



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

LEANDRO ANTÔNIO RODRIGUES FERREIRA

**UMA NOVA ABORDAGEM PARA AVALIAÇÃO DO ESTADO DE REGULADORES
DE TENSÃO USANDO TRANSFORMADA DISCRETA WAVELET**

Salvador
2019

LEANDRO ANTÔNIO RODRIGUES FERREIRA

**UMA NOVA ABORDAGEM PARA AVALIAÇÃO DO ESTADO DE REGULADORES
DE TENSÃO USANDO TRANSFORMADA DISCRETA WAVELET**

Dissertação apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia, em cumprimento à parte das exigências para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Salvador
2019

LEANDRO ANTONIO RODRIGUES FERREIRA

**Uma Nova Abordagem para Avaliação do Estado de Reguladores de Tensão
utilizando Transformada Discreta Wavelet.**

Dissertação apresentada à Universidade
Federal da Bahia, como parte das
exigências do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica, para
a obtenção do título de *Mestre*.

APROVADA em: 02 de abril de 2019.

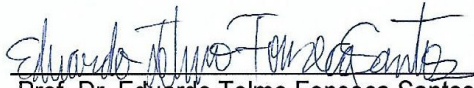
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Eduardo Furtado de Simas Filho
Orientador - UFBA



Prof. Dr. Paulo Cesar Machado de A. Farias
UFBA



Prof. Dr. Eduardo Telmo Fonseca Santos
IFBA

Dedico este trabalho aos meus pais, Francisco Valente Ferreira (*in Memoriam*) e Terezinha Elvia Rodrigues Ferreira, com todo respeito e admiração.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter-me concedido condições intelectuais e emocionais para o desenvolvimento deste trabalho.

À minha esposa Eliene e aos meus filhos Thiago e Marcos, pelo incentivo, apoio e compreensão.

Ao professor Eduardo Simas pela oportunidade de realizar meu grande sonho e pela sua orientação, fundamental para a efetivação desta dissertação.

Ao professor Luiz Alberto de Almeida pelas primeiras orientações recebidas durante a fase inicial deste trabalho.

Aos amigos Robson e Sérvulo pelo apoio e incentivo constantes durante o período de realização dos trabalhos.

Ao professor Edmar Egídio pelo suporte no desenvolvimento do método de escolha da wavelet mãe.

À professora Milde Lira, da UFPE, que gentilmente permitiu a utilização de trechos de sua tese de doutorado na formulação dos conceitos básicos de wavelet.

À UFBA pela oportunidade de realização deste curso. Aos seus professores e funcionários pela presteza, pela convivência agradável e orientações recebidas.

À BRASKEM pelo incentivo e financiamento que permitiu a realização desta dissertação.

Aos meus líderes, Ivo Andrei e Antônio Leal, pelo esforço em permitir e garantir as condições necessárias à minha participação no Mestrado de Engenharia Elétrica.

À TRACOL pela disponibilidade dos recursos utilizados em sua oficina durante a coleta de dados.

Agradeço ainda, a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a conclusão desta dissertação.

A satisfação está no esforço feito para alcançar o objetivo, e não tê-lo alcançado”.

Gandhi

RESUMO

Este trabalho é parte de um projeto de pesquisa com o propósito de propor métodos que possibilitem avaliar o processo de desgaste de equipamentos ao longo de sua vida útil. A coleta de dados foi realizada em uma oficina especializada em reguladores de tensão retirados do sistema elétrico por apresentarem defeito durante a operação. Usualmente um regulador de tensão ou um OLTC (*On-Load Tap-Changer*) é encaminhado para manutenção quando atinge um limite fixo de tempo em operação ou quando falha. Vai-se buscar otimizar o primeiro caso, com métodos científicos de avaliação e de monitoramento *online*, para que não ocorra o segundo. O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema não invasivo de monitoramento do estado dos contatos elétricos de reguladores de tensão, utilizando análise acústica. Os sinais de vibração emitidos durante as mudanças de posição dos contatos são coletados e condicionados. A saída do módulo de condicionamento de sinais é conectada a um PC através da placa de som, onde o sinal coletado é submetido a uma ferramenta de análise. A ferramenta matemática aqui utilizada para diagnóstico do estado do regulador é baseada na transformada wavelet e os resultados obtidos foram satisfatórios quando comparado a outras duas pesquisas que utilizaram a mesma base de dados e ferramentas de análise diferentes (Prony e Algoritmo Genético).

Palavras-chave: Processamento de sinais, *Wavelets*, Engenharia da Confiabilidade.

ABSTRACT

This paper is part of a research project in order to propose methods to evaluate the process of equipment wear along its useful life. Data collection was performed by a specialized maintenance shop with voltage regulators removed for the electrical system due to failure during operation. Usually a voltage regulator or an OLTC (*On-Load Tap-Changer*) is sent for maintenance when it reaches a fixed limit of operation time or when it fails. We will seek to optimize the first case, with scientific methods of evaluation and online monitoring, in order to avoid de failure. The purpose of this work is to develop a non-invasive system for monitoring the status of the electrical contacts of voltage regulators using acoustic analysis. The vibration signals emitted during position changes of the contacts are collected and conditioned. The signal conditioning module output is connected to a PC through the sound card, where the signal collected is subjected to an analysis tool. The mathematical tool used here to diagnose regulator status is based on Wavelet Transform and the results were satisfactory when compared to two other studies that used the same database and different analysis tools (Prony and Genetic Algorithm).

Keywords: Signal processing, Wavelets, Reliability Engineering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Plataforma experimental	20
Figura 2.2 – OLTC aberto para manutenção	21
Figura 2.3 – Comparação entre contato desgastado (esquerda)	22
Figura 2.4 – Módulo comutador (<i>tap changer</i>)	23
Figura 2.5 – Placas de contato do módulo comutador.....	24
Figura 2.6 – Posição Relativa do Contato Móvel:.....	24
Figura 2.7 – Disposição das molas	25
Figura 2.8 – Estágios de uma Mudança de derivação	26
Figura 2.9 – Intervalos de tempo do sinal	27
Figura 2.10 – OLTC no qual existem papelão e calços soltos	28
Figura 2.11 – OLTC no qual foi observado um parafuso solto.....	29
Figura 2.12 – Partículas sólidas encontradas no interior do OLTC.....	29
Figura 2.13 – Elementos filtrantes: usado (esquerda) e novo (direita).....	30
Figura 3.1 – Esquema de decomposição usando banco de filtros	43
Figura 3.2 – Esquema de reconstrução usando banco de filtros.....	44
Figura 4.1 – Banco de filtros / codificação em sub-bandas.....	46
Figura 4.2 – Fluxo do sistema não-intrusivo de monitoramento proposto para OLTCs	46
Figura 4.3 – Módulo de condicionamento de sinais - esquema	47
Figura 4.4 – Módulo de condicionamento de sinais.....	47
Figura 4.5 – Acelerômetro Tipo 4395 Bruel Kjaer (Alimentação ICP).....	48
Figura 4.6 - Fluxo do sistema não-invasivo de monitoramento de OLTC's proposto	48
Figura 5.1 – Coif2 – 5 Níveis de decomposição – Contato Novo e desgastado.....	51
Figura 5.2 – Db5 – 5 Níveis de decomposição – Contato Novo e Desgastado	52
Figura 5.3 – Haar – 5 Níveis de decomposição – Contato Novo e Desgastado	52
Figura 5.4 – Sym2 – 5 Níveis de decomposição – Contato Novo e Desgastado	53
Figura 5.5 – Divergência KL x média – Coif2 – 5 níveis de decomposição.....	54
Figura 5.6 – Divergência KL x média – Db5 – 5 níveis de decomposição	54
Figura 5.7 – Divergência KL x média – Haar – 5 níveis de decomposição	55
Figura 5.8 – Divergência KL x média – Sym2 – 5 níveis de decomposição.....	55
Figura: 5.9– Wavelet COIF 2	56
Figura: 5.10 – Wavelet DB5.....	57
Figura: 5.11 – Wavelet HAAR.....	57
Figura: 5.12 – Wavelet SYM 2.....	58
Figura 5.13 – Valores médio-quadrático dos coeficientes de aproximação e detalhe:.....	59
Figura 5.14 – Dependência típica dos coeficientes de energia CoefE normalizados para os contatos em uma condição nova (azul), e em uma condição desgastada (vermelho)	60
Figura 5.15 – Intervalos de Tempos do Sinal	61
Figura 5.16 – Análise de Prony para Contato Novo.....	63
Figura 5.17 – Análise de Prony para Contatos Desgastados	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Resultados do Método da Divergência de Kullback-Liebler.....	53
Tabela 5.2 – Resumo dos Parâmetros obtidos por Algoritmos Genéticos	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS¹

CIGRE	<i>Conseil International Des Grands Réseaux Electriques</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
DGA	<i>Dissolved Gas-in-oil Analysis</i>
END	Ensaio não-destrutivo
ESD	<i>Energy Spectral Density</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FT	<i>Fourier Transform</i>
OLTC	<i>On-Load Tap-Changer</i>
PC	<i>Personal Computer</i>

¹ No caso de abreviaturas internacionalmente conhecidas, optou-se por manter as mesmas em sua língua original.

LISTA DE SÍMBOLOS

- a Parâmetro de escala da função wavelet
- b Parâmetro de translação da função wavelet
- ck Coeficientes da série de Fourier
- $c_{m,n}$ e $d_{m,n}$ Coeficientes de wavelet
- $\phi(t)$ Função Escala
- h_n Coeficientes dos filtros gerados pela função ϕ
- k Número inteiro
- $\psi(t)$ Função Wavelet
- ψ^* Conjugado complexo de ψ
- Q Fator de qualidade do filtro
- t Variável tempo
- $x(t)$ Sinal de informação contínuo, no domínio do tempo
- $x[n]$ Sinal de informação discreto
- X_k Transformada discreta de Fourier
- * Operação de convolução
- $(\uparrow 2)$ Operador de dizimação de ordem 2
- $(\downarrow 2)$ Operador de inserção de ordem 2

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Definição do problema	13
1.2 Objetivo	16
1.2.1 Objetivos específicos	17
1.3 Importância da pesquisa	17
1.4 Organização do trabalho	18
2 REGULADOR DE TENSÃO	19
2.1 Componentes do regulador de tensão	20
2.2 Inspeções Internas	27
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
3.1 Linha do tempo	31
3.2 Técnicas de processamento de sinais utilizadas neste trabalho.....	36
3.2.1 Transformada de Fourier	36
3.3 Wavelet	37
3.3.1 Wavelet discreta	38
3.3.2 Análise de multirresolução	39
3.3.3 Codificações de sub-bandas.....	40
3.3.4 Aproximações e detalhes	41
3.3.5 Bancos de filtros	41
4 METODOLOGIA.....	45
4.1 Desenvolvimento do método	45
4.2 Módulo de condicionamento de sinais	46
4.3 Metodologia de Coleta de Dados	48
4.4 Definição dos Parâmetros de Coleta	48
4.5 Wavelet Mãe.....	49
5 RESULTADOS	51
5.1 Resultados da seleção da wavelet mãe	51
5.2 Resultados Alcançados	58
5.3 Análise comparativa com outras ferramentas	61
6 CONCLUSÕES.....	65
6. 1 Trabalhos futuros	66
REFERÊNCIAS	67
APÊNDICES	70

1 INTRODUÇÃO

1.1 Definição do problema

A velocidade das transformações do mercado, seja do ponto de vista tecnológico, seja no de processo, tem levado as organizações a buscarem mais e mais por mecanismos que lhes permitam antecipar as intervenções necessárias em seus ativos antes que a produção seja afetada. Como consequência, as condições desafiadoras deste mercado, como a busca incessante pela competitividade e a produtividade, estão forçando as plantas a reverem seus modelos de negócio e a reduzirem os seus custos de manutenção.

Neste contexto, surge como importante segmento na administração de negócios a Gestão de Ativos, definida pela PAS 55/ISO 55000 como sendo:

Atividades e práticas sistemáticas e coordenadas através das quais uma organização de forma otimizada e sustentável administra seus ativos e sistemas de ativos, o seu desempenho, riscos associados e despesas ao longo do seu ciclo de vida com o objetivo de alcançar seu plano estratégico organizacional. (PAS 55/ISO 55000, 2008).

Atualmente, com o avanço da tecnologia digital, equipamentos estão sendo construídos com acessórios que monitoram importantes funções, que antes só eram conhecidas através das inspeções e/ou manutenções periódicas. Estas informações são coletadas, condicionadas e enviadas aos centros de controle e análise da Engenharia de Confiabilidade da planta. Além disso, importantes técnicas na área de processamento digital de sinais estão sendo aplicadas para o acompanhamento do desempenho de máquinas e no processo decisório sobre o momento ideal de se intervir em um determinado equipamento. A estratégia de manutenção adequada é escolhida com base na função do ativo, sua criticidade e o impacto em segurança.

Neste trabalho, o foco principal é o emprego específico de uma ferramenta para o tratamento do sinal de vibração de um regulador de tensão, extraíndo dele informações sobre a sua evolução ao longo de um determinado tempo e relacionando-os com a taxa de desgaste de suas superfícies de contato.

Originalmente, diversas linhas de pesquisa semelhantes a esta, mas com abordagens e metodologias diferentes, direcionaram seus estudos ao comutador de derivação sob carga, acessório interno de grandes transformadores de potência. Neste estudo, foi utilizado o regulador monofásico de tensão, uma espécie de modelo reduzido do comutador de derivação sob carga, conhecido pela sigla de OLTC – *On-load Tap-Changer*.

Antes de entrar propriamente no contexto da análise de vibração para avaliação do estado dos contatos de um OLTC, faz-se necessário descrever sobre o cenário macro do sistema elétrico onde ele está inserido; a sua importância dentro da garantia de qualidade no fornecimento de energia elétrica; as ocorrências que normalmente são identificadas durante os trabalhos de recuperação do mesmo nas oficinas e suas causas principais. Por fim, o método aqui desenvolvido para avaliar e garantir maior disponibilidade do equipamento em operação, permitindo redução de custos elevados por manutenção corretiva, perdas econômicas por lucro cessante, além da insatisfação do cliente por indisponibilidade no fornecimento de energia por parte da concessionária.

O Sistema Elétrico de Potência, para que opere em conformidade com os requisitos de rede exigidos pelos órgãos reguladores e por um mercado consumidor cada vez mais exigente, deve estabelecer como meta a busca contínua pela Qualidade de Energia no fornecimento da mesma aos seus consumidores.

A qualidade no fornecimento de energia aos consumidores pode ser avaliada através dos seguintes itens:

- Continuidade do fornecimento;
- Nível de tensão;
- Oscilações de tensão;
- Desequilíbrio de tensão;
- Distorção harmônica da tensão;
- Nível de interferência em sistema de comunicação.

Foram selecionados dois itens que têm uma relação importante com o este trabalho e ambos estão regulamentados pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL - através da Resolução número 505.

1 - A continuidade do fornecimento - define os índices de continuidade do fornecimento por conjunto de consumidores e os valores de continuidade para um consumidor específico;

2 - O nível de tensão - define os níveis de tensão do fornecimento de energia elétrica, bem como a definição dos limites de variação das tensões.

Enquanto a continuidade do fornecimento de energia está ligada diretamente à qualidade e aos métodos utilizados na manutenção dos ativos, o controle dos níveis de tensão está relacionado com a correta regulação de tensão – função principal do OLTC.

Existem hoje, na conceituação mais moderna, quatro tipos básicos de manutenção: preditiva, preventiva, detectiva e corretiva. Tarefas preditivas (ou baseadas em condição) envolvem checar se alguma coisa está falhando. Manutenção preventiva usualmente significa desmontar e revisar completamente itens ou substituir componentes, a intervalos fixos. A manutenção corretiva significa consertar coisas quando estão falhando ou quando falharam. Dentro da manutenção preditiva evidencia-se os ensaios não-destrutivos (END) cujos métodos garantem a qualidade e a manutenibilidade de produtos e processos. Na maioria dos casos, a escolha de um END depende de uma grande quantidade de parâmetros. Para a escolha do END apropriado a determinado diagnóstico, são requeridos o conhecimento de detalhes sobre o possível tipo de defeito e a localização deste. A acessibilidade ao defeito também deve ser garantida. Alguns fatos recentes justificam o emprego de END nas empresas, como por exemplo (MAGALHÃES, 2005):

- Aumento nos padrões de qualidade dos produtos e processos;
- Aumento dos custos causados por paradas imprevistas no sistema de produção;
- Aumento nos padrões de segurança e proteção ambiental;
- Melhoria dos instrumentos de controle e sensores;
- Aumento da experiência e do entendimento na interpretação de sinais.

Os END mais comuns são:

- Inspeção Visual;
- Ensaios de Líquido Penetrante;
- Ensaios de Partículas Magnéticas;
- Ultrassom;
- Raio X;
- Ensaios com a Corrente Parasitas;
- Análise de Vibrações.

Em Ferreira (2008), destaca-se que a eficiência e a vida útil dos aparelhos elétricos dos clientes exigem, por parte das concessionárias, vigilância constante dos níveis de tensão de fornecimento. Para que uma concessionária consiga manter adequados os níveis de tensão de fornecimento aos consumidores são imprescindíveis que os sistemas de geração, transmissão e distribuição operem harmoniosamente. Para o equacionamento do assunto, é necessário detectar qual o segmento do sistema elétrico que apresenta deficiências de tensão, analisando detalhadamente cálculos e medições de tensão no barramento das subestações, na rede primária, no transformador, na rede secundária, no ramal de serviço e na instalação interna do

consumidor. Detectado que o problema de tensão é causado pela rede primária, uma ou mais das seguintes providências pode ser tomada:

- Transferência de carga para outros alimentadores menos carregados;
- Melhora do fator de potência;
- Instalação de regulador de tensão;
- Troca da bitola do alimentador;
- Construção de novo alimentador;
- Mudança da tensão primária de alimentação;
- Construção de uma nova subestação.

Das medidas citadas, a instalação de reguladores de tensão destaca-se como a mais adequada para os alimentadores longos, que atendem regiões com densidades de carga média e que não justifiquem investimentos em novos alimentadores, subestações, etc. Os reguladores de tensão permitem a obtenção de uma faixa adequada de regulação, que deverá ser compatibilizada com os taps dos transformadores de distribuição.

Após esta abordagem sobre a função e aplicação do OLTC no sistema elétrico de potência, serão tratados os aspectos construtivos e as principais causas de defeito registradas ao longo do ciclo de vida útil do equipamento.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema não-invasivo de monitoramento de OLTC, através da análise da vibração emitida pelo equipamento a cada mudança de posição dos contatos, sendo proposta uma modelagem do sinal utilizando transformada wavelet. Muito embora os OLTC's estejam contemplados nos programas de manutenção preventiva, eles recebem o mesmo tratamento dos transformadores de distribuição, ou seja, a retirada do equipamento de operação se dá quando ocorre uma falha ou quando algum procedimento operacional exige a substituição do mesmo. Com o monitoramento será possível avaliar o estado do regulador de tensão e definir a data mais apropriada para uma intervenção no mesmo, prolongado ao máximo tempo médio entre paradas e diminuindo os custos de reparo, sem comprometer a continuidade e os níveis adequados de tensão fornecida ao consumidor final.

1.2.1 Objetivos específicos

- Estudar o funcionamento do OLTC e o comportamento dos seus componentes internos ao longo do período sob teste.
- Estudar técnicas de análise de sinais aplicadas ao tratamento de sinais de vibração coletados dos OLTC's.
- Identificar a Função Wavelet mãe mais apropriada para este estudo.
- Propor um método de avaliação do desgaste dos contatos do OLTC simplificado através de um único parâmetro.

1.3 Importância da pesquisa

Os critérios convencionais utilizados para a manutenção preventiva em OLTC são baseados apenas em critérios de manutenção preventiva sistemática por família de equipamento, cuja periodicidade é definida por período fixo ou por número de operações em carga.

O grande diferencial do método aqui desenvolvido, em relação aos critérios convencionais, para avaliar o estado dos contatos do OLTC é ser não-invasivo e permitir um monitoramento *online* em tempo real a partir de um centro de controle utilizado pela Engenharia de Confiabilidade, que analisará sistematicamente a evolução do ciclo de vida do equipamento sob teste. Enquanto a Engenharia de Confiabilidade atualmente se utiliza da estatística para monitorar uma família de equipamentos, nosso método faz uma avaliação individual e no instante em que são colhidas as assinaturas das análises de vibração. Após o tratamento do sinal amostrado e calculados os índices de Wavelet, proposta deste trabalho, estes são apresentados na forma de gráfico. Uma análise da curva traçada permite uma avaliação da condição de uso do OLTC. De posse dos resultados, pode-se identificar três situações:

- Envelhecimento precoce;
- Envelhecimento esperado;
- Envelhecimento retardado.

A depender da situação de envelhecimento do OLTC poder-se-á influenciar nossa tomada de decisão para retirada de funcionamento e início da manutenção antes da falha. A retirada poderá ser antecipada, no tempo normal esperado ou postergada, possibilitando um melhor gerenciamento dos recursos disponíveis, evitando a perda de produção e, em consequência, do lucro cessante.

1.4 Organização do Trabalho

O texto está dividido em 6 seções.

Seção 2 – São apresentados o regulador de tensão monofásico, seus componentes principais, como a chave de comutação e acessórios. Destaca-se as condições de contatos novos e contatos desgastados com a operação normal do equipamento. São mostradas uma visão geral da plataforma de teste, da coleta e do tratamento dos sinais de vibração colhidos. Também são descritas com bastante detalhe sobre a degradação das condições físico-químicas do óleo mineral isolante, importante no controle da temperatura e da isolamento do equipamento.

Seção 3 – Dedicase uma boa parte do texto com as pesquisas que nortearam este trabalho. É apresentada uma revisão dos assuntos aqui expostos, iniciando com uma breve explanação sobre a análise de vibração, introduzindo conceitos da análise de Fourier que possibilitará melhor entendimento da Wavelet. Dá ênfase à Transformada Discreta de Wavelet, banco de filtros, análise multirresolução, etc.

Seção 4 – Desenvolve-se uma descrição do modelo proposto, dos detalhes de como foram arranjados e combinados os dados coletados da plataforma de testes, bem como a análise dos resultados obtidos. É apresentada a metodologia adotada para seleção da Wavelet mãe mais apropriada.

Seção 5 – São apresentados os resultados alcançados no desenvolvimento deste trabalho de mestrado, considerando principalmente aspectos positivos quando comparados com outras ferramentas.

Seção 6 – São apresentadas as conclusões e as perspectivas para trabalhos futuros.

2 REGULADOR DE TENSÃO

A monitoração dos sinais de vibração é uma das técnicas mais eficientes para a manutenção preditiva de máquinas e estruturas. Fundamentalmente utilizada para avaliação de desempenho de máquinas girantes de grandes parques industriais, a análise de vibrações mecânicas tem avançado e dado importantes contribuições em outros tipos de investigações como é o nosso caso. Um estudo realizado por Weichbrodt (1972), da General Electric, sobre a “assinatura” dos diversos componentes e conjuntos de máquinas que são sistemas ativos aptos a produzir assinaturas completas quando em operação, dividiu estes sistemas em três grupos principais:

- Maquinário cíclico - motores e transmissões;
- Geradores de som através de fluxo - bombas, caldeiras;
- Maquinário operando a transitórios - prensas, chaves elétricas, martelos.

Estes estudos eram baseados em medições de níveis globais, embora adotadas por praticamente todas as normas e especificações em vigor, não constitui um método satisfatório para verificar a qualidade de um equipamento ou monitorar as condições de trabalho de um maquinário. O som ou a vibração originada nos sistemas cíclicos apresentam temporalmente um aspecto que se repete dentro de um dado intervalo. Este tipo de sinal é utilizado para a elaboração de manutenção preventiva com monitoramento permanente.

Entretanto, considerando os compressores ou motores de combustão interna, os sinais que são registrados e produzidos são acompanhados por sinal de fundo (barulho de fundo) de amplitude considerável, incluindo os sinais e engrenagens, rolamentos etc. Na eventualidade de um dos pistões apresentar trinca de fadiga, aparece alguma alteração no sinal, mas tal alteração é inviável de se detectar através da medida global do sinal, isto porque o nível do ruído de fundo torna praticamente impossível detectar pequenas alterações de grande importância à manutenção, embora irrelevante em relação ao nível global de vibração. Para estes casos a utilização de um método seletivo, como a transformada de *wavelet* no processamento de sinais, é recomendado. Sabendo que a vibração é um parâmetro essencialmente vetorial, possui amplitude e três direções ortogonais, é importante considerar as amplitudes em cada direção ao se analisar o sinal global no equipamento. Entretanto, nos casos usuais, apenas duas medidas e análise nas direções axial e radial permitem todas as informações. Além disso, em todos os casos, a escolha correta dos pontos de aplicação dos dispositivos de medida e análise das vibrações constitui um fator crítico para o sucesso do programa destinado a análise ou monitoramento de vibrações de máquinas. A escolha de um

ponto inadequado não retirará, do sinal global, a componente ou componentes que representam as condições do maquinário. Nesse caso, nenhuma análise, por mais completa e complexa que seja indicará as condições do dispositivo.

A proposta desenvolvida nesse trabalho está fundamentada na análise do sinal de vibração emitido pelo regulador de tensão monofásico, coletado de forma não invasiva, no momento de acionamento do contato. O diagnóstico da condição dos contatos do regulador é efetuado utilizando-se como ferramenta para análise desse sinal a transformada de *wavelet* e banco de filtros/codificação em sub-bandas. Foi utilizado um módulo de aquisição de dados com filtragem analógica e desenvolvida uma rotina de tratamento do sinal. O método utilizado permite a obtenção de características importantes do sinal como amplitudes, fase e amortecimento dos principais componentes de frequências. A partir destas variáveis, é feito o diagnóstico do equipamento.

2.1 Componentes do regulador de tensão

O regulador de tensão sob carga, Figura 2.1 na qual são mostrados um regulador do modelo McGraw-Edison VR – 32 e o sistema de aquisição de dados, daqui em diante denominado OLTC (*On-Load Tap-Changer*), é responsável por manter constante a tensão fornecida por subestações de energia elétrica. O OLTC muda as derivações de seu transformador de potência através de um controlador, para manter a tensão de saída em um nível desejado, mesmo com a mudança de carga e de tensão a montante. O sinal de saída é mantido constante devido à mudança controlada da relação de enrolamento para uma dada carga, sem interrupção do fornecimento de corrente elétrica.

Figura 2.1 - Plataforma experimental



Fonte: Magalhães (2005)

Um OLTC é composto basicamente de: comutador de derivação, transformador, óleo isolante, módulo de controle, carcaça e ferragens de sustentação. Na Figura 2.2 tem-se um OLTC em processo de manutenção, no qual se pode identificar o comutador e o transformador. As falhas mais relevantes em OLTC's acontecem por baixa isolamento e por defeitos no sistema de posicionamento do comutador.

Figura 2.2 - OLTC aberto para manutenção



Fonte: Magalhães (2005)

Por ser um dispositivo de comutação eletromecânica, o comutador é a parte mais vulnerável a falhas. Portanto, as causas mais frequentes de falhas num OLTC são defeitos nos contatos ou no mecanismo de posicionamento (KANG1,2001), (KANG2,2000). (KANG3,2003) e (WANG,2000a). No chaveamento de um novo contato (mudança de tap) ocorre o surgimento de arco elétrico e essa descarga provoca a queima do óleo e com isso a formação de carbono. As descargas provocam também o desgaste físico dos contatos e, consequentemente, a liberação de partículas de material condutor no óleo. Com o aumento da concentração de carbono e o acúmulo de partículas condutoras, o óleo perde sua capacidade isolante, permitindo, assim, a formação de arcos mais intensos e de maior duração e, em casos extremos, um curto circuito. Dessa forma, verifica-se que o desgaste dos contatos contribui para a degradação das características isolantes do óleo. Um problema no mecanismo de posicionamento pode deixar os contatos fora de posição, isto é, não acoplados corretamente, gerando descargas parciais entre os contatos. A perda de sincronismo entre o motor e o

sistema de disparo pode ocasionar o aumento no tempo de duração dos arcos. A Figura 2.3 ilustra a diferença entre um contato desgastado e um contato novo.

Figura 2.3 - Comparação entre contato desgastado (esquerda) e contato não desgastado (direita)

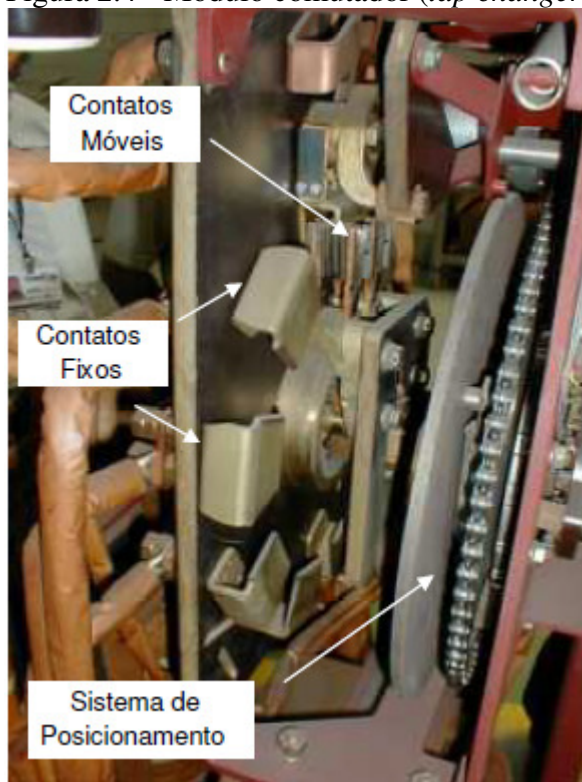


Fonte: Simas (2004)

Atualmente, a manutenção dos equipamentos é feita através de inspeções regulares ou na ocorrência de falhas. Este procedimento de reparo é demorado, deixando o OLTC fora de operação por muito tempo.

Os OLTC's são do tipo autotransformadores com várias entradas, permitindo ajustar o número de espiras, e consequentemente a relação de transformação, de acordo com a variação da tensão de entrada. O ajuste do número de espiras é feito pelo comutador por meio da chave rotativa do sistema de posicionamento. O comutador permite que o OLTC regule suavemente, em degraus precisos com velocidade controlada, o que minimiza arcos e prolonga a vida dos contatos. Se o cursor (contatos móveis) da chave rotativa estiver na posição 0 (contato neutro ou neutral) o regulador está desligado (Martignoni, 1967). Na Figura 2.4, observa-se a foto de um módulo comutador de um OLTC, mostrando os contatos fixos, os contatos móveis e o sistema de posicionamento.

Figura 2.4 - Módulo comutador (*tap changer*)



Fonte: Simas (2004)

Quando a tensão de entrada é diferente da tensão de referência, os contatos móveis são deslocados na tentativa de manter a tensão de saída no nível desejado. O OLTC pode atuar como um elevador ou redutor de tensão, dependendo da tensão de entrada. Como essa operação é realizada sob carga, o processo de mudança de posição do cursor gera arcos elétricos. Na tentativa de diminuir a intensidade desses arcos usa-se geralmente um autotransformador preventivo ou reator, projetado para limitar a corrente circulante dentro de um valor de segurança durante o intervalo de tempo em que se faz a transição entre os contatos adjacentes.

Esta montagem não é capaz de eliminar totalmente os arcos, mas reduz a corrente minimizando a intensidade dos arcos elétricos. Como já citado anteriormente, o comutador de derivação sob carga, modelo VR-32 com controle CL-5C do fabricante McGraw-Edison regula a tensão de linha de 10% acima a 10% abaixo, em 32 passos, com passos de aproximadamente 5/8%. Esses reguladores são monofásicos, de 13,8kV. Seu módulo comutador possui oito contatos fixos, o contato da posição neutra, um par de contatos móveis, uma chave reversora e o sistema de posicionamento nas Figuras 2.4 e 2.5.

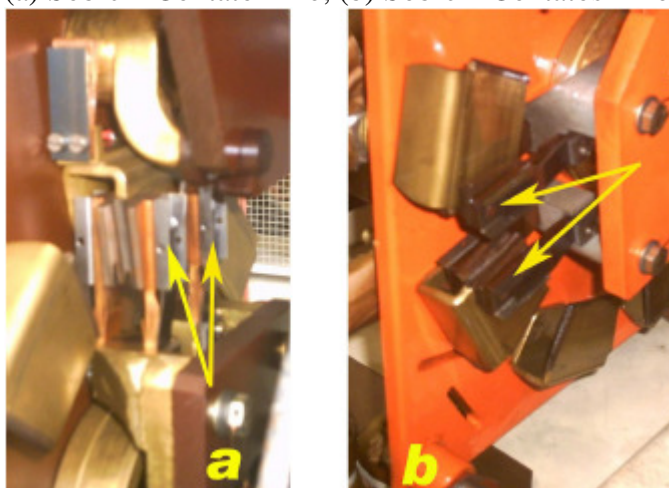
Figura 2.5 - Placas de contato do módulo comutador



Fonte: Magalhães (2005)

Conforme observa-se na Figura 2.6, o contato móvel pode assumir duas posições distintas para cada contato fixo. Em um ciclo completo, têm-se 16 níveis de tensão. Cada um destes níveis pode corresponder a um aumento ou redução da tensão de entrada, conforme a posição da chave reversora, contabilizando-se os 32 passos do regulador.

Figura 2.6 - Posição Relativa do Contato Móvel:
(a) Sobre 1 Contato Fixo, (b) Sobre 2 Contatos Fixos



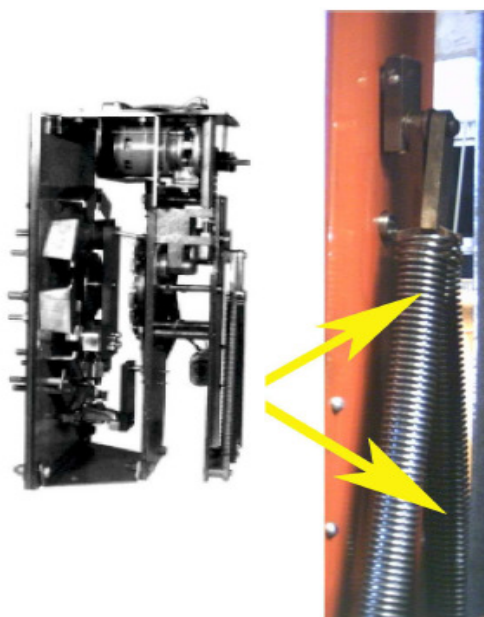
Fonte: Magalhães (2005)

Reguladores para aplicação em baixa corrente utilizam comutadores acionados pela energia armazenada em mola, mais comum em correntes abaixo de 219 A. A Figura 2.7 ilustra um típico mecanismo de acionamento por mola. Reguladores de tensão usados em aplicações de média ou elevada corrente empregam comutadores acionados diretamente por motor. Eles têm um motor e um conjunto de engrenagens movendo os contatos através de um pinhão. Comutadores de acionamento direto são mais comuns em aplicações de correntes acima de 219 A. Nesse trabalho estuda-se o desgaste em contatos nos reguladores para aplicação em baixa corrente, que utilizam comutadores acionados pela energia armazenada em mola.

O motor para comutadores de acionamento por mola é um motor com reversão de engrenagens, operado por capacitor adequado para uso em 120 Vac, monofásico a 50Hz ou 60Hz. Um mecanismo de freio integral controla a inércia do motor.

A função da chave de reversão é mudar a polaridade do enrolamento com derivações. Quando o comutador de acionamento por mola estiver na posição neutra a chave de reversão é aberta. O movimento da chave reversora no comutador de acionamento por mola ocorre quando os contatos móveis principais entram ou abandonam a posição neutra.

Figura 2.7 - Disposição das molas

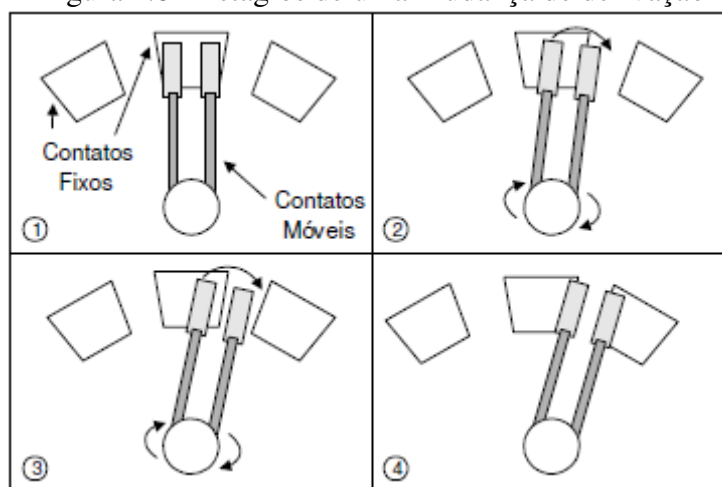


Fonte: Magalhães (2005)

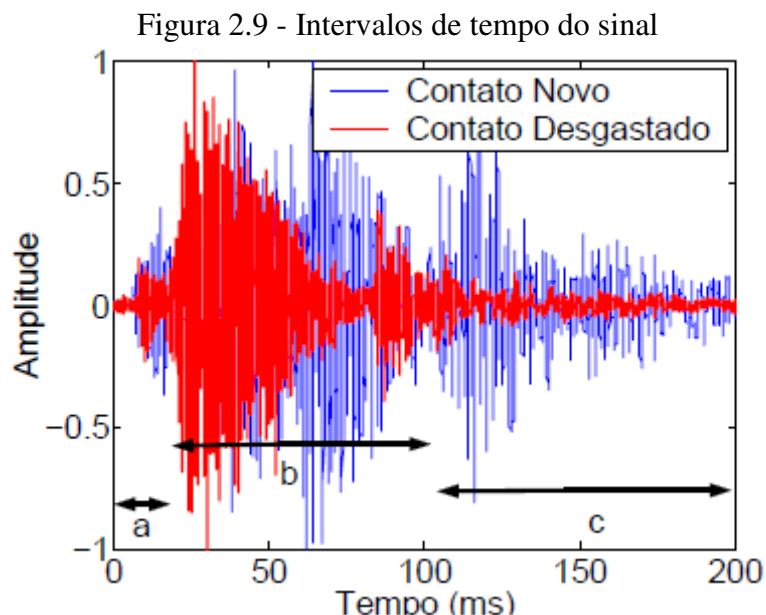
Muitas conexões elétricas são realizadas por uma grande variedade de estruturas. Essas conexões redundam em contatos elétricos. Em nosso estudo, esses contatos podem ser divididos em contatos a arco e não arco. Os contatos de não arco consistem em anéis deslizantes (frontal e traseiro) que servem como ponto de conexão para o terminal oposto do enrolamento do reator e um terminal dos dois contatos móveis principais. Todas as superfícies de contato são de cobre *Electrical Tough Pitch* e todas as emendas são rebitadas, parafusadas ou soldados para manter a alta-condutividade do caminho da corrente. O contato móvel principal é dividido para fazer contato com ambas as superfícies do anel deslizante e resistir à separação no caso de curtos de altas correntes.

O módulo comutador de derivação é composto, conforme Figura 2.8, de um jogo de contatos fixos, dois contatos móveis, motor e mola de disparo, sendo que os dois últimos são parte do sistema de posicionamento. É no módulo de controle que se verifica as variações nas características da rede elétrica e se determina para qual nível o sistema de posicionamento deve levar os contatos. O motor é então acionado e, através de um sistema de correntes e engrenagens, leva a mola até a posição em que ocorre o disparo, ocorrendo mudança de contato. A mudança de derivação pode ser dividida em quatro estágios, ver Figura 2.8 (SIMAS FILHO, 2004). No primeiro estágio ocorre o início da comutação. No segundo, os contatos móveis estão sendo arrastados sobre os fixos. No terceiro, um dos contatos móveis se desprende do contato fixo, nesta etapa ocorrem os arcos elétricos. No último estágio os contatos móveis finalizam o acoplamento. Dessa forma, pode-se associar a cada um destes estágios uma parte do sinal de vibração adquirido.

Figura 2.8 - Estágios de uma Mudança de derivação



Fonte: Simas (2004)



Fonte: Magalhães (2005)

A Figura 2.9 mostra, no domínio do tempo, dois sinais de vibração coletados na carcaça de um OLTC. Um dos sinais representa a resposta dinâmica de um contato novo, o outro, a resposta dinâmica de um contato com desgaste avançado, ambos os sinais coletados no momento de uma comutação. Nessa mesma figura, dividiram-se esses sinais de vibração nos intervalos (a), (b) e (c). Em (a) ocorrem os estágios (1) e (2) definidos na Figura 2.8, em (b), intervalo de maior amplitude do sinal, ocorrem os estágios (3) e (4), e (c) é o tempo de resposta de todo o sistema ao estímulo de vibração gerado pela troca de derivação. As informações mais importantes do sinal para avaliação da integridade dos contatos elétricos estão provavelmente nos intervalos (a) e (b). No intervalo (a) tem-se a ocorrência de eventos mecânicos como disparo da mola e arraste dos contatos. Em (b), tem-se eventos elétricos e mecânicos como arco elétrico, acoplamento e arraste dos contatos. A busca de informações e extração de parâmetros é feita baseada nas informações acima. O sinal de vibração foi amostrado a uma frequência de 44.100 Hz, cada amostra da dinâmica da comutação dura entre 180 e 220 ms, o que corresponde a um sinal com 7900 a 9700 amostras. O intervalo (a) dura aproximadamente 20 ms e (b) 80 ms, correspondendo a aproximadamente 880 e 3500 amostras, respectivamente. O restante do tempo corresponde ao intervalo (c).

2.2 Inspeções Internas

Nas inspeções internas dos OLTC's em falha foram registradas algumas ocorrências que entende-se ter uma relação muito próxima com a vibração do mesmo durante um ciclo de

comutação. Além disso, outro fator importante, responsável pela retirada de operação do regulador pela baixa isolamento dielétrica, é a degradação do óleo mineral isolante.

Neste quesito, dois elementos importantes que aceleram a degradação do óleo mineral isolante são a água e as partículas sólidas condutoras. Estes contaminantes reduzem acentuadamente a rigidez dielétrica do óleo e alteram suas características físico-químicas: modificam a sua cor, indicando contaminação; aumentam a acidez, em consequência da oxidação e fazem decrescer a tensão interfacial. A ação destes contaminantes, além de prejudicar as propriedades elétricas do óleo, acelera a deterioração química dos isolamentos celulósicos, diminuindo a vida dos equipamentos, indicando uma condição indesejável que requer uma ação corretiva.

Abaixo, têm-se os resultados da Inspeção Interna no OLTC em Falha realizados em oficina especializada. Durante a abertura dos OLTC's, antes mesmo de se fazer uma avaliação direta dos contatos, era realizada uma inspeção geral do equipamento a fim de diagnosticar as causas de sua retirada de operação do sistema elétrico de potência. Dentre as não conformidades registradas podem-se citar as seguintes:

- Papelão solto

A vibração causada pela operação de comutação dos contatos ou o esforço mecânico no enrolamento devido a variação da carga podem provocar o desprendimento de calços e papelão. Calços de madeira servem para apoio e fixação do conjunto interno e o papelão serve como isolante. Nestas condições as vibrações tenderão a se elevar, agravando o defeito e prejudicando o modo natural de operação do regulador. A ocorrência destes eventos leva a uma diminuição da vida útil e até mesmo a queima do equipamento.

Figura 2.10 - OLTC no qual existem papelão e calços soltos

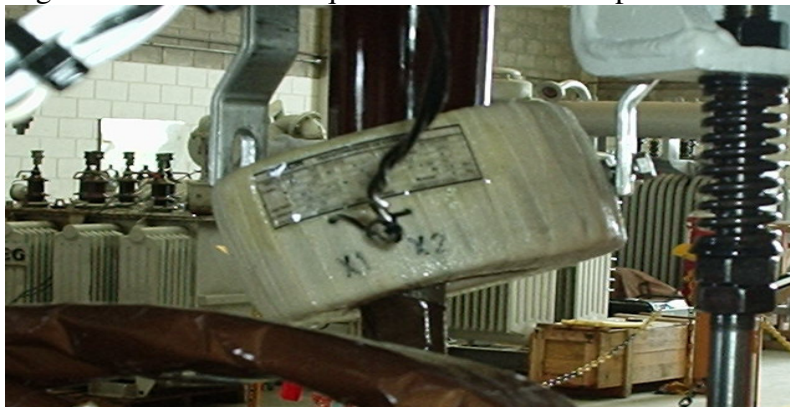


Fonte: Autor (2019)

- Parafuso Solto

Do mesmo modo, a vibração causada pela operação de comutação dos contatos ou o esforço mecânico no enrolamento devido a variação da carga podem provocar o desprendimento de parafusos de fixação de acessórios. Foram observados diversos eventos deste tipo, principalmente do parafuso que fixa o transformador de corrente na estrutura do equipamento. A ocorrência destes eventos leva a uma diminuição da vida útil e até mesmo a queima do equipamento.

