

Detecção de Defeitos em Transformadores de Potência Utilizando o Sinal de Corrente do Aterramento

Erik Leandro Bonaldi, Luiz Eduardo Borges da Silva, Levy Ely de Lacerda de Oliveira, Germano Lambert-Torres, Felipe dos Santos Moreira, Giscard F. C. Veloso

Resumo – Uma técnica de detecção de defeitos incipientes e de forma não invasiva em transformadores de potência é apresentada neste trabalho. Utilizando as características de boa largura de banda das bobinas de efeito Rogowski e o grande potencial de processamento de sinais da Transformada Wavelet Discreta, é possível fazer inferências sobre a atividade de descargas parciais e outros problemas que se manifestam de forma sorrateira em transformadores de potência. Este trabalho descreve um equipamento desenvolvido com este propósito, ilustrando a técnica apresentada.

Palavras-chave – Bobina de Efeito Rogowski, Manutenção Preditiva, Medidas Elétricas, Processamento de Sinais, Sistemas de Medição.

I. INTRODUÇÃO

Os transformadores de potência são os equipamentos mais caros nos sistemas de transmissão de energia elétrica. Uma substituição devido a uma falha inesperada pode causar grandes transtornos, além de grandes perdas financeiras. A monitoração permanente deste equipamento pode detectar problemas incipientes, evitando que eles se desenvolvam de maneira descontrolada e causem a falha repentina e inesperada do transformador. Assim, a manutenção preditiva de transformadores pode garantir não só uma maior confiabilidade na transmissão da energia elétrica, como também uma redução nos custos de manutenção.

Neste contexto, um problema comum que se desenvolve lentamente ao longo do tempo e pode levar à falha total do transformador é a descarga parcial. Se não forem percebidas, as descargas parciais podem deteriorar completamente o sistema de isolamento do equipamento, levando a uma falha catastrófica.

Há diversas técnicas para detecção de descargas parciais, porém a maioria delas exige que o equipamento seja coloca-

do fora de operação, o que as torna excessivamente custosas e impraticáveis. Estas paradas para manutenção têm alto custo para as empresas de energia elétrica, tornando necessária a busca por técnicas suficientemente não-invasivas para serem aplicadas com o equipamento em operação.

O problema do monitoramento de descargas parciais também inclui uma grande susceptibilidade a ruídos. Em alguns casos, é impossível distinguir entre o ruído e o sinal da descarga parcial, fazendo-se necessária a aplicação de um processamento mais específico dos sinais coletados para extrair a informação correta do mesmo. Dentre as possibilidades disponíveis na área de processamento digital de sinais, a Transformada Wavelet Discreta se revela extremamente útil na resolução de problemas envolvendo descargas parciais. Sua característica de multi-resolução permite não apenas a redução do ruído do sinal, mas também a busca por sinais transitórios que possam revelar a atividade característica das descargas parciais.

Neste trabalho, uma técnica que aproveita as enormes possibilidades do sensor de efeito Rogowski e o poder de processamento da Transformada Wavelet Discreta para detecção de pulsos de descarga parcial em transformadores e sua implementação em um equipamento portátil serão descritos.

O equipamento desenvolvido para detectar defeitos em transformadores de potência faz uso de processamento digital de sinais de corrente coletados no cabo de aterramento por um sensor de efeito Rogowski. As técnicas de processamento se baseiam na Transformada Wavelet Discreta que é aplicada com dois objetivos diferentes. Num primeiro momento, é feita uma redução de ruído e, em seguida, uma busca por pulsos transitórios, aproveitando a capacidade de multi-resolução dessa transformada.

Este artigo apresenta os detalhes técnicos de operação do equipamento desenvolvido utilizando essa metodologia. Inicialmente, a Transformada Wavelet Discreta é apresentada, bem como exemplos de sua aplicação. Em seguida, é dada uma visão geral do desenvolvimento do equipamento e de sua aplicação em campo.

II. SINAIS INCIPIENTES DE FALHAS EM TRANSFORMADORES

A descarga parcial é um pulso elétrico que pode ocorrer, no caso de isolantes líquidos, dentro de bolhas repletas de gases [1] [2]. Este pulso faz uma ponte, completando apenas parcialmente o circuito entre as fases ou entre a fase e o aterramento, através do núcleo ou da carcaça do transforma-

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL, no projeto 0453-0013..

E. L. Bonaldi, L. E. L. de Oliveira, e G. Lambert-Torres são pesquisadores do CGTI – Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação e Instituto Gnarus (e-mails: {erik.bonaldi, levy.oliveira, jonas.borges, germanoltorres}@gmail.com)

L. E. Borges da Silva e G. F. C. Veloso são professores da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI (e-mail: {leborgess, giscard.veloso}@gmail.com)

F. S. Moreira trabalha no Grupo Neoenergia - TermoPE (e-mail: felipe.moreira@termope.com.br).

dor [1].

Os pulsos de descarga parcial são gerados inicialmente em frequências altas [3], mas dependendo do circuito que percorrem desde o interior do transformador até o ponto em que são detectados, podem sofrer diversas atenuações, o que modifica significativamente sua forma de onda e, principalmente, sua amplitude, reduzindo-a consideravelmente [2]. Aos pulsos de pequena amplitude, soma-se ainda o problema do ruído. Numa subestação, há diversas fontes de ruídos como ondas de rádio, descargas eletrostáticas, coronas, relâmpagos, além do ruído térmico [4]. O próprio equipamento de aquisição de sinais, por possuir grande largura de banda para detectar sinais de descargas parciais também contribui para a contaminação com ruído branco. Assim, uma simples análise visual de um sinal coletado, por exemplo, num terminal de aterramento do transformador, pode não revelar nada relacionado a descargas parciais. É imprescindível, portanto, uma análise mais acurada utilizando técnicas de processamento digital de sinais.

III. BOBINA DE EFEITO ROGOWSKI

Levando em consideração os terminais de aterramento do transformador como um dos caminhos por onde passam os pulsos de descargas parciais na forma de corrente elétrica, sua detecção poderia ser feita monitorando estes locais. Para isto, deve-se utilizar um tipo de sensor que, além de ser capaz de detectar correntes de altas frequências, deve também proporcionar uma boa isolamento elétrica. O dispositivo ideal para esta tarefa é a bobina de efeito Rogowski.

A bobina de Rogowski (Fig. 1) é composta por um molde circular plástico com um enrolamento montado de forma a ter uma densidade de espiras uniformemente distribuída. As seções transversais também devem manter suas áreas uniformes. A bobina deve ser montada em torno do condutor onde se deseja medir a corrente. Uma tensão proporcional à variação da corrente surgirá entre os terminais do enrolamento, de acordo com a expressão (1), onde H está relacionado à sensibilidade da bobina. Assim, integrando este sinal de tensão, tem-se o sinal de corrente que se deseja medir.

$$E = H \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

A bobina de efeito Rogowski possui ótima sensibilidade para altas frequências e sua construção proporciona excelente isolamento elétrica. Ela também é capaz de medir altos níveis de correntes, variando desde algumas centenas de miliampéres até centenas de milhares de ampéres.

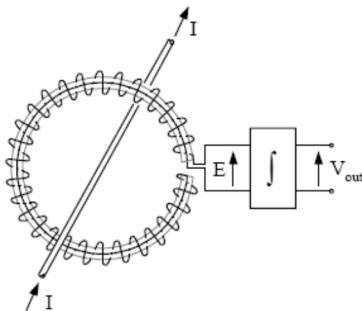


Figura 1. Bobina de Efeito Rogowski.

Instalando-se uma bobina de efeito Rogowski num dos terminais de aterramento do transformador, pode-se monitorar o sinal de corrente neste ponto. A utilização de técnicas apropriadas de processamento de sinal permite extrair os pulsos de descargas parciais que eventualmente se manifestarem nos referidos terminais.

IV. PROCESSAMENTO DO SINAL

A. Visão Geral

A Figura 2 ilustra esquematicamente como foi feito o processamento de sinais neste trabalho, baseado em [5].

Considerando as características dos pulsos de descargas parciais que podem ser detectados nos terminais de aterramento do transformador, deve-se estabelecer uma boa estratégia de processamento do sinal coletado, levando em conta todos os problemas envolvidos.



Figura 2. Estratégia de processamento do sinal de corrente.

A ferramenta matemática básica desta estratégia de processamento de sinais é a Transformada Wavelet Discreta. Ela proporciona a redução do ruído e simplifica a detecção dos transitórios. O detalhamento da estratégia será feito a seguir.

B. Transformada Wavelet Discreta e Multi-resolução

A multi-resolução é um conceito relacionado com a capacidade de visualizar um sinal em diferentes resoluções, ou seja, analisar um sinal em diferentes níveis de detalhes, sendo capaz de destacar o que é mais relevante em cada nível. A decomposição do sinal em diferentes resoluções pode ser feita com a Transformada Wavelet Discreta. A importância de visualizar um sinal em diferentes níveis de detalhes está no fato de que suas características podem estar distribuídas nesses níveis. Assim, se os níveis forem separados, as características também serão.

A Transformada Wavelet Discreta é uma forma de expansão de funções ou sinais [6]. Uma característica peculiar é seu conjunto de expansão ser formado por dois tipos de funções: wavelets e funções escalas. Desta forma, a expressão para a Transformada Wavelet Discreta pode ser escrita na forma:

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{j_0,k} \cdot \varphi_{j_0,k}(t) + \sum_{j=j_0}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{j,k} \cdot \psi_{j,k}(t) \quad (2)$$

onde $c_{j_0,k}$ são os coeficientes relacionados com as funções escalas, chamados de coeficientes de aproximação; $d_{j,k}$ são os coeficientes relacionados com as funções wavelets, chamados de coeficientes de detalhes; $\varphi_{j_0,k}$ é o conjunto de expansão formado por funções escalas; $\psi_{j,k}$ é o conjunto de expansão formado por funções wavelets; j é o índice relacionado com a escala; k é o índice relacionado com o tempo.

Os coeficientes na Transformada Wavelet Discreta dependem de duas variáveis, ou seja, os coeficientes têm duas dimensões que cobrem o conteúdo espectral do sinal e o conteúdo temporal. Estes coeficientes podem ser organizados em níveis definidos pela variável j , relacionados com o

conceito de escala de uma função. A escala é um parâmetro relacionado com a frequência e pode ser pensado como inversamente proporcional a ela. Se a frequência cresce, a escala decresce. A informação temporal é preservada pela variação em k . Portanto, a Transformada Wavelet Discreta é o processo de se calcular os coeficientes $c_{j0,k}$ e $d_{j,k}$.

Na prática, quando um sinal é decomposto pela Transformada Wavelet Discreta, ele é separado em níveis, cada um relacionado a uma banda de frequências. O número de níveis é um parâmetro deste processo. O resultado é um certo número de níveis de coeficientes de detalhes e um único nível de coeficientes de aproximação que retêm o conteúdo de baixa frequência do sinal. A Figura 3 ilustra como é uma decomposição (de três níveis) no domínio da frequência.

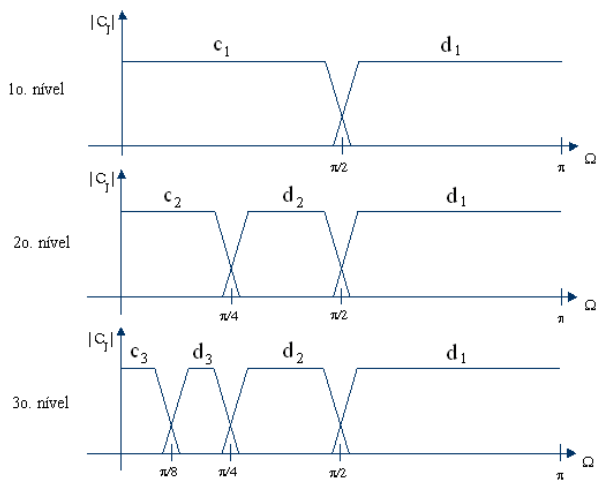


Figura 3. Visualização de uma decomposição de três níveis no domínio da frequência.

Os coeficientes, agrupados por bandas de frequências (níveis de decomposição), preservam a informação temporal, permitindo uma visualização de diferentes sinais que compõem o sinal original. Na Figura 4, pode-se ver um exemplo de sinal decomposto em dois níveis. Os dois primeiros gráficos são sinais componentes relacionados a frequências altas (detalhes). O terceiro gráfico é o sinal componente de mais baixa frequência (aproximação). O último gráfico é o sinal original, formado pela soma dos sinais componentes obtidos pela Transformada Wavelet Discreta.

Neste trabalho, as informações separadas na decomposição do sinal de corrente elétrica pela Transformada Wavelet Discreta são usadas para reduzir o nível de ruído e para encontrar os pulsos de Descarga Parcial que se manifestam como transitórios de amplitude muito pequena.

C. Redução de Ruído

A separação de características por bandas de frequência pode ser útil quando se deseja fazer a redução do ruído do sinal [7]. Para compreender como isto pode ser feito, é preciso conhecer um pouco sobre a Transformada Wavelet Discreta Inversa. A inversa é capaz de reconstruir a função (ou sinal) original a partir dos coeficientes, num caminho inverso ao da aplicação da transformada. Porém, como a Transformada Wavelet Discreta possui um conjunto bidimensional de coeficientes, os quais representam diferentes sinais que compõem o sinal original, é possível reconstruir apenas parte do sinal simplesmente selecionando os coeficientes

que se deseja utilizar. Assim, se alguns níveis da decomposição correspondem a sinais espúrios, é possível descartar os coeficientes correspondentes e reconstruir o sinal sem a parte ruidosa. Este conceito é formalmente demonstrado em [7].

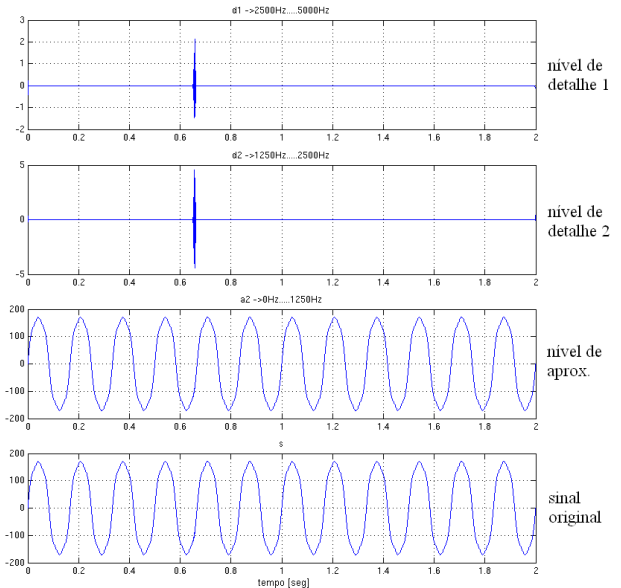


Figura 4. Decomposição de dois níveis visualizada no domínio do tempo.

Para ilustrar a redução de ruído, a Figura 5 exibe um sinal senoidal contaminado com ruído branco. A decomposição deste sinal em 4 níveis aparece na Figura 6.

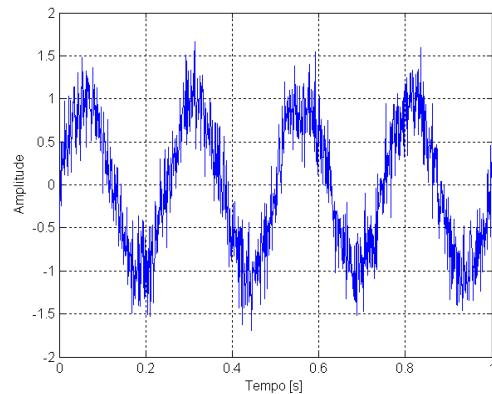


Figura 5. Exemplo de sinal senoidal contaminado com ruído.

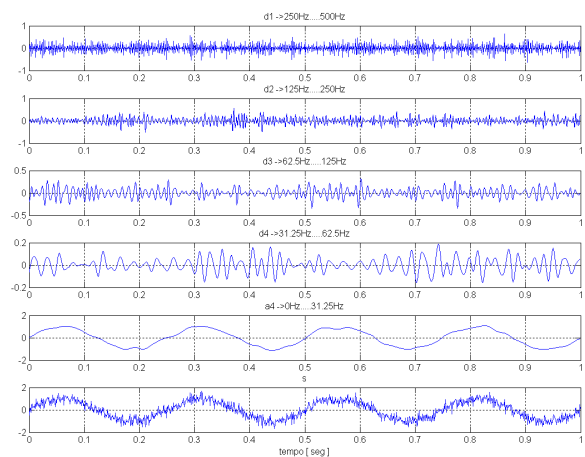


Figura 6. Decomposição do sinal ruidoso em 4 níveis com a Transformada Wavelet Discreta.

Nota-se que os coeficientes dos níveis de detalhes contêm quase toda a energia do ruído. Determinando-se um limiar (threshold) abaixo do qual todo coeficiente nestes níveis é considerado ruído, basta eliminá-los (substituir por um valor nulo) e reconstruir o sinal com os coeficientes modificados resultando no gráfico da Figura 7. Apesar da pequena deformidade no terceiro ciclo, pode-se dizer que a redução de ruído foi bem sucedida. Em [7], é apresentada uma forma de cálculo do limiar (threshold) do ruído.

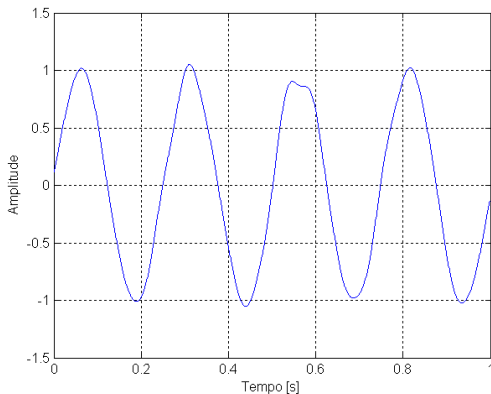


Figura 7. Sinal após o processamento de redução de ruído.

D. Detecção de Transitórios

Ao se aplicar a Transformada Wavelet Discreta a um sinal que contenha um transitório de frequência relativamente alta, ele será decomposto em vários níveis (ou bandas de frequência, como explicado anteriormente), separando o sinal estacionário do sinal transitório. A devida reconstrução dos níveis que contêm o transitório permite visualizá-lo, além de se poder determinar quando ocorreu e quanto tempo durou [7] [8].

Um fato importante que deve ser levado em conta é que o mesmo sinal, onde se deseja procurar pulsos de descargas parciais, também sofreu uma redução de ruído usando a Transformada Wavelet Discreta. Neste caso, se este processo não for bem feito, os pulsos que se deseja encontrar podem ser eliminados juntamente com o ruído, uma vez que são de amplitudes muito pequenas, quase totalmente imersos no ruído [9].

Assim, a remoção de ruído usando a Transformada Wavelet Discreta conjugada com a busca por transitórios correspondentes a pulsos de descargas parciais depende muito da escolha da wavelet cuja forma de onda seja bem correlacionada com a do pulso. Isto fará com que os coeficientes relacionados com os pulsos tenham valores mais altos e fiquem acima do limiar (*threshold*) de redução de ruído [8].

V. EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO

O equipamento desenvolvido tem como principal característica a mobilidade. Todo o sistema de medição e processamento está acondicionado em um *case* de fácil transporte (Figura 8), de modo que um único equipamento permite monitorar todos os transformadores de uma subestação.

O procedimento de medição consiste em levar o equipamento até o transformador a ser medido. A bobina de efeito Rogowski deve ser acoplada ao cabo de aterramento (fig. 9) e o sistema deve ser ligado. O software, que já deve ter os transformadores cadastrados, permite selecionar aquele que

se deseja medir e iniciar o processo, como mostrado na tela de coleta de sinais na fig. 10.



Figura 8. Equipamento de Detecção de Defeitos em Transformadores de Potência.



Figura 9. Medição da corrente no aterramento.

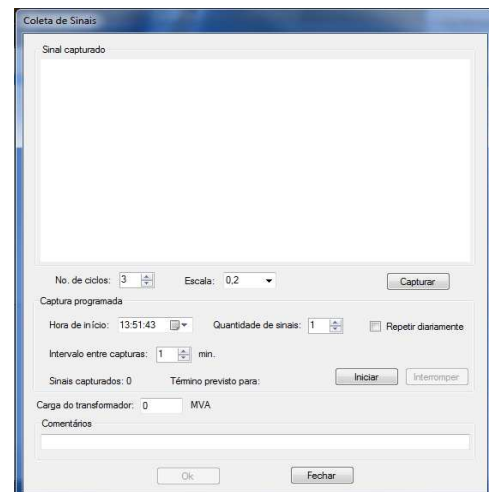


Figura 10. Tela de coleta de sinais.

Uma vez coletado, o sinal é automaticamente processado para redução de ruído, descrita nas seções anteriores, e também para a detecção de pulsos de pequena intensidade presentes no sinal de corrente do aterramento (fig. 11). Eventos como descargas parciais podem descarregar sua energia através do aterramento.

A detecção de defeitos através desse método consiste em fazer medições periódicas dos transformadores, de preferência sempre com a mesma condição de carga. O valor de energia média dos pulsos encontrados é constantemente mo-

nitorado e a variação de sua tendência pode indicar algum tipo de defeito em andamento. Um exemplo de gráfico de tendência da energia média dos pulsos pode ser vista na figura 12.

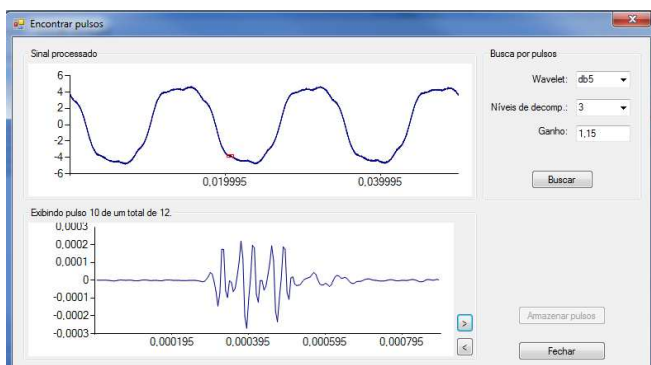


Figura 11. Exemplo de pulso de pequena intensidade encontrado em um sinal de corrente de aterramento de um transformador de potência.

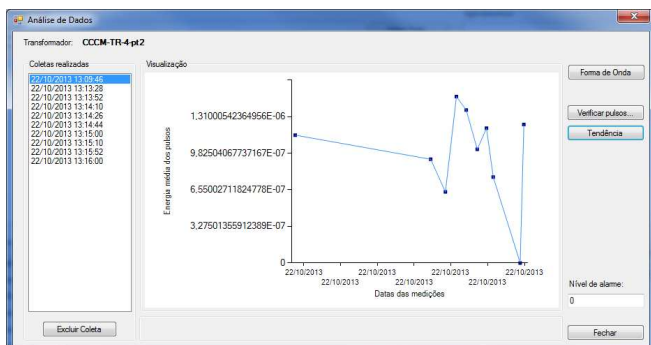


Figura 12. Gráfico de tendência da energia média dos pulsos de um transformador de potência.

VI. RESULTADOS DE TESTES DE CAMPO

Foram definidos pela equipe do projeto os seis transformadores que seriam monitorados pelos seis equipamentos do lote pioneiro. São eles: 0BAT10 e 1BAT10 da TermoPE; TE02 e TSA4 da Itapebi e Trafo de 3MVA de Pacatuba e Trafo de Mogi Guaçu da EnergyWorks.

Na primeira fase de instalação e operação do lote pioneiro, os equipamentos foram instalados nos dois transformadores da TermoPE e nos dois transformadores da Itapebi.

Para a segunda fase, foi ministrado o treinamento de Instalação e Operação do sistema (com os equipamentos do Lote Pioneiro – Fase 2) aos senhores Adenir Baia de Oliveira (Técnico Eletricista Sênior) e Cláudio Sobreira Viana (Engenheiro Especialista), representantes da EnergyWorks. Nesse mesmo período o equipamento foi instalado no transformador selecionado na unidade de Mogi Guaçu para realização de coleta e análise dos sinais. O outro equipamento foi enviado para Pacatuba.

A. Instalação Realizada em Mogi Guaçu

Em Mogi Guaçu, o equipamento foi instalado em um transformador de 40MVA. Como este apresentava três pontos de aterramento, todos foram testados. As figuras seguintes apresentam o processo de instalação, coleta e análise realizado durante o treinamento ministrado aos profissionais da EnergyWorks.



Figura 13. Instalação e teste no ponto 3 de aterramento (lado de 138kV).

Os dados coletados em Mogi Guaçu revelaram uma operação aparentemente normal, sem manifestações significativas de possíveis defeitos, considerando a baixa quantidade de pulsos encontrados nos sinais.

A coleta feita no ponto 1 revelou um sinal com forma senoidal pouco distorcida e com pequena quantidade de pulsos. No ponto 2 (lado de 11,5kV), os pulsos encontrados foram um pouco mais numerosos e a forma de onda do sinal mais distorcida. O ponto 3 (lado de 138kV) revelou formas de onda pouco distorcidas, mas uma quantidade maior de pulsos (Fig. 11).

A visualização da tendência revelou que os pulsos, além de poucos, são de baixa energia (Fig. 12). Como foram as primeiras medições feitas nesse transformador, recomenda-se a formação de histórico para análise comparativa dos dados.

B. Instalação na Energyworks

Os transformadores monitorados, bem como os períodos de coleta de dados realizados na Energyworks estão apresentados na Tabela I.

O transformador TR1 foi monitorado pela primeira vez e por um período de três dias. Logo, trata-se do início da formação de histórico desta máquina. Vale ressaltar que a análise é comparativa e que esta assinatura será comparada com as assinaturas futuras no intuito de se inferir falhas no transformador. Este transformador foi monitorado em dois pontos distintos, no aterramento da carcaça e no aterramento do para-raios.

Tabela I – Transformadores Monitorados na Energyworks.

Transformador	Potência	Tensão
TR1	9,375kVA	11,5kV/138kV
TR2	9,375kVA	11,5kV/138kV
TR3	35kVA	11,5kV/138kV
TR4	30kVA	11,5kV/138kV
TR5	3,75kVA	480V/11,5kV

A energia média dos pulsos no aterramento da carcaça é menor que no aterramento do para-raios. Porém, este último ponto pode ser mais suscetível a interferências eletromagnéticas externas do que o aterramento na carcaça. As formas

de ondas coletadas nesse transformador são todas muito semelhantes, um tanto distorcidas, mas condizentes com os testes feitos em outros transformadores (Fig. 14).

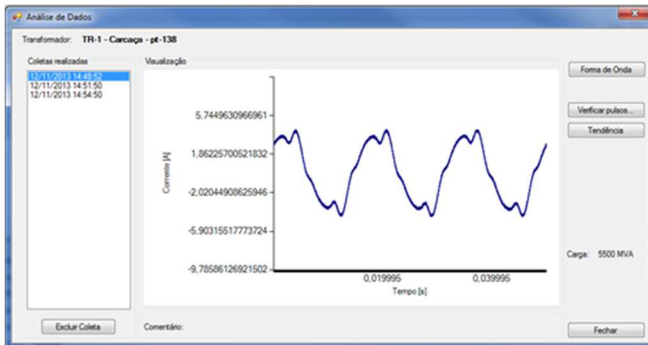


Figura 14 – Forma de onda típica do transformador TR1 da Energyworks.

O transformador TR2 apresentou uma energia média de pulsos maior que o TR1, apesar dos dois transformadores serem parecidos. Apesar de ter o registro de carga no momento da coleta de sinais, o TR2 foi monitorado apenas no dia 12/11/13. Seus dados foram coletados em dois pontos diferentes, assim como no TR1, no aterramento da carcaça e no do para-raios.

O transformador TR3 foi monitorado no dia 12/11/13. Dois pontos de aterramento na carcaça foram monitorados, um próximo à alta tensão e outro próximo à baixa tensão. As curvas de tendência mostram pulsos de baixa energia, se comparados com os transformadores TR1 e TR2. A carga no momento da coleta de sinais era de 17,5 kVA.

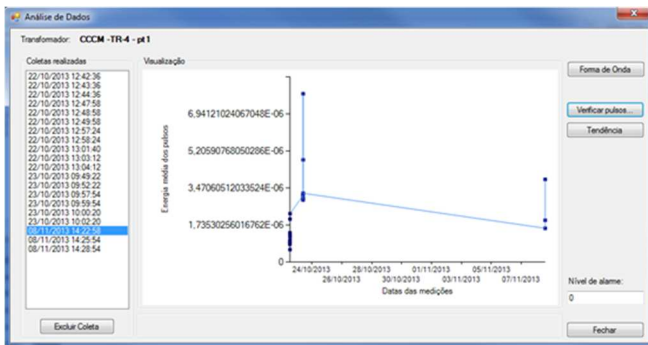


Figura 15 – Curva de Tendência dos dados coletados no aterramento denominado pt1 do transformador TR4 da Energyworks.

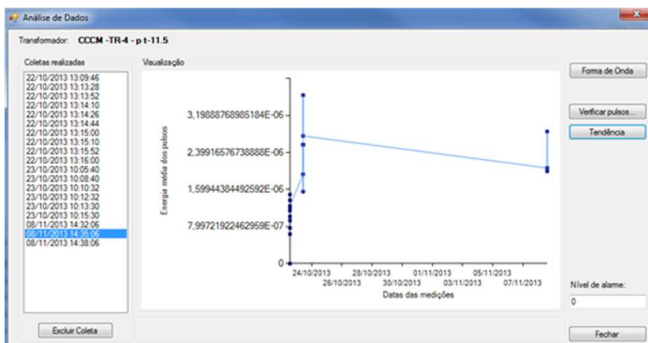


Figura 16 – Curva de Tendência dos dados coletados no aterramento da carcaça próximo à baixa tensão do transformador TR4 da Energyworks.

O monitoramento do transformador TR4 cobriu um período maior, embora tenha havido coletas de sinais em apenas

três dias. Só houve um registro de carga, no dia 23/10/13, de 25,8kVA. As curvas de tendência nos três pontos monitorados podem ser vistas nas Figuras 15, 16 e 17.

A curva dos sinais do aterramento próximo à alta tensão tem uma ligeira diferença devido a variações de energia dos pulsos num mesmo dia. Isto sugere que as coletas de sinais devem ser feitas, se possível, em condições de funcionamento semelhantes, ou seja, com a mesma carga e, de preferência, no mesmo horário do dia. Assim, as alterações devido a possíveis defeitos em evolução serão mais facilmente percebidas.

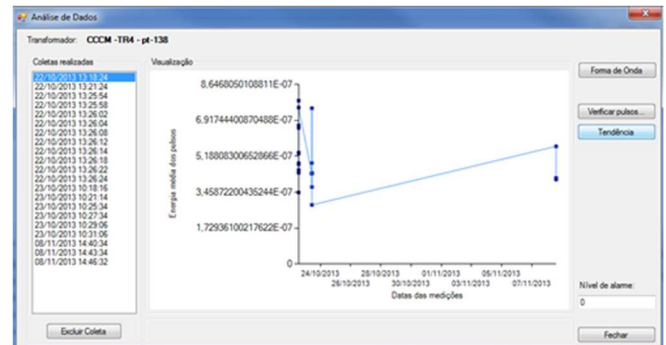


Figura 17 – Curva de Tendência dos dados coletados no aterramento da carcaça próximo à alta tensão do transformador TR4 da Energyworks.

O último transformador monitorado na Energyworks foi o TR5. Poucos sinais foram coletados. Não há informação de carga. A forma de onda típica aparece na figura 18, onde se pode ver um nível razoável e bem definido de distorções harmônicas. A energia média dos pulsos é baixa, mas a pouca quantidade de dados e informações ainda não permite uma inferência confiável sobre o estado do transformador.

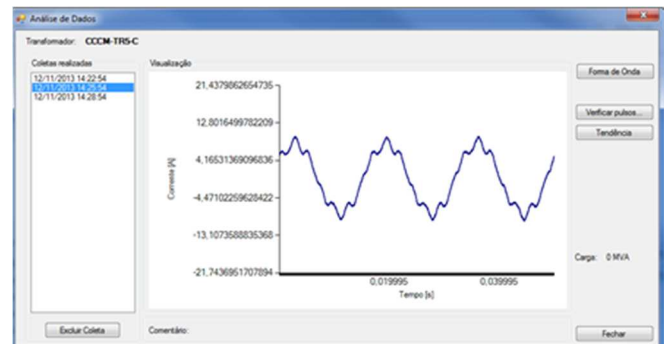


Figura 18 – Forma de onda típica dos sinais coletados no transformador TR5 da Energyworks.

Os transformadores da Energyworks passaram pelo monitoramento com o Equipamento de Detecção de Defeitos em Transformadores de Potência e revelaram pulsos de baixa energia fluindo pelos seus aterramentos. O histórico de dados começou a ser formado para permitir análises comparativas futuras. Recomenda-se fazer medições regulares com a mesma condição de carga para que os dados reflitam a condição dos equipamentos.

C. Instalação na Termope

Os transformadores monitorados, bem como os períodos de coleta de dados realizados na Termope são apresentados na Tabela II.

Tabela II – Transformadores Monitorados na Termope.

Transformador	Potência	Tensão
OBAT10	290MVA	18kV/235kV
1BAT10	210MVA	18kV/235kV
2BAT10	210MVA	18kV/235kV

As medições no transformador OBAT10 iniciaram-se com uma coleta inadequada e é interessante ilustrar o problema. Foi feita uma escolha de escala de medição equivocada, resultando em formas de ondas ceifadas, como pode ser visto na figura 19. Após a seleção da escala adequada, a forma de onda aparece correta na figura 20.

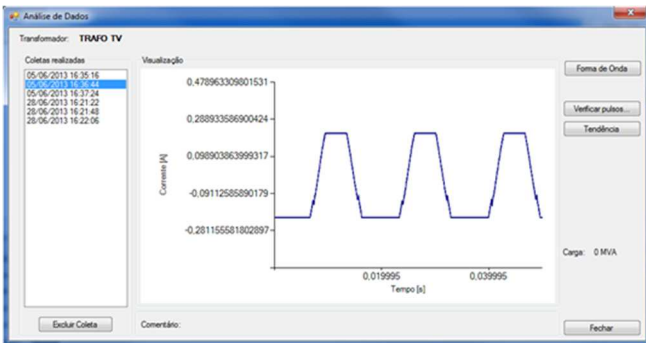


Figura 19 – Forma de onda ceifada devida à escolha inadequada da escala em uma medição no transformador OBAT10 da Termope.

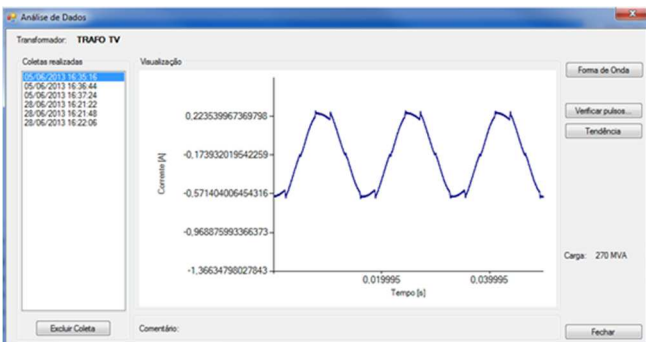


Figura 20 – Forma de onda (correta) medida no transformador OBAT10 da Termope.

A curva de tendência entre os dias 05/06/13 e 09/12/13 (Fig. 21) mostra um aumento súbito de energia média dos pulsos encontrados em Agosto. Mas volta à normalidade após esse episódio. Como nenhuma informação adicional foi fornecida, nada pode ser dito sobre esta ocorrência. Uma possibilidade é um aumento de carga.

As formas de onda do transformador 1BAT10 apresentam um tipo interessante de distorção harmônica, como pode ser visto na figura 22. Seu gráfico de tendência (Fig. 23) revela uma redução de pulsos no segundo dia medido, o que pode ser influência da redução da carga de 190MVA no dia 05/06/13 para 150MVA no dia 28/06/13.

O aumento súbito na curva de tendência pode ser explicado por algum tipo de falha na hora da coleta, pois a forma de onda nesse dia está alterada (Fig. 24).

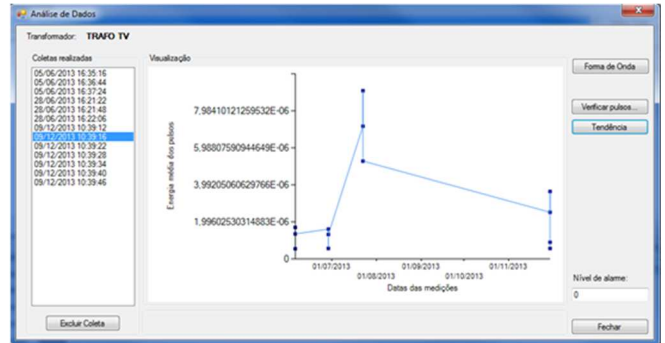


Figura 21 – Curva de Tendência dos dados coletados no aterramento do transformador OBAT10 da Termope.

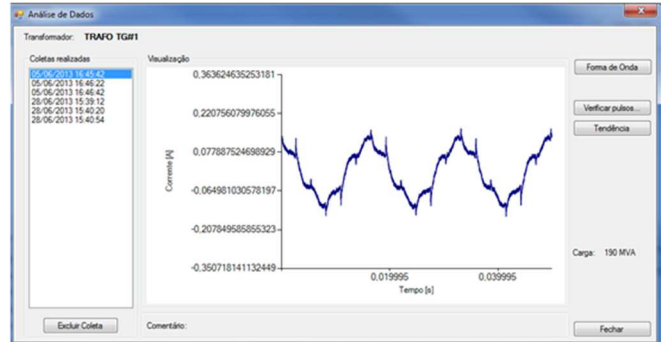


Figura 22 – Forma de onda medida no transformador 1BAT10 da Termope.

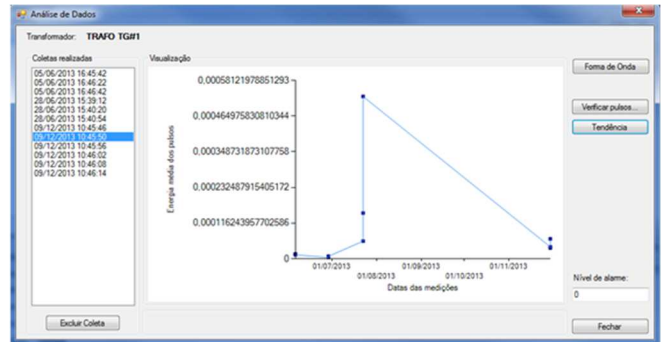


Figura 23 – Curva de Tendência dos dados coletados no aterramento do transformador 1BAT10 da Termope.

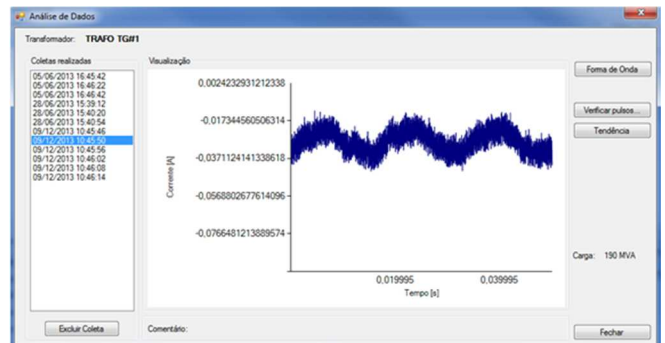


Figura 24 – Forma de onda alterada no transformador 1BAT10 da Termope.

D. Instalação na Itapebi

O transformador monitorado e os períodos de coleta de dados realizados em Itapebi foi o TSA04 de 1500 kVA e relação de transformação de 460V/660V.

As coletas de sinais em Itapebi resultaram em formas de ondas incomuns, cujo formato não tinha sido registrado até então. Em três situações diferentes foram vistos padrões não usuais, mostrados nas figuras 25, 26 e 27.

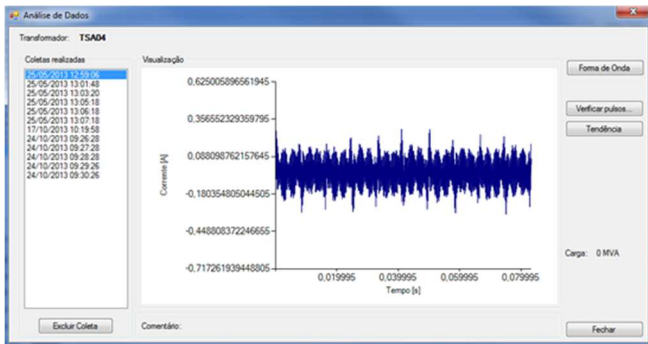


Figura 25 – Forma de onda medida no transformador TSA04 de Itapebi em Maio de 2013.

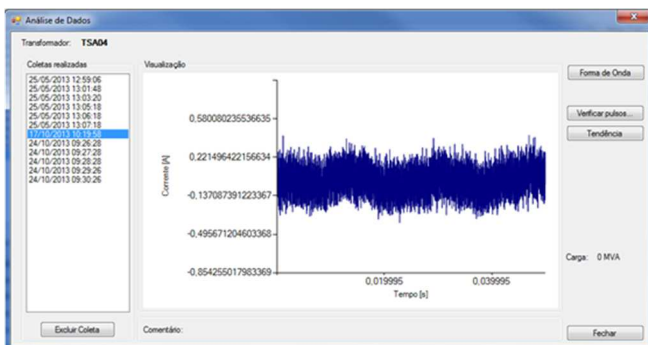


Figura 26 – Forma de onda medida no transformador TSA04 de Itapebi em Outubro de 2013.

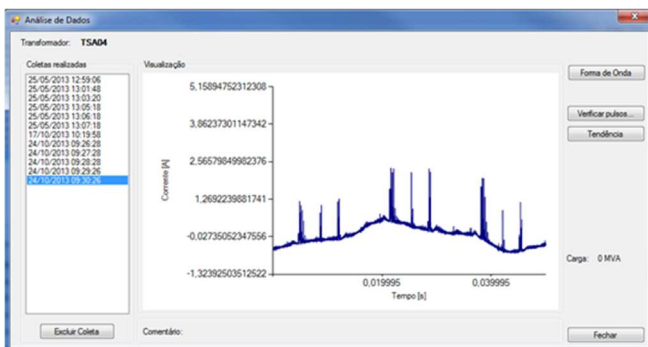


Figura 27 – Última forma de onda medida no transformador TSA04 de Itapebi.

VII. CONCLUSÕES

O equipamento para detecção de defeitos em transformadores de potência utilizando bobinas de efeito Rogowski e processamento dos sinais coletados com Transformada Wavelet Discreta revelou-se eficaz na extração de pulsos de amplitude reduzida e imersos em ruído, situação típica na detecção de descargas parciais e, possivelmente, de outros defeitos.

A utilização em longo prazo do equipamento ainda será feita para confirmar os resultados, mas a técnica descrita neste trabalho traz enormes vantagens na detecção de defeitos em transformadores de grande porte. Ela pode ser aplicada com o transformador operando normalmente, sem interrupções e sua sensibilidade permite a detecção de atividade incipiente de falhas. Em comparação com a maioria dos métodos usuais, que exigem a retirada do transformador de operação, esta técnica pode representar uma grande economia na manutenção destes equipamentos.

Em termos de relevância científica, esta linha de projetos gerou duas teses de doutorado. A primeira apresentada no ciclo passado (cabeça-de-série), com o título “Identificação de Padrões de Contaminação em Óleo de Transformador através da Monitoração das Descargas Parciais”, defendida por Giscard Francimeire Cintra Veloso, sob a orientação do Coordenador do Projeto Prof. Luiz Eduardo Borges da Silva, apresentada no dia 1 de julho de 2011, junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá. A segunda tese de doutorado, intitulada “Sistema de Avaliação da Contaminação por Umidade de Óleo de Transformador usando Técnicas de Ultrassom”, foi desenvolvida por Ismael Noronha, sob a orientação do Coordenador do Projeto Prof. Luiz Eduardo Borges da Silva, que teve sua apresentação realizada em 14 de setembro de 2012, junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá.

Já em termos tecnológicos, nesta linha de projetos, foi feito um pedido de patente de invenção intitulado “PROCESSO DE DETECÇÃO PRECOCE DE DEFEITOS EM ISOLAMENTO DE TRANSFORMADORES DE ENERGIA ELÉTRICA POR WAVELET E LÓGICA NÃO CLÁSSICA”.

VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G.J. Paoletti, A. Golubev, “Partial discharge theory and technologies related to medium-voltage electrical equipment”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 37, no. 1, pp. 90-103, January/February 2001.
- [2] S.A. Boggs, “Partial discharge: overview and signal generation”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 6, no. 4, pp. 33-39, July/August 1990.
- [3] R. Bartnikas, “Partial discharges: their mechanism, detection and measurement”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 9, no. 5, pp. 763-808, October 2002.
- [4] I. Shim, J.J. Soraghan, W. H. Siew, “Digital signal processing applied to the detection of partial discharge: an overview”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 16, pp. 06-12, May/June 2000.
- [5] H. Borsi, “A pd measuring and evaluation system based on digital signal processing”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 7, no. 1, pp. 21-29, February 2000.
- [6] C.S. Burrus, R. A. Gopinath, H. Guo, *Introduction to wavelets and wavelet transforms*. New Jersey: Prentice Hall, 1998.
- [7] D.L. Donoho, “De-noising by soft-thresholding”, *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 41, no. 3, pp. 613-627, May 1995.
- [8] X. Ma, C. Zhou, I.J. Kemp, “Automated wavelet selection and thresholding for partial discharge detection”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 18, no. 2, April 2002.
- [9] I. Shim, J.J. Soraghan, W. H. Siew, “Detection on pd utilizing digital signal processing methods part 3: open-loop noise reduction”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 17, no. 1, pp. 06-13, January/February 2001.