



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GPC 19
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO V

GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO E CONTROLE EM SISTEMAS DE POTÊNCIA – GPC

DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS MONOFÁSICAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS UTILIZANDO A TRANSFORMADA WAVELET

Rodrigo Hartstein Salim*

Karen Rezende Caino de Oliveira

Arturo Suman Bretas

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma nova metodologia para a detecção, classificação e determinação do instante de ocorrência de faltas monofásicas em sistemas elétricos. A ferramenta de análise para a tomada de decisão é a transformada wavelet, através da análise multiresolução dos sinais de corrente medidos na subestação. Simulações são utilizadas para a validação da metodologia e para o projeto dos parâmetros necessários. Os resultados mostram que a metodologia proposta é eficiente e robusta na detecção de faltas ocorridas em qualquer das fases do sistema, inclusive para faltas com resistência elevada.

PALAVRAS-CHAVE

Proteção de Sistemas Elétricos, Detecção de Faltas, Transformada Wavelet.

1.0 - INTRODUÇÃO

Com as mudanças no setor elétrico brasileiro, novos índices de qualidade do fornecimento de energia elétrica foram determinados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (1)—(2). Estes índices estão diretamente relacionados com as interrupções no fornecimento da energia elétrica aos consumidores, seja o número ou o período total de interrupção no fornecimento. Dentro deste contexto os sistemas de proteção são peças fundamentais, visto que projetos de proteção bem desenvolvidos devem visar, além da mitigação das conseqüências quando da ocorrência de uma falha no sistema, um período de interrupção mínimo no fornecimento da energia elétrica aos consumidores, bem como a interrupção no fornecimento de energia elétrica da menor carga possível (3).

Segundo (3), os sistemas de proteção dos sistemas de distribuição de energia devem atender a alguns requisitos, tais como a seletividade, a rapidez, a sensibilidade, a segurança e a economia. Todos os requisitos técnicos citados estão diretamente relacionados com a detecção de faltas. A detecção e o diagnóstico correto de uma falha irão determinar o grau de sensibilidade, segurança e seletividade do sistema. O tempo em que a falha é detectada, adicionado do período de abertura de chaves e disjuntores, determina a velocidade de operação do sistema de proteção. Desta forma, a detecção de faltas é a peça fundamental dos sistemas de proteção dos sistemas de distribuição de energia, sendo responsável pela resposta do sistema durante uma falha.

A técnica mais comum para a proteção dos sistemas elétricos envolve a utilização de diferentes filosofias de proteção e equipamentos eletromecânicos de proteção, visando o funcionamento ótimo do sistema (4). O grande problema é que não é sempre possível executar uma sintonia adequada do sistema de proteção como um todo devido às limitações dos equipamentos, assim, o sistema de proteção, mesmo que bem projetado, pode

(*) Av. Osvaldo Aranha, 103 – Sala 116 – CEP 90035-190 Porto Alegre, RS – Brasil
Telefone: (+55 51) 9988-3400 – E-mail: salim@ece.ufrgs.br

apresentar casos de operações indevidas em algumas situações. Ainda, outros fatores desconhecidos durante o projeto do sistema de proteção, como a resistência da falta, possuem uma influência nos transitórios eletromagnéticos que não pode ser desprezado, limitando os resultados obtidos com estes sistemas de proteção.

Com o avanço da tecnologia de microprocessadores e a diminuição do seu custo de fabricação, verifica-se hoje a utilização cada vez maior de sistemas de proteção digitais para sistemas elétricos de potência (5). Baseado nisso, diversas técnicas de detecção de falhas utilizam a consagrada DFT (Transformada Discreta de Fourier) para a análise dos sinais de corrente e tensão, visando a detecção de faltas. Entretanto, na análise de Fourier a resolução temporal é perdida em detrimento da resolução em frequência. Logo, os sistemas de proteção utilizando a DFT estão cada vez mais limitados, devido à necessidade crescente de precisão na detecção de faltas.

Contudo, diversas técnicas baseadas na análise em frequência utilizando a transformada wavelet foram desenvolvidas nos últimos anos (6)–(8), mostrando a robustez deste tipo de análise para esta aplicação, tornando tecnicamente viável a utilização de sistemas de proteção digitais com graus de confiabilidade e segurança maiores do que os sistemas baseados na análise de Fourier. A transformada wavelet agrega variáveis de controle à análise, sendo possível uma identificação não só das frequências envolvidas no sinal avaliado como também uma identificação temporal do instante em que estas frequências ocorrem, com uma precisão elevada.

Utilizando esta técnica robusta de processamento digital de sinais o presente trabalho busca desenvolver uma nova metodologia de detecção de falhas para sistemas elétricos de potência de transmissão, subtransmissão e distribuição de energia elétrica.

Na segunda seção a transformada wavelet discreta é apresentada, enquanto na terceira seção são introduzidos os fenômenos de transitórios eletromagnéticos causados pelas faltas. Na quarta seção a metodologia de detecção de faltas é apresentada. A validação da metodologia e as conclusões são apresentadas respectivamente nos capítulos cinco e seis.

2.0 - TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA

A análise em frequência de sinais discretos é normalmente executada através de transformações baseadas na Transformada de Fourier (TF), como a DFT (*Discrete Wavelet Transform*) e a WDFT (*Windowed Discrete Fourier Transform*, Transformada de Fourier com Janelamento).

Sabe-se que a DFT possui uma alta resolução em frequência em decorrência de sua baixa resolução temporal, problema que pode ser parcialmente contornado através da utilização da WDFT. A diferença entre a DFT e a WDFT é que a WDFT utiliza uma janela para executar a transformação entre o tempo e a frequência (9). Nesta transformada, a janela utilizada é previamente definida e possui certo compromisso entre a resolução temporal e em frequência. Entretanto, esta resolução possui precisão limitada, controlada pelo tamanho da janela (9).

A Transformada Wavelet Discreta (TWD) é uma ferramenta para análise em frequência de sinais digitais que funciona como a WDFT, utilizando uma janela para executar a transformação. Entretanto, a janela utilizada pela TWD é variável, sofrendo dilatações e translações durante o processo de transformação do sinal.

A TWD é dada pela equação (1), descrita em (9):

$$(TWD)(m, k) = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_n x[n] \cdot g\left(\frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (1)$$

onde $x[n]$ é um sinal discreto com n coeficientes, $g(\cdot)$ é a função janela, chamada de wavelet, a e b são respectivamente os parâmetros de escala e translação, funções de um parâmetro inteiro m ($a = a_0^m$ e $b = nb_0 a_0^m$, sendo a_0 e b_0 parâmetros constantes). Ainda, k é uma variável inteira que se refere a uma amostra específica do sinal.

A janela utilizada no processo é chamada de wavelet-mãe. Existem diversas wavelet-mães e cada uma possui peculiaridades em relação às outras. No trabalho desenvolvido é necessária detecção de singularidades (definida como uma mudança brusca no espectro de frequências do sinal) com grande precisão. Desta forma, a escolha da wavelet-mãe deve considerar a quantidade de quedas que a mesma possui, pois as wavelets-mãe com um maior número de momentos de queda possuem uma maior precisão na detecção de singularidades (10). Entretanto, um maior número de momento de queda faz com que a wavelet-mãe possua mais amostras, limitando o número de detalhes em que a análise de wavelet pode ser executada, visto que a wavelet-mãe sofre uma dilatação a cada diferente detalhe de análise. Assim, a wavelet-mãe escolhida para o desenvolvimento deste trabalho é a Daubechies8, que apresenta uma melhor relação entre número de coeficientes e momentos de queda (10).

O parâmetro de escala da wavelet origina uma escala logarítmica em frequência, como mostrada na Figura 1 (11), contrapondo-se à escala linear obtida com a WDF. As saídas da TWD são diversos detalhes, cada um correspondendo a uma banda de frequência, como na Figura 1. Quanto maior é o número do detalhe, menor é a banda de frequência. A saída do primeiro detalhe possui $n/2$ amostras e o detalhe d possui $n/2^d$ amostras, visto que para cada banda de frequência analisada pela TWD, ocorre a decimação do sinal original, retornando um total de n amostras para o sinal transformado no domínio de wavelets.

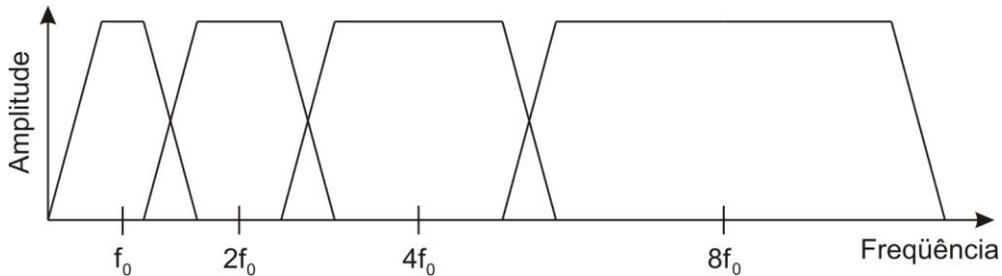


FIGURA 1 – Escala logarítmica em frequência proporcionada pela Transformada Wavelet

Quando ocorre a interpolação dos sinais na base de wavelets, a transformação possui a vantagem de ser invariante no tempo e é chamada de Transformada Wavelet Estacionária (TWE). A desvantagem é que para cada detalhe da transformada existe o mesmo número de amostras do sinal original, aumentando o número de amostras para representar o sinal. Entretanto, para a avaliação direta da energia de cada detalhe é vantajoso que cada detalhe possua o mesmo número de amostras. Assim, a TWE é a ferramenta de análise utilizada neste trabalho.

3.0 - TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS DEVIDO À FALTAS

Faltas são distúrbios comuns em sistemas de potência e este fenômeno é associado a diferentes naturezas, como: ruptura do isolamento, descargas atmosféricas, animais e árvores em contato com equipamentos elétricos, entre outros. Devido a sua natureza estocástica, as faltas são dificilmente evitadas e as suas características em frequência vistas da subestação são também aleatórias e variáveis, dependendo do caso de falta e do sistema.

Diversos aspectos como o local da falta e a sua resistência, o tamanho total da linha, a impedância da linha, sua geometria e o acoplamento mútuo entre as fases podem interferir no espectro de frequências dos dos transitórios induzidos pelas faltas (12)—(13), ocasionando em um espectro de frequências também estocástico, por natureza. Desta forma, os transitórios causados pelas faltas podem variar dentro de um espectro limitado, mas a sua localização exata no espectro de frequências não pode ser conhecida previamente à ocorrência da falta. Esta é a principal motivação para a utilização da transformada wavelet na detecção de faltas ao invés de transformadas baseadas na Análise de Fourier, visto que a wavelet varre uma banda de frequências e não somente uma frequência pontual, como a DFT.

Tipicamente, os transitórios induzidos pelas faltas estão limitados em uma banda de frequências, que corresponde às frequências na faixa de 0.1 Hz à 1 kHz, como mostrado na Figura 2 (13), onde os espectros de frequências de transitórios eletromagnéticos comuns estão definidos.

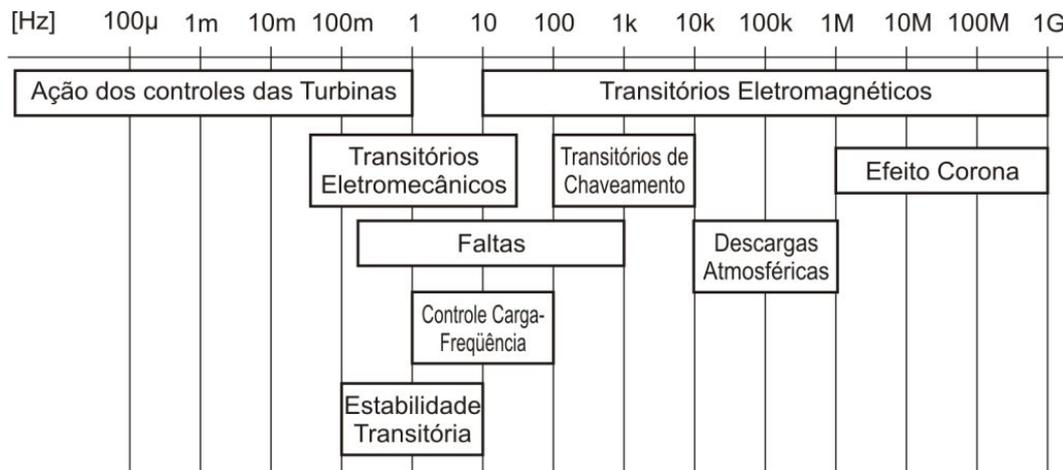


FIGURA 2 – Distribuição das frequências dos transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência

4.0 - METODOLOGIA DE DETECÇÃO DESENVOLVIDA

A metodologia de detecção de faltas desenvolvida é dividida em quatro diferentes processos, discutidos a seguir.

4.1 Extração de Características Base

Cada sistema elétrico existente é diferente dos demais e possui as suas características próprias. Desta forma, é necessário um módulo que extraia características dos sinais de corrente do sistema para que todo o processo de detecção utilize valores relativos a estes.

A informação utilizada para a detecção das faltas é a energia do sinal na faixa de mais alta frequência presente nos sinais de corrente medidos na subestação durante a ocorrência de uma falta. Como já visto anteriormente, durante uma falta aparecem sinais de frequência de até 1 kHz. Assim, a metodologia proposta mede efetivamente a energia das componentes de mais alta frequência desta faixa: 750 Hz – 1 kHz.

Para que a detecção torne-se mais robusta frente a diferentes sistemas, é necessário que o parâmetro que indica a variação mínima detectável na energia desta faixa de frequências para a determinação da ocorrência de uma falta seja relativo a um valor inicial desta energia, enquanto o sistema está em condições normais de operação. Desta forma, a saída deste processo é um valor de energia que serve de base para a detecção das faltas.

Este módulo é projetado para ser executado em intervalos de tempos determinados ou ainda no instante em que o engenheiro responsável desejar. Este módulo é executado anteriormente ao processo de detecção de faltas e enquanto o sistema opera em regime permanente, visto que serve de base para os cálculos executados no mesmo. As operações realizadas neste módulo podem ser visualizadas na Figura 3.

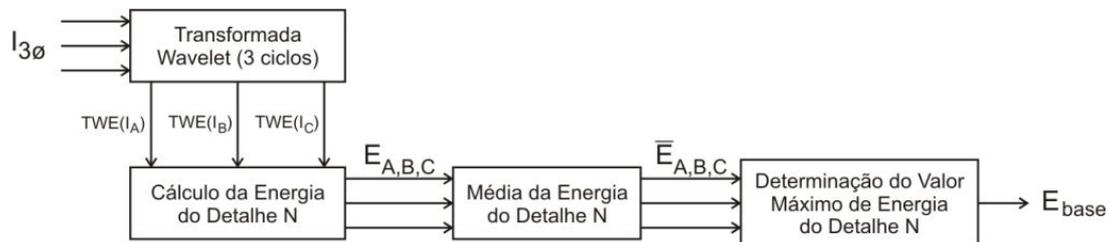


FIGURA 3 – Extração de Características Base

Este módulo realiza inicialmente a transformada wavelet estacionária dos sinais trifásicos de corrente. A TWE é executada em três ciclos dos sinais de corrente, em passos de um quarto de ciclo, com uma janela de um ciclo. A energia de cada uma destas transformadas é calculada para cada fase, mas somente no detalhe referente à faixa de frequências de interesse (750 Hz – 1 kHz).

Logo após é calculada a energia média do sinal para cada ciclo, nesta faixa de frequências. A motivação para este cálculo vem do fato de que, mesmo em regime permanente, a energia dos sinais de corrente pode variar, mesmo que minimamente, para diferentes instantes de tempo e para as diferentes fases.

Após executado o cálculo da energia média na faixa de frequências desejada para cada fase do sistema, é escolhida a energia base, que é a maior das energias médias de cada fase do sistema, em um ciclo. Esta energia base é utilizada como parâmetro de comparação nos módulos subsequentes.

4.2 Extração de Características Online

Após ter determinado valor base da energia do detalhe desejado da wavelet, o algoritmo de detecção tem condições de ser executado. Neste processo, são utilizados os sinais de corrente de um ciclo na frequência fundamental do sistema, que, no caso do Brasil, é de 60 Hz. A energia do detalhe de interesse (750 Hz – 1 kHz) da TWE é calculada e posteriormente normalizada pela energia base determinada no processo anterior. A Figura 4 exemplifica graficamente o módulo de extração de características on-line.

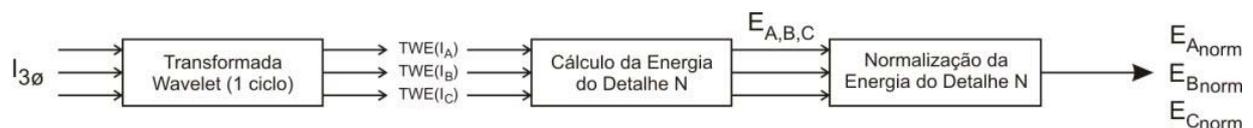


FIGURA 4 – Extração de Características Online

As saídas deste módulo são as energias do detalhe de interesse dos sinais de corrente das três fases do sistema (A, B e C). Estas saídas entram diretamente no módulo de detecção da falta e classificação da fase envolvida no distúrbio.

4.3 Determinação da Ocorrência de Falta e Classificação

Este módulo utiliza a energia normalizada do detalhe de interesse da corrente trifásica medida no ponto de instalação do relé. O diagrama que mostra a seqüência de passos deste processo está esquematizado na Figura 5.

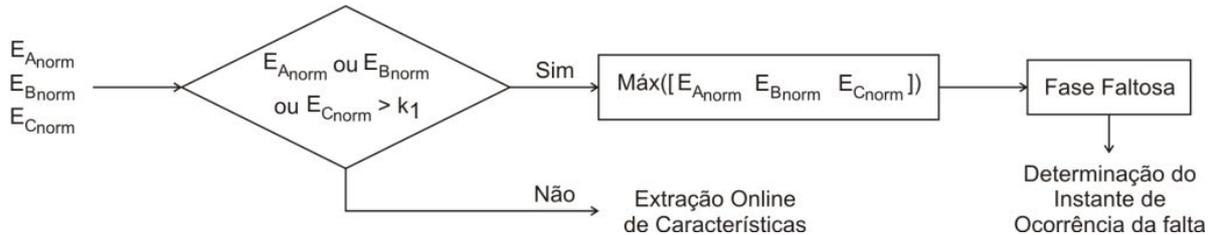


FIGURA 5 – Determinação da Ocorrência de Faltas e Classificação da Fase Faltosa

Neste processo as energias normalizadas são diretamente comparadas com um valor limite. Caso a energia normalizada de qualquer uma das fases ultrapasse este valor mínimo, denominado *índice mínimo de detecção*, k_1 , ocorre a detecção de uma falta. Este valor mínimo deve ser determinado de acordo com os critérios do engenheiro de proteção.

Em alguns sistemas, cargas elevadas podem entrar no sistema, fazendo com que o sistema de proteção atue erroneamente devido a uma detecção errada. Neste caso, o engenheiro de proteção talvez necessite configurar o índice mínimo de detecção de forma que a energia normalizada do detalhe de interesse durante a entrada da carga crítica no sistema não ultrapasse o índice mínimo de detecção.

Neste caso, a detecção para faltas com resistências mais elevadas pode estar comprometida, visto que nas faltas com maior resistência são geradas componentes de alta frequência com menor amplitude (atenuadas). O mesmo ocorre para faltas ao final do alimentador. Para faltas nestas localidades, a atenuação das componentes de alta frequência faz com que estas componentes cheguem ao local de medição com um valor bastante inferior às componentes geradas por faltas próximas ao local de medição. Logo, faltas localizadas ao final do alimentador e com valores elevados de resistência provavelmente poderiam não ser detectados.

O projeto do índice mínimo de detecção ainda pode levar em consideração diversos outros parâmetros, como a ocorrência freqüente de faltas com a mesma característica em um dado alimentador ou ramal do sistema de distribuição, entre outros. Este índice é um parâmetro do sistema de proteção e a sua determinação é função do engenheiro de proteção, que deve levar em consideração os parâmetros e características únicas do sistema a ser protegido. O uso de simulações na fase de projeto deste índice é maciçamente estimulado, visto que a topologia dos sistemas elétricos tende a ser extremamente complexa, sendo as simulações com modelos coerentes extremamente úteis para o engenheiro de proteção.

A detecção da ocorrência da falta ocorre indiferente da fase faltosa. Para determinar a fase faltosa, é utilizada a informação da energia relativa do detalhe de interesse mais elevada dentre as fases do sistema. A fase que possui a maior energia nesta faixa de frequências é determinada como a fase faltosa. A classificação da fase faltosa é executada desta forma visto que as faltas fase-terra são faltas monofásicas, produzindo componentes de alta frequência somente na fase em falta. A aparição de sinais de alta frequência nas outras fases ocorre devido ao acoplamento existente entre as fases do sistema nas linhas de transmissão e distribuição.

4.4 Determinação do Instante de Ocorrência da Falta

O processo de determinação do instante de ocorrência da falta executa uma varredura nas N componentes do detalhe de interesse d da TWE da corrente da fase faltosa, como mostrado na Figura 6. Nesta varredura, o valor que a transformada assume é comparado com um valor limite, k_2 , denominado de *índice mínimo instantâneo*. A primeira componente que possuir valor mais elevado do que o índice mínimo instantâneo, é dita determinante do instante de ocorrência da falta.

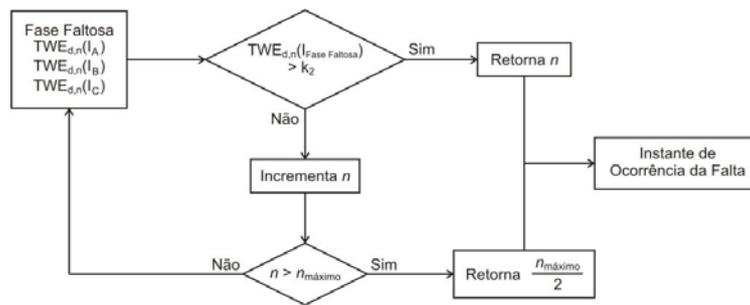


FIGURA 6 – Determinação do Instante de Ocorrência da Falta

A motivação para a utilização desta metodologia para o processo de determinação do instante de ocorrência da falta vem do fato que as componentes do detalhe de interesse assumem valores muito próximos de zero quando o sistema opera em regime permanente. Quando ocorre uma falha no sistema, estas componentes têm sua magnitude aumentada. A ocorrência da falta causa uma elevação instantânea nas componentes dos detalhes de mais elevada frequência, o que não ocorre nos detalhes que correspondem às baixas frequências.

A utilização de um valor baixo para k_2 não interfere no processo de detecção de faltas, visto que este processo só é executado após a falta ter sido detectada. Desta forma, não há como o algoritmo de detecção acusar a ocorrência de uma falta devido a um valor extremamente baixo atribuído para o índice mínimo instantâneo (k_2), pois o processo de detecção de faltas utiliza somente o índice mínimo de detecção (k_1), bem como as características extraídas do sinal.

Se de alguma forma na falta detectada não tiver sido possível a determinação do instante de ocorrência da falta, o algoritmo retorna o instante de tempo que corresponde ao instante mediano de tempo do sinal analisado, ou seja, no instante de tempo que corresponde à metade do ciclo analisado. Desta forma, o erro será mínimo, pois as amostras de sinais utilizadas são de um ciclo completo, com passos de um quarto de ciclo.

5.0 - ESTUDO DE CASO

Para demonstrar a eficiência do algoritmo proposto, faltas foram simuladas utilizando o software ATP/EMTP em um sistema de distribuição de energia elétrica. O sistema utilizado é o sistema de estudos IEEE 37 barras (14). Este sistema é um sistema de distribuição subterrâneo, com cargas altamente desbalanceadas e com assimetria nas linhas, com cargas todas em ligação delta. Sua classe de tensão é de 4.8 kV. Foram utilizadas 192 amostras por ciclo, conferindo uma frequência de amostragem de 11520 Hz. Assim, utilizando a wavelet mãe do tipo *Daubechies8*, podemos determinar que o detalhe de interesse é o terceiro, possuindo uma frequência central de aproximadamente 960 Hz, cobrindo a banda de frequências mais elevadas dos transitórios ocasionados pelas faltas.

Foram simuladas faltas A-terra em 103 diferentes pontos do sistema de estudo, com resistências de $R_F = 0, 10, 20, 50$ e 100Ω , totalizando 515 simulações. Através destas simulações os valores de k_1 e k_2 foram projetados, de forma que o sistema de detecção sempre atuasse na presença de faltas. Para cada caso de falta, a transformada wavelet foi executada nos sinais de corrente e a energia do detalhe de interesse foi calculada. Os resultados estão mostrados na Tabela 1.

TABELA 1 – Energia Calculada Para Cada Detalhe nos Sinais Trifásicos de Corrente

	Fase A				Fase B				Fase C			
	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄
Regime Permanente												
Mín.	0.004	0.011	0.040	0.167	0	0	0.001	0.008	0.003	0.008	0.031	0.133
Máx.	0.004	0.011	0.042	0.168	0	0	0.002	0.009	0.003	0.008	0.033	0.133
Média	0.004	0.011	0.040	0.168	0	0	0.001	0.008	0.003	0.008	0.032	0.133
1ª Janela Pós-Falta												
Mín.	0.004	0.011	0.040	0.194	0	0	0.001	0.042	0.003	0.008	0.031	0.133
Máx.	78.00	616.4	62.08	180.8	21.68	141.0	15.22	45.26	20.92	167.8	15.83	48.34
Média	4.221	27.90	4.451	11.39	1.049	6.771	1.127	2.922	1.134	7.483	1.111	2.992
4ª Janela Pós-Falta												
Mín.	0.005	0.011	111.5	28.07	0	0	40.54	5.157	0.003	0.009	17.61	9.210
Máx.	69.4k	64.9k	970.5	786.4	17.8k	15.8k	246.0	196.8	16.9k	16.7k	239.8	211.3
Média	1155	6226	502.1	382.7	279.2	1519	130.4	95.49	308.3	1594	120.7	95.94

Através da Tabela 1, pode-se verificar que a escolha pelo terceiro detalhe de interesse foi a correta, visto que é o detalhe que possui o maior aumento de energia nos sinais de corrente quando da ocorrência de uma falta. Para projetar o valor de k_1 , foi considerada a relação entre o valor máximo da energia do detalhe de interesse (3) do sinal de corrente da fase faltosa (A) em regime permanente e o valor mínimo da energia do mesmo detalhe do mesmo sinal de corrente na 4ª janela pós-falta, que é a janela que possui o sinal em seu primeiro ciclo pós falta, visto que a metodologia utiliza passos de $\frac{1}{4}$ de ciclo e uma janela de 1 ciclo. Com estes valores, k_1 foi projetado para $k_1=500$.

Já o índice mínimo instantâneo é um parâmetro menos crítico, que deve considerar o valor mínimo dos coeficientes no detalhe de interesse da transformada wavelet dos sinais analisados. Através da análise em (15), pode-se determinar o valor de k_2 para $k_2=10$.

Com k_1 e k_2 projetados, foram simuladas faltas A-terra, B-terra e C-terra com resistências mais elevadas, de $R_F = 500, 1000, 1500$ e 2000Ω , para os mesmos 103 pontos de falta, totalizando 2781 casos de falta, de forma a validar a metodologia proposta. Na Tabela 2 estão mostrados os acertos percentuais para a detecção de faltas, a determinação da fase faltosa e para a determinação do instante de ocorrência da falta, com uma tolerância de $\pm\frac{1}{4}$ de ciclo.

TABELA 2 – Resultados Obtidos

R_F [Ω]	Falta A-terra			Falta B-terra			Falta C-terra		
	Detecção [%]	Fase [%]	Instante [%]	Detecção [%]	Fase [%]	Instante [%]	Detecção [%]	Fase [%]	Instante [%]
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100
10	100	100	100	100	100	100	100	100	100
20	100	100	100	100	100	100	100	100	100
50	100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
500	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1000	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1500	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2000	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Através dos resultados, é possível observar que para todos os casos de falta estudados a metodologia proposta de detecção de faltas executou todas as operações corretamente, detectando a presença da falta, determinando a fase faltosa corretamente e também o instante de ocorrência da falta, independente da resistência da falta. Os resultados mostram que a utilização da transformada wavelet através da análise multiresolução proporciona uma grande robustez frente à resistência de falta, que dificilmente poderia ser obtida através de algoritmos baseados na transformada de Fourier ou ainda equipamentos de proteção eletromecânicos.

6.0 - CONCLUSÕES

As recentes mudanças operacionais e gerenciais ocorridas no setor elétrico brasileiro e mundial tornaram necessária uma melhor qualidade da energia entregue aos seus consumidores, sob pena de perda de mercado consumidor. Neste aspecto, a detecção segura e confiável das faltas tornou-se imprescindível e o presente trabalho apresentou uma nova técnica para a detecção de faltas em sistemas de distribuição dentro deste novo contexto. A utilização de novas ferramentas de análise como a transformada wavelet, possibilitou a correta detecção das faltas em diversos casos estudados, bem como a fase faltosa e o instante de ocorrência da falta, mostrando-se eficiente e robusta frente à resistência e o local da falta. A metodologia proposta baseia-se no estado de operação do sistema, conforme a configuração adotada de atualização dos parâmetros do relé. Assim, é possível obter uma certa melhoria nos resultados para os diferentes carregamentos do sistema.

O atual desenvolvimento de tecnologias digitais auxiliam o processo de proteção dos sistemas elétricos de potência, através do desenvolvimento de novas ferramentas capazes de melhorar o desempenho dos mesmos. A utilização da transformada wavelet como ferramenta de análise mostrou-se bastante-se robusta, sendo possível a análise de todo o espectro do sistema. Desta forma, tem-se uma fotografia altamente fiel do sistema, em termos das componentes de frequência observadas.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Agência Nacional de Energia Elétrica – Resolução ANEEL N°. 24 – 2000.
- (2) Agência Nacional de Energia Elétrica – Resolução ANEEL N°. 75 – 2003.
- (3) GIGUER, S. – “Proteção de Sistemas de Distribuição” – Editora Sagra. Porto Alegre, RS, 1988.
- (4) HOROWITZ, S. H.; PHADKE, A. G. – “Power system Relaying” – Research Studies Press. Baldock, Inglaterra, 1995.
- (5) PHADKE, A. G.; THORP, J. S. – “Computer Relaying For Power Systems” - Research Studies Press. Baldock, Inglaterra, 1988.
- (6) ROBERTSON, D. C.; CAMPS, O. I.; MAYER, J. S.; GISH, W. B. – "Wavelets and Electromagnetic Power System Transients" – IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, pp. 1050-1058, Abril 1996.
- (7) ZHAO, W.; SONG, Y. H.; MIN, Y. – "Wavelet Analysis Based Scheme for Fault Detection and Classification in Underground Power Cable Systems" – Electric Power Systems Research, vol. 53, pp. 23-30, Janeiro 2000.
- (8) XINZHOU, D.; YAOZHONG, G.; BINGYIN, X. – "Fault position relay based on current travelling waves and wavelets" – IEEE Power Engineering Society Winter Meeting 2000, pp. 1997-2004.
- (9) AGGARWAL, R.; KIM, C. H. – "Wavelet Transforms in Power Systems: Part 1 - General Introduction to the Wavelet Transforms" – Power Engineering Journal, vol. 14, pp. 81-87, Abril 2000.
- (10) MALLAT, S. – “A Wavelet Tour Of Signal Processing” – Academic Press. California, EUA, 1999.
- (11) RIOUL, O.; VETTERLI, M. – "Wavelets and Signal Processing" – IEEE Signal Processing Magazine, vol. 8, pp. 14-38, Outubro 1991.
- (12) SWIFT, G. W. – "The Spectra of Fault-Induced Transients" – IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, pp. 940-947, Maio 1979.
- (13) D’AJUZ, A. et alii – “Transitórios Elétricos e Coordenação do Isolamento: Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão” – FURNAS Centrais Elétricas S. A. Rio de Janeiro, Brasil, 1987.
- (14) KERSTING, W. – "Radial Distribution Test Feeders" – IEEE Power Engineering Society Winter Meeting 2001, pp. 908-912.
- (15) SALIM, R. H. – “Detecção de Falhas em Sistemas de Distribuição Utilizando a Transformada Wavelet” – Projeto de Diplomação Submetido à Universidade Federal do Rio Grande do Sul para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, 2006.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Rodrigo Hartstein Salim

Nascido em Porto Alegre, RS, em 15 de setembro de 1983.

Graduação (2006) em Engenharia Elétrica: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Mestrando em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul desde 2007.

Karen Rezende Caino de Oliveira

Nascida em Aracaju, SE, em 18 de dezembro de 1984.

Aluna de graduação da Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Rio Grande do Sul desde 2003.

Arturo Suman Bretas

Nascido em Baurú, SP, em 05 de julho de 1972.

Graduação (1995) e Mestrado (1998) em Engenharia Elétrica: USP-EESC.

Doutorado (2001) em Engenharia Elétrica: Virginia Tech, Blacksburg, USA.

Pós-Doutorado (2004) em Engenharia Elétrica: Institut National Polytechnique de Grenoble, França.

Professor Adjunto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul desde 2001.