nos cabos do sistema.

Dependendo do local da falta e das condições do sistema, pode ocasionar um decréscimo da tensão, aumento da tensão ou ainda uma perda completa da tensão, caracterizados como *afundamento*, *elevação* e *interrupção*, respectivamente.

2.2.1. Interrupção de Curta Duração

Uma interrupção é definida como um decréscimo do fornecimento de tensão ou corrente para um valor menor que 0,1 p.u. por um período que não excede 1 min.

São causadas por faltas no sistema, falhas nos equipamentos e um incorreto funcionamento de sistemas de controle. A duração do distúrbio é normalmente associada ao tempo de operação dos dispositivos de proteção empregados. Os religadores programados para operar instantaneamente, limitam a interrupção a tempos inferiores a 30 ciclos; os temporizados podem ocasionar interrupções momentâneas ou temporárias, dependendo da escolha das curvas de operação do equipamento, e a interrupção originada pelo mal funcionamento de equipamentos tem uma duração de tempo irregular.

Algumas interrupções podem ser precedidas por um afundamento de tensão quando estas são devidas a faltas no sistema supridor. A Figura 1 ilustra uma interrupção momentânea devido a um curto-circuito, sendo precedida por um afundamento de tensão [4].

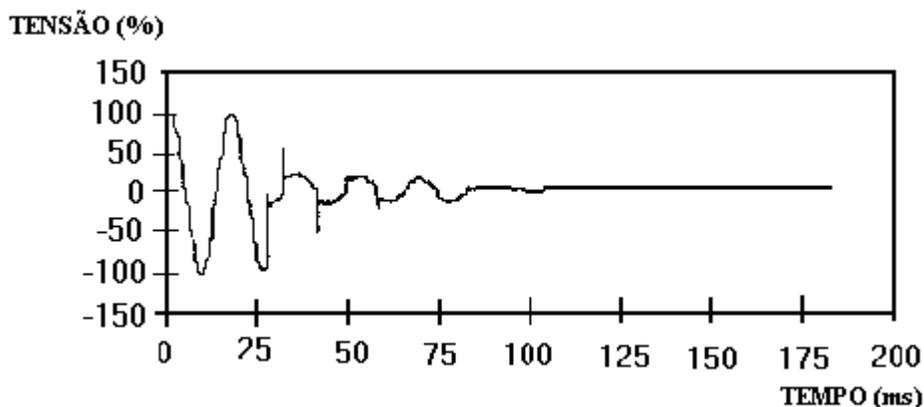


Figura 1 - Interrupção momentânea devido a um curto-circuito.

2.2.2. Afundamento de Tensão de Curta Duração

Afundamentos de tensão são associados, normalmente, a faltas no sistema, mas podem ser causados pela energização de grandes cargas ou a partida de grandes motores e pela corrente de magnetização de um transformador.

A falta pode ocasionar um decréscimo temporário de 10-90% no valor eficaz da tensão no sistema, dependendo da localização da falta e das condições do sistema, podendo permanecer por um período de 0,5 ciclos até 1 min.

Estes fenômenos podem ser classificados em instantâneos, momentâneos ou temporários, dependendo da duração do evento. A Figura 2 ilustra um afundamento de tensão de curta duração, causado por uma falta fase-terra, onde ocorreu um decréscimo de 80% na tensão por um período de 3 ciclos aproximadamente [4].

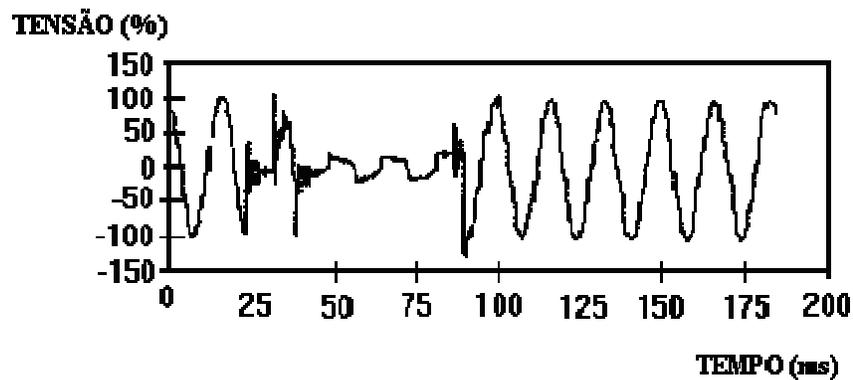


Figura 2 – Afundamento de tensão causado por uma falta fase-terra

2.2.3. Elevação de tensão de Curta Duração

A elevação de tensão de curta duração é caracterizada como um aumento entre 10-80% da tensão, na frequência de rede, com 0,5 ciclos a 1 min de duração.

Assim como os afundamentos de tensão, as elevações de tensão são também usualmente associadas a condições de faltas no sistema, assim como à saída de grandes blocos de cargas ou a energização de grandes bancos de capacitores, porém com menor incidência que as causadas por faltas fase-terra nas redes de transmissão e distribuição. A Figura 3 ilustra uma elevação de tensão causada por uma falta fase-terra [4].

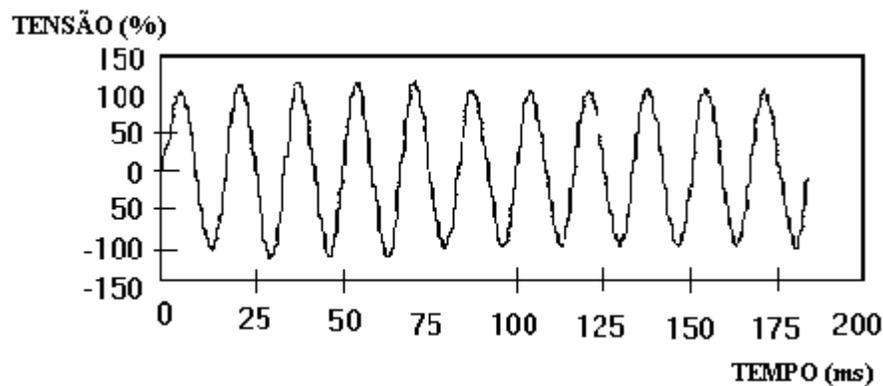


Figura 3 – Elevação de tensão ocasionada por uma falta fase-terra

2.3. Variações de Tensão de Longa Duração

As variações de longa duração são fenômenos de desvio do valor eficaz da tensão com duração superior a 1 minuto. Estas variações podem estar associadas a *elevações*, *afundamentos* e *interrupções sustentadas*, causadas geralmente por variações na carga ou operações de chaveamento sobre o sistema.

2.3.1. Interrupção Sustentada

É caracterizada como uma permanência nula no fornecimento de tensão por um período superior a um minuto.

As interrupções sustentadas podem ocorrer de forma inesperada ou de forma planejada. As causas da ocorrência inesperada são principalmente falhas nos disjuntores, queima de fusíveis, falha de componentes do circuito alimentador, etc. Já as ocorrências planejadas são realizadas para a manutenção da rede, serviços como troca de cabos e postes, mudança do *tap* do transformador, alterações dos ajustes de equipamentos de proteção, etc.

Seja a interrupção de natureza sustentada ou inesperada, o sistema elétrico deve ser projetado e operado de forma a garantir que:

- o número de interrupções seja mínimo;
- uma interrupção dure o mínimo possível e
- o número de consumidores afetados seja mínimo.

A consequência de uma interrupção sustentada é o desligamento dos equipamentos exceto para aqueles protegidos por sistemas *no-breaks* ou por outras formas de armazenamento de energia. O desligamento de equipamentos tem como consequências grandes prejuízos às indústrias, e no caso de interrupção sustentada o prejuízo é considerável, uma vez que o tempo de duração da interrupção é ainda maior, atrasando a retomada do processo produtivo.

2.3.2. Subtensão

A subtensão é definida como um decréscimo no valor eficaz da tensão AC para menos de 90% na frequência do sistema, e também com uma duração superior a 1 minuto.

São ocasionados principalmente pelo carregamento excessivo dos circuitos alimentadores, os quais são submetidos a determinados níveis de corrente, que interagindo com a impedância da rede, originam quedas de tensão acentuadas. Contribuem também para as subtensões a conexão de cargas a rede elétrica, o desligamento de bancos de capacitores e, conseqüentemente, o excesso de reativo transportado pelos circuitos de distribuição, o que limita a capacidade do sistema no fornecimento de potência ativa e ao mesmo tempo eleva a queda de tensão.

Dentre os problemas ocasionados por afundamentos destacam-se:

- redução da potência reativa fornecida por bancos de capacitores ao sistema;
- possível interrupção da operação de equipamentos eletrônicos, tais como computadores e controladores eletrônicos;
- redução do índice de iluminação para os circuitos de iluminação incandescente.
- aumento nos valores das correntes do estator de um motor de indução quando alimentado por uma tensão inferior à nominal. Desta forma tem-se um sobreaquecimento da máquina, o que certamente reduzirá a expectativa de vida útil da mesma.

Dentre as opções para melhorar a regulação de tensão temos:

- a instalação de reguladores de tensão para elevar o nível da tensão;
- a instalação de capacitores *shunt* para reduzir a corrente do circuito;
- a instalação de capacitores série para cancelar a queda de tensão indutiva;
- a instalação de cabos com bitolas maiores para reduzir a impedância da linha;
- a mudança do transformador de serviço para um com maior capacidade, reduzindo assim a impedância da linha e
- a instalação de compensadores estáticos de reativos, os quais têm os mesmos objetivos que os capacitores, para mudanças bruscas de cargas.

2.3.3. Sobretensão

As sobretensões são caracterizadas como um aumento no valor eficaz de tensão CA, maior que 110% na frequência do sistema, por uma duração maior que 1 minuto.

São geralmente ocasionados por desligamento de grandes cargas, energização de bancos de capacitores e também pelos *taps* dos transformadores incorretamente conectados.

Como conseqüências da sobretensão, têm-se falhas em equipamentos, danos em dispositivos eletrônicos e redução da vida útil de transformadores, cabos, disjuntores, TCs, TPs e máquinas rotativas quando submetidos a sucessivas condições de elevação de tensão. Relés de proteção também podem apresentar falhas de operação durante as sobretensões.

2.4. Desequilíbrio de tensão

O desequilíbrio de tensão é caracterizado como a razão entre os componentes ou de seqüência negativa ou zero, com o de seqüência positiva dos sinais.

As origens dos desequilíbrios estão geralmente nos sistemas de distribuição, os quais possuem cargas monofásicas distribuídas inadequadamente, fazendo surgir no circuito tensões de seqüência negativa, agravando ainda mais quando consumidores alimentados de forma trifásica possuem uma má distribuição de cargas em seus circuitos internos. Podem ser originados também da queima de fusíveis em uma fase de um banco de capacitores trifásicos.

Estes fatores fazem com que a qualidade da energia fornecida seja prejudicada, e desta forma, alguns consumidores têm em suas alimentações um desequilíbrio de tensão, o qual se manifesta sob três formas distintas:

- amplitudes diferentes;
- assimetria nas fases e
- assimetria conjunta de amplitudes e fases.

Destas três formas, apenas a amplitude diferente é evidenciado em no sistema elétrico com grande frequência [3].

2.5 Distorção na Forma de Onda

É caracterizada por um desvio da forma de onda puramente senoidal na frequência fundamental.

Há cinco tipos de distorções da forma de onda: *nível CC*, *harmônicos*, *inter-harmônicos*, *notching* e *ruído*.

2.5.1. Nível CC

Nível CC é a presença de um componente contínuo na tensão ou corrente em um sistema de energia CA. São ocasionados por um distúrbio ou devido à operação não ideal de retificadores de meia-onda.

Tem como consequência a saturação de transformadores, resultando em perdas adicionais, e redução da vida útil. Podem também ocasionar corrosão eletrolítica dos eletrodos de aterramento e de outros conectores.

2.5.2. Harmônico

É definido como um componente de onda periódica cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental.

Distorção harmônica é um tipo específico de energia cuja que é normalmente associada com a crescente quantidade de acionamentos estáticos, fontes chaveadas e outros dispositivos eletrônicos nas plantas industriais. Estas perturbações no sistema podem normalmente ser eliminadas com a aplicação de filtros de linha.

Entre as consequências da presença de harmônicos estão os efeitos indesejáveis ao sistema elétrico e problemas da perda da vida útil de equipamentos como transformadores, máquinas rotativas, bancos de capacitores, etc.

2.5.3. Inter-harmônico

É definido como a presença nas formas de ondas de tensões e correntes de componentes de frequência que não são múltiplos inteiros da frequência com que o sistema é suprido e designado a operar.

Os efeitos deste fenômeno não são bem conhecidos, mas, admite-se que os mesmos podem afetar a transmissão de sinais *carrier* e induzir *flicker* no display de equipamentos como tubos de raios catódicos.

