

PROPOSIÇÃO DE UMA NOVA TÉCNICA DE DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Mauricio de Campos¹, Paulo S. Sausen¹, Alexandre C. Oliveira², Antônio Marcus N. Lima²

¹UNIJUI, Universidade regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí – RS, Brasil

²UFCG, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, Brasil

e-mail: {decampos.mauricio, paulosausen}@gmail.com, {aco, amnlima}@dee.ufcg.edu.br

Resumo – De uma forma geral, todos os sistemas elétricos estão susceptíveis a falhas. No contexto das falhas, as faltas de alta impedância são as de maior dificuldade de detecção e as com maior risco de morte a população, devido ao fato dos circuitos continuarem energizados. Muitas técnicas têm sido avaliadas com o objetivo de detectar de forma efetiva as faltas de alta impedância, contudo, o uso das técnicas individualmente demonstram algumas imprecisões, quer seja por não detectarem as faltas sob determinadas condições de ocorrência das mesmas, quer seja por interpretarem eventos próprios da operação dos sistemas elétricos como sendo faltas. Este trabalho se propõe a contribuir com o estudo de detecção de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia elétrica, combinando uma técnica baseada na observação dos harmônicos de baixa ordem de sequência negativa, com uma técnica baseada em Wavelets. O resultado da combinação demonstrou melhor desempenho se comparado ao uso individual de cada uma das técnicas, tendo sido possível identificar claramente a condição de falta em todos os cenários estudados, isolando-se os eventos corriqueiros de operação do sistema.

Palavras-Chave – Faltas de Alta Impedância, Sistema de Distribuição, Wavelets.

PROPOSAL FOR A NEW TECHNIQUE FOR DETECTION OF HIGH IMPEDANCE FAULTS IN ELECTRICAL DISTRIBUTION SYSTEMS

Abstract – In general all electrical systems are susceptible to failure. In the context of failure, high impedance faults are the most difficult detection and with higher risk of death in population due to the fact that the circuits remain energized. Many techniques have been performed with the objective of detect effectively the high impedance faults, however, the use of techniques individually demonstrate some inaccuracies, whether by not detect the faults of the same determined occurrence of conditions, whether by interpreting events own operation of electrical systems as faults. This paper objectives to contribute to the study of detection of high

impedance faults in power distribution systems, combining a technique based on the observation of low negative sequence order harmonics, with a technique based on wavelets. The result of the combination demonstrated better performance compared to the individual use of each techniques, it was possible to clearly identify the fault condition in all scenarios studied, isolating the ordinary events of system operation.

Keywords – High Impedance Faults, Power Systems, Wavelets.

I. INTRODUÇÃO

De uma forma geral, todos os sistemas elétricos estão susceptíveis a falhas. Uma falha em um sistema de potência é caracterizada por uma condição anormal, que envolve um defeito elétrico na operação de algum tipo de equipamento, em uma das tensões primárias do sistema [1].

A distribuição da energia elétrica no Brasil, se faz, quase na sua totalidade, através de ramais aéreos alimentados em classe de tensões de 15kV ou 23 kV. Este modelo de Rede de Distribuição de Energia (RDE), foi concebido na década de 40 do século XX e apresenta, atualmente, saturações tecnológicas e baixo nível de confiabilidade, quando comparado a outros modelos de distribuição. A ocorrência de uma falha mecânica em um condutor ou no sistema de fixação deste ao poste, nesse tipo de sistema de distribuição de energia elétrica, expõe a população da área em que o mesmo está situado a uma condição de risco de acidentes com potencial de fatalidade elevado.

Existem faltas que não são vistas pelo sistema de proteção, como por exemplo, a causada por galhos de árvores que tocam a rede elétrica ou ainda um rompimento de cabo sob uma superfície isolante tal como asfalto. As faltas que não interferem na continuidade de operação, geram singularidades transitórias na RDE que comprometem desde a qualidade de energia entregue aos consumidores até a possibilidade de óbito e num futuro acarretar o desligamento parcial ou total da RDE.

Para as falhas que apresentam um incremento no fluxo de corrente de um sistema, já existem diversos dispositivos de proteção disponíveis [2]. Quanto maior a corrente de falta mais fácil é a detecção da falha. Entretanto as faltas que provocam baixos fluxos de corrente (*Low Current Fault - LCF*) também conhecidas como faltas de alta impedância (*High Impedance Fault - HIF*) se apresentam ainda como um desafio e não podem ser detectadas pelos métodos

Artigo submetido em 24/01/2016. Primeira revisão em 26/02/2016. Aceito para publicação em 15/04/2016 por recomendação do Editor Marcelo Cabral Cavalcanti.

tradicionais. Estas são falta cujos valores de corrente, nos alimentadores da distribuição, ficam abaixo dos valores de partida dos relés de sobrecorrente tradicionais.

A preocupação sobre o tema não é recente, em 1949 o Power Systems Relaying Committee Working Group (PSRC), concluiu ser impossível, naquele momento, desenvolver técnicas para detecção de faltas de alta impedância [3].

Em 1996 foram apresentados resultados experimentais da emulação de algumas faltas para alimentadores de distribuição com tensões de 12,5kV, que, apesar de não representarem o padrão brasileiro, podem permitir uma noção da intensidade das mesmas. Neste estudo, um cabo desta magnitude de tensão, tocando o asfalto seco, provoca um curto imperceptível de 0A. Já o contato com solo ou vegetação secos, 20A e úmidos, 40A. Chegando a alcançar 75A em uma superfície de concreto reforçado [4].

Em diversos estudos realizados a partir de testes preparados para simulação e análise das HIFs dos sistemas de distribuição aterrados, os pesquisadores registraram magnitudes das correntes de falta, variando de zero a menos de 100 Ampéres [5].

Em sistema de redes inteligentes, imaginando um cenário com diversos sistemas de geração distribuída, onde os fluxos de potência são bidirecionais, o desligamento de um determinado trecho passa a se tornar uma tarefa complexa. Neste contexto, a informação mais importante é identificar rápida e precisamente que um circuito está operando em condição de falta. Desta forma, é possível atuar imediatamente desligando o mesmo e informar esta condição ao centro de operações do sistema. Na literatura temos diversos estudos que objetivam solucionar este problema. No entanto não existe até o momento uma solução definitiva para o mesmo.

As técnicas de detecção de HIF's podem ser divididas em técnicas passivas, que se baseiam em uma assinatura de falta a ser identificada por um sistema de instrumentação e algoritmos de detecção, e técnicas ativas, que procuram identificar condições de falta através de sinais de alta frequência injetados no sistema elétrico.

Existe um conjunto de técnicas passivas que utilizam métodos mais simples de detecção de faltas, como por exemplo, análise de harmônicos de baixa ordem. Há também métodos mais complexos que utilizam redes neurais artificiais, transformada de Wavelets, entre outras. Apesar de todas estas técnicas funcionarem adequadamente, quando submetidas a sistemas complexos e cenários iguais, todas apresentam deficiências.

Este trabalho apresenta a comparação de um conjunto de técnicas passivas, sendo testadas e comparadas sob as mesmas condições em um sistema de distribuição que reproduz um sistema real. A partir destes resultados pôde-se observar as deficiências destes métodos e principalmente suas limitações. Com o objetivo de contribuir com os avanços neste tema, é proposta uma nova metodologia de detecção de faltas combinando as técnicas baseadas em análise da terceira harmônica de sequência negativa com a Transformada de Wavelets. Esta combinação permite potencializar o desempenho das técnicas individuais, aumentado, significativamente, a precisão da detecção da

falta.

As próximas seções deste artigo estão organizadas como segue: na seção 2 é apresentado o modelo do sistema de distribuição utilizado neste trabalho bem como as técnicas passivas de detecção de HIF avaliadas. Na seção 3 será apresentado um estudo comparativo entre as técnicas, submetidas a 3 cenários de aplicação de distúrbios e faltas. Em todas as análises foi usado o mesmo modelo de sistema de distribuição. Uma nova proposta de combinação de técnicas passivas é descrita na seção 4, sendo apresentados os resultados e análises de aplicação da técnica aos mesmos cenários de distúrbios e faltas descritos na seção 3. Por fim, tem-se na seção 5 as considerações finais.

II. SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO E TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

Em [2] é apresentado um modelo de sistema de distribuição de energia elétrica (Figura 1).

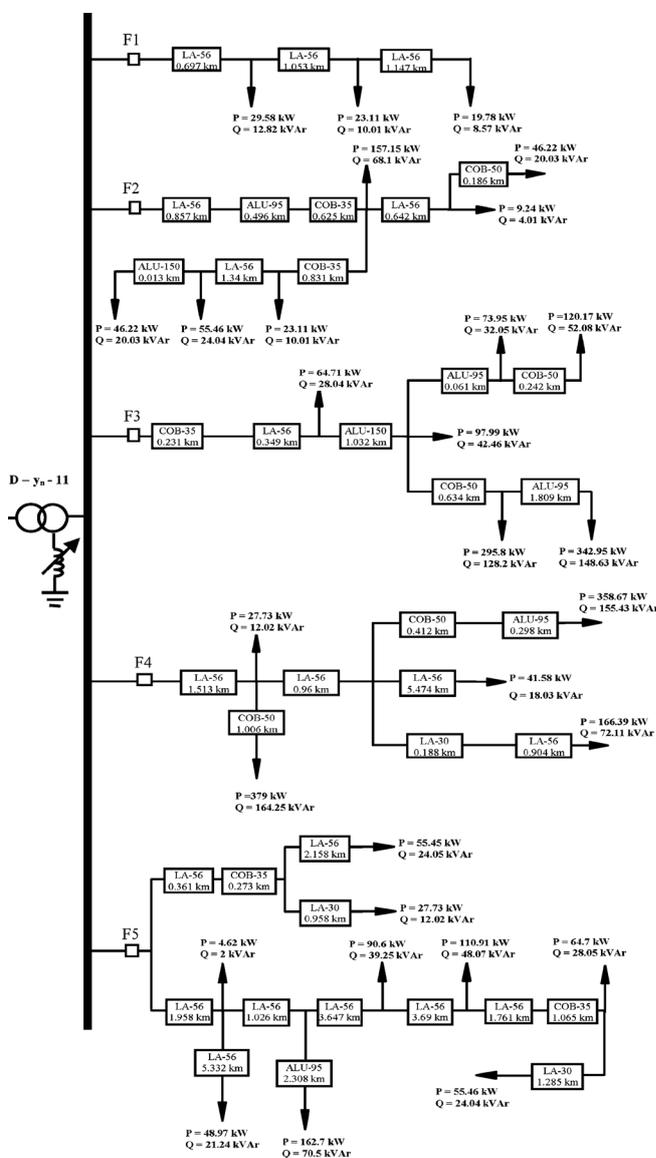


Fig. 1. Modelo de um sistema de distribuição adaptado às características do sistema brasileiro [2].

Este modelo foi simulado no Matlab® com algumas alterações para torná-lo mais semelhante ao sistema elétrico típico brasileiro. São elas, a substituição dos ramais subterrâneos por ramais aéreos, tornando-se então 44,3km de ramais aéreos (onde todos os cabos isolados foram substituídos por cabos de alumínio), e ainda o transformador foi alterado para que fosse considerada uma relação de transformação de 69/13,8kV.

Existem diversas técnicas propostas para a detecção de faltas de alta impedância na literatura. Para este trabalho, foram escolhidas algumas delas para que fosse realizada uma comparação entre o seu desempenho, utilizando como base o modelo de sistema elétrico apresentado por Zamora [2]. Para escolha destes métodos, foram utilizados os seguintes critérios: dois métodos que apresentam o melhor resultado nos artigos científicos numa vasta gama de aplicações (Transformada de Wavelet e Redes Neurais Artificiais). Conforme pode ser observado em [7], estes métodos continuam sendo pesquisados, pois apresentam bom desempenho para este fim. Em [7] uma rede neural também auxilia a classificação de eventos de faltas, apresentando bons resultados, mas, tal como nos demais trabalhos, o cenário de testes é restrito. Dois métodos baseados na facilidade de implementação (método de componentes de baixa frequência em sequência zero e método de componentes de baixa frequência em sequência negativa). Estes métodos foram os primeiros desenvolvidos e estudados, sendo, ainda, os mais utilizados em dispositivos comercialmente vendidos para este fim.

No trabalho [8], variações de pequena ordem e desbalanceamentos, foram estudados com o objetivo de detectar essas faltas. Por fim, em [9], é proposta uma variação da aplicação de redes neurais, baseadas em três variações de uma rede *feedforward* que combinadas apresentam uma melhor precisão na detecção de faltas. No entanto, esta nova rede não é combinada com nenhuma outra técnica.

III. CENÁRIOS DE TESTES E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para a realização deste estudo, foram criados três cenários. Cada um deles apresenta duas faltas de alta impedância transitórias. Alguns deles ainda apresentam a inserção de eventos comuns do sistema (i.e. banco de capacitores, variação de carga no sistema), para verificar a capacidade das técnicas em diferenciar tais eventos de faltas de alta impedância. Em todos os cenários foi utilizado o sistema apresentado na Figura 1.

A. Primeiro Cenário

No primeiro cenário, foram aplicadas duas faltas de alta impedância distantes da subestação. A primeira no final do ramal 1, próximo a última carga, iniciando em 0,6 segundos com duração de 0,1 segundos. A segunda falta no final do ramal 3, iniciando em 1,2 segundos, com duração de 0,2 segundos. Também foi adicionado um evento considerado normal ao sistema, caracterizando o chaveamento de um banco de capacitores no final do ramal 2 em 1,9 segundos.

Simulando o circuito apresentado temos na Figura 2 as correntes do sistema durante todo o período de simulação.

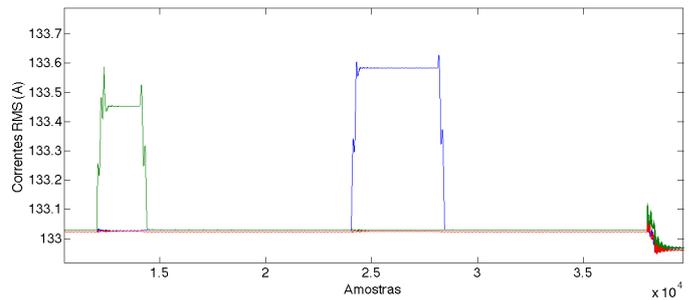


Fig. 2. Correntes RMS do sistema nas condições do cenário 1.