Figura 2.11 – OLTC no qual foi observado um parafuso solto



Fonte: Autor (2019)

- Partículas Sólidas

Foi verificado, em abundância, um acúmulo de partículas sólidas depositadas em todo o corpo (parte interna do OLTC) originárias, principalmente, do desgaste dos contatos fixos e móveis do mecanismo de comutação. Partículas sólidas provocam baixa isolamento, podendo levar o equipamento a uma condição de falha.

Figura 2.12 - Partículas sólidas encontradas no interior do OLTC

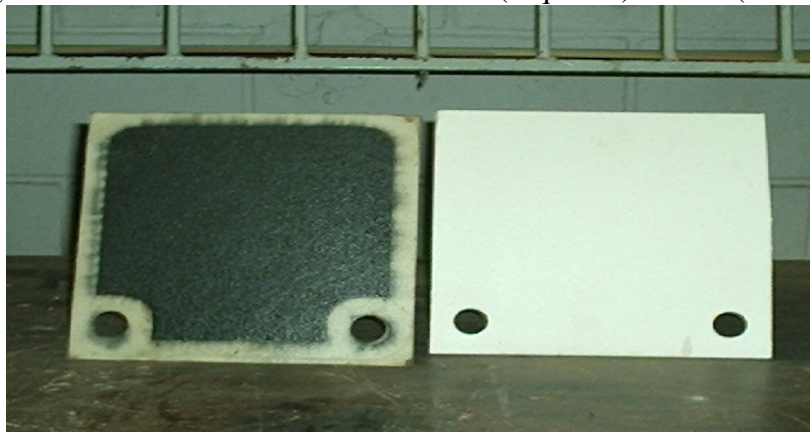


Fonte: Autor (2019)

- Condições do Óleo Mineral Isolante

Em noventa por cento de todos os equipamentos inspecionados, o óleo mineral isolante estava carbonizado em função dos arcos elétricos decorrentes da comutação dos contatos fixos e móveis do mecanismo de comutação. Óleo degradado provoca baixa isolação, podendo levar o equipamento a uma condição de falha. A situação é tão crítica que o óleo precisa ser filtrado primeiro para depois sofrer o tratamento convencional. É necessária a retirada das partículas para não danificar as máquinas termo vácuo que irão recondicionar ou regenerar o óleo dando-lhe as características físico-químicas originais.

Figura 2.13 – Elementos filtrantes: usado (esquerda) e novo (direita)



Fonte: Autor (2019)

Os fatos, acima registrados, já faziam parte de uma pesquisa empreendida por empresas concessionárias de energia elétrica e cujos resultados levaram a adoção de um novo processo de tratamento do núcleo do regulador e em consequência a uma diminuição do número de equipamentos que eram alienados porque não se conseguir recuperar a isolação dos mesmos. A ideia agora é encontrar um sistema de investigação que possa nos indicar quando o equipamento vai atingir o limiar de sua capacidade operacional, permitindo uma ação preventiva na manutenção do mesmo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Linha do tempo

Diversas técnicas de análise de desgastes de contatos dos comutadores de derivações sob carga têm sido desenvolvidas ao longo do tempo com o objetivo principal de evitar a saída de operação dos transformadores de força. Alguns pesquisadores, destacados abaixo, direcionaram suas pesquisas para testes não-invasivos através da análise de vibração do sinal coletado durante a comutação do taps.

Segundo Simas Filho (2004), o monitoramento de um OLTC pode ser efetuado de diversas formas, já desenvolvidas e validadas, como por exemplo:

- Análise das características do óleo isolante (WANG *et al.*, 2000a), chamada de DGA (*Dissolved Gas-in-oil Analysis*). Esta técnica permite associar a mudança da concentração de certos gases dissolvidos no óleo às condições de falha do equipamento. A análise é feita de forma não invasiva, usando dados de imagens térmicas no espectro do infravermelho.

- Análise dos dados extraídos do sinal de vibração, colhido na carcaça do equipamento a cada mudança de contatos:

A – utilizando a transformada *wavelet* para detectar a envoltória do sinal e depois se aplica a análise dos dados com mapas auto-organizáveis (KANG & BIRTHWHISTLE, 2001a, 2001b), (KANG & MCCULLOCH, 2000a).

B – M. Foata em Foata *et al.* (2000) usa convolução de Hilbert para detectar a envoltória, fazendo comparações entre o sinal medido e uma referência pré-estabelecida.

- No estudo da CIGRE - (*Conseil International Des Grands Réseaux Electriques*) (GUUINIC & AUBIN, 2001) podem-se encontrar os métodos mais usados para monitoramento de OLTC's. Além dos citados acima (DGA e análise acústica), o estudo indica que podem ser extraídas informações importantes a partir do monitoramento das seguintes variáveis: corrente e torque do motor do sistema de posicionamento e temperatura relativa das partes do OLTC.

Em sua pesquisa, Simas Filho (2004) indicou que os Algoritmos Genéticos mostraram que é possível identificar e classificar o estado de um contato do OLTC a partir da análise da amplitude do parâmetro estimado. Para as frequências de 890 a 2500 Hz, na análise do sinal completo, as amplitudes nos contatos novos são 5 vezes maiores que nos contatos desgastadas. A avaliação de outros parâmetros possibilita a diferenciação entre contatos novos e desgastados. Para esta análise, dividiu-se o sinal amostrado em três intervalos e por questões

técnicas selecionaram-se os intervalos “a” e “b” regiões onde se concentram as características mais marcantes do sinal, que pode ser vista na Figura 2.9 – Intervalos de Tempo do Sinal, mostrada na seção anterior.

Em sequência, várias pesquisas se utilizaram da mesma base de dados e, através do emprego de diversas ferramentas, para monitorar o desgaste de contatos de um OLTC. Paulo R. A. