Saturação de Transformadores de Corrente e suas Implicações em Esquemas Diferenciais de Proteção - Detecção e Decisão de Atuação usando a Transformada Wavelet e Redes Neurais Artificiais

Rodrigo Alves Benes Ferreira e Francisco Antônio Reis Filho

***Resumo*--O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um algoritmo para identificação da saturação e localização da falta em relação ao objeto protegido (falta interna ou externa). A metodologia usada foi baseada na capacidade de se detectar mudanças bruscas do sinal através da Transformada Wavelet Discreta e na capacidade de aprendizagem da Rede Neural Artificial e na etapa de localização utilizou-se um critério de decisão no tempo para cálculo da defasagem das correntes correspondentes com uma janela de 1/4 de ciclo. Os resultados mostram a metodologia como uma alternativa para tomada de decisão rápida do dispositivo de proteção mesmo com a possível ocorrência de saturação dos transformadores de corrente.**

***Palavras chaves*--Proteção Diferencial, Redes Neurais Artificiais, Saturação de TC, Transformada Wavelet Discreta.**

I. Introdução

Na ocorrência de uma falta no sistema no sistema elétrico de potência é objetivo do sistema de proteção a identificação da falta e o isolamento da mesma possibilitando uma maior rapidez no restabelecimento do sistema.

Um esquema de proteção largamente utilizado e considerado o mais seletivo é a proteção diferencial (ANSI 87), onde na ocorrência de uma falta interna ao objeto protegido, o dispositivo de proteção deve enviar um comando para abrir os disjuntores dos dois extremos. Quando esta falta é externa, esta proteção não deve atuar.

Os dispositivos críticos neste esquema de proteção são os transformadores de corrente (TC) e como todo material ferromagnético, o mesmo trabalha com uma curva de histerese. Para o seu correto funcionamento, os TCs são dimensionados para que trabalhem na faixa linear desta curva, entretanto, existem situações de difícil estimativa que causam sua saturação, como o nível DC da corrente de curto-circuito e o fluxo residual do TC. O dispositivo de proteção deve detectar este fenômeno para evitar atuação indevida da proteção diferencial.

Este trabalho tem o objetivo de desenvolver uma metodologia para detecção da saturação dos transformadores de corrente e localização da falta em relação ao objeto protegido mesmo com a saturação dos TCs em um esquema de proteção diferencial. O objeto de proteção escolhido foi uma linha de transmissão de 345KV de 1,54Km de comprimento.

II. Proposta de Trabalho

O projeto é dividido em duas principais etapas:

A. Etapa 1: Treinamentos

O funcionamento do sistema elétrico é simulado no programa ATPDraw 3.5 que gera um arquivo texto contendo as medições solicitadas numa taxa de amostragem determinada. A aquisição dos dados, a detecção falta, o tratamento dos sinais e o treinamento da Rede Neural Artificial foram realizados por um programa elaborado no Software Matlab 7.0.

O sistema elétrico utilizado nesta etapa é um circuito monofásico incluindo o modelo do TC com a curva de histerese que possibilita a variação do ângulo de incidência da falta, da corrente de falta, sua componente DC e variação do fluxo residual (Ver figura 1 a seguir).

O tratamento dos dados é realizado pela Transformada Wavelet Discreta (DWT – Discrete Wavelet Transform). Esta ferramenta é capaz de detectar distorções nos sinais sendo possível criar dados representativos de faltas normais e de faltas com saturação do TC usando principalmente a sua escala logarítmica e características apresentadas em [4]. Em seguida estes dados são apresentados à Rede Neural Artificial multicamadas para treinamento supervisionado e com isso explorar a habilidade da rede de aprender através de exemplos e por fim ser utilizada para o reconhecimento de padrões que não participaram do treinamento.

Rodrigo A. Benes Ferreira trabalha na Siemens E D EA, Jundiaí, SP, Brasil (rodrigobenes@yahoo.com.br)

Francisco A. Reis Filho é consultor pela Farfilho Consultoria Comércio e Representações LTDA, São Paulo, SP, Brasil (farfilho@farfilho.com.br).