Em regime, as correntes normais do sistema têm aproximadamente 133A. A alteração no nível de corrente é típica de uma falta de alta impedância com variações na ordem de 0,5A (que representa menos de 0,4 % da corrente nominal). Já o chaveamento do banco de capacitores apresenta variação de corrente ainda menor, entretanto, pode-se observar um significativo incremento no conteúdo em alta frequência.

Para este cenário foi aplicada a Transformada de Wavelet (TW) do tipo Ortogonal, com filtro digital FIR (*Finite Impulse Response*) do tipo Daubechies de Terceira Ordem (db3), produzindo o resultado apresentado na Figura 3.

Conforme se pode observar, a Transformada de Wavelet consegue perceber o instante inicial de cada uma das faltas. Entretanto, o chaveamento de um banco de capacitores é percebido, ainda com mais intensidade e com uma resposta muito semelhante à resposta da TW ao distúrbio característico de uma falta.

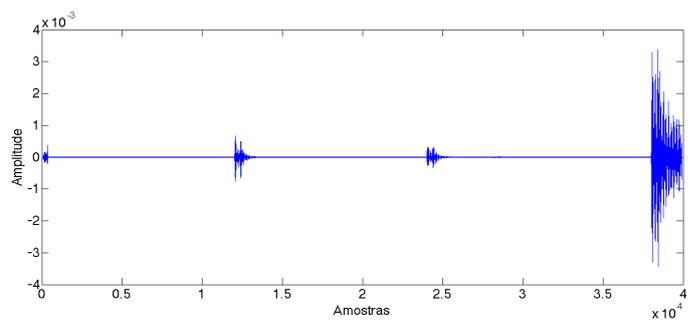


Fig. 3 - Resultado da Transformada de Wavelet para o cenário 1.

Como segundo método proposto, foi empregada a técnica de detecção utilizando uma Rede Neural Artificial (RNA). Neste caso, foi utilizada uma rede com duas camadas (layers) do tipo rede direta (*feedforward*). Esta RNA foi treinada utilizando como base os dados deste primeiro cenário. Foi definida a resposta igual a zero para condição de funcionamento normal e igual a um para detecção de falta. Os resultados obtidos (Fig. 4), indicam a detecção das faltas e sua duração, contudo, observa-se um sinal significativo relativo a perturbação causada pelo evento normal do sistema.

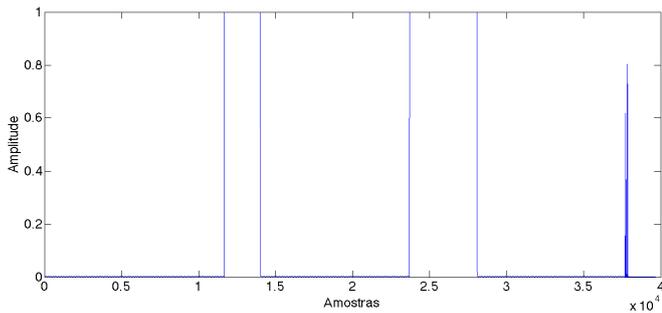


Fig. 4. Aplicação da técnica de RNA - cenário 1.

O terceiro método, utilizando harmônicos não característicos de sequência zero, analisa os sinais resultantes da segunda harmônica do sistema. Esta técnica é citada na literatura por ser mais imune aos eventos normais do sistema. O resultado desta pode ser observado na Figura 5.

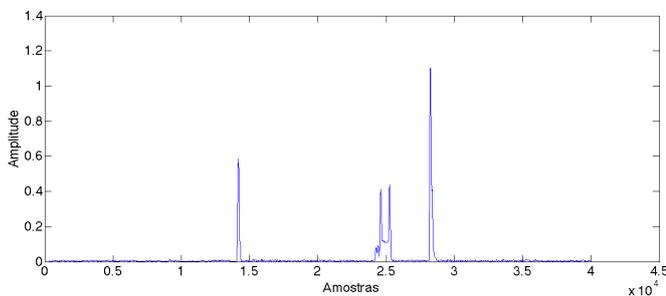


Fig. 5. Harmônicos não característicos de sequência zero - cenário 1.

Pode-se observar que para a primeira falta a técnica é sensível apenas ao instante final da falta, não percebendo seu início. Já a segunda falta é percebida com boa precisão. Ainda, o chaveamento do banco de capacitores não é percebido neste caso.

A técnica que utiliza harmônicos de baixa ordem de sequência negativa, para a detecção de faltas de alta impedância, foi implementada como o quarto método deste estudo. Na literatura esta técnica é defendida por conseguir perceber variações instantâneas e desbalanceamento de correntes em um sistema trifásico. Na Figura 6, os resultados desta técnica são apresentados.

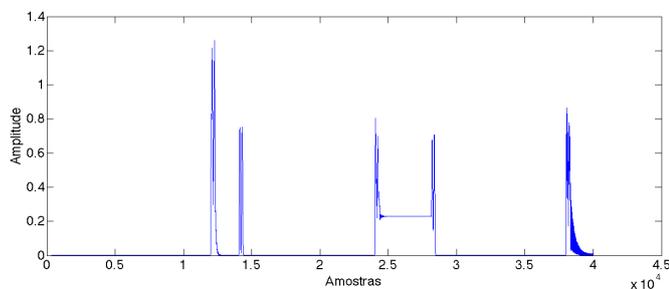


Fig. 6. Harmônicos de baixa ordem de sequência negativa - cenário 1.

Neste caso, a técnica percebeu ambas as faltas, mas foi bastante sensível também para o chaveamento do banco de capacitores.

B. Segundo Cenário

Neste segundo cenário, foram aplicadas três faltas de alta impedância, todas distantes da subestação no ramal com corrente de valor significativo em comparação com os demais (ramal 5 têm corrente em torno de 28A cerca de aproximadamente 22% do total) e fases distintas. A primeira iniciando em 0,7 segundos com duração de 0,2 segundos, a segunda iniciando em 1,0 segundo com duração de 0,4 segundos e a terceira iniciando em 1,6 segundos com duração de 0,3 segundos. Foi adicionado também um banco de capacitores em uma posição intermediária do ramal 1, o qual é acionado em 0,2 segundos, permanecendo acionado por todo período da simulação.

Na Figura 7 podemos observar os resultados da aplicação da técnica da Transformada de Wavelet.

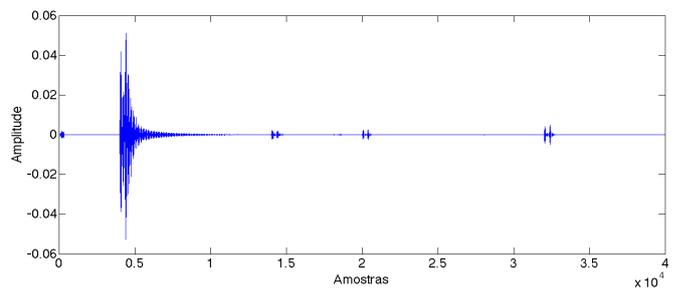


Fig. 7. Resultado da Transformada de Wavelet - cenário 2.

O instante inicial de cada uma das faltas é percebido como nos demais casos pela Transformada de Wavelet. Entretanto o distúrbio provocado pelo chaveamento de um banco de capacitores apresenta variações bastante significativas.

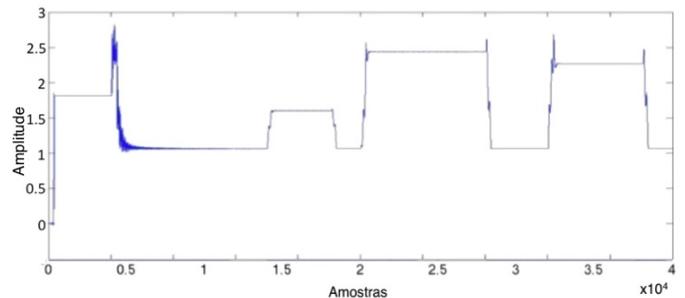


Fig. 8. Resultado da aplicação da RNA no cenário 2.

Na Figura 8 é apresentado o resultado obtido utilizando a técnica de detecção através de uma Rede Neural Artificial (treinada para as condições do primeiro cenário). O que se percebe neste caso é que os valores detectados não convergem para os resultados do treinamento, mesmo assim, as faltas apresentam variações na resposta.

Na Figura 9, pode ser observado o resultado da implementação do terceiro método para este cenário. Esta técnica é muito sensível aos ruídos do sistema e acaba interferindo na real percepção da falta.

Implementando-se a técnica de análise de terceiro harmônico de sequência negativa, para este cenário temos os resultados mostrados na Figura 10.

Neste cenário, esta técnica detecta as faltas adequadamente, no entanto, como nos demais casos, ela foi bastante sensível ao chaveamento do banco de capacitores.

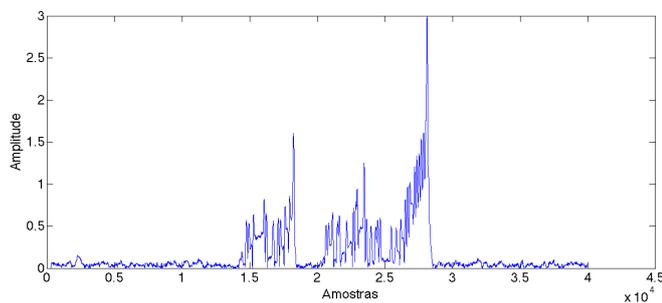


Fig. 9. Harmônicos não característicos sequência zero - cenário 2.

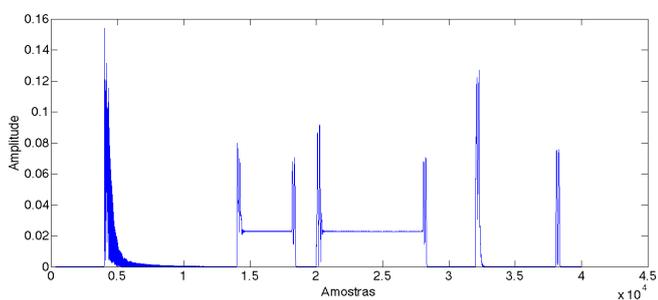


Fig. 10. Harmônicos de baixa ordem sequência negativa - cenário 2.

C. Terceiro Cenário

No terceiro cenário, foram aplicadas duas faltas de alta impedância, uma no ramal 1 e outra no ramal 3. A primeira iniciando em 0,6 segundos, com duração de 0,1 segundos e a segunda iniciando em 1,2 segundos, com duração de 0,2 segundos. Foi adicionado um banco de capacitores no ramal 2, ativado em 1,9 segundos. Também foi aplicada uma variação de carga no ramal 4 do sistema em 1s. Esta variação é bastante significativa, pois tem um nível de corrente de aproximadamente 15A, representando 12% da corrente nominal do sistema completo.

Pode-se observar os resultados da aplicação da técnica da Transformada de Wavelet do tipo Daubechies de Terceira Ordem (db3) no cenário 3 através da Figura 11. O instante inicial de cada uma das faltas é percebido, entretanto, a variação de carga e o acionamento do banco também apresentam uma assinatura neste sinal. Assim, em todas elas, fica difícil a identificação do evento, considerando apenas esta informação.

Utilizando a técnica de detecção através de uma Rede Neural Artificial (treinada a partir das informações geradas pelo primeiro cenário) temos os resultados mostrados na Figura 12. Neste caso, os valores detectados também não convergem para os resultados do treinamento, mesmo assim, as faltas apresentam variações na resposta da mesma forma que no cenário 2.

Realizando o re-treinamento da rede neural, para este caso específico, obtém-se o resultado apresentando na Figura 13, onde podemos observar que as faltas foram detectadas perfeitamente e os eventos normais do sistema apresentam apenas pequenos transitórios.

Para este cenário, pode-se observar o resultado da implementação do terceiro método na Figura 14. Novamente esta técnica, em alguns casos, consegue apenas perceber o instante final da falta não percebendo o início da mesma. O que chama atenção novamente é que nem o banco de capacitores nem a variação de carga foram detectadas por este método.

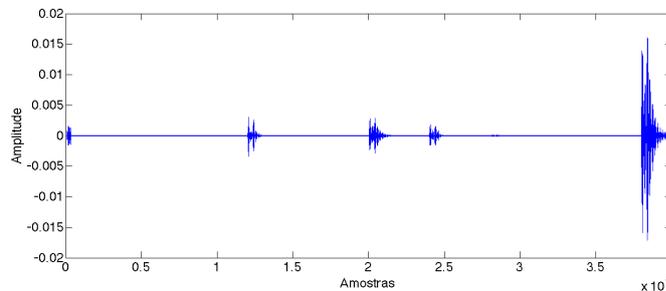


Fig. 11. Resultado da Transformada de Wavelets - cenário 3.

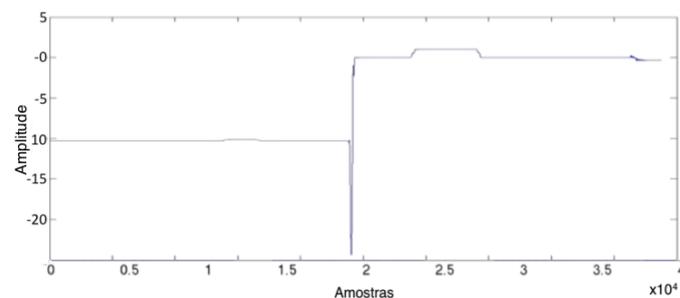


Fig. 12. Resultado da aplicação da técnica RNA no cenário 3.

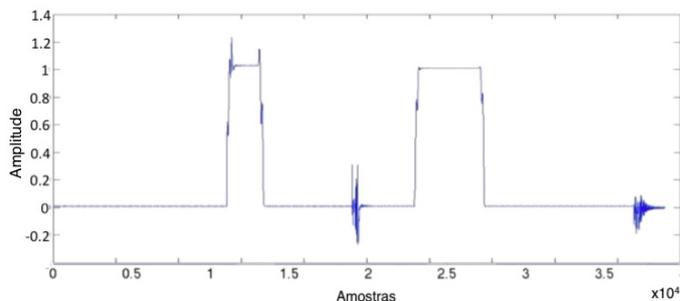


Fig. 13. Resultado do cenário 3 utilizando uma RNA treinada especificamente pra este caso.

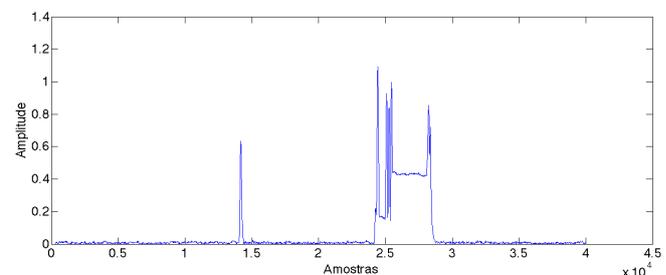


Fig. 14. Harmônicos não característicos sequência zero - cenário 3.

Na Figura 15 observa-se o resultado obtido a partir da técnica de análise de terceiro harmônico de sequência

negativa para este cenário. A variação de carga apresenta um incremento significativo na informação, e ainda, as faltas foram detectadas corretamente. Como nos casos anteriores podemos destacar que todos os eventos do sistema aparecem nesta técnica, sejam eles provenientes de falta ou não.

D. Considerações

Com base nos resultados obtidos, podemos concluir que nenhuma das técnicas estudadas apresenta um comportamento ótimo em relação à detecção de faltas de alta impedância. Entretanto, varias considerações devem ser feitas neste momento.

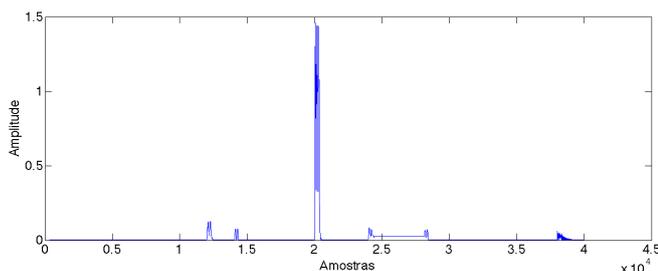


Fig. 15. Harmônicos de baixa ordem sequência negativa - cenário 3.

A Transformada de Wavelet é bastante sensível aos eventos transitórios do sistema. Assim, ela consegue perceber toda e qualquer condição de falta do sistema. Entretanto, operações normais como, variações abruptas de carga e chaveamento de bancos de capacitores, podem ser confundidos com faltas, pois apresentam resultados muito semelhantes. Mesmo assim, a condição de percepção em 100% dos casos de falhas por esta técnica não pode ser desprezada.

A conclusão parcial que podemos chegar sobre a técnica baseada em Redes Neurais Artificiais é que se esta for corretamente treinada, possui entre todas, o melhor desempenho para o reconhecimento de padrões específicos no sistema. No entanto, a previsão de todos os eventos normais do sistema, bem como as perturbações de carga específicas que podem ocorrer no mesmo, são impossíveis de serem modeladas. Assim, o treinamento da rede neural é fator decisivo para o bom desempenho da mesma.

Em todos os cenários, a técnica baseada em harmônicos não característicos de sequência zero (neste caso específico foram observados os harmônicos de segunda ordem), demonstrou falhas na detecção de faltas de alta impedância. Principalmente, na detecção do início da falta, o que ocorreu em condições de faltas distintas e aleatórias. Assim, esta técnica não apresenta confiabilidade, para este tipo de detecção. Por outro lado, em todos os cenários avaliados, os eventos considerados normais do sistema, não foram, na sua totalidade, detectados. Ou seja, apesar de não detectar com precisão as faltas de alta impedância, esta técnica consegue ser imune (ao menos nos casos aqui estudados) aos eventos normais do sistema.

Para a técnica baseada na observação dos harmônicos de baixa ordem de sequência negativa, podemos concluir que a mesma possui um desempenho limitado. Principalmente, se levarmos em conta que todos os eventos do sistema interferem neste sinal, tornando quase impossível a

determinação de uma falta por esta técnica. Ainda pode-se observar no cenário de número três que qualquer ruído no sistema altera ainda mais o desempenho desta técnica.

IV. NOVO MÉTODO

Conforme apresentadas na seção anterior, as técnicas passivas, quando aplicadas isoladamente, são efetivas na detecção das HIF's para alguns cenários, porém, em outros não. Na sua maioria quando detectam as faltas corretamente, também detectam eventos normais do sistema como sendo faltas, não sendo desejado esse tipo de erro.

Como a técnica baseada em Wavelets possui um ótimo desempenho na detecção de faltas ela foi escolhida para compor as combinações aqui estudadas. Neste sentido as técnicas que de alguma forma foram imunes aos eventos do sistema foram combinadas com esta para que fosse analisada as suas contribuições, ou não, na detecção das HIF's.

A. Combinação da Técnica de Harmônicos não Característicos de Sequência Zero com a Transformada de Wavelets

A técnica baseada em harmônicos não característicos de sequência zero possui uma boa imunidade a ruídos. Assim esta técnica foi combinada com a técnica baseada na transformada de Wavelets com o objetivo de potencializar a mesma. Esta combinação ocorre da seguinte forma. Primeiro é realizada a extração da sequência zero e isolados os distúrbios de segundo harmônico em seguida é utilizada a transformada de wavelets com o objetivo de aumentar a precisão de detecção de faltas e sua imunidade a eventos do sistema (Figura 16).

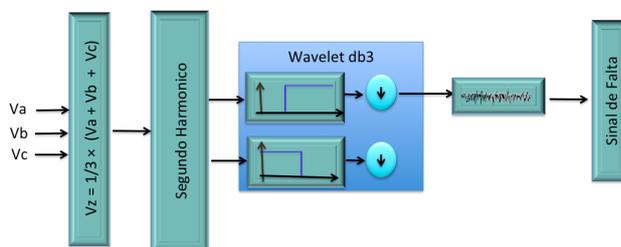


Fig. 16. Diagrama de blocos da combinação da técnica de harmônicos de segunda ordem de sequência zero com a Transformada de Wavelet.

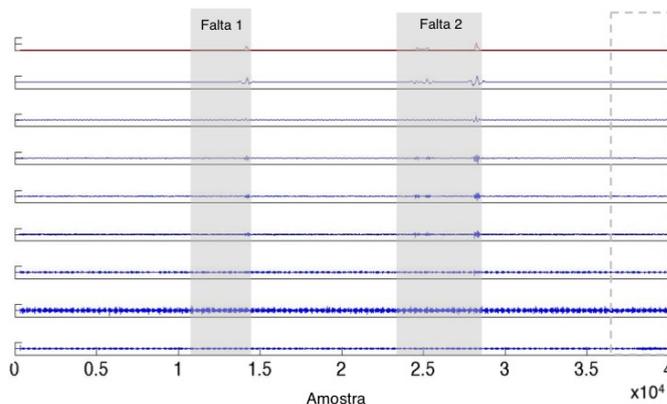


Fig. 17. Combinação da técnica de harmônicos não característicos de sequência zero com a Transformada de Wavelet.

O cenário escolhido para testar essa combinação foi o cenário 1. O resultado pode ser observado na Figura 17. Nestes resultados podemos observar que ao contrário do que foi suposto, ao invés da técnica de sequência zero potencializar a técnica baseada na Transformada de Wavelet, o resultado foi neutro. Ou seja, não houve nenhum ganho nesta combinação se compararmos com a utilização da técnica baseada na Transformada de Wavelet. Desta forma a combinação se torna inútil, pois apenas aumenta o esforço computacional sem haver nenhum benefício.

Isolando o melhor resultado obtido na simulação acima temos o apresentado na Figura 18. Como podemos observar apesar do resultado ser positivo no que se refere a imunidade em relação ao evento normal do sistema, a técnica, já na primeira falta, identifica seu início mas não o final da mesma.

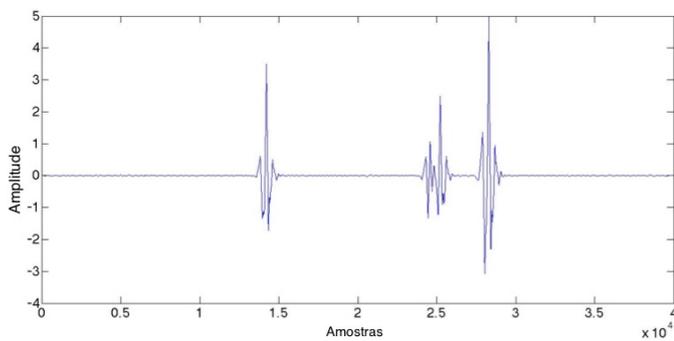


Fig. 18. Melhor resultado da combinação da técnica de harmônicos não característicos de sequência zero com a Transformada de Wavelet - cenário 1

B. Combinação da Técnica de Harmônicos de Baixa Ordem de Sequência Negativa com a Transformada de Wavelets

A segunda técnica que possui uma boa imunidade a detecção dos ruídos e eventos normais do sistema é a técnica baseada na observação de harmônicos de baixa ordem de sequência negativa. Com vistas a potencializar suas qualidades, a mesma foi combinada com a técnica baseada em Transformada de Wavelet. Nessa associação das técnicas os sinais elétricos provenientes da oscilografia, são combinados e é executado o algoritmo de detecção de faltas através da análise do conteúdo harmônico de sequência zero de baixa ordem (3º harmônico).

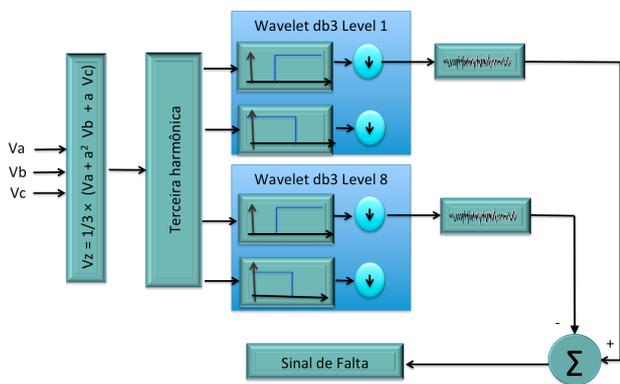


Fig. 19. Diagrama de blocos da combinação da técnica de harmônicos de baixa ordem de sequência negativa com a Transformada de Wavelet.

O sinal resultante dessa primeira etapa é submetido a técnica baseada na Transformada de Wavelets Daubechies 3db. Por fim a subtração dos resultados do nível 8 desta transformada e os do nível 1 permitem que sejam identificados quais são os eventos de falta e quais são eventos normais de funcionamento do sistema. O diagrama de blocos, desta técnica pode ser observado na Figura 19.

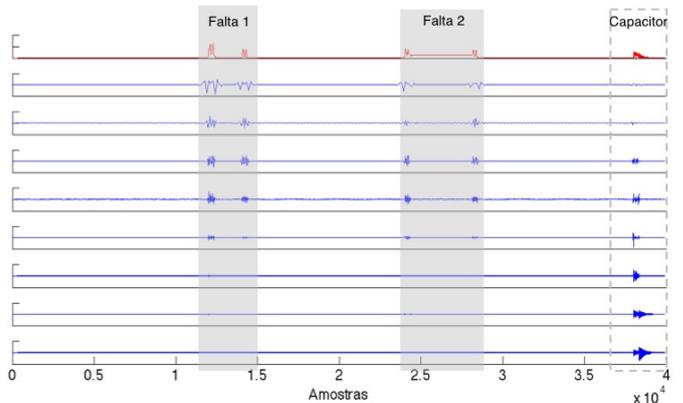


Fig. 20. Combinação da técnica de observação de harmônicos de baixa ordem de sequência negativa com a Transformada de Wavelet - cenário 1.

Novamente o primeiro cenário foi testado a fim de se observar os resultados que estão apresentados na Figura 20.

Em uma primeira observação mais qualitativa, podemos observar que a técnica identifica corretamente as faltas, tanto seu início como seu final, no entanto, o evento normal do sistema também é identificado.

Contudo, quando observamos os resultados de forma quantitativa, percebe-se que, conforme a intensidade (nível) da Transformada Wavelet é incrementado, o sinal resultante passa a potencializar o evento do sistema e atenuar significativamente os sinais de falta.

Assim se compararmos o nível um com o nível oito da Wavelet, vamos perceber que essa diferença é bastante significativa.

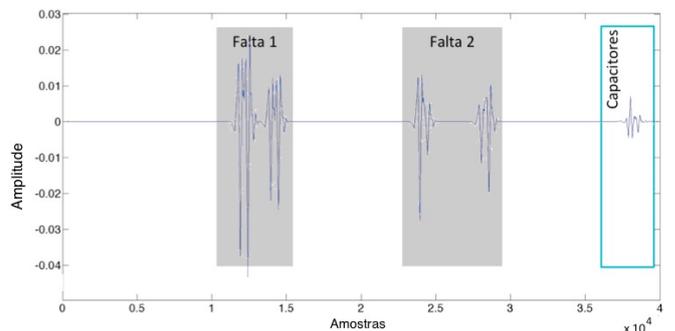


Fig. 21. Destaque da combinação da técnica de harmônicos de baixa ordem de sequência negativa com a Transformada de Wavelet para o cenário 1, considerando o Nível 1 (db3).

Nas Figuras 21 e 22 podemos observar de forma mais clara o exposto. Assim, baseado na comparação dos dois resultados podemos obter a informação de qual sinal é efetivamente de falta e qual corresponde ao evento do sistema. No entanto, ressalta-se que o cenário 1 é o mais

simples em termos de observação, sendo portanto necessário que a técnica seja submetida aos cenários 2 e 3 que representam eventos mais significativos para avaliar a proposta.

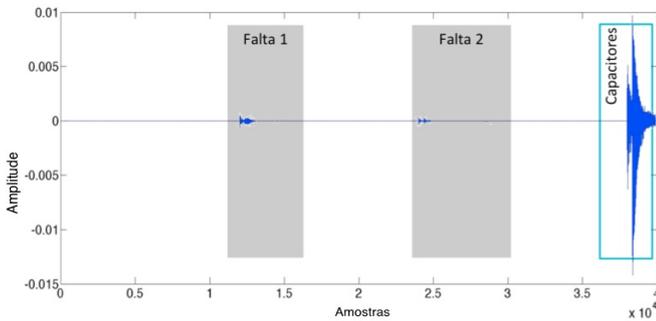


Fig. 22. Destaque da combinação da técnica de harmônicos de baixa ordem de seqüência negativa com a Transformada de Wavelet para o cenário 1, considerando o Nível 8 (db3).

Foi simulado novamente essa combinação de técnicas para o segundo cenário. Neste cenário além de uma terceira falta o banco de capacitores foi propositalmente adicionado a um ramal cujo nível de corrente é elevado, sendo o banco conectado no primeiro trecho do alimentador. O resultado desta simulação pode ser observado na Figura 23.

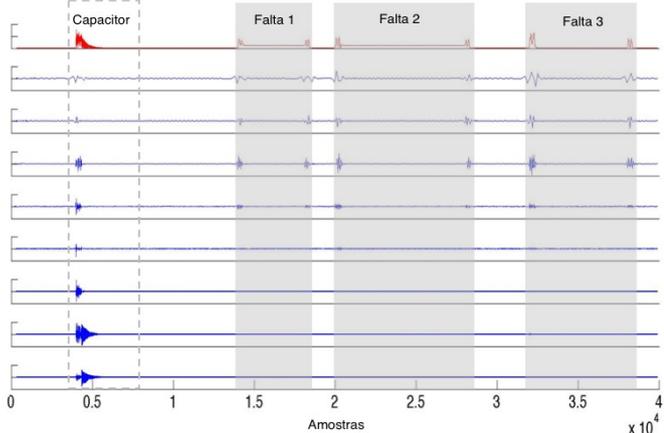


Fig. 23. Combinação da técnica de harmônicos de baixa ordem de seqüência negativa com a Transformada de Wavelet - cenário 2.

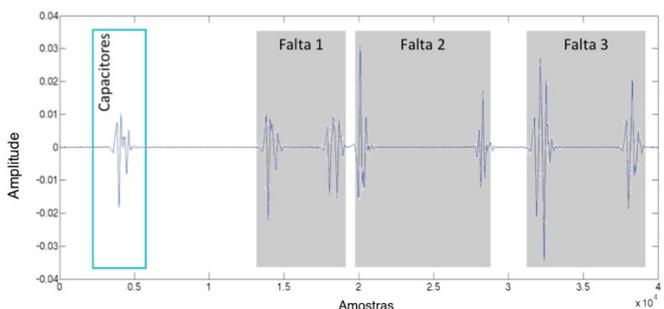


Fig. 24. Destaque da combinação da técnica de harmônicos de baixa ordem de seqüência negativa com a Transformada de Wavelet para o cenário 2, considerando o Nível 1 (db3).

Observa-se novamente o mesmo efeito, onde no primeiro nível temos neste caso as três faltas destacadas, mais a entrada do banco de capacitores e no nível oito o destaque

bastante significativo da entrada do banco de capacitores. Estes resultados podem ser percebidos de forma mais nítida nos destaques do nível 1 e 8 apresentados nas Figuras 24 e 25 respectivamente.

Considerando os resultados obtidos até aqui, foi simulada novamente essa combinação de técnicas para o terceiro cenário. Este cenário, conforme pode ser observado na seção anterior, apresentou em todas as técnicas isoladas um resultado não satisfatório, pois além do banco de capacitores inserido no sistema, ele possui a energização de um dos alimentadores em degrau, o que acarreta um evento com grande quantidade de energia, o qual confundiu as técnicas, quando aplicadas de forma individual.

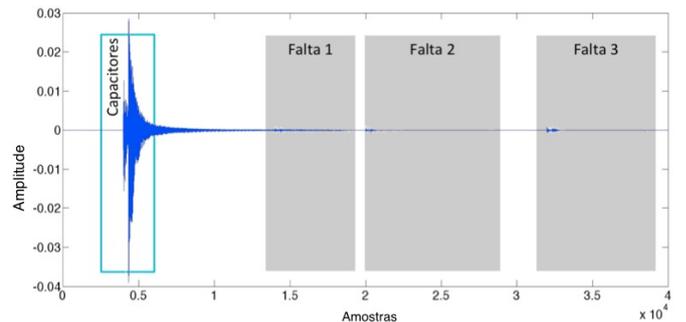


Fig. 25. Destaque da combinação da técnica de harmônicos de baixa ordem de seqüência negativa com a Transformada de Wavelet para o cenário 2, considerando o Nível 8 (db3).

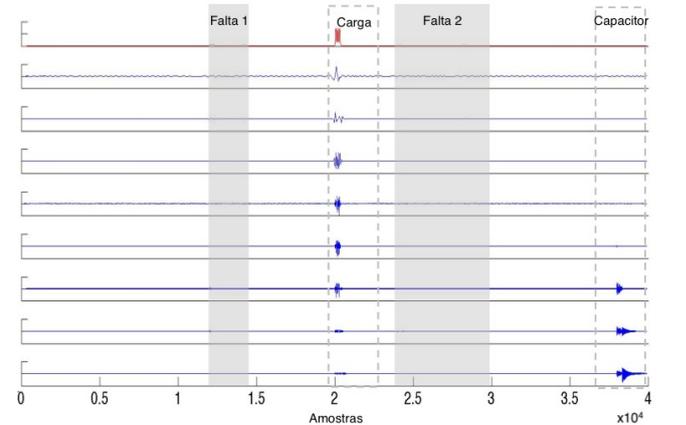


Fig. 26. Combinação da técnica de harmônicos de baixa ordem de seqüência negativa com a Transformada de Wavelet - cenário 3.

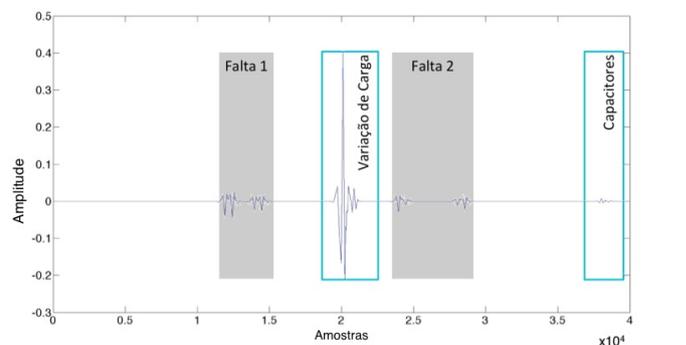


Fig. 27. Destaque da combinação da técnica de harmônicos de baixa ordem de seqüência negativa com a Transformada de Wavelet para o cenário 3, considerando o Nível 1 (db3).

REFERÊNCIAS

Como podemos observar o mesmo efeito relatado anteriormente ocorre neste caso e mesmo com a inclusão de um novo evento no sistema, é possível através da combinação dos resultados do nível 1 e 8 obter uma clara distinção dos eventos de falta e dos eventos normais. O destaque a estes níveis pode ser observado nas Figuras 27 e 28.

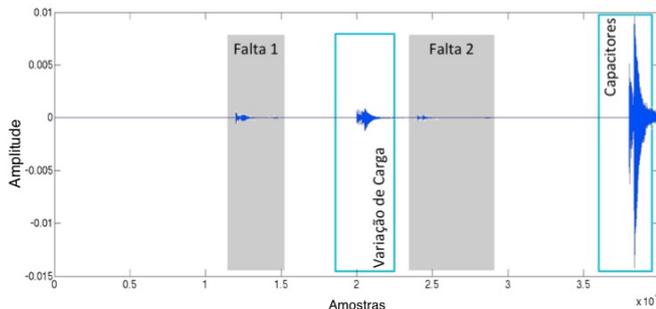


Fig. 28. Destaque da combinação da técnica de harmônicos de baixa ordem de sequência negativa com a Transformada de Wavelet para o cenário 3, considerando o Nível 8 (db3).

No destaque apresentado na Figura 28 podemos observar que o evento característico da entrada em degrau de um alimentador é destacado, mas não de forma tão intensa como no caso do banco de capacitores, mesmo assim, ele possui níveis de energia varias vezes maiores que o sinal de falta, assim, é possível definir limites que permitiriam a distinção do mesmo em face a um evento de falta.

V. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma proposta de método de detecção de faltas de alta impedância em Sistemas de distribuição. Os estudos realizados neste trabalho contemplam combinações de algumas técnicas passivas de detecção de faltas de alta impedância. A Transformada de Wavelet, bastante sensível aos eventos transitórios do sistema e notoriamente indicada pela comunidade científica como uma das mais eficazes na detecção destas faltas, foi combinada com a técnica de sequência zero e não apresentou nenhuma melhoria de desempenho.

A técnica baseada na observação dos harmônicos de baixa ordem de sequência negativa, foi combinada com a técnica baseada em Wavelets. A partir dos resultados obtidos com essa combinação, pôde-se verificar que a Wavelet em vários níveis possui resultados muito distintos. A Wavelet do tipo Daubechies 3 (db3), quando executada em nível 1, identifica todos os eventos do sistema sem permitir a distinção de eventos ditos normais do sistema e das faltas de alta impedância. No entanto no nível 8, ela potencializa, significativamente, os resultados dos eventos normais do sistema, minimizando os demais. Esta combinação permitiu em todos os cenários estudados a distinção dos eventos do sistema e a correta detecção das faltas em todos os casos. Portanto esta combinação de técnicas, demonstra resultados bastante positivos e uma contribuição importante para a detecção de faltas de alta impedância.

- [1] N. D. Tleis, *Power Systems Modelling and Fault Analysis – Theory and Practice*, Oxford : Elsevier Ltd., 2008.
- [2] I. Zamora, A. J. Mazoon, K. J. Sagastabeitia E J. J. Zamora, "New Method for Detecting Low Current Faults in Electrical Distribution Systems", *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 22, n. 4, p. 2072–2079, October, 2007.
- [3] L. Li, e M. A. Redfem. "A Review of Techniques to Detect Downed Conductors in Overhead Distribution Systems", [ed.] In. Proc. of Seventh International Conference on Developments in Power System Protection (IEE), pp. 169-172, 2001.
- [4] B. Aucoin, e R. Jones. "High Impedance Detection Implementation Issues", *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 11, n. 1, pp. 589-594. January 1996.
- [5] Schweitzer Engineering Laboratories, Comercial LTDA, "Análise dos métodos de proteção contra faltas à terra nos sistemas da distribuição aterrados, não aterrados e compensados" 2006. [Online]. Disponível: http://www.selinc.com.br/art_tecnicos/6123.pdf.
- [6] S. Ebron, D. L. Lubkeman, and M. White, "Neural Network Approach to the Detection of Incipient Faults on Power Distribution Feeders", *IEEE Transactions on Power Delivery*. v. 5, n. 2, pp. 905-914, April 1990.
- [7] I. Nikoofekr, M. Sarlak, S. M. Shahrtash, "Detection and classification of high impedance faults in power distribution networks using ART neural networks", In. Proc. of 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), pp 1-6, 2013.
- [8] K. J. Sagastabeitia, I. Zamora, A. J. Mazón, Z. Aginako, G. Buigues, "Low-current fault detection in high impedance grounded distribution networks, using residual variations of asymmetries", *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 6, n. 12, pp. 1252 - 1261, December, 2012.
- [9] N. Saravanan, A. Rathinam, "A Comparative Study on ANN Based Fault Location and Classification Technique for Double Circuit Transmission Line". In Proc. of Fourth International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN), pp. 824 – 830, 2012.

DADOS BIOGRÁFICOS

Maurício de Campos possui graduação em Engenharia Elétrica pela UNIJUI (1997), mestrado pela UFSM (2000) e é doutorando na mesma área pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Atualmente é professor assistente da UNIJUI. Atua principalmente nos seguintes temas: qualidade de energia, instrumentação, sistemas supervisórios, acionamentos de máquinas elétricas e educação em engenharia.

Paulo Sérgio Sausen possui Graduação (UNIJUI) e mestrado (UFPB) em Ciências da Computação e doutorado em Engenharia Elétrica pela UFCG (2008). Atualmente é Bolsista de Produtividade em Pesquisa Nível 2 no CNPq e professor Associado do Departamento de Ciências Exatas e

Engenharia da UNIJUÍ. Possui experiência nas áreas de Ciência da Computação, Engenharia Elétrica e Matemática Aplicada, com ênfase em Redes de Sensores Sem Fio.

Alexandre Cunha Oliveira Nasceu em Fortaleza, Ceará, Brasil, em 1970. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba (1993), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba (1995) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (2003). Entre 1996 e 2004, fez parte do corpo docente do Departamento de Eletro-Eletrônica do Centro Federal de Educação Tecnológica do Maranhão. Desde de novembro de 2004 é professor Adjunto no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Parariba, Brasil. As áreas de pesquisa de interesse incluem sistemas de acionamento, eletrônica de potência, controle e qualidade de energia.

Antônio Marcus Nogueira Lima Nasceu em Recife, Pernambuco em 1958, obteve os títulos de Engenheiro Eletricista e de Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba - UFPB em 1981 e 1985, respectivamente e o título de Doutor em Engenharia Elétrica pelo Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, França, em 1989. Trabalhou na Escola Técnica Redentorista - ETER, Campina Grande de 1977 até 1982 e foi Engenheiro de Projetos da Sul - América Philips, Recife, Pernambuco, de 1982 a 1983. De setembro de 1983 até setembro de 1995 foi, sucessivamente, Professor Auxiliar, Assistente e Adjunto do Departamento de Engenharia Elétrica - DEE da UFPB. Em outubro de 1995 foi aprovado no Concurso Público de Provas e Títulos para Professor Titular do DEE da UFPB. Desde abril de 2002 é Professor Titular do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG. Foi Diretor-Secretário da Sociedade Brasileira de Automática e membro do seu Conselho Superior por dois mandatos, sendo atualmente seu Vice-Presidente. Foi membro do Comitê Assessor de Engenharia Elétrica e Engenharia Biomédica do CNPq (Set/2003 a Ago/2006) e da Comissão da CAPES para avaliação de programas de pós-graduação da Área de Engenharias IV (1998, 1999, 2000, 2001). Foi Coordenador de Área - Engenharias IV da CAPES por dois mandatos (Triênios 2008/2010 e 2011/2013). Seus atuais interesses de pesquisa são máquinas elétricas, eletrônica de potência, acionamentos elétricos, instrumentação eletrônica, sistemas de controle, identificação de sistemas, sistemas embarcados e robótica.