2.5.4 Notching

É um distúrbio periódico de tensão causado pela má operação dos dispositivos eletrônicos quando a corrente é comutada de uma fase para outra. Durante este período há um momentâneo curto circuito entre duas fases levando a tensão próxima a zero tanto quanto é permitido pelas impedâncias do sistema.

2.5.5. Ruído

São definidos como sinais elétricos não desejáveis com um conteúdo espectral abaixo de 200 kHz, superposto à tensão e corrente do sistema de energia nos condutores de fase ou obtidos sobre os condutores neutros, ou ainda, nos sinais de linhas.

Podem ser causados em sistemas de energia por equipamentos eletrônicos, circuitos de controle, equipamentos a arco, cargas com retificadores de estado sólido e fontes chaveadas e, via de regra, estão relacionados com aterramentos impróprios.

2.6. Flutuação de tensão

É caracterizado como variações sistemáticas no valor eficaz da tensão de suprimento dentro da faixa compreendida entre 0,95 e 1,05 pu.

Flutuações são geralmente causadas por cargas industriais e manifestam-se de diferentes formas, como:

- Flutuações Aleatórias: causadas principalmente por fornos a arco, onde as amplitudes das oscilações dependem do estado de fusão do material, bem como do nível de curto-circuito da instalação.
- Flutuações Repetitivas: as principais fontes destas flutuações são máquinas de solda, laminadoras, elevadores de minas e ferrovias.
- Flutuações Esporádicas: a principal fonte causadora destas oscilações é a partida direta de grandes motores.

Os principais efeitos no sistema elétrico, resultados das oscilações causadas pelos equipamentos mencionados anteriormente são:

- oscilações de potência e torque das máquinas elétricas;
- queda de rendimento dos equipamentos elétricos;
- interferência nos sistemas de proteção e
- efeito *flicker*

2.7. Variação na Frequência do Sistema

Variações na frequência são caracterizadas como um desvio no valor da frequência fundamental deste sistema (50 ou 60 Hz).

A frequência do sistema de potência está diretamente associada à velocidade de rotação dos geradores que suprem o sistema. Pequenas variações de frequência podem ser observadas como resultado do balanço dinâmico entre carga e geração no caso de alguma alteração (variações na faixa de $60 \pm 0,5\text{Hz}$). A amplitude da variação e sua duração dependem das características da carga e da resposta do regulador de velocidade instalado no sistema de geração.

Variações de frequência que ultrapassam os limites para operação normal em regime permanente podem ser causadas por: faltas em sistemas de transmissão, saída de um grande bloco de carga ou pela saída de operação de uma grande fonte de geração.

3. A TRANSFORMADA WAVELET

Como introdução à aplicação da Transformada *Wavelet* – TW, seguimos o trabalho apresentado por HWAN KIM & AGGARWAL (2000) [6], de onde, os mesmos destacam a importância da análise e entendimento dos fenômenos transitórios, os quais apresentam um grande efeito sobre a operação normal de sistemas de potência.

Alguns dos métodos empregados para a análise dos fenômenos transitórios no presente passam pela:

- transformação dos dados no domínio da frequência, empregando-se a análise de *Fourier*, *Laplace* ou a Transformada Z ou pelo
- uso de programas de simulação computacional de sistemas de energia, como o programa de transitórios eletromagnéticos (EMTP), ou pelas soluções matemáticas de equações diferenciais, seja analítica ou numericamente.

Apesar da eficiência destes métodos, com o aumento da complexidade dos sistemas de energia, concomitante com a demanda para permitir uma rede mais rígida sem comprometer a qualidade do fornecimento de energia, os engenheiros estão continuamente na busca de métodos alternativos de análise transitória, com o propósito de projetar novos equipamentos que eficientemente atuem perante os fenômenos com características transitórias. No entanto, os métodos convencionais apresentam certas limitações com respeito à análise de transitórios. A série de *Fourier*, por exemplo, requer periodicidade no tempo de todas as funções envolvidas. A informação da frequência do sinal calculado pela clássica Transformada de *Fourier* (TF) é uma média sobre a duração total do sinal em análise. Então, se há um sinal transitório local, definido em um pequeno intervalo de tempo sobre o sinal em análise, o seu transitório será considerado pela TF, mas a sua localização sobre o eixo do tempo será perdida. Uma técnica que procura minimizar, dentro de certos limites, o problema mencionado é uma versão da TF que é realizada considerando-se um determinado tamanho de janela de dados fixos. Esta técnica é conhecida como “*Short-Time Fourier Transform (STFT)*”. Contudo, o problema é que a STFT também possui limitações quanto ao comprimento fixo da janela de dados empregada, a qual necessita ser a priori fixada. Uma larga janela de dados permite uma boa resolução no domínio da frequência, mas uma pobre resolução no domínio do tempo e, uma estreita ou pequena janela permite uma boa resolução no tempo, mas uma pobre resolução no

domínio da frequência. A análise por *Wavelet* transpõe as limitações dos métodos de *Fourier* pelo emprego de funções de análise que são locais, ambas no tempo e na frequência. Uma *Wavelet* é uma pequena “wave”, a qual possui sua energia concentrada no tempo, possibilitando assim a análise de fenômenos transitórios, não estacionários ou variantes no tempo. A mesma ainda possui característica oscilatória, mas também tem a habilidade de permitir a análise tanto no tempo quanto na frequência, simultaneamente.

A TW é muito bem aceita para uma ampla faixa de sinais que não são periódicos e que podem conter ambos os componentes senoidais e de impulso, como é típico nos transitórios de sistemas de potência. Em particular, a habilidade da *Wavelet* em se concentrar em pequenos intervalos de tempo, para componentes de alta frequência, e em longos intervalos de tempo, para componentes de baixa frequência, melhora a análise com impulsos e oscilações localizadas, particularmente na presença da componente fundamental e dos componentes harmônicos de baixa ordem. Para esta análise em específico, a TW pode apresentar uma janela que automaticamente se ajusta para proporcionar a resolução desejada.

3.1. Conceitos Básicos de *Wavelet*

A análise de *Wavelet* emprega um protótipo de função designado como *Wavelet* mãe. Matematicamente, a Transformada Contínua de *Wavelet* (TCW) de um dado sinal $x(t)$, com respeito a *Wavelet* mãe $g(t)$, é genericamente definida como:

$$TCW(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) g\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

Onde \mathbf{a} é a dilatação ou fator de escala e \mathbf{b} é o fator de translação, e ambos as variáveis são contínuas. É claro da equação (1) que o sinal original no domínio do tempo $x(t)$, com uma dimensão, é mapeado para uma nova função no espaço, de dimensão dois, através dos coeficientes de escala e de translação pela TW. O coeficiente da TW, em uma particular escala e translação – $TW(a, b)$, representa quão bem o sinal original $x(t)$ e a *Wavelet* mãe escalada e transladada se combinam. Então o conjunto de todos os coeficientes $TW(a, b)$ associados a um particular sinal é a representação do sinal $x(t)$ com respeito a *Wavelet* mãe $g(t)$.

Podemos visualizar a *Wavelet* mãe como uma função associada ao tamanho da janela de dados. O fator de escala a e o tamanho da função associada à janela são interdependentes, isto é, pequenas escalas implicam em pequenas janelas. Conseqüentemente, podemos analisar componentes com pequenas faixas de freqüências de um sinal com um pequeno fator de escala e componentes com largas faixas de freqüência com um grande fator de escala, capturando, portanto, todas as características de um sinal em particular.

A TW engloba um infinito conjunto de *Wavelet* devido à necessidade da Análise Multiresolução (AMR). Na AMR, as funções *Wavelet* são usadas para construir blocos para decompor e construir o sinal em diferentes níveis de resolução. A função *Wavelet* gerará uma versão detalhada do sinal decomposto e a função escalamento gerará uma versão aproximada do sinal decomposto. Há muitos tipos de *Wavelets* mães que podem ser empregadas na prática. No trabalho [6] os autores exemplificam algumas que são usualmente empregadas como *Haar*, *Symmlet*, *Daubechies*, *Morlet* etc. Uma *Wavelet* mãe muito empregada para uma grande faixa de aplicações é a *Daubechies Wavelet*. Esta é idealmente aceitável para detectar um sinal com baixa amplitude, curta duração e com rápido decaimento e oscilação, típico dos sinais encontrados em sistemas de energia.

3.2. A transformada discreta *Wavelet* (TDW)

Análoga à relação existente entre a transformada contínua de Fourier e a Transformada Discreta de Fourier (TDF), a Transformada contínua *Wavelet* tem uma versão digitalmente implementável, denotada como Transformada Discreta *Wavelet* (TDW), que é definida como segue:

$$TDW(m, k) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_n x(n) g\left(\frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (2)$$

Onde $g(\cdot)$ é a *wavelet* mãe e os parâmetros de escala e de translação a e b são funções de um parâmetro inteiro m , isto é, $a = a_0^m$ e $b = nb_0 a_0^m$, que permite uma expansão da família originada pela *wavelet* mãe, gerando as *wavelets* filhas. Nesta equação k é uma variável inteira que se refere a um número particular de amostra de um determinado sinal de entrada. O parâmetro de escala permite o aumento da escala

geométrica, isto é, $1, 1/a_0, 1/a_0^2, \dots$. A saída da TW pode ser representada em duas dimensões de maneira similar a TDF, mas com divisões muito diferentes no tempo e na frequência.

Pela simples troca entre as variáveis n e k e rearranjando (2) temos:

$$TDW(m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_k x(k) g(a_0^{-m}n - b_0k) \quad (3)$$

Observando esta equação, podemos notar que há uma grande similaridade com a equação de convolução para a resposta ao impulso finito para filtros digitais (*Finite Impulse Response – FIR*), a saber:

$$y(n) = \frac{1}{c} \sum_k x(k) h(n - k) \quad (4)$$

Onde $h(n-k)$ é a resposta ao impulso do filtro FIR. Comparando-se as duas últimas equações, é evidente que a resposta ao impulso do filtro na equação de TDW é $g(a_0^{-m}n - b_0k)$.

Como ilustração apresentada por HWAN KIM & AGGARWAL (2000), podemos selecionar $a_0 = 2$ ou $a_0^{-m} = \left(1, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \dots\right)$ e $b_0 = 1$, e a TDW pode ser implementada pelo uso de um filtro multi-estágio com a *Wavelet* mãe como um filtro passa baixo $l(n)$ e com seu dual tendo o filtro passa alto $h(n)$. A implementação da TDW com um banco de filtros é computacionalmente eficiente. A saída do filtro passa alto permite uma detalhada versão dos componentes de alta frequência do sinal e o componente de baixa frequência é mais bem empregado para se obter os outros detalhes do sinal de entrada.

Similar a TDF, a TDW pode ser representada em um plano com uma dimensão, mas com diferentes divisões no tempo e na frequência. Por exemplo, se o sinal original está sendo amostrado em F_s (Hz), então a maior frequência de amostragem que o sinal pode representar é $F_s/2$ (baseado no teorema de *Nyquist*). Esta pode ser vista como a saída do filtro passa alto, que é o primeiro detalhe do sinal decomposto.

Associado com a análise *Wavelet*, ambas as principais características em alta e baixa frequência nos diferentes níveis de detalhes são claramente evidenciadas. Isto é obtido aplicando-se a TDW a um determinado número de ciclos do sinal transitório.

4. ALGUNS APONTAMENTOS SOBRE A LÓGICA IMPLEMENTADA

O algoritmo adaptado neste trabalho teve como base a lógica computacional apresentada por ARRUDA [3], em que o mesmo aplica a técnica de análise por multiresolução (AMR) para detectar, localizar e classificar distúrbios relacionados à qualidade de energia.

A técnica AMR divide o sinal distorcido em diferentes níveis de resolução, desta maneira o sinal a ser analisado pode ser decomposto em outros sinais, em diferentes níveis de frequência, fornecendo informações diretas no domínio do tempo e da frequência. Estes sinais decompostos indicam a existência e localização no tempo do distúrbio, uma vez que estes estão em níveis de frequência diferente do nível da frequência fundamental. Para ilustrar tal afirmativa, nesta pesquisa, o sexto e o sétimo detalhe do sinal decomposto em AMR são utilizados para a classificação, tomando-se como base a comparação entre a diferença de energia caracterizada por determinados limiares do sexto detalhe do sinal de entrada com a energia do sinal em regime permanente. Desta maneira, diferenciam-se os distúrbios entre afundamento, elevação e ou interrupção de tensão a 60 Hz, classificados de acordo com os limiares característicos para cada distúrbio.

4.1. ANÁLISE POR MULTIRESOLUÇÃO

A técnica AMR permite a decomposição de um dado sinal em diferentes níveis de resolução, fornecendo importantes informações no domínio do tempo e da frequência. Por esta técnica, o sinal analisado é primeiramente decomposto em dois outros sinais, uma versão detalhada e outra aproximada, através de filtros passa alta e passa baixa, que são representados matematicamente por funções *Wavelets*, e estão indicadas na Figura (4) como h_1 e h_0 , respectivamente. O sinal aproximado proveniente do filtro passa baixo, é novamente decomposto, resultando em dois outros sinais, um detalhado e outro aproximado, em níveis de frequência diferentes, fornecendo assim os níveis de decomposição. Estes fornecem informações diretas, relativas ao sinal original, no domínio da frequência e do tempo.

A *wavelet* mãe utilizada neste trabalho foi a *Daubechies* de ordem 4 (db4), que conforme mostrado em ARRUDA *et al.* (2002) e em muitos artigos desta área, são as mais adequadas para a decomposição dos distúrbios analisados.

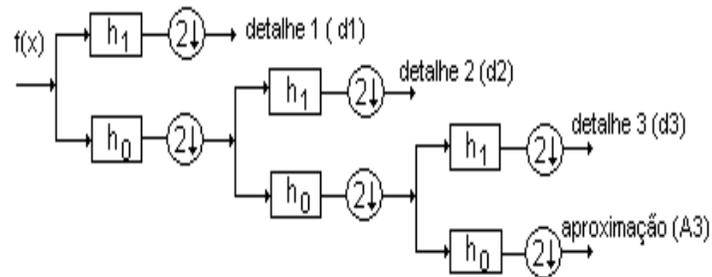


Figura 4 – Decomposição do sinal por AMR

4.2. A DETECÇÃO DOS DISTÚRBIOS

Para a análise do sinal caracterizando uma condição normal de operação e ou uma condição de distúrbio, é realizada a decomposição do sinal de entrada considerando somente o primeiro nível, usando-se janelas de um ciclo de dados contendo 128 amostras (frequência de amostragem de 7680 Hz), com passos de 64 amostras. O primeiro detalhe do sinal é comparado com o primeiro detalhe de um sinal em regime permanente tomado como referência. Se houver diferença entre os coeficientes caracterizados, esta indica a presença do distúrbio, ocorrendo a detecção da anomalia. Esta diferença é repassada ao algoritmo através de um limiar característico do sistema. Caso contrário, sendo esta diferença desprezível, ou menor do que o limiar pré-especificado confirma-se então uma condição normal de operação sobre o sistema.

4.3. CLASSIFICAÇÃO DE DISTÚRBIOS

De acordo com os resultados observados, o sexto e o sétimo detalhe de decomposição em AMR, utilizando como *wavelet* mãe a Db4, indicam a presença de distúrbios caracterizados na frequência fundamental do sistema. Desta forma o algoritmo inicialmente classifica os distúrbios em dois grupos:

- aqueles cuja frequência é similar à frequência do sistema elétrico e
- aqueles cuja frequência é superior a 60 Hz no nosso caso.

Esta análise é feita calculando-se a energia do sexto detalhe do sinal de entrada e comparando-o com a energia de um sinal representativo do regime permanente do sistema.

Esta análise classifica os distúrbios entre afundamento e elevação de tensão ou interrupção momentânea. A classificação é feita de acordo com o valor da diferença entre a energia do sinal de referência e a energia do sinal de entrada, denominada como “*diff*”, e, dependendo dos valores obtidos, considera-se a seguinte lógica:

- se “*diff*” menor que zero → presença de elevação de tensão
- se “*diff*” maior que zero → presença de afundamento de tensão e ou interrupção da energia.
- se “*diff*” igual ou próximo de zero → não indica a presença de distúrbios com frequência similar à do sistema.

No segundo caso em que o valor do “*diff*” é maior que zero, a caracterização entre afundamento ou interrupção é feita estipulando-se um limiar limite para a classificação, em que valores de “*diff*” maiores que o limiar do distúrbio é classificado como afundamento e, caso contrário, como interrupção da energia.

Caso o sinal de entrada não seja classificado como um distúrbio com frequência similar à do sistema elétrico, este é novamente submetido à análise dos primeiros detalhes de decomposição.

A caracterização entre oscilação transitória e ruído é feita de acordo com as respostas típicas que estes oferecem na AMR. A resposta na AMR oferecida por oscilações transitórias apresenta picos superiores e característicos aos oferecidos pela

resposta dos ruídos. Desta forma, uma janela de dados contendo vinte amostras percorre todo o sinal, calculando a razão denominada “*Det*” entre a média da janela de dados atual com a média da janela anterior. Desta razão, comparada com um limiar que diferencia os fenômenos entre oscilações transitórias e ruído, têm-se a classificação dos mesmos.

5. O ALGORITMO IMPLEMENTADO PARA DETECÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE DISTÚRBIOS RELACIONADOS A QEE

O algoritmo proposto e adaptado neste trabalho foi implementado utilizando-se do *software* Matlab, empregando o *toolbox* direcionado para a aplicação da Transformada *Wavelet*.

O arquivo de dados usado para a rotina de testes do algoritmo, possui 90 colunas com 1924 amostras ou linhas, em que cada coluna representa um tipo do sinal com o distúrbio caracterizado. Este arquivo apresenta 12 casos de Oscilação Transitória, 10 casos de Ruído, 34 casos de Afundamento de Tensão, 8 casos de Interrupção da Energia e 26 casos de Elevação de Tensão. Os casos com distúrbios de Ruídos foram gerados no *software Matlab* pela sobreposição à forma de onda em regime permanente. Os demais casos foram gerados por simulações de um sistema de distribuição real da CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz) dispondo do *software ATP (Alternative Transients Program)* [7].

5.1. MÓDULO PRINCIPAL

O módulo principal do algoritmo foi implementado de tal forma a possibilitar uma futura interface gráfica para o algoritmo, com grande interatividade com o usuário, permitindo assim não só a aplicação do algoritmo com os dados que foram utilizados como teste, mas também a outros dados de entrada.

Este módulo apresenta como variáveis de entrada os seguintes parâmetros:

- **Nível de tensão do sistema**

Possibilita a entrada do valor de tensão do sistema, permitindo a normalização do sinal de entrada para ser feita a comparação com o sinal em regime permanente, visando à análise da condição de operação do sistema (normal ou sob distúrbio).

- **Nome do arquivo de dados**

Nome do arquivo de dados de entrada, o qual pode ser decorrente de uma determinada oscilografia ou registro de perturbação, para a realização da análise pelo algoritmo.

- **Coluna do arquivo de dados**

O arquivo de dados no qual foram realizados os testes do algoritmo possui 90 colunas de dados, no qual cada coluna representa um sinal com 1924 amostras com algum distúrbio. Esta função possibilita a seleção de determinada coluna (ou sinal) para ser analisado.

A presença desta função é devido à estrutura do arquivo de dados usado para realização dos testes, sendo futuramente substituída por uma função de escolha da fase para análise do sinal de tensão, em que a entrada será a fase do sistema a ser analisada (fase A, B ou C).

- **Freqüência de Amostragem do sinal**

É a freqüência de amostragem do sinal de entrada. Esta freqüência é utilizada no algoritmo para o cálculo da localização no tempo do distúrbio, quando manifestado.

5.1.1. SUB-ROTINA DE DETECÇÃO

A sub-rotina de detecção foi implementada com uma janela de dados contendo 128 amostras por ciclo (freqüência de amostragem de 7680 Hz), que percorre o sinal a ser analisado, com passos 64 amostras. Desta forma, o sinal é analisado tomando um ciclo de dados e em seguida a janela se desloca meio ciclo à frente da janela anterior, como mostrado na Figura 5.

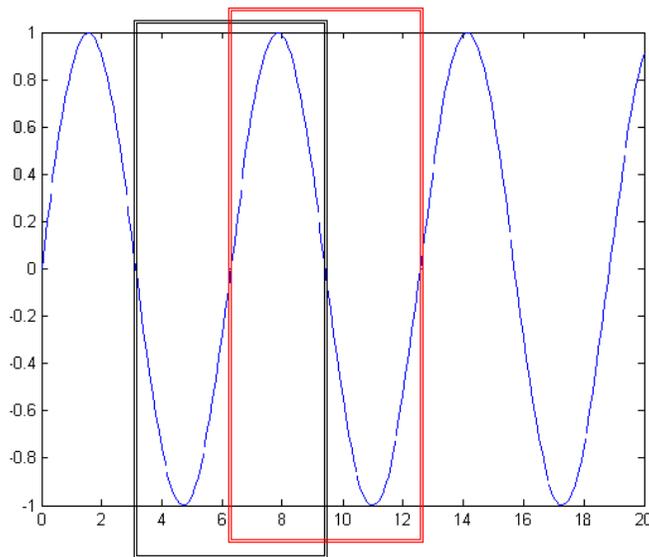


Figura 5 – Janelamento do sinal de entrada

O sinal de entrada é então comparado com um sinal de referência que representa o sistema em regime permanente. Quando verificado, no primeiro detalhe de decomposição, a superação de um limiar previamente estabelecido, o algoritmo acusa a presença de uma anormalidade sobre o sistema.

5.1.2. SUB-ROTINA DE COMPOSIÇÃO

Depois de detectado o distúrbio, realiza-se a decomposição do sinal em sete níveis de detalhes e de aproximações, para que possa ser feita a classificação do ocorrido, comparando inicialmente a energia calculada do sexto detalhe do sinal de entrada com a energia representativa do sinal em regime permanente. A decomposição é realizada considerando-se somente 8 ciclos de pós-falta, permitindo assim um menor esforço computacional.

5.1.3. MÓDULO DE LOCALIZAÇÃO NO TEMPO

Com a detecção e classificação dos distúrbios caracterizados a 60 Hz (sexto nível de detalhe) o algoritmo fornece um tempo preliminar de início do distúrbio, tempo este impreciso, pois é calculado a partir da janela em que foi detectado o distúrbio e não da amostra de início do mesmo. Logo, faz-se necessário uma estimativa mais precisa dos tempos associados ao ocorrido, acusando o início, fim e duração do distúrbio, fornecendo assim, uma localização mais exata no tempo.

A partir da janela que foi detectado o fenômeno, pode-se encontrar a amostra que caracteriza o início do distúrbio e desta, em função do conhecimento da frequência de amostragem, calcular o tempo preciso de início. Tal situação decorre da multiplicação do número de amostras consideradas pelo intervalo de tempo entre as mesmas, o qual é verificado pela frequência de amostragem conhecida. A localização do final do distúrbio é feita da mesma forma, utilizando-se, no entanto, a amostra que caracteriza a volta do sistema à operação normal.

Comenta-se que o período (T) entre amostras é o inverso da frequência de amostragem (F_{amt}) do sinal. Então, $T = \frac{1}{F_{amt}}$. Nos casos estudados, a frequência de

amostragem é 7680 Hz. Temos então que $T = \frac{1}{7680} = 1,302 * 10^{-4} s$, que é o tempo transcorrido entre duas amostras.

Tendo o tempo inicial e final da situação caracterizada, basta realizar a diferença entre os mesmos para encontrar a duração do distúrbio propriamente dito.

Já para os casos de oscilação transitória a localização é feita comparando o sinal em análise com um sinal em regime, observando-se um determinado limiar entre estes. A localização do fim do distúrbio é apontada da mesma forma.

5.1.4. AMPLITUDE DO DISTÚRBO

A amplitude do distúrbio é calculada percorrendo o sexto nível de detalhe do sinal de entrada delimitado pelo início e fim do distúrbio, observando neste intervalo, o máximo valor do módulo apontado. Deste valor é extraído o valor de pico do sinal de referência, caracterizando assim a amplitude do distúrbio.

Já para os casos de ruído, a amplitude é calculada tomando-se o maior e o menor valor amostrado, e destes, o maior valor absoluto para caracterizar a amplitude do ocorrido.

5.2. DADOS DE SAÍDA DO ALGORITMO

Após a análise do sinal de entrada o algoritmo fornece um relatório completo do observado conforme sumarizado pela Tabela 1. Nesta, consta o número da janela *wavelet* em que foi detectado o distúrbio (**Janela**), o tempo preliminar de início (**T_Prelimin**), limiar determinado empiricamente para mapear os distúrbios sob análise (**Dif**), os tempos precisos de início (**T_Inic**) e fim (**T_Fim**) do ocorrido, a sua duração (**Duração**), a amplitude do distúrbio (**Amplitude**), e a classificação do mesmo (**Class_Alg**). Na coluna destinada à classificação do distúrbio (**Class_Alg**), OT diz respeito às situações de Oscilação Transitória, RD (Ruídos), AF (Afundamento), INT (Interrupção) e ELV (Elevação) apontadas pelo algoritmo implementado. A variável (**Class_Des**) refere-se à classificação real da situação em teste.

Na Tabela 2, dispõe-se de algumas informações para os casos de oscilação transitória, onde é fornecido o maior (**Valor Máximo**) e o menor (**Valor Mínimo**) valor em p.u. da amostra observada.

Vale comentar também que a situação de ruído foi aplicada sobre todo o sinal em análise, não sendo oportuno a localização no tempo do distúrbio.

TABELA 1 – Resultados oriundos da análise automática quando da aplicação do algoritmo implementado

J	Janela	T_Prelimin	Dif	T_Inic	T_Fim	Duração	Amplitude	Class_Alq	Class_Des
1	5	0,0456	X	0,0477	0,0727	0,0250	0,1127	OT	OT
2	5	0,0469	X	0,0509	0,0799	0,0290	18,0243	OT	OT
3	5	0,0456	X	0,0477	0,0727	0,0250	0,2679	OT	OT
4	5	0,0469	X	0,0509	0,0799	0,0290	21,7488	OT	OT
5	5	0,0454	X	0,0477	0,0758	0,0281	1,7580	OT	OT
6	5	0,0465	X	0,0509	0,0737	0,0228	23,9758	OT	OT
7	5	0,0447	X	0,0454	0,0706	0,0252	0,4537	OT	OT
8	5	0,0441	X	0,0477	0,081	0,0333	12,4904	OT	OT
9	5	0,0448	X	0,0454	0,0706	0,0252	0,2040	OT	OT
10	5	0,0441	X	0,0477	0,081	0,0333	5,8723	OT	OT
11	5	0,0448	X	0,0454	0,0768	0,0314	11,0494	OT	OT
12	5	0,0441	X	0,0477	0,081	0,0333	17,4027	OT	OT
13	1	0,0122	X	X	X	X	0,0179	RD	RD
14	1	0,0118	X	X	X	X	0,0117	RD	RD
15	1	0,0118	X	X	X	X	0,0320	RD	RD
16	1	0,0124	X	X	X	X	0,0192	RD	RD
17	1	0,0125	X	X	X	X	0,0150	RD	RD
18	1	0,0128	X	X	X	X	0,0256	RD	RD
19	1	0,0120	X	X	X	X	0,0188	RD	RD
20	1	0,0118	X	X	X	X	0,0221	RD	RD
21	1	0,0117	X	X	X	X	0,0172	RD	RD
22	1	0,0120	X	X	X	X	0,0327	RD	RD
23	5	0,0456	0,0274	0,0451	0,0919	0,0468	10,9901	AF	AF
24	5	0,0456	0,0391	0,0451	0,0919	0,0468	15,7596	AF	AF
25	5	0,0456	0,0535	0,0451	0,0919	0,0468	21,2188	AF	AF
26	5	0,0456	0,0649	0,0451	0,0919	0,0468	25,4897	AF	AF
27	5	0,0456	0,0776	0,0451	0,0919	0,0468	29,4973	AF	AF
28	5	0,0461	0,0897	0,0477	0,0893	0,0416	37,2457	AF	AF
29	5	0,0311	0,0975	0,0451	0,0919	0,0468	37,3308	AF	AF
30	5	0,0311	0,1090	0,0451	0,0919	0,0468	42,6711	AF	AF
31	5	0,0311	0,1167	0,0451	0,0919	0,0468	47,8898	AF	AF
32	5	0,0311	0,1249	0,0451	0,0919	0,0468	51,5832	AF	AF
33	5	0,0311	0,1322	0,0451	0,0919	0,0468	55,8088	AF	AF
34	5	0,0311	0,1432	0,0477	0,0893	0,0416	63,3561	AF	AF
35	5	0,0311	0,1528	0,0477	0,0893	0,0416	66,8672	AF	AF
36	5	0,0311	0,1569	0,0477	0,0893	0,0416	70,7912	AF	AF
37	5	0,0311	0,1573	0,0477	0,0893	0,0416	75,1962	AF	AF
38	5	0,0311	0,1677	0,0477	0,0893	0,0416	80,1646	AF	AF
39	5	0,0311	0,1700	0,0451	0,0893	0,0442	84,9953	INT	AF
40	5	0,0456	0,0304	0,0482	0,1001	0,0519	12,1702	AF	AF
41	5	0,0456	0,0432	0,0482	0,1001	0,0519	17,5363	AF	AF
42	5	0,0456	0,0588	0,0482	0,1001	0,0519	23,9846	AF	AF
43	5	0,0456	0,0711	0,0482	0,1001	0,0519	28,3082	AF	AF

44	5	0,0456	0,0841	0,0482	0,1001	0,0519	31,3177	AF	AF
45	5	0,0456	0,1014	0,0509	0,0977	0,0468	27,3941	AF	AF
46	5	0,0456	0,1045	0,0482	0,1001	0,0519	36,3161	AF	AF
47	5	0,0456	0,1159	0,0482	0,0789	0,0307	39,8506	AF	AF
48	5	0,0456	0,1260	0,0509	0,1001	0,0492	40,8192	AF	AF
49	5	0,0456	0,1341	0,0509	0,1001	0,0492	44,8298	AF	AF
50	5	0,0456	0,1428	0,0509	0,1001	0,0492	49,2910	AF	AF
51	5	0,0456	0,1587	0,0509	0,0977	0,0468	55,6886	AF	AF
52	5	0,0456	0,1592	0,0509	0,0977	0,0468	59,3437	AF	AF
53	5	0,0456	0,1651	0,0509	0,0977	0,0468	63,4791	AF	AF
54	5	0,0456	0,1736	0,0509	0,0977	0,0468	68,1694	INT	AF
55	5	0,0456	0,1720	0,0509	0,0977	0,0468	73,5003	INT	AF
56	5	0,0456	0,1822	0,0509	0,0977	0,0468	79,5328	INT	AF
57	5	0,0311	0,1700	0,0451	0,0893	0,0442	84,9953	INT	INT
58	5	0,0311	0,1658	0,0451	0,0893	0,0442	86,1130	AF	INT
59	5	0,0311	0,1675	0,0451	0,0893	0,0442	87,8403	AF	INT
60	5	0,0311	0,1699	0,0451	0,0893	0,0442	90,2087	INT	INT
61	5	0,0456	0,1822	0,0509	0,0977	0,0468	79,5328	INT	INT
62	5	0,0456	0,1824	0,0509	0,0977	0,0468	80,5776	INT	INT
63	5	0,0456	0,1826	0,0509	0,0977	0,0468	79,4921	INT	INT
64	5	0,0456	0,1826	0,0509	0,0977	0,0468	77,9612	INT	INT
65	5	0,0400	-0,0439	0,0451	0,0898	0,0447	6,4301	ELV	ELV
66	5	0,0400	-0,0439	0,0477	0,0945	0,0468	12,5434	ELV	ELV
67	5	0,0400	-0,0501	0,0477	0,0945	0,0468	17,0294	ELV	ELV
68	5	0,0400	-0,0551	0,0477	0,0945	0,0468	24,2096	ELV	ELV
69	5	0,0400	-0,0550	0,0477	0,0945	0,0468	29,4691	ELV	ELV
70	5	0,0400	-0,0978	0,0451	0,0904	0,0453	30,0464	ELV	ELV
71	5	0,0400	-0,1054	0,0451	0,0904	0,0453	35,8289	ELV	ELV
72	5	0,0400	-0,1104	0,0451	0,0945	0,0494	40,6578	ELV	ELV
73	5	0,0400	-0,1472	0,0451	0,0904	0,0453	43,5970	ELV	ELV
74	5	0,0400	-0,1526	0,0451	0,0904	0,0453	47,2641	ELV	ELV
75	5	0,0400	-0,1154	0,0451	0,0945	0,0494	55,7004	ELV	ELV
76	5	0,0400	-0,1681	0,0451	0,0904	0,0453	61,5732	ELV	ELV
77	5	0,0400	-0,1700	0,0451	0,0904	0,0453	65,2014	ELV	ELV
78	5	0,0400	-0,0460	0,0509	0,0982	0,0473	7,2016	ELV	ELV
79	5	0,0400	-0,0451	0,0509	0,1029	0,052	13,8098	ELV	ELV
80	5	0,0400	-0,0512	0,0509	0,0987	0,0478	18,5131	ELV	ELV
81	5	0,0400	-0,0554	0,0509	0,1029	0,0520	25,6372	ELV	ELV
82	5	0,0400	-0,0544	0,0509	0,1029	0,052	30,3939	ELV	ELV
83	5	0,0400	-0,1007	0,0509	0,0987	0,0478	32,6126	ELV	ELV
84	5	0,0400	-0,1083	0,0509	0,0987	0,0478	38,5825	ELV	ELV
85	5	0,0400	-0,1124	0,0509	0,1029	0,052	43,4409	ELV	ELV
86	5	0,0400	-0,1513	0,0477	0,0789	0,0312	39,1813	ELV	ELV
87	5	0,0400	-0,1569	0,0477	0,0789	0,0312	41,3789	ELV	ELV
88	5	0,0400	-0,1159	0,0509	0,0732	0,0223	57,5613	ELV	ELV
89	5	0,0400	-0,1722	0,0477	0,0784	0,0307	49,1597	ELV	ELV
90	5	0,0400	-0,1740	0,0477	0,0784	0,0307	50,9628	ELV	ELV

TABELA 2 – Valore máximos e mínimos do distúrbio para os casos de oscilação transitória.

J	Valor Máximo	Valor Mínimo	J	Valor Máximo	Valor Mínimo
1	1,0039	-0,9906	7	1,1019	-1,1076
2	1,1885	-1,1524	8	1,1362	-1,2277
3	1,0046	-0,9893	9	1,0854	-1,0991
4	1,2229	-1,1768	10	1,1018	-1,1597
5	1,0118	-0,9868	11	1,2229	-1,1859
6	1,2142	-1,2377	12	1,2861	-1,2249

6. CONCLUSÃO

O algoritmo apresentado utiliza a Transformada *Wavelet* para o monitoramento do sistema elétrico no que diz respeito à Qualidade da Energia, através da Análise de Multiresolução, empregando como *wavelet* mãe a Db4.

O algoritmo tem como saída um relatório de dados em que consta a janela em que foi detectado o distúrbio, tempo preliminar de início, tempo preciso inicial e final, duração, amplitude e classificação do distúrbio.

Conforme foi apresentado nas Tabelas 1 e 2 todos os resultados estão condizentes com o esperado.

Pela Tabela 1, observa-se que o procedimento para a tomada do tempo de início apresentou um ótimo índice de acerto, correspondendo para todos os casos, a um valor superior a 96%. Para a variável associada ao tempo final, o pior índice diz respeito à situação de Oscilação Transitória (OT) – 78%. Cabe frisar que a tomada de tal variável é uma situação um pouco que complicada, pois dependerá basicamente da resposta do sistema à volta da condição normal de operação. Para todas as outras situações, este índice corresponde a um valor superior a 93%. Para a classificação, os piores resultados referem-se às situações de interrupção (INT) – 75% e afundamento da tensão (AF) – 88,23%. Vale comentar da dificuldade na definição dos limiares entre entes fenômenos já que, estas situações são basicamente caracterizadas na frequência do sistema (60 HZ) e definidas por um decréscimo no nível de tensão.

Cabe ressaltar a importância do assunto apresentado, já que, devido à atualidade do mesmo, é de grande importância para a formação acadêmica e profissional voltada ao curso de engenharia elétrica.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SANTOSO, S., GRADY, W. M., POWERS, E. J., LAMOREE, J. and BHATT, S. C. Characterization of Distribution Power Quality Events with Fourier and Wavelet Transforms. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 15, 1, 247-254, January, 2000.
- [2] DUGAN, R. C., MCGRANAGHAN, M. F. and BEATY, H. W. *Electrical power systems quality*. New York: McGraw-Hill, xv, 265 p. 1996
- [3] ARRUDA, E. F. (2003). “Análise de distúrbios relacionados com a qualidade da energia elétrica utilizando a transformada *Wavelet*”, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Biblioteca Central.
- [4] APOSTILA DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA (QEE), USP/EESC, SEL0409
- [5] ARRUDA, E. F., DELMONT, O. F., COURY, D. V., CARNEIRO, A. A. F. M. (2002). Um Estudo das Famílias Wavelets Aplicadas à Qualidade da Energia Elétrica. *Congresso Brasileiro de Automática – CBA2002*, 6p, Natal/RN.
- [6] HWAN KIM, C. and AGGARWAL, R. (2000). “Wavelet transforms in power systems. Part 1 General introduction to the wavelet transforms”, *Power Engineering Journal*, pp. 81-87, Apr.
- [7] ALTERNATIVE Transients Program. Rule Book, Leuven EMTP Center (LEC), 1987.
- [8] GAOUDA, A. M.; SALAMA, M. M. A.; SULTAN, M. R. & CHIKHANI, A.Y. (1999). “Power quality detection and classification using wavelet-multiresolution signal decomposition”, *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 14, No.4, Oct.