



## Grupo de Estudo de Transformadores, Reatores, Materiais e Tecnologias Emergentes - GTM

### Metodologia online para diagnóstico de comutadores de derivações sob carga baseada em assinatura elétrica

EMERSON LIMA DO NASCIMENTO (1); MARIA ALICE DE OLIVEIRA RODRIGUES (1); ALEXANDRO SANTA ROSA (1); ADELFO BRAZ BARNABÉ (1); AURÉLIO MARTINS BARBOSA (2); CGTI (1); LIGHT S.E.S.A. (2);

## RESUMO

Este artigo apresenta um sistema de monitoramento on-line de comutadores de derivações sob carga capaz de detectar possíveis falhas no equipamento, baseando-se nas formas de onda das correntes de fase do transformador e da corrente do motor do comutador. Foram catalogadas formas de onda associadas a anormalidades ocorridas no equipamento através de ensaios e simulações computacionais, e técnicas de processamento de sinais e inteligência artificial foram aplicadas para extração de características e diagnóstico dos comutadores. Os resultados obtidos foram satisfatórios quanto à detecção das anormalidades sugeridas. O sistema de monitoramento on-line apresentado proporciona uma alternativa para a avaliação da condição operativa dos comutadores.

## PALAVRAS-CHAVE

Comutador de derivações sob carga – OLTC – Processamento de sinais – *Wavelets* – Monitoramento online – Manutenção preditiva – Assinatura elétrica.

## 1.0 - INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a execução da manutenção preditiva tem ganhado cada vez mais espaço no setor elétrico, uma vez que a adoção dessa prática tem permitido empresas reduzir a quantidade de manutenções preventivas e corretivas e consequentemente minimizar perdas financeiras. A manutenção preditiva é realizada por meio do monitoramento ou inspeção de dados que indiquem as condições de funcionamento de determinada máquina ou equipamento, como por exemplo, o desgaste de contatos elétricos. A partir disso, é possível estimar, com antecedência, precisamente, quando o equipamento irá falhar e as condições necessárias para que este tempo seja aproveitado (1), (2), (3) e (4).

Além disso, ocorrência de uma falha que venha a retirar um equipamento de serviço, para evitar danos maiores ao equipamento, poderá causar problemas de ordem política e financeira. No sistema elétrico, o transformador de potência representa o equipamento de maior importância estratégica e de maior investimento (3). Entre os componentes de um transformador de potência, está o Comutador de Derivações sob Carga (On Load Tap-Changer – OLTC), responsável pela variação da relação de espiras do transformador e regulação da sua tensão de operação, adequando-o às condições sistêmicas necessárias para sua operação (1).

O OLTC é submetido a esforços mecânicos, bem como a esforços elétricos. De acordo com o Guia de Manutenção para Transformadores de Potência do CIGRE Brasil, de novembro de 2013, 26% das causas para falhas em transformadores de potência, são devidas a OLTCs (1). A partir disso, o OLTC requer a adoção de uma política de manutenção preventiva mais eficiente para garantir melhor desempenho dos transformadores de potência e reguladores de tensão, aumentando consequentemente a confiabilidade do sistema e sua vida útil (1), (2), (3) e (4).

Técnicas preventivas para manutenção de OLTCs vêm sendo constantemente pesquisados e desenvolvidos por profissionais da área acadêmica e da indústria. Os objetivos destes estudos são interpretar precocemente a falha incipiente e definir um correto diagnóstico para que não ocorra uma parada no processo produtivo para uma manutenção não programada (5), (6) e (7). Utilizam-se como técnicas para manutenção de OLTCs o tempo de operação, o número de comutações, análise físico-química e cromatográfica de óleo, medição do torque do motor, análise vibro acústica e medição de resistência dinâmica. No entanto, qualquer programa de manutenção para OLTCs requer a execução de mais de uma técnica para cobrir a maior escala possível de falhas (1) e (7).

Com o avanço das pesquisas tornou-se possível à implementação de algoritmos de sistemas inteligentes, capazes de determinar o tipo de uma falha num OLTC, através das grandezas monitoradas, sem necessitar de modelos matemáticos complexos (6). A partir disso, algumas pesquisas podem ser exemplificadas quanto ao uso de sistemas inteligentes. Aqui citam-se estudos baseados mais comumente em Redes Neurais Artificiais (RNAs), lógica Fuzzy (LF) e transformada wavelet como os trabalhos de (8), (9), (10), (11), (12) e (13). Esta última, a Transformada Wavelet, é largamente utilizada visto que é uma ferramenta robusta e eficiente para reconhecer características em sinais que possuem componentes espectrais em quaisquer faixas de frequências.

Existem dificuldades nos sistemas de diagnóstico de falhas que já foram solucionadas que podem ser mais bem exploradas. Sendo assim, visando encontrar o ponto ótimo para manutenção dos OLTCs, esse trabalho apresenta uma nova técnica preditiva para redução da manutenção em OLTCs baseado em monitoramento contínuo, através de análise de assinaturas elétricas das Correntes de Fase do Transformador e da Corrente do Motor do Comutador (CFT e CM) (Sistema de Monitoramento de Comutadores – SMC).

A partir de ensaios e simulações computacionais em OLTCs, foram levantadas formas de onda associadas a anormalidades ocorridas em OLTCs. Esse banco de dados levantado foi usado no desenvolvimento de algoritmos para monitoramento das anormalidades possibilitando que estas fossem precisamente detectadas utilizando-se apenas as CFT e CMC.

## 2.0 - EQUIPAMENTOS E MÉTODOS

### 2.1 Sistema de Monitoramento de Comutadores

O Sistema de Monitoramento de Comutadores (SMC) está ilustrado na Figura 1. Na figura 2 apresenta-se a interface supervisória já integrada ao equipamento. Esta interface permite gerenciamento dos equipamentos, download e visualização de registros, análise temporal e filtragens dos registros, dentre outros.



FIGURA 1. Sistema de monitoramento de comutadores.

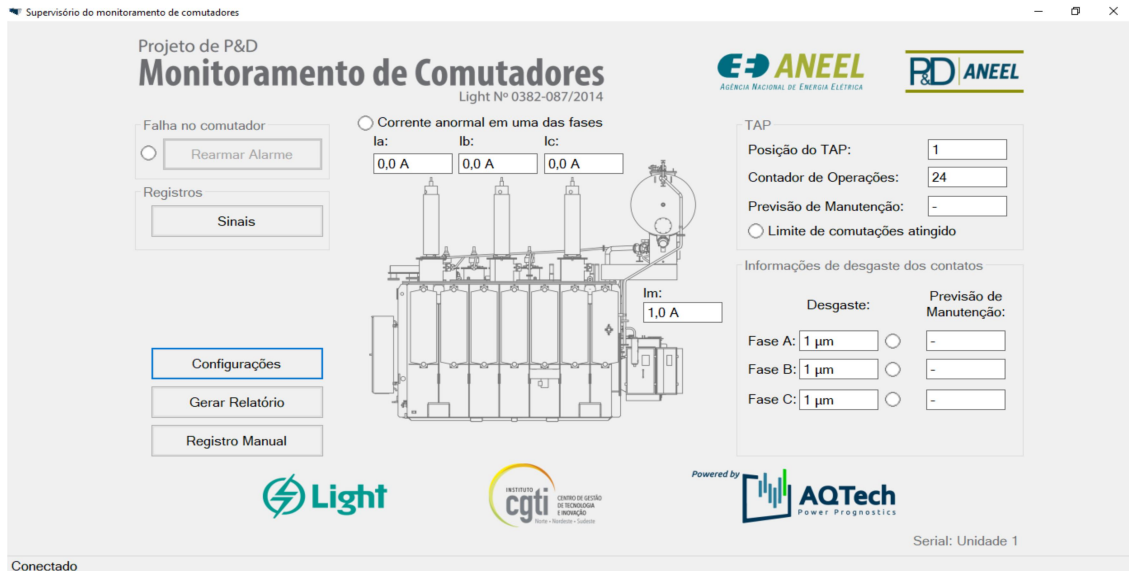


FIGURA 2. Tela inicial do software supervisor do SMC.

O hardware opera de forma independente, sem a necessidade presencial de operador, e permite o acesso remoto para sua configuração.

Os sinais são adquiridos, através de sensores de corrente instalados nas fases A, B e C do transformador, e também da corrente do motor do comutador, como apresentado na Figura 3. Além disso, a aquisição de dados é externamente ao comutador, portanto, pode ser instalado em qualquer tipo e modelo de comutador e mesmo estando em operação, sem necessidade de interrupção de funcionamento do mesmo.

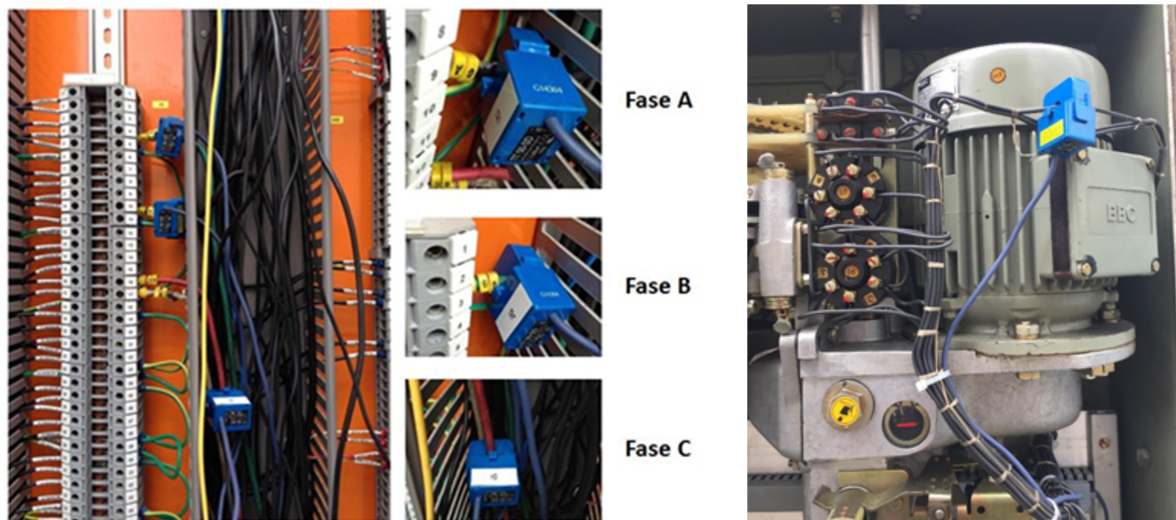


FIGURA 3. Aquisição das CFT e CMC através dos sensores de corrente.

## 2.2 Arquitetura de rede

A arquitetura de rede do SMC é mostrada na figura 4. Esta arquitetura, do tipo cliente-servidor, fornece acesso centralizado de informações, e atua na partilha de dados do monitoramento das máquinas e equipamentos presentes nas subestações, como OLTCs ou relés.

No caso do monitoramento dos OLTCs, os dados adquiridos pelos sensores de corrente são enviados ao SMC, que por sua vez está conectado ao BIT por meio de cabos de fibra óptica. O BIT é um terminal server que opera usando o protocolo TCP/IP e concentra as informações de todos os equipamentos e máquinas monitorados pela LIGHT. A partir disso, o SMC está conectado à rede, de forma que é possível acessar suas informações remotamente, através de uma unidade de análise, ou através de uma conexão ponto a ponto local. Dessa forma, qualquer sinalização de alarme pelo SMC é enviada ao centro de operações da LIGHT via rede, eliminando a necessidade de visitas periódicas para checagem do equipamento.

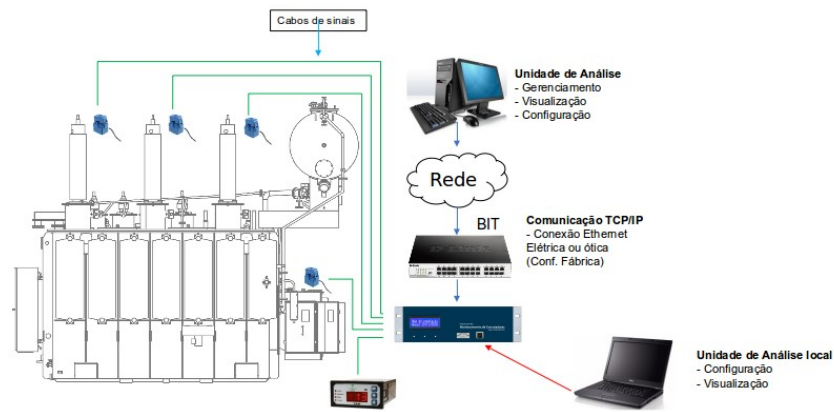


FIGURA 4. Arquitetura de rede do SMC.

### 2.3 Princípio de diagnóstico de falhas em OLTCs

Cada operação do OLTC produz uma forma de onda característica nas CFT e na CM. Num comutador sadio, não há mudança significativa na forma de onda das correntes. No entanto, qualquer degradação num OLTC induz mudanças na forma de onda das CFT e CM. Para o caso em que uma degradação induz sempre a mesma alteração no padrão forma de onda, esta alteração configura uma assinatura elétrica característica da degradação que ocorreu.

Em alguns dos casos, é possível observar e analisar visualmente a presença de uma distorção na forma de onda das CFT e CM, para deduzir semelhanças ou diferenças. Este processo é chamado de extração de características e nem sempre é realizado de forma visual, já que em alguns casos uma assinatura elétrica característica somente é exibida mediante a aplicação de alguma transformação que realce a informação desejada.

Com base nas observações, constrói-se um banco de dados de sinais OLTCs saudáveis, e não saudáveis previamente diagnosticado. Os sinais dos OLTCs saudáveis são tomados como valores de referência para diagnóstico, enquanto que assinaturas dos OLTCs não saudáveis permitem o reconhecimento de vários problemas.

Ensaio realizados em OLTCs comprovaram a existência de assinaturas características nas CFT, por exemplo, quando, uma cordoalha de interligação dos contatos principais se rompe, e na CM provenientes de defeitos elétricos e mecânicos no sistema de acionamento da comutação. A partir da análise dos sinais dos ensaios realizados, foi possível estabelecer critérios de diagnóstico para as falhas ensaiadas, através de um processamento digital dos sinais das CFT e CM.

Em suma, o processo de diagnóstico de um OLTC, a partir das CFT e CM divide-se em duas etapas: extração e classificação de assinaturas elétricas.

## **3.0 - FALHAS ABORDADAS E METODOLOGIA PARA DETECÇÃO**

### 3.1 Rompimento da cordoalha de comutação

#### 3.1.1 Descrição da falha

O OLTC opera mudando as de derivações de um transformador, podendo ser aumentado ou diminuído, mesmo com presença de corrente de carga nominal. Os contatos principais são responsáveis pela mudança dos taps e são interligados na chave comutadora através de uma cordoalha. Durante a mudança de taps, a chave comutadora realizada rotação provocando torção nestas cordoalhas. Dessa forma, ao longo do tempo estas cordoalhas podem vir a romper, prejudicando a comutação, podendo provocar arcos internos, formação de borras no óleo e aquecimento na chave comutadora.

#### 3.1.2 Método de aquisição de sinais

Utilizando dois equipamentos comerciais com taxa de amostragem de 10 kHz, foram realizados ensaios para levantamento de assinatura elétrica do rompimento da cordoalha de comutação, em uma fase de um banco de transformadores na subestação de Volta Redonda/RJ. Fotografias retiradas durante a realização dos ensaios são apresentadas na Figura 5.

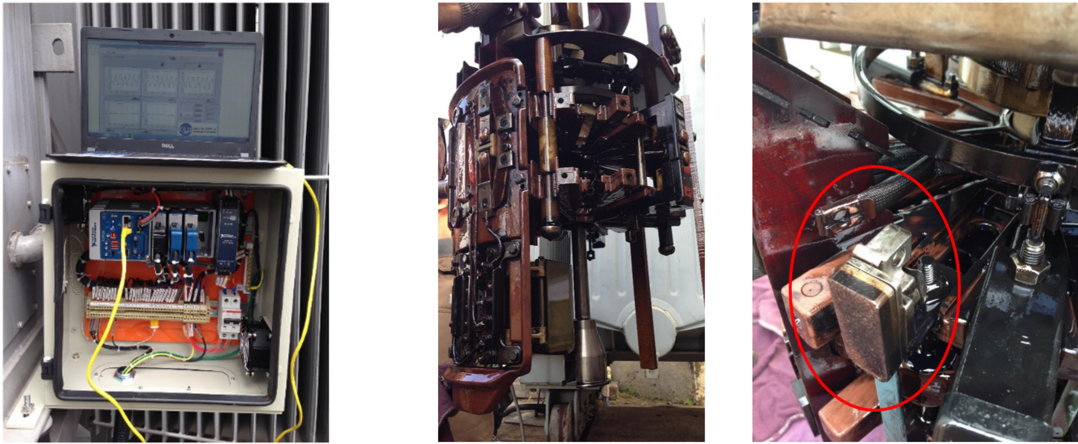


FIGURA 5. Ensaio para levantamento de padrões de defeito do rompimento da cordoalha no CDC.

A análise dos sinais obtidos revelou que existe uma assinatura elétrica característica nas CTF no instante da comutação. A forma de onda da assinatura elétrica do defeito é apresentada na Figura 6. A partir desse ensaio e da assinatura elétrica obtida, um banco de dados com 200 sinais sadios, e 30 sinais provenientes de OLTCs com cordoalhas de comutação rompidas, foi usado no desenvolvimento de um algoritmo para processamento e diagnóstico desse defeito.

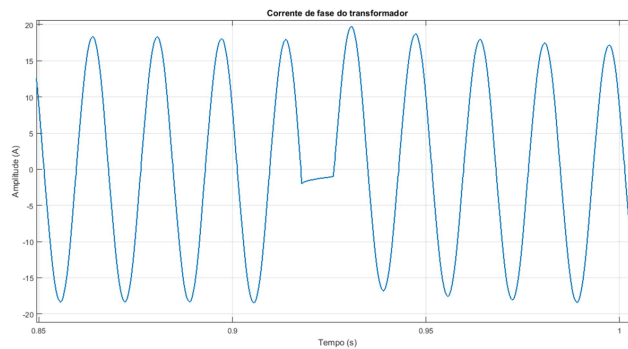


FIGURA 6. Assinatura elétrica do rompimento da cordoalha do OLTC na corrente da fase A do transformador.

### 3.1.3 Algoritmo para detecção de cordoalhas rompidas

Utilizando a forma de onda da Figura 6, foi implementado um algoritmo computacional baseado em técnicas de processamento digital de sinais para detecção de cordoalhas rompidas num OLTC.

O processo de extração de características tem o propósito de verificar a presença da assinatura elétrica característica do rompimento da cordoalha de comutação nas CTF. Este processo é baseado na aplicação da transformada wavelet discreta às CTF. Como resultado do processamento dos sinais, obtêm-se energias dissipadas, durante o processo de comutação, pela presença de cada falha no OLTC. Dessa forma, caso o OLTC esteja sadio, as energias dissipadas por todas as falhas, calculadas pelos algoritmos, são nulas. Além disso, para o processo de classificação/diagnóstico dos OLTCs utilizam-se técnicas de inteligência computacional, como as redes neurais.

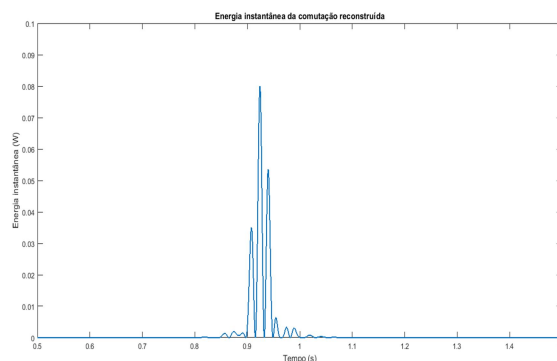


FIGURA 7. Energia instantânea resultante da aplicação da transformada wavelet discreta a CTF.

Na Figura 7, verifica-se que existe alteração no sinal transformado apenas no instante da assinatura da falha mostrada na Figura 6. Para cálculo da energia total dissipada pela falha, calcula-se a área abaixo da energia instantânea. Por fim, uma rede neural recebe como entrada o valor da energia das comutações detectando a presença, ou não, de cordoalhas rompidas no comutador.

### 3.2 Quebra de barras do rotor

De acordo com (7), falhas elétricas no rotor representam de 5% a 10% do percentual de falhas nos motores de indução trifásicos. Dentre as falhas elétricas, destacam-se as barras quebradas que representam 35% das falhas de rotor (6).

#### 3.2.1 Descrição

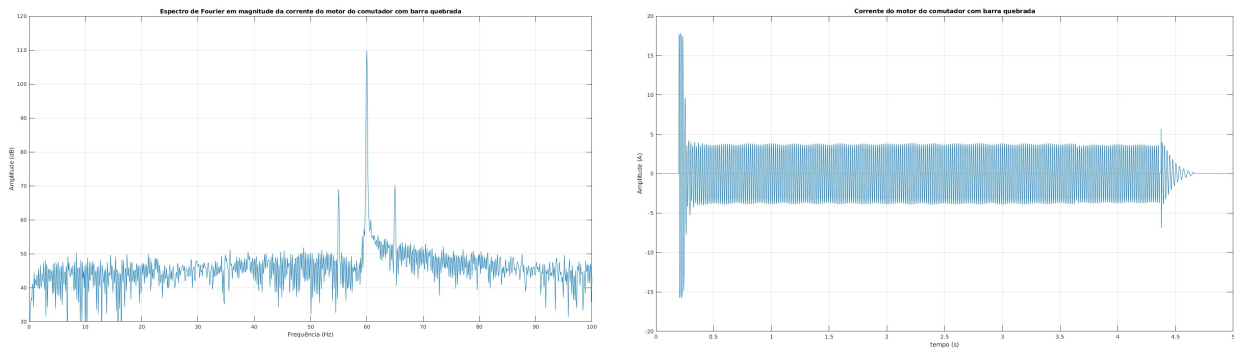


FIGURA 8. Corrente do estator motor (à direita) e seu espectro de Fourier (à esquerda).

Quando uma barra se quebra, o campo magnético rotativo no entreferro da máquina se torna não simétrico, de forma que, bandas laterais próximas à frequência fundamental de acionamento do motor, características da falha, são encontradas no espectro das correntes elétricas de estator.

#### 3.3.3 Método de aquisição de sinais

Utilizando o MATLAB/SIMULINK, um motor de indução trifásico, operando a 60Hz, foi simulado em laboratório. Nesta simulação potência, quantidade de polos e escorregamento foram parâmetros variados dentro dos valores comerciais.

As simulações mostraram uma assinatura elétrica caracterizada por uma modulação em amplitude com adição de portadora da corrente do estator do motor. Neste sinal, a envoltória pode ter determinada a partir dos parâmetros de simulação de acordo com (6), (7), (14) e (15). A forma de onda da corrente do estator do motor assim como seu espectro são apresentados na Figura 8.

A partir dessa simulação, um banco de dados com 200 sinais foi usado no desenvolvimento de um algoritmo para diagnóstico dessa falha.

#### 3.2.3 Algoritmo para detecção de barras quebradas

A detecção de barras rompidas é feita a partir da verificação das bandas laterais (envoltória) em relação a componente fundamental de 60 Hz (portadora), em dB. A Tabela 1 mostra uma escala de severidade da falha, determinada de acordo com (15).

TABELA 1. SEVERIDADE PARA ANÁLISE DE BARRAS QUEBRADAS.

Amplitude	Avaliação da condição	Abreviatura da condição
> 50 dB	Excelente	1
44 a 50 dB	Boa	2
39 a 44 dB	Moderada	3
35 a 39 dB	Desenvolvendo trincas	4
30 a 35 dB	Duas barras quebradas	5
25 a 30 dB	Muitas barras quebradas	6
< 25 dB	Severa	7

A partir disso, o algoritmo desenvolvido tem como objetivo classificar em qual das regiões descritas pela Tabela 1 o motor do CDC se encontra, calculado a diferença entre a magnitude da componente fundamental e de uma das bandas lateral. Para isso, é necessário que o algoritmo isole os picos adjacentes ao pico principal, separando o sinal da corrente do motor em uma componente de defeito e uma componente de corrente do motor pura. Por fim uma rede neural recebe como entrada o valor das diferenças detectando a presença, ou não, de barras quebradas no motor.

#### 4.0 - RESULTADOS

Os resultados para cada uma das falhas abordadas são apresentados nas subseções a seguir.

##### 4.1 Rompimento de cordoalha de comutação do OLTC

A Figura 9 apresenta um gráfico de dispersão para as energias dissipadas pela falha, retornadas pelo algoritmo. Nesse gráfico, cada ponto representa um registro de sinal da fase A do banco de transformadores.

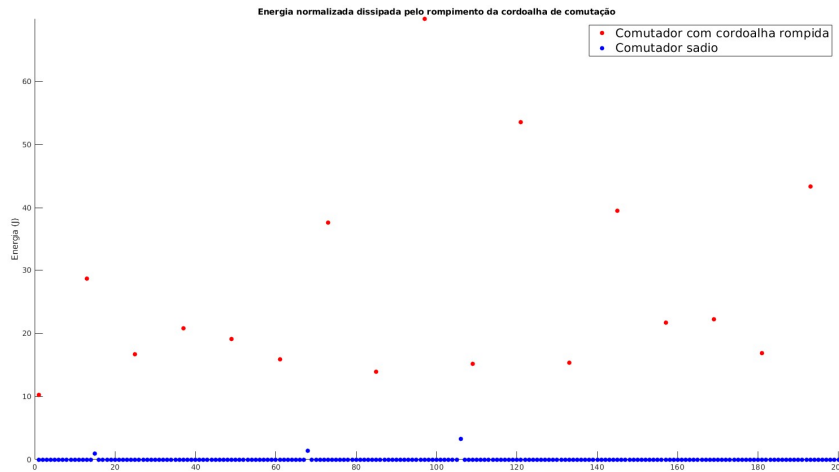


Fig. 9. Energias dissipadas pelas comutações com presença de cordoalha rompida.

Percebe-se a partir da Figura 9 que as comutações com cordoalhas rompidas dissipam uma energia maior que as comutações sadias. Uma vez que os dados são linearmente separáveis, uma rede neural é usada para calcular o valor da energia limite e classificar as comutações. O resultado da validação das classificações retornou uma taxa média de assertividade de 99,8%.

##### 4.2 Quebra de barras do rotor do motor do comutador

A Figura 10 apresenta um gráfico de dispersão para a diferença entre a magnitude da componente fundamental e banda lateral, retornados pelo algoritmo. Nesse gráfico cada ponto do gráfico representa um registro sinal da corrente do motor do comutador. O resultado da validação das classificações retornou uma taxa média de assertividade de 97,4%.

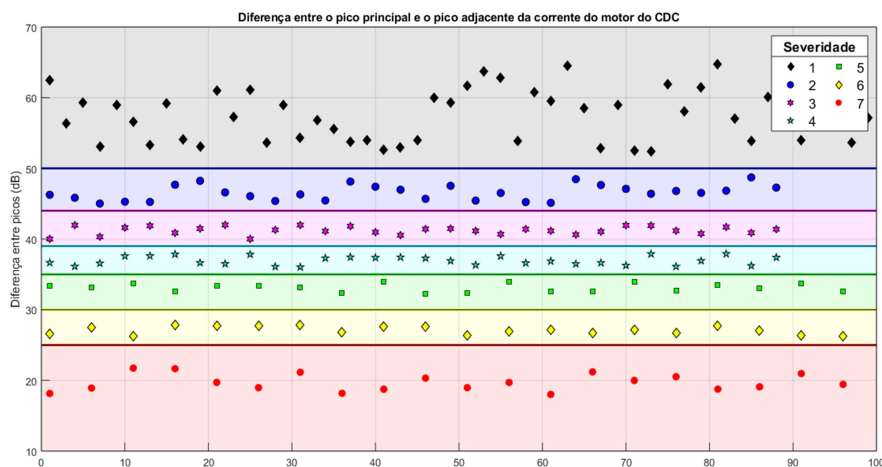


FIGURA 10. Diferença entre o pico principal e o pico adjacente da corrente do motor do OLTC.

## 5.0 - CONCLUSÃO

Foi apresentado um sistema de monitoramento on-line de comutadores capaz de detectar possíveis falhas no equipamento, baseando-se apenas nas formas de onda das Correntes de Fase do Transformador e da Corrente do Motor do comutador (CFT e CMC) através da utilização de técnicas de processamento digital e sinais e inteligência artificial.

A associação dessas ferramentas para extração e classificação de dados capacita o SMC a diagnosticar, em tempo real, o grau de deterioração dos componentes do OLTC. A partir disso, é possível estimar precisamente, quando o OLTC irá falhar, com antecedência, reduzindo a quantidade de manutenções preventivas e corretivas. Dessa forma, pode-se também reduzir o custo de manutenção e assim grandes perdas financeiras.

Em suma, o sistema apresentado é uma nova técnica de manutenção preditiva para OLTCs, que proporciona uma alternativa não invasiva as técnicas de manutenção conhecidas. Com seu uso, empresas podem prever com assertividade o momento adequado de manutenção preventiva dos comutadores.

## 6.0 - REFERÊNCIAS

- (1) CIGRÉ BRASIL. Guia de manutenção de transformadores de potência. Novembro, 2013.
- (2) DE FARIA, HAROLD; COSTA, JOÃO GABRIEL SPIR; OLIVAS, JOSE LUIS MEJIA. A review of monitoring methods for predictive maintenance of electric power transformers based on dissolved gas analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015
- (3) LAZARESCU, EMIL; FRIGURA-ILIASA, FLAVIU MIHAI; FRIGURA-ILIASA, MIHAELA; ANDEA, PETRU; VATAU, DORU. A new approach to predictive maintenance of high voltage switching devices. 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, IEEE, 2017.
- (4) ANTELIZ JAIMES, ANTONIO ALEXI. Maintenance predictive in electric transformers, applying spectral analysis to the flow of magnetic dispersion. XVII Symposium of Image, Signal Processing, and Artificial Vision, IEEE, 2012.
- (5) S. NANDI, H. A. TOLIYAT, X. LI. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors-A Review. *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 20, no. 4, pp 719-729, Dec. 2005.
- (6) F. M. DA CUNHA SANTOS, M. SUETAKE, I. NUNES DA SILVA. Sobre a Aplicação de Sistemas Inteligentes para Diagnóstico de Falhas em Máquinas de Indução – Uma Visão Geral. *Revista Controle & Automação*, vol.23, no. 5, págs. 553-569, Set-Out. 2012.
- (7) A. BELLINI, F. FILIPPETTI, C. TASSONI, G-A. CAPOLINO. Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 12, pp. 4109-4126, Dec. 2008.
- (8) L. A. L. DE ALMEIDA, M. FONTANA, F. A. WEGELIN, L. FERREIRA. A New Approach for Condition Assessment of On-Load Tap-Changers using Discrete Wavelet Transform. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Ottawa, May 2005.
- (9) F. FILIPPETTI, G. FRANCESCHINI, C. TASSONI, P. VAS. Recent developments of induction motor drives fault diagnosis using AI techniques. *IEEE Tran. on Industrial Electronics*, 2000.
- (10) K. VIREECK, A. SAVELIEV. Acoustic tap-changer analyses using continuous wavelet transformation. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Dallas, May 2016.
- (11) T. BHAVANI SHANKER, H. N. NAGAMANI, GURURAJ S. PUNEKAR. Acoustic emission signal analysis of On-Load Tap Changer (OLTC). *IEEE 1st International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems*, Kolkata, Dec. 2013.
- (12) P. S. BARENDSE, B. HERNDLER, M. A. KHAN, P. PILLAY. The Application of Wavelets for the Detection of Inter-Turn Faults in Induction Machines. *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, Miami, May 2009.
- (13) X. DUAN, T. ZHAO, T. LI, J. LIU, L. ZOU, L. ZHANG. Method for diagnosis of on-load tap changer based on wavelet theory and support vector machine. 6th International Conference on Renewable Power Generation, Wuhan, Oct 2017.
- (14) KASHIWAGI M., DA COSTA CESAR, MATHIAS MAURO HUGO. Proposta de desenvolvimento de um sistema de diagnóstico para detecção de barras rompidas, em motores de indução com rotor em gaiola, baseado em transformada de wavelet. 86 VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2014.
- (15) BRITO, J. N. Desenvolvimento de um Sistema Inteligente Híbrido para Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos. Tese de Doutorado - UNICAMP. 2006.



## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



### **Emerson Lima do Nascimento**

Graduado em engenharia eletrônica pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Atualmente é pesquisador associado do Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação (CGTI), participando de projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação na área de manutenção de sistemas elétricos de potência com ênfase em processamento digital de sinais, inteligência artificial e computacional, eletrônica analógica e digital e telecomunicações. Atua também como engenheiro eletrônico na QualiHouse Automação desenvolvendo projetos para automação industrial.

### **Maria Alice de Oliveira Rodrigues**

Bacharel em Engenharia Elétrica/Eletrotécnica em 2009, na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Mestra em Engenharia Elétrica em 2012, na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), na área de aterramento de sistemas elétricos. Atua em projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (P, D&I) principalmente pelo Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação (CGTI - Sede Nordeste).

### **Alexandro Santa Rosa**

Graduado em Engenharia Elétrica pela Faculdade Anhanguera Educacional, atualmente faz parte do quadro societário da Quantum Tecnologia e Inovação, colaborador do Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação CGTI pertencendo ao Grupo Bueno & Mak, onde atua na área de pesquisa e desenvolvimento executando a gestão técnica/financeira de projetos de engenharia.

### **Adelfo Braz Barnabé**

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá (1987) e especialização em Engenharia de Segurança do trabalho pela Universidade Estadual de Campinas (1996). Atualmente é Diretor de Engenharia do Centro de Gestão de Tecnologia - CGTI e Diretor Técnico na JB Engenharia. Especializou-se em Engenharia de Segurança e Medicina do Trabalho, Micro centrais Hidrelétricas, Subestações, Técnicas em Alta Tensão, Projetos de Sistemas de Aterramento, Coordenação de Isolamento, Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, Gerenciamento de Riscos, Análise Funcional de processos e Gerência entre os anos de 1987 e 2002. Tem experiência prática nas áreas de Engenharia Elétrica, com ênfase em Transmissão e Distribuição da Energia.

### **Aurélio Martins Barbosa**

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Fluminense (2005). Atualmente é Gerente de Manutenção e Operação na LIGHT Serviços de Eletricidade S/A. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência.