

# Desenvolvimento de Metodologia e Sistema Piloto de Controle da Condição Operativa de Comutadores sob Carga

Aurélio M. Barbosa (Light), Wagner L. O. Marques (Light), Adelfo. B. Barnabé (CGTI), José Eduardo B. Querido (CGTI), Newton J. Guaraldo (em memória) (CGTI), José Mak (B&M), Laurence L. Marques (B&M), Flavio Faria (B&M), Viviane B. M. Vieira (B&M), Alexandro Santa Rosa (B&M).

**Resumo** – Este trabalho descreve uma nova e inédita tecnologia de monitoramento de comutadores de derivação sob carga. Os comutadores normalmente operam em regime intenso e exigem manutenções adequadas para garantir seu bom desempenho e conseqüentemente o aumento de sua vida útil. O projeto buscou um novo arranjo de modo a identificar defeitos nos comutadores, através de assinaturas elétricas das correntes de fases do transformador, da corrente do motor do sistema de acionamento e na avaliação do desgaste dos contatos (principais e auxiliares). O sistema registra as condições operativas atuais e as compara com a situação do seu ponto ideal, apontando desvios relacionados a condições anormais de operação. O sistema também monitora o número de operações, e apresenta desgaste dos contatos através do somatório das correntes interrompidas e também seus perfis, com o objetivo de auxiliar na tomada de decisão das medições.

**Palavras-chave** – comutador, comutador sob carga, comutador de derivação sob carga – CDC, comutador de derivação em carga - OLTC, seletor de derivação.

## I. INTRODUÇÃO

O projeto de P&D regulado pela ANEEL intitulado “PD-0382-0087/2015 Desenvolvimento de Metodologia e Sistema Piloto de Controle da Condição Operativa de Comutadores de Derivação Sob Carga – Cabeça de Série” foi realizado pela Light Serviços de Eletricidade S. A. e pelas empresas executoras Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação – CGTI e B&M Pesquisa e Desenvolvimento Ltda. no período de 01/2015 a 12/2016.

Os comutadores de derivação em carga: [1]–[2] ou OLTC (On Load Tap Changer) são dispositivos utilizados como reguladores de tensão em transformadores de potência, com a finalidade de:

- Variar a relação de transformação;

- Controlar o ângulo de fase;  
- Manter a tensão secundária constante mesmo com a tensão primária variável;  
- Controlar o fluxo de potência reativa entre dois sistemas de geração, e/ou ajustar o fluxo de reativos entre os ramos de circuitos malhados;

Estes dispositivos funcionam de forma eletromecânica alterando a ligação dos enrolamentos do transformador de forma automática ou de acordo com a solicitação de um operador, pode ser elétrica e remota através de UTR's - Unidades Terminais Remotas, elétrica através de um comando local ou automático ou até mesmo de forma manual através de uma manivela.

A regulação de tensão para sistemas de transmissão utiliza equipamentos complexos que exigem cuidados especiais na instalação e sobretudo durante a operação. Os comutadores sob carga, representam o principal componente dos reguladores, operam sob intenso regime de solicitação elétrica e mecânica. As técnicas convencionais de manutenção preventiva para comutadores, de acordo com o Guia de Manutenção para Transformadores de Potência – CIGRÉ Brasil são: análise vibro acústica, torque do motor, monitoramento preditivo por análise de óleo e resistência dinâmica: [3]. Além dessas, as concessionárias utilizam a metodologia de intervenção periódica, de acordo com o número de operações indicado pelo fabricante.

Devido sua grande importância no sistema, a adoção de uma política de manutenção preventiva mais eficiente em comutadores, torna-se um fator primordial para garantir melhor desempenho de transformadores de potência e reguladores de tensão, aumentando conseqüentemente a confiabilidade do sistema e sua vida útil.

A ideia do projeto surgiu da necessidade do desenvolvimento de uma nova metodologia para manutenção preditiva das chaves comutadoras, de forma mais eficiente, proporcionando às equipes de manutenção das concessionárias o monitoramento on-line do estado operativo do comutador, possibilitando a intervenção no ponto ótimo, ou seja, antecipando futuros problemas e/ou evitando intervenções desnecessárias.

---

Esse trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL, sob número PD-0382-0087/2015.

Aurélio M. Barbosa [aurelio.barbosa@light.com.br](mailto:aurelio.barbosa@light.com.br); trabalha na Light Serv. de Eletricidade S.A.; José Mak [josemak@buenomak.com.br](mailto:josemak@buenomak.com.br); Viviane Mak Vieira [viviane@buenomak.com.br](mailto:viviane@buenomak.com.br), Alexandro Santa Rosa [alexandro@buenomak.com.br](mailto:alexandro@buenomak.com.br), Flavio Faria [flavio@buenomak.com.br](mailto:flavio@buenomak.com.br); Laurence L. Marques [laurence@buenomak.com.br](mailto:laurence@buenomak.com.br), trabalham na B&M Pesquisa e Desenvolvimento Ltda ME. e Adelfo B. Barnabé [barnabe@cgti.org.br](mailto:barnabe@cgti.org.br); José Eduardo B. Querido [eduardoquerido@cgti.org.br](mailto:eduardoquerido@cgti.org.br); e Newton J. Guaraldo (em memória) trabalham no CGTI, Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação.

## II. DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA

Na primeira parte do desenvolvimento do projeto, na fase experimental, foi realizado um levantamento do estado da arte sobre os principais tipos de reguladores de tensão, comutadores de derivação sob carga em transformadores de potência, e os principais procedimentos utilizados nas manutenções dos testes em um novo modelo laboratorial.

Para a confecção dos protótipos cabeça de série foram utilizados como parâmetros os dados referenciados aos modelos de comutadores com derivação sob carga existentes e o desenvolvido em laboratório.

### A. Comutador de Derivação sob Carga – Estado da Arte

Os comutadores possuem características construtivas complexas, cujas manobras normalmente são realizadas automaticamente com o transformador energizado e a plena carga. O funcionamento depende da interação dos componentes elétricos e mecânicos que basicamente os constituem:

- Sistema de acionamento motorizado: montado externamente ao transformador é responsável pelas operações de trocas de posições do comutador;

- Chave de carga: dotada de resistores e conjuntos de contatos fixos e móveis que opera imersa em um cilindro estanque, com volume de óleo próprio, separado do transformador. Trata-se da parte do comutador mais solicitada durante seu funcionamento; e

- Chave seletora: composta de contatos fixos e móveis, normalmente é imersa no óleo isolante onde esta imersa a parte ativa; as mudanças de posições dos contatos da chave de carga não devem gerar arco-elétrico que resulta na formação de gases combustíveis no óleo do transformador: [4].

Na figura 1 é mostrado um comutador de taps normalmente usado em transformadores de potência.



Figura 1. Comutador sob carga tipo M, da empresa alemã MR Reinhausen.

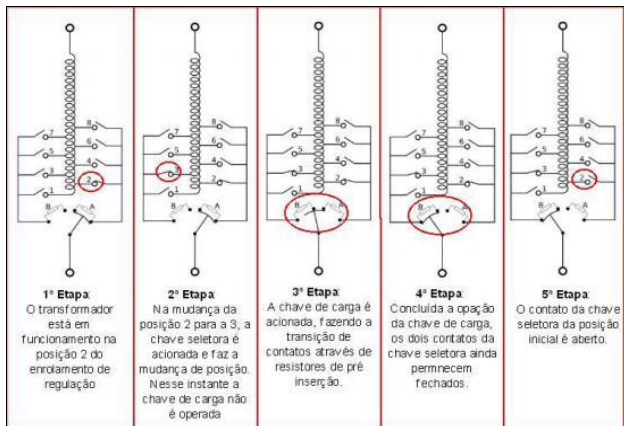


Figura 2. Exemplo do funcionamento de um comutador sob carga.

Observou-se com frequência que as manutenções normalmente ocorrem de acordo com o número de operações realizadas, e isso muitas vezes prolonga a resolução de defeitos, pois as intervenções ocorrem quando os comutadores atingem o número de operações determinadas pelos fabricantes, ou por manutenção corretiva, oriundas de falhas.

Podemos observar na Tabela I, os itens verificados nas manutenções preventivas dos comutadores recomendados pela empresa CPFL: [5].

Tabela I. Check-list de Manutenção Periódica em Comutadores – CPFL

DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES	Periodicidade						A**
	Por número de operações (mil)						
	100	200	300	400	500	600	
Retirar óleo existente no tanque do comutador e lavá-lo	x	x	x	x	x	x	x
Retirar óleo do tanque de compensação e lavá-lo	x	x	x	x	x	x	x
Lavagem do relé de fluxo de óleo	x	x	x	x	x	x	x
Lavar todas as partes da unidade com óleo limpo	x	x	x	x	x	x	x
Polir ou limar as rebarbas dos contatos	x	x	x	x	x	x	x
Limpar os contatos com manta de fibras sintéticas	x	x	x	x	x	x	x
Medir a espessura dos contatos e substituí-los caso estejam abaixo do mínimo	x	x	x	x	x	x	x
Medir o valor dos resistores de transição	x	x	x	x	x	x	x
Limpeza interna do cilindro interruptor com óleo limpo		x		x		x	
Limpeza dos elementos interruptores		x		x		x	
Inspeção das condições dos resistores, partes móveis, mancais, cordoalhas e molas		x		x		x	
Substituição da manivela excêntrica e da lingueta				x			
Substituição da mola do acumulador de energia	x	x	x	x	x	x	
Substituição do compartimento da mola *							
Substituição do suporte da cordoalha do disco superior				x			

\* Após Estudo

\*\*A – A cada 6 anos

Em vista dessas características operativas dos comutadores sob carga, a adoção de uma política de manutenção adequada torna-se um fator primordial para garantir um melhor desempenho destes dispositivos, de forma a aumentar suas vidas úteis. A vida útil destes dispositivos, independente da tecnologia adotada para interrupção do arco voltaico, é função das condições de trabalho, da topologia em que são aplicados e das características elétricas, tais como: níveis de curto-circuito, natureza dos chaveamentos, frequências das operações, estados e condições de manutenção. Conforme conhecimentos dos pesquisadores do projeto, atualmente nas concessionárias brasileiras não há acompanhamento centralizado e autônomo da utilização correta e da manutenção prestada a cada unidade. Não existe implantado um sistema de monitoramento de verificação do número de chaveamen-

tos correlacionando-os com a condição operativa, e com as intensidades das correntes interrompidas. Daí o presente projeto ter buscado o desenvolvimento de um sistema que atendesse essas peculiaridades e o setor de manutenção das empresas concessionárias.

#### A. Ensaios em Campo – Motor-Gerador

No início do desenvolvimento do novo sistema, a equipe do projeto realizou ensaios para mapeamento dos tipos de defeitos que poderiam incidir nos comutadores, para isso a empresa proponente Light disponibilizou para estudos na subestação de Volta Redonda/RJ, um transformador reserva, alimentado por um conjunto motor-gerador.

Foram realizados arranjos técnicos de ligação no transformador para simulação das características de operação, através da injeção de correntes do conjunto motor-gerador. Foram utilizados dois sistemas de aquisição de dados, conectados em paralelos, com configurações de aquisição diferentes; o primeiro composto por 16 entradas analógicas e 8 digitais, com frequência de amostragem de 10 kHz, e o segundo com 8 entradas analógicas e 8 digitais, com frequência de amostragem de até 7 kHz.

A lógica do gatilho implementada para o registro dos eventos foi baseada na variação da corrente durante o processo de comutação e nos sinais originados nestas comutações. Foi levantado o desvio do valor médio RMS (calculado em janela de tempo de 2 s) para correntes superiores a 0,1 A, combinado com lógica tipo “AND” para a entrada digital de comutação do transformador (um ou zero).

A técnica desenvolvida utiliza os sinais de corrente das fases A, B e C do transformador e a corrente do motor do comutador, coletadas através de sensores de corrente tipo TC-alicete. Durante os ensaios junto ao motor-gerador foi conectado no painel de medição do transformador o TC-alicete coletando o sinal de corrente da fase A, conforme mostra a figura 3.



Figura 3. Instalação do transdutor de corrente na fase A do transformador reserva.

Foram realizadas inúmeras comutações percorrendo todas as posições do comutador tanto na subida como descida dos taps com a finalidade de levantar as curvas características em cada posição, conforme mostram as figuras 4 e 5 a seguir.

A finalidade destas medições foi para o aprendizado sobre as características e o desempenho dos sistemas de medição utilizados e para verificação da influência das diferentes taxas de aquisição de dados nas coletas dos sinais e formas de ondas dos sinais medidos.

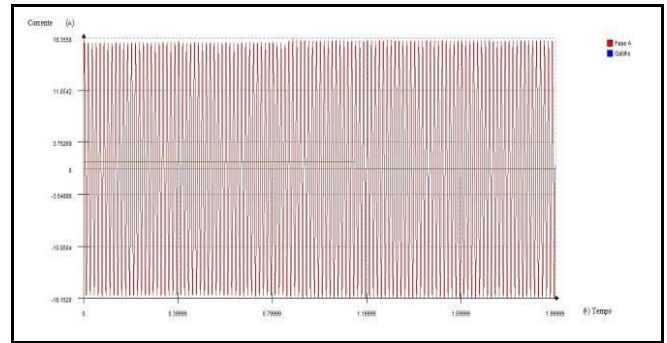


Figura 4. Corrente da fase A em função do tempo no instante de uma comutação do tap 1-2 em condição normal.

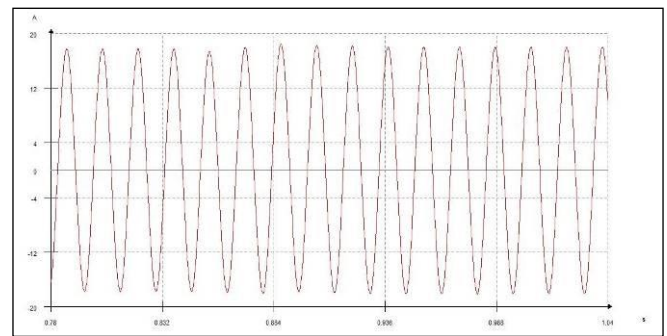


Figura 5. Corrente da fase A em função do tempo no instante de uma comutação do tap 1-2 em condição normal - imagem ampliada.

Nas figuras 4 e 5 mostradas acima pode-se visualizar a característica da assinatura elétrica na comutação do tap 1 para o tap 2 em condição normal de funcionamento, onde a onda de corrente permanece estável, sem variações bruscas ou cortes.

Num segundo ensaio, foi simulado o rompimento da resistência que fixa o contato do comutador, através da retirada dessa “esteirinha”. Esse defeito ocorre quando o desgaste da malha de conexão é grande, fazendo com que a mesma se rompa.



Figura 6. Resistência que segura o contato do comutador aberta.

Após a retirada da resistência que fixa o contato responsável pelas mudanças dos taps, foram realizadas diversas comutações, tanto de subida como descida, com o propósito



de informar ao sistema o comportamento de um “defeito”. As assinaturas elétricas mostradas nas figuras 7 e 8 abaixo mostram esta condição.

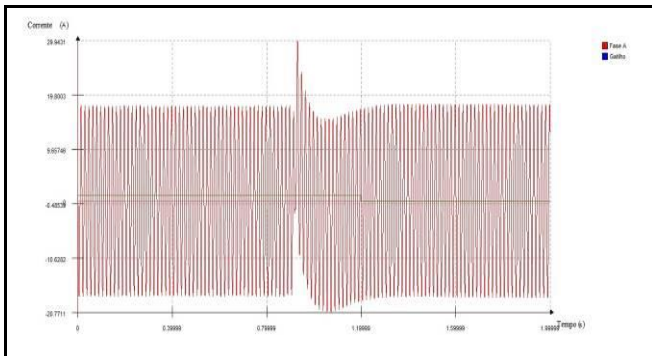


Figura 7. Corrente da fase A em função do tempo no instante de uma comutação do tap 1-2 em condição de defeito.

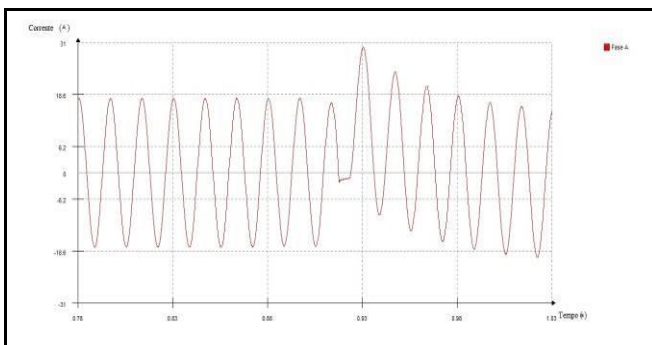


Figura 8. Corrente da fase A em função do tempo no instante de uma comutação do Tap 1-2 em condição de defeito - imagem ampliada.

### B. Protótipo do Painel Coletor de Dados

Após coletadas, as informações das correntes junto aos momentos de comutação, as mesmas subsidiaram o desenvolvimento da metodologia base para o desenvolvimento dos primeiros protótipos.

Nesta primeira versão, o Painel Coletor de Dados, foi desenvolvido utilizando o controlador *CompactDAQ - 9132* da National Instruments e módulos sensores de corrente, tensão e temperatura, responsáveis pela coleta das informações oriundas do transformador e do comutador; a programação foi feita utilizando o ambiente de desenvolvimento integrado *LabVIEW* também da National Instruments.



Figura 9. Controladora *CompactDAQ - 9132* e módulos de corrente, tensão e temperatura no interior do Painel Coletor de Dados.

O controlador *CompactDAQ - 9132* oferece processamento dual-core do Intel Atom e armazenamento não volátil de 16 GB às aplicações avançadas de data logging e de monito-

ramento embarcado. O controlador pode executar o Windows Embedded Standard 7 (*WES7*) ou *LabVIEW Real-Time*; [6]; dessa forma, é possível selecionar entre a familiaridade com a interface de usuário do Windows ou a confiabilidade de um sistema operacional em tempo real. Ambos sistemas oferecem recursos de visualização ao vivo. Utilizando as opções de sistema operacional disponíveis na indústria com o software de projeto gráfico do sistema *LabVIEW*, a portabilidade de seus códigos é simplificada, podendo utilizar os sistemas de medição atuais com esses novos controladores. O controlador *CompactDAQ - 9132* também oferece diversas opções padrão de conectividade e expansão, incluindo armazenamento em cartão SD, USB, Ethernet, serial RS232 e entrada de trigger: [7].

O software *LabVIEW* é um ambiente de desenvolvimento produtivo, para a criação de aplicações customizadas e que interagem com os dados e sinais do mundo real, em áreas como ciência e engenharia. A linguagem de programação G é sua essência, tanto que é frequentemente chamada de “programação em *LabVIEW*”. Com o uso dessa linguagem, é possível aliar rapidamente tarefas como aquisição de dados, análise e operações lógicas, e ainda compreender como os dados estão sendo modificados. Do ponto de vista técnico, “G” é uma linguagem gráfica de programação utilizada na forma de fluxo de dados, na qual os nós (operações ou funções) trabalham sobre os dados assim que eles ficam disponíveis, melhor do que a maneira sequencial linha-após-linha que muitas linguagens de programação empregam. O “fluxo” dos dados é distribuído graficamente através da aplicação com fios que conectam a saída de um nó à entrada de outro.

O benefício prático da abordagem gráfica é que ela foca mais nos dados e nas operações sendo executadas nesses dados, e abstrai muito da complexidade administrativa da programação em computador, como alocação de memória e sintaxe. Novos programadores comumente desenvolvem curvas de aprendizado menores com a linguagem “G” do que outras linguagens de programação, pois eles podem relacioná-la aos fluxogramas ou outras representações visuais familiares de processos. Programadores experientes podem também obter vantagem dos ganhos de produtividade trabalhando em um nível maior de abstração, enquanto ainda empregam práticas avançadas de programação, como programação orientada ao objeto, encapsulamento e perfil de código.

O Painel Coletor de Dados está instalado na subestação Volta Redonda/RJ, seguindo as premissas iniciais do sistema, que é de fácil instalação, sem necessidade de desligamento do transformador, coletando as correntes das fases do transformador através de TCs-alcates, conforme mostradas nas figuras 10, 11 e 12 abaixo.



Figura 10. Instalação dos TCS-alcates nas fases A, B e C do transformador.

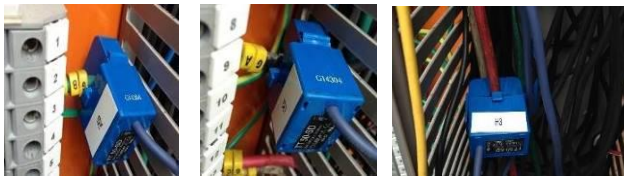


Figura 11. Detalhe da instalação dos TCS-alcates nas fases A, B e C.

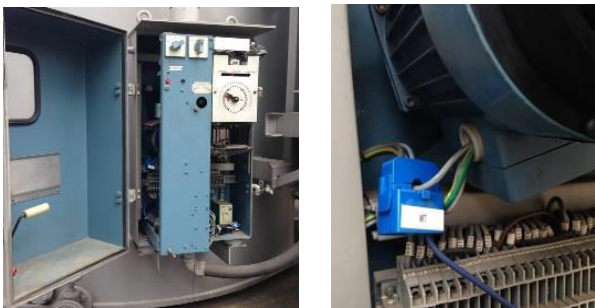


Figura 12. Detalhe da instalação do transdutor de corrente no circuito do motor do comutador.



Figura 13. Instalação do Painel Coletor de Dados.



Figura 14. Painel Coletor de Dados em funcionamento em campo.

Desde a instalação, o Painel Coletor de Dados fez aproximadamente 4.280 registros salvos em seu banco de dados no formato de arquivo TDMS - *Technical Data Management Streaming*. Mensalmente os dados eram coletados e analisados em laboratório.

A análise passa inicialmente pela conversão dos dados/arquivos do formato “TDMS” para o formato “COMTRADE”, possibilitando assim, que os dados produzidos em campo, possam ser reproduzidos em bancada, através da Caixa Doble. Com isso, pode ser observado com mais detalhes o sinal característico da assinatura elétrica gerada.

Os dados coletados forneceram subsídios para mapear as características das assinaturas elétricas das fases A, B e C do transformador, e também da corrente do comutador, possibilitando assim o desenvolvimento e otimização da metodologia.

Vale ressaltar que esta primeira versão do protótipo, teve como um dos objetivos, avaliar o funcionamento inicial da metodologia de monitoramento aplicada em uma situação real de campo, possibilitando melhorias e otimização no sistema e também no processo de análise dos dados, pois esta versão foi programada apenas para a coleta dos dados.

Por se tratar de componentes de altos custos, a equipe do projeto, vislumbrou a possibilidade de migrar para um equipamento mais compacto fisicamente e também por alguns recursos economicamente mais viáveis, que possibilitassem a futura produção em série tornando o produto mais atrativo para o Setor Elétrico, sem perder a qualidade nas aquisições das informações e nos tratamentos dos registros.

### C. Sistema de Monitoramento de Comutadores

Com os levantamentos realizados nos ensaios com o grupo motor-gerador e com as informações levantadas com o protótipo inicial Painel Coletor de Dados, foi desenvolvido a versão final do protótipo, denominado Sistema de Monitoramento de Comutadores.

O enfoque construtivo do hardware teve base em componentes comerciais integrados em um gabinete metálico customizado, similar aos relés existentes no mercado e já familiarizados com a equipe de manutenção das concessionárias.



Figura 15. Painel do Sistema de Monitoramento de Comutadores.

O equipamento foi projetado para operar de forma independente, sem a necessidade presencial de um operador, permitindo o acesso ao equipamento de modo remoto, ou através de conexão pela entrada tipo RJ45, tanto para configuração quanto para visualização em tempo real do monitoramento.

Nestas duas formas de operação o usuário poderá monitorar os seguintes parâmetros: correntes das fases do transformador,

maior; desgastes dos contatos do comutador; posição do tap; número de operação após última intervenção; contador de operação; relatórios; oscilografias; eventos; alarmes e principalmente a detecção de defeitos.

A interface supervisória permite a seleção para download de registros específicos, passíveis de visualização com o software de análise já integrado ao equipamento.

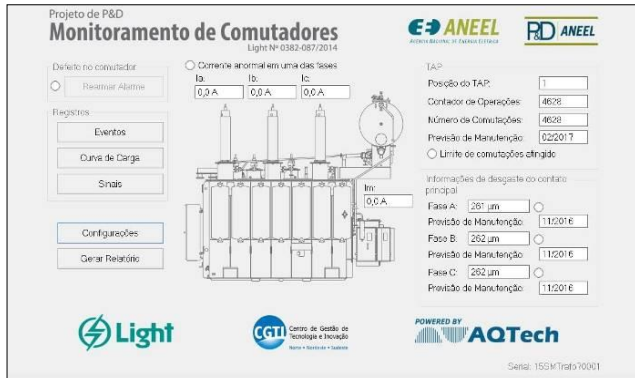


Figura 16. Tela do sistema operacional do equipamento

Além de acompanhar o funcionamento do comutador e ter acesso aos registros de modo instantâneo, o usuário poderá também realizar a partir dos registros obtidos, cálculos avançados, análise temporal, filtragens, dentre outros.

O modelo de algoritmo embarcado no equipamento, inicia o registro dos sinais da comutação, no instante em que há corrente no motor, ou seja, início da comutação. Depois de registrado, o algoritmo detecta se há ou não alterações no padrão do sinal de corrente durante a comutação dos taps do transformador. Para isso, o modelo de cálculo realiza diversas operações com os registros monitorados gerando um sinal de referência para atuação de um gatilho e um sinal de desvio de padrão para cada corrente monitorada no transformador. A figura 17 mostra o sinal de referência para gatilho do defeito (vermelho) e o sinal de desvio de padrão para a corrente monitorada (azul).

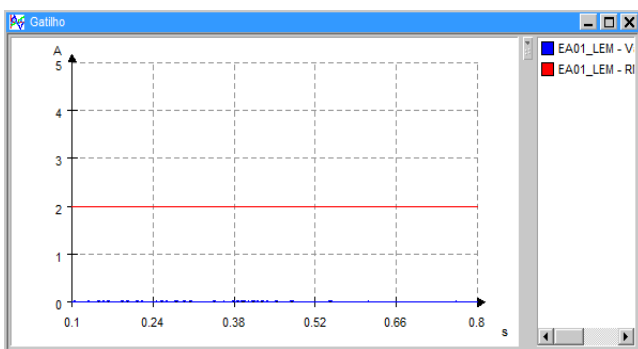


Figura 17. Sinal de corrente da fase A referência para o gatilho em vermelho e o sinal de desvio de padrão para a corrente monitorada em azul.

Com o padrão definido, a detecção do defeito e consequente o acionamento do alarme ocorre quando o valor do sinal de desvio do padrão (azul) atinge o valor do sinal de referência para o gatilho (vermelho) durante uma comutação. O modelo de detecção de defeito é habilitado durante uma comutação de tap, condição determinada a partir dos sinais monitorados.

Existem parâmetros no modelo de cálculo que permitem

aumentar ou diminuir o valor da curva de referência para acionamento do gatilho de defeito, permitindo dessa forma uma mudança de sensibilidade no algoritmo de detecção de defeito.

A figura 18 mostra três valores de referência para determinação do limite da faixa de defeito, indicados por Ganho (G) e Offset (O). Dentre os três sinais de referência apresentados, utilizamos para o modelo de cálculo,  $G=10\%$  e  $O=0,5A$ , que se mostrou mais adequado para os tipos de sinais encontrados durante os ensaios.

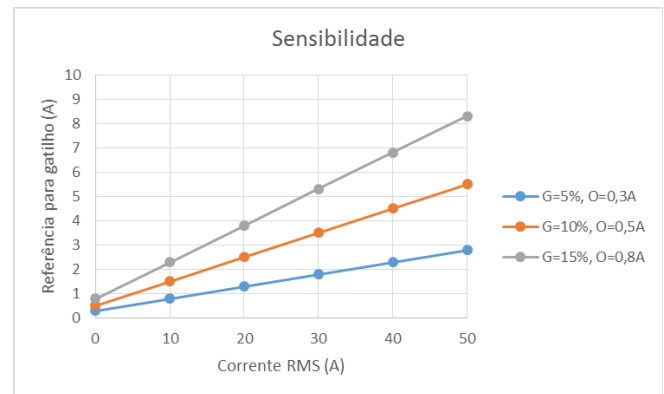


Figura 18. Gráfico de sensibilidade do detector referência para gatilho (A) em função da corrente RMS (A).

O modelo apresenta uma sensibilidade dinâmica. O sinal de referência para o gatilho varia proporcionalmente à corrente que circula no transformador. Os parâmetros permitem alterar a inclinação e o deslocamento vertical da curva. Com a definição dos limites para detecção de defeitos, embarcadas no algoritmo, foram realizados ensaios em bancada, considerando os ensaios de campo realizados com o motor-generador, em três condições: normal, defeito e operando na rede.

#### - Ensaio 1: Transformador em condição normal

Não foram registrados falsos alarmes nessa condição. Foram analisadas em ambiente simulando 40 comutações. O sinal de desvio do padrão permaneceu distante do sinal de referência para gatilho em todas as comutações. A figura 19 mostra uma dessas comutações de tap.

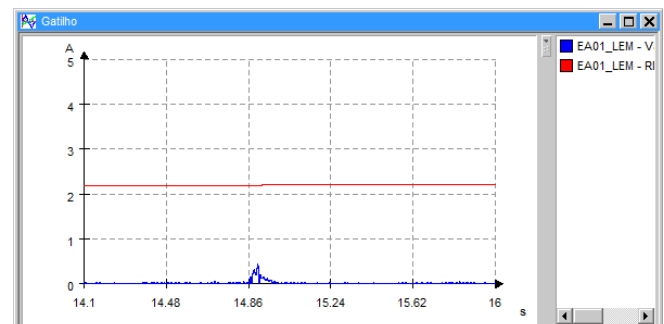


Figura 19. Sinal de corrente da fase A referência para o gatilho em vermelho e o sinal de desvio de padrão para a corrente monitorada em azul em condição normal

#### - Ensaio 2: Transformador em condição de defeito

Como nem sempre os efeitos de um defeito são percebidos no sinal de corrente, foram registrados alarmes em 26 comutações do total de 43 registros analisados, aproxima-



damente 60% das comutações registradas. A figura 20 mostra uma dessas comutações sem alarme.

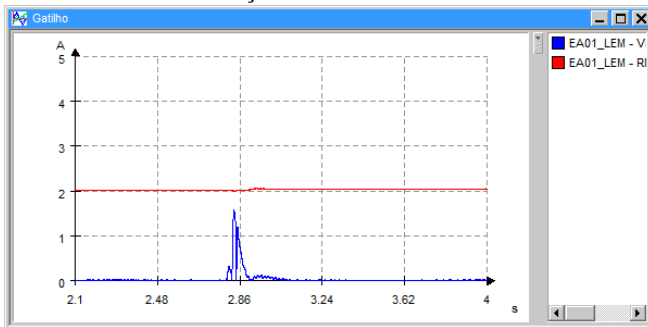


Figura 20. Sinal de corrente da fase A referencial para o gatilho em vermelho e o sinal de desvio de padrão para a corrente monitorada em azul para uma comutação sem alarme.

Na figura 21 é apresentada a comutação com acionamento do alarme, pois o sinal da corrente de comutação ultrapassou o limite determinado para defeito.

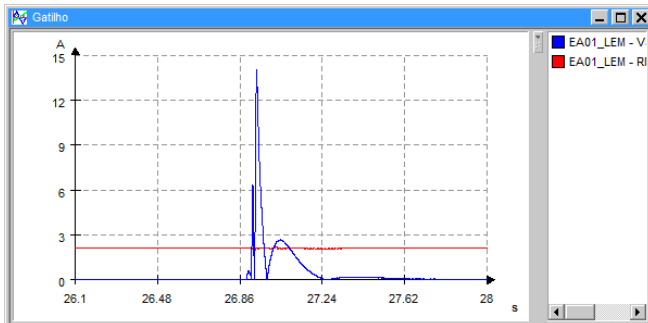


Figura 21. Sinal de corrente da fase A referencial para o gatilho em vermelho e o sinal de desvio de padrão para a corrente monitorada em azul para uma comutação com alarme.

Verificou-se que nem toda comutação em condição de defeito gera uma alteração no padrão do sinal de corrente capaz de atuar o alarme (para a sensibilidade ensaiada).

### - Ensaio 3: Transformador em condição normal conectado à rede

Nesta condição verificou-se que o sinal de desvio de padrão (azul) fica um pouco mais “ruidoso” em condição normal de operação na rede, porém, ainda assim, seus valores ficam muito inferiores ao sinal de referência para acionamento do alarme (vermelho).

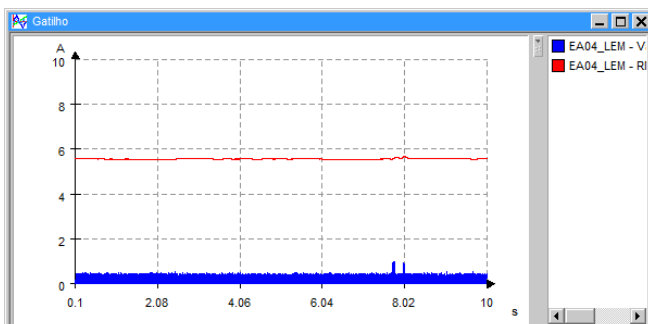


Figura 22. Sinal de corrente da fase A referencial para o gatilho em vermelho e o sinal de desvio de padrão para a corrente monitorada em azul para condição normal quando conectado à rede.

Considerando os registros analisados e os parâmetros escolhidos, a probabilidade de detecção de um defeito é de 60% em uma única comutação. Quando o defeito é detecta-

do, o alarme é acionado e permanece ativo até que seja rearmado manualmente.

Portanto, a probabilidade do sistema detectar um defeito em um comutador com a “esteirinha” desconectada em até 10 comutações é de 99,99%, considerando os dados obtidos em campo e a sensibilidade selecionada e utilizada, validando a eficácia do algoritmo.

A Figura 23 mostra o gráfico de eficiência do modelo de detecção em função de comutações. Este gráfico mostra curvas de diferentes sensibilidades.

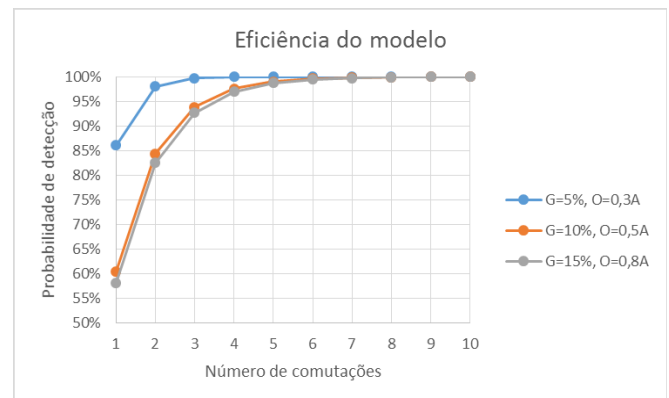


Figura 23. Probabilidade de detecção de defeito (%) em função do número de comutações.

Os parâmetros escolhidos para validação correspondem à curva laranja. Não foram registrados falsos positivos, atuações indevidas do alarme, no modelo ensaiado em laboratório em nenhum dos casos, porém, é importante ressaltar que aumentando a sensibilidade do modelo (curva azul) corre-se o risco de atuações indevidas do alarme (falsos positivos).

Foi verificado também que após a sexta comutação, a probabilidade de detecção de um dado defeito é muito próxima de 100% em todos os casos ensaiados.

Os resultados mostraram que a sensibilidade ensaiada se mostrou adequada e conclui que o modelo está apropriado para testes e validações em campo.

### D. Aplicação da metodologia desenvolvida em campo

Após os testes realizados em bancada, a metodologia do Sistema de Monitoramento de Comutadores, o protótipo final foi construído e instalado em campo, em duas subestações sugeridas pela empresa Light, SE Fontinelli e SE Saudade. Permanecendo conectado à rede em condições normais de operação.

Após várias comutações manuais e causadas pelo próprio comutador, foram analisadas as correntes das fases A, B e C e dos motores de comutação. Verificou-se que os sinais obtidos apresentavam componentes DC (Corrente Contínua) que prejudicaram o correto funcionamento do algoritmo de detecção de defeitos do equipamento.

A figura 24 mostra a corrente da fase B e seu valor médio em um sinal coletado em campo em condições normais de operação. Note que há uma componente DC, que faz com que a fase B valor médio, fique diferente de 0. Causando assim, uma condição de defeito no sistema, mesmo com o comutador em condições normais (sem defeito) fazendo com que o alarme acione constantemente.

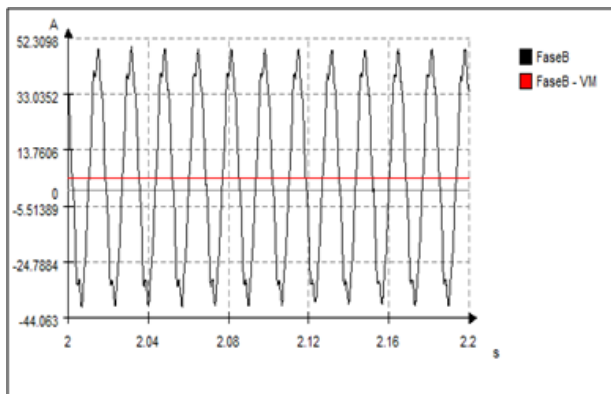


Figura 24. Corrente da fase B e seu valor médio ao longo do tempo de registro.

Para eliminar a influência da componente DC sobre os sinais medidos, o modelo de cálculo foi modificado para realizar uma filtragem com um filtro de primeira ordem do tipo passa-alta, nos sinais de corrente das fases e na corrente do motor de comutação. A frequência de corte selecionada foi de 1 Hz. Dessa forma, componentes DC abaixo e até 1 Hz são retiradas do sinal e frequências acima são mantidas, de forma a não prejudicar o funcionamento do algoritmo de detecção de defeitos.

A figura 25 mostra o sinal da fase B do mesmo ensaio mostrado na figura 24, porém agora com o uso do filtro passa-alta com corte em 1 Hz.

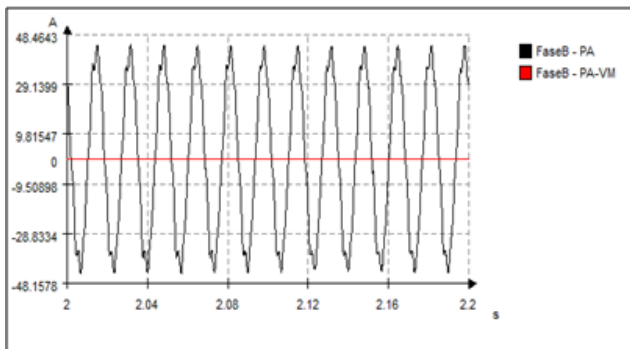


Figura 25. Corrente da fase B e fase seu valor médio ao longo do tempo de registro, usando o filtro passa-alta com corte em 1 Hz.

É importante observar que com o uso do filtro passa-alta o valor médio do sinal é nulo, ou seja, a componente DC foi removida do sinal, e não houve alteração perceptível na forma de onda do sinal da fase B.

Nos ensaios de bancada, não haviam sido detectados anteriormente tal influência, por ser um ambiente controlado, e onde não foi possível idealizar e simular esta variável que estava presente no ambiente real da subestação.

Os ajustes realizados não são específicos para o equipamento ou a subestação em questão, ou seja, os ajustes melhoram o modelo de cálculo que podem ser utilizados também em outras subestações.

As soluções aplicadas resolveram os pontos de atenção encontrados.

### III. AGRADECIMENTO

Este trabalho é dedicado “*in memoriam*” ao Eng. Newton José Guaraldo companheiro que esteve ao nosso lado ao longo de quase todo o projeto, acompanhando, apoiando e

principalmente acreditando no uso do conhecimento tecnológico.

Obrigado pela sua contribuição, descanse em paz.

### IV. CONCLUSÃO

Após a validação do desempenho do Sistema de Monitoramento de Comutadores em laboratório e em campo, as versões finais encontram-se instaladas nas subestações Fontinelli e Saudade, localizadas na cidade de Barra Mansa/RJ e já integrada ao sistema e também BIT da Light, podendo o supervisor ser acessado e operado remotamente.

O uso do Sistema de Monitoramento de Comutadores junto a reguladores de tensão e transformadores de potência deverão trazer ganhos técnicos e econômicos às empresas concessionárias com maior previsão quando das necessidades de manutenções.

O trabalho apresentado oriundo de um projeto de P&D regulado pela ANEEL na fase Cabeça de Série da cadeia de inovação deverá ter andamento na fase de Lote Pioneiro, quando protótipos em formatos industrial e comercial deverão ser construídos e aplicados de forma a se verificar com maior precisão a performance de operação dos mesmos em outras condições operativas e de defeitos, tornando-o um produto capaz de atender o Setor Elétrico Nacional.

### V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Norma ABNT. NBR 8667-1. Comutadores de Derivação. Parte 1: Testes e Ensaios. Dezembro/2012.
- [2] Norma ABNT. NBR 8667-2. Comutadores de Derivação. Parte 2: Guia de Aplicação. Dezembro/2012.
- [3] J. Suñé, L. A. Heredia, A. T. de Brito, C. Dupont, C. G. Gonçalves, C. C. dos Santos, E. L. S. Brito, G. Amorim, H. H. S. Bezerra, J. C. Carneiro, J. S. Santelli, J. R. da Silva, M. A. Marin R. Jasinski, R. Carraro, R. Evaristo, R. M. Teixeira, A. Moriama, A. Meira, A. C. B. Bissacot, B. Salum, C. Severino, F. A. F. Amorim, J. Baldauf, J. C. Mendes, M. A. Sens, P. Moraes, R. Asano Jr, R. Censi e R. Ferrari, “*Guia de Manutenção para Transformadores de Potência*, ” em *Proc. 2013 XXIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, pp. 135-139
- [4] C. Gao and M.A. Redfern, “A review of voltage control techniques of networks with distributed generations using on-load tap changer transformers” in *Proc. 2010 International Universities Power Engineering Conference*, pp. 1–6
- [5] *Check-list de Manutenção Periódica em Comutadores*, CPFL, agosto 1990.
- [6] LabView (2016, dezembro 12) [On line]. Disponível em: <<http://www.ni.com/newsletter/51141/pt/>>
- [7] Controlador cDAQ-9132 (2016, dezembro 12) [On line]. Disponível em: <<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/212698>>