Assim, a Rede Neural após o treinamento torna-se capaz de generalizar o conhecimento adquirido. Os parâmetros da rede neural (número de camadas, número de neurônios em cada camada, pesos e bias) são salvos para utilização na próxima fase.

B. Etapa 2: Testes

Nesta etapa é utilizado um circuito trifásico de uma linha de transmissão de 345KV e 1,54 km onde são simulados diversos tipos de falta para teste do algoritmo. (Ver a Fig. 2 a seguir).

Em seguida um programa no Matlab faz a aquisição dos dados, a detecção do instante de falta, a separação da janela deslizante de ¼ de ciclo e o tratamento do sinal pela Transformada Wavelet Discreta. Estes dados são apresentados à rede neural treinada na fase anterior fazendo assim a detecção da saturação. Esse processo é feito para as três fases de corrente de cada lado da LT.

Paralelamente ao algoritmo acima é executado o algoritmo de localização que indicará se a falta foi interna ou externa à zona de proteção diferencial onde o sinal de abertura é acionado quando a saturação é detectada e a falta interna é identificada.

III. METODOLOGIA

A. Descrição do Sistema Elétrico (Simulação)

O circuito mostrado na Fig. 1 é utilizado na primeira etapa para gerar dados de faltas normais e com saturação para treinamento da RNA.

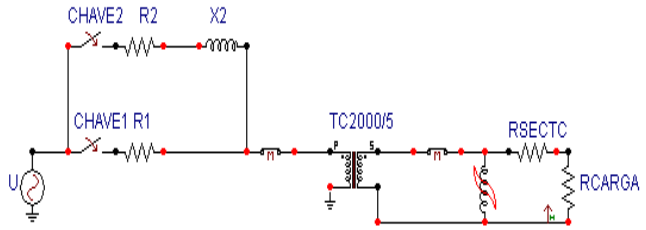

Fig. 1. Circuito de Treinamento

Nesse circuito a resistência R1 simula a corrente de regime e a resistência R2 e a indutância X2 modelam a corrente de defeito, além de possibilitar a variação da componente DC dessas correntes pela relação X2/R2. No circuito do transformador de corrente usa-se o modelo do transformador ideal em conjunto com o modelo da curva de excitação dada típica onde através da subrotina HISTERESE obtem-se sua respectiva curva de Histerese representando o seu fluxo residual.

O circuito trifásico mostrado na Fig. 2 modela uma linha de transmissão de 345KV / 1,54 km da Siderúrgica USIMINAS (Cubatão-SP) e os transformadores de corrente das três fases em ambos os lados da linha. A curva de histerese foi inserida no próprio modelo do transformador. Este circuito é utilizado na segunda etapa para simular faltas e testar os algoritmos de detecção e localização.

B. Geração dos Dados

1) Amostragem e Tratamento Digital dos Sinais:

A amostragem e a ferramenta utilizada para tratamento do sinal são decisões fundamentais para a obtenção de bons resultados. A ferramenta para tratamento do sinal utilizada foi a Transformada Wavelet Discreta por ser sensível a variações bruscas do sinal facilitando a identificação da saturação do TC e por apresentar uma escala logarítmica(escalamento) para cada nível apresentado (Para maiores informações sobre a mesma ver a referência bibliográfica [1]).

A freqüência de amostragem utilizada foi de 256 amostras por ciclo (15360Hz) onde a escolha da freqüência de amostragem foi feita com o objetivo de atender os compromissos de obter um algoritmo rápido e ter uma quantidade razoável de coeficientes Wavelets.

A janela utilizada foi de um quarto de ciclo e com isso obtivemos uma janela de 64 amostras e a Transformada Wavelet Discreta é aplicada nesta janela. A função mãe utilizada foi a Daubechie 10 mostrada na Fig. 3.

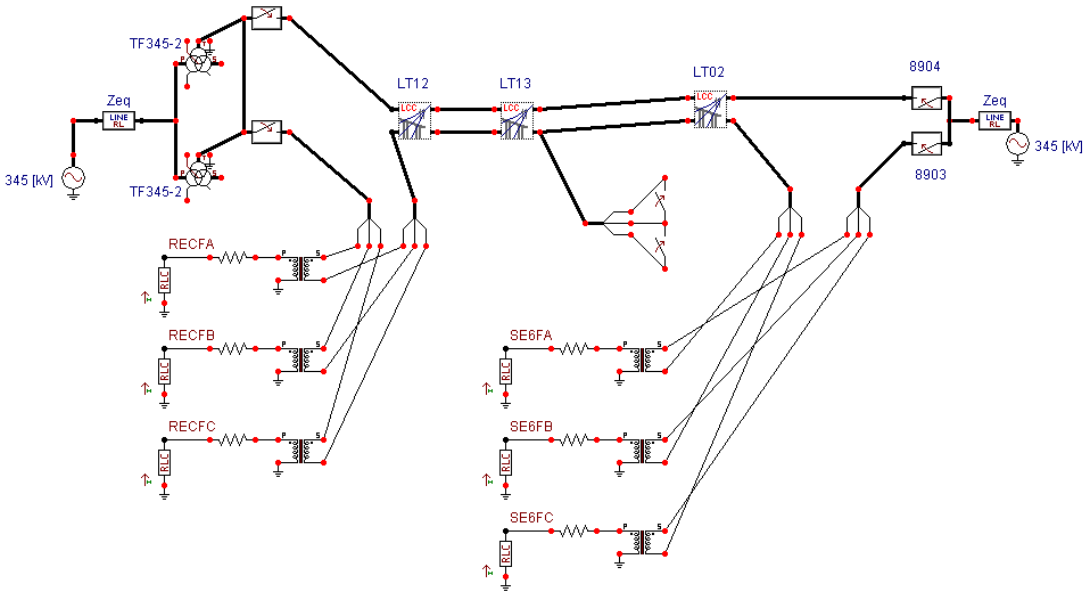

Figura 2 – Circuito de Testes

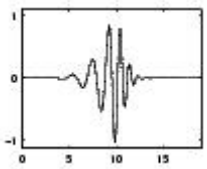

Fig. 3 – Função Daubechies 10

Onde essa função se mostrou bem sensível às variações no sinal devido à saturação e o número de coeficientes Wavelets de cada detalhe é calculado conforme a fórmula (1):

$$\mathbf{floor}\left(\frac{n-1}{2}\right)+N \qquad (01)$$

Onde N= número da função daubechie, n=número de amostras e floor = menor inteiro mais próximo.

Nesta aplicação temos portanto 41 coeficientes de detalhe de nível 1.

Neste momento é possível avaliar com dados os compromissos estabelecidos para decisão da freqüência de amostragem. Como podemos observar, o número de amostras finais que é usado para identificação da saturação é reduzido drasticamente. Com amostragem de 256 amostras/ciclo e uma janela de um quarto temos no final 41 coeficientes. Caso uma amostragem de 128 fosse utilizada, teríamos 25 coeficientes.Outro ponto considerado foi a possibilidade de utilização de outro nível de detalhe da transformada wavelet caso fosse necessário. Devido à decimação efetuada no calculo da transformada a cada nível reduzimos ainda mais a quantidade de amostras. Portanto com 256 amostras por ciclo temos uma quantidade boa de coeficientes wavelets de nível 1 e com uma janela de um quarto de ciclo conseguimos uma rapidez do algoritmo. A Fig. 4 a seguir mostra a Tranformada Wavelet de nível 1 onde “s” é o sinal de entrada, e “d1” os coeficientes de detalhe.

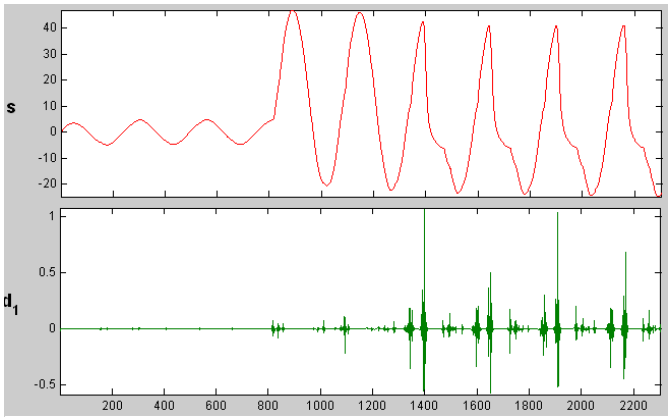

Fig. 4 - Tranformada wavelet discreta

Nesta figura observamos que os coeficientes do detalhe escolhido apresentam valores elevados nos instantes em que ocorrem deformações da forma de onda e mudanças bruscas do sinal que caracterizam o fenômeno da saturação.

2) Organização dos Dados:

Para que o aprendizado da Rede Neural seja efetivo, ou seja, que o conhecimento seja adquirido e que uma boa generalização seja obtida é necessário que os dados representativos das situações que ela deve classificar sejam apresentados.

Utilizando o circuito monofásico proposto foram armazenados os resultados de simulação em diversas situações variando-se os parâmetros do circuito. A resistência de carga foi variada de 5 a 10 ohms e o ângulo de incidência da falta foram 0º, 90º, 180º e 270º. Em cada uma destas situações foram retirados dados de uma falta sem saturação e com saturação. No total foram realizadas 22 simulações do circuito

e destas foram retiradas 704 janelas de faltas normais e 704 janelas de faltas com saturação. Estes dados foram organizados na matriz de treinamento de forma intercalada, gerando uma matriz de dimensões 41x1408 na qual cada coluna representa a Transformada Wavelet Discreta de uma janela.

Para previamente avaliar se o tratamento do sinal foi adequado e qual será o trabalho da Rede Neural para classificar, escolhemos a média e o valor máximo do módulo de cada coluna da matriz de treinamento para representá-los em um plano. A Fig. 4 mostra esta representação.

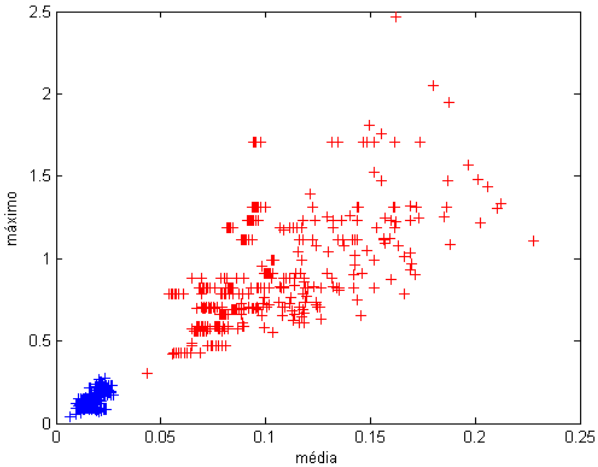

Fig. 4 - Separação no plano: Máximo x Média

Neste gráfico observamos a separação de dois agrupamentos (clusters) entre os dados com saturação (pontos vermelhos) e sem saturação (pontos azuis).

C. *Normalização*

A normalização dos dados de entrada da Rede Neural Artificial é um conceito heurístico consagrado que visa o melhor desempenho do algoritmo de treinamento. A forma de normalização escolhida foi a divisão dos dados pelo valor máximo da tabela. Este valor máximo foi chamado de fator de normalização onde antes do mesmo são calculados os módulos dos coeficientes wavelets.

D. *Modelagem e Treinamento da Rede Neural Artificial*

A tomada de decisão da ocorrência ou não da saturação é realizada pela Rede Neural Artificial multicamadas. O algoritmo de treinamento utilizado foi um algoritmo baseado no backpropagation com taxa de aprendizagem adaptativa e mommentum. A rede tem a função de classificar o sinal de entrada como saturado (saída=1) e não saturado (saída=0). Sua arquitetura após os testes foi 41-1-1. Sendo uma camada de saída e uma intermediária com 1 neurônio e 41 entradas sem neurônio. As funções de ativação utilizadas foram a linear e a sigmóide logística nas camadas intermediária e de saída respectivamente. A Fig. 5 mostra o processo de identificação desde a janela deslizantes de corrente até a saída da Rede Neural.

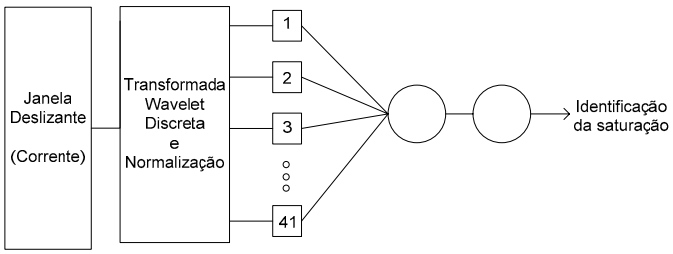

Fig. 5 – Processo de Identificação da Saturação

E. *Tratamento Final*

O objetivo desta etapa é interpretar a saída da Rede Neural de forma a evitar erros de identificação. A saída da rede neural varia de 0 a 1. Neste projeto foi considerado que uma saída maior que 0,8 é interpretado como 1 (Saturação). Além disso foi adotado que é necessário uma confirmação, ou seja, para que seja identificado a saturação, ao menos por duas janelas consecutivas a saída da RNA deve ser maior que 0,8.

F. *Localização da Falta*

Para localização da falta as correntes correspondentes de cada lado da linha são comparadas. Esta comparação é feita amostra a amostra de cada janela de um quarto de ciclo. O critério para determinação da localização foi o seguinte: Se mais de 70% (45 amostras) da janela os sinais dos dois tiverem a mesma polaridade, a falta é identificada como interna. Caso contrário a falta é externa.

G. *Decisão de Atuação*

O algoritmo de localização é executado paralelamente ao algoritmo de saturação. Quando ocorre a identificação da saturação e falta interna o algoritmo geral é finalizado e é gerado um sinal de atuação. Quando a saturação é identificada e a falta é externa o trip é bloqueado. Quando a saturação não é identificada o algoritmo convencional de proteção diferencial (fora do escopo deste trabalho) segue sua execução normal.

A Fig. 6 apresenta de forma resumida o diagrama de blocos do algoritmo da fase de teste descrito nos itens anteriores:

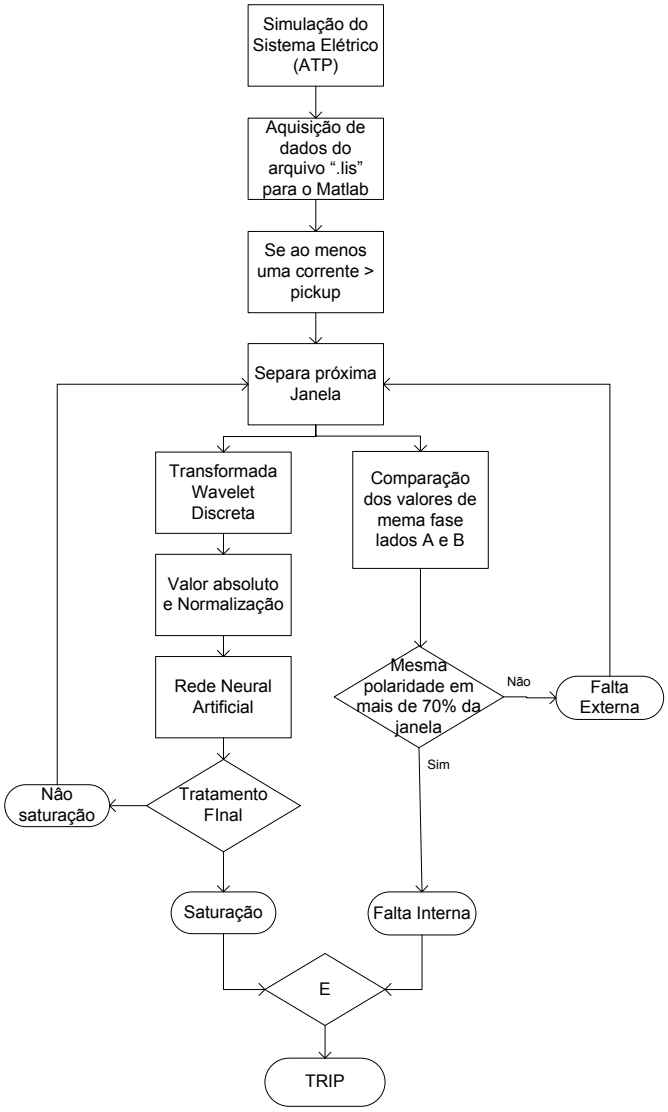

Fig. 6 – Algoritmo da Etapa de Teste

IV. Resultados Obtidos

Para os testes em pauta foram gerados cinco casos principais: Falta Interna monofásica, Falta Interna monofásica com impedância de falta, Falta Externa monofásica, Falta Interna Trifásica e Falta Externa Trifásica, onde para essas condições o algoritmo apresentou desempenho satisfatório, atuando corretamente para estes casos.

As Figs. 7-8 mostram os resultados para a Falta interna monofásica. O primeiro gráfico mostra o circulo identificando a última amostra da janela onde ocorreu identificação da saturação e a atuação da proteção e o segundo gráfico apresenta a defasagem entre as respectivas fases B de ambos os lados indicando que a falta foi interna.

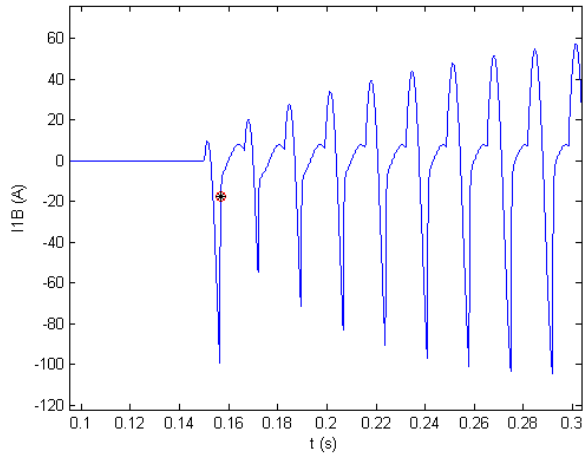

Fig. 7 – Falta interna Monofásica – Identificação da saturação e atuação.

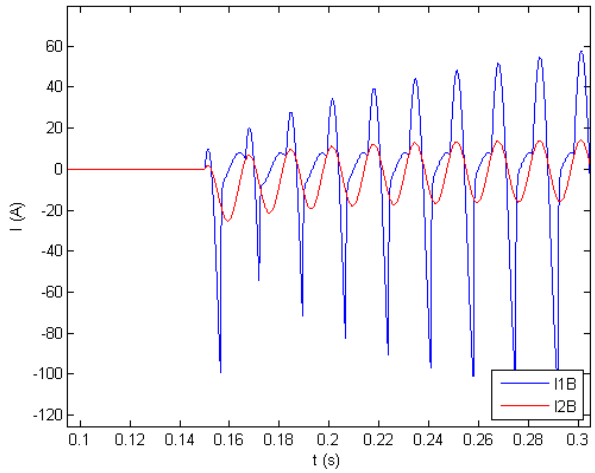

Fig. 8 – Falta Interna Monofásica – Defasagem entre Fases B de ambos os lados.

Nas Figs. 9-10 são apresentados os resultados para da Falta Externa Trifásica. Os círculos em vermelho do primeiro gráfico representam a última amostra da janela em que foi identificada a saturação, porém sem o sinal de abertura, e o segundo gráfico apresenta a defasagem entre as correntes das fases A de ambos os lados.

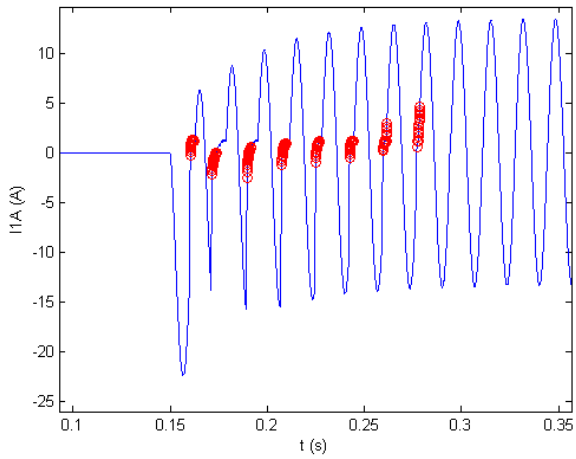

Figura 9 – Falta Externa Trifásica – Identificação da saturação.

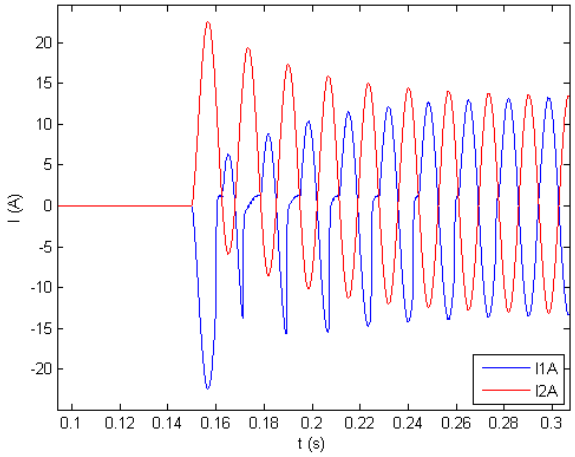

Fig. 10 – Falta Externa trifásica – Defasagem entre Fases A de ambos os lados.

Nas Figs 11-12 a seguir é apresentada a mesma metodologia indicada anteriormente para um defeito interno com alta impedância(Rf = 50 Ω).

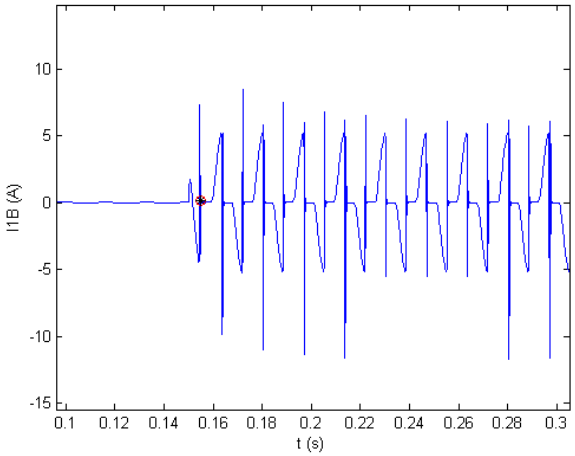

Fig. 11 – Falta Interna Monofásica com resistência de falta – Identificação da Saturação e Atuação.

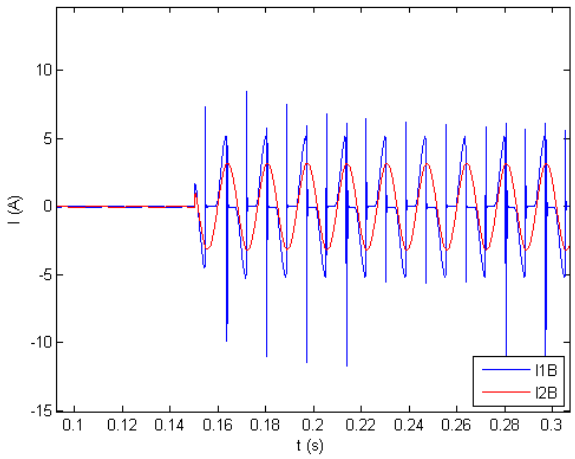

Fig. 12 – Falta Interna Monofásica com resistência de falta - Defasagem fases B de ambos os lados.

V. Conclusões

Este trabalho apresentou uma metodologia para a tomada de decisão de atuação de um relé diferencial na situação de saturação dos transformadores de corrente onde a identificação correta da saturação possibilita um ajuste mais sensível do pickup da referida proteção.

Por outro lado a Transformada Wavelet Discreta mostrou-se efetiva na discriminação da situação normal de falta com e sem saturação do TC facilitando o trabalho de classificação da Rede Neural Artificial bem como o critério de localização para os casos apresentados. Vale ressaltar que todo esse processo teve uma duração de ¼ ciclo como um todo e os resultados obtidos foram encorajadores.

Para a validação da metodologia serão necessárias em uma etapa posterior a geração de um número maior de testes e a variação de alguns parâmetros do sistema tais como: Incidência do ângulo de falta, resistência de falta,nível DC da corrente de defeito,o fluxo residual dos TCs e as respectivas impedâncias de fonte do sistema.

VI. Referências Bibliográficas

[1] F. A. Reis Filho, E. C. Senger, "Saturação de Transformadores de Corrente e suas Implicações em Esquemas Diferenciais de Proteção. Paradigmas e Possíveis Soluções", apresentado no IX STPC, 2008.

[2] R. A. Benes Ferreira, "Implementação em Hardware de um Identificador de Falhas em Linhas de Transmissão Utilizando-se Redes Neurais Artificiais", Projeto de Conclusão da Graduação, UERJ, 2008.

[3] S. Haykin, "Redes Neurais - Princípio e Prática", Bookman, 2001.

[4] W. Rebizant, K. Feser, T. Hayder, L. Schiel, "Differential Relay with Adaptation During Saturation Period of Current Transformers".

[5] B. Kasztenny, E. Rosolowski, M. Lukovicz, J. Izykowsk, "Current Related Relaying Algorithms Immune to Saturation of Current Transformers".

VII. DADOS BIBLIOGRÁFICOS

Rodrigo Alves Benes Ferreira Nascido em Volta Redonda (RJ) - 1982. Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) em janeiro de 2008 – Rio de Janeiro (RJ). No momento está finalizando o curso de Pós-graduação em Proteção de Sistemas Elétricos na Universidade Santa Cecília (UNISANTA) – Santos (SP).Atualmente trabalha na SIEMENS E D EA (Energy Automation).

Áreas de interesse: Proteção de Sistemas Elétricos e Inteligência computacional.

E-mail: rodrigobenes@yahoo.com.br

Francisco Antonio Reis Filho, Brasileiro 55, graduado em 1981(Sistemas de Potência) pela UEVA/RJ. Em 1992 e 2002 obteve respectivamente os titulos de M.Sc. e Ph.D pela EPUSP/POLI. Possui mais de 30 anos de experiência em Proteção de Sistemas Elétricos trabalhando com projetos, pesquisas, vendas,estudos e demais atividades correlatas em empresas como Furnas,ABB,SEG,SEL,GE e no LPROT/USP. Atualmente está desenvolvendo atividades de estudos elétricos por sua empresa a Farfilho Consultoria Comércio e Representações LTDA,e com relação a pesquisas seu principal foco é a utilização de novas ferramentas matemáticas para o desenvolvimento de algoritmos de proteção de sistemas elétricos.

Seu e-mail para contato é: farfilho@farfilho.com.br e seu site é www.farfilho.com.br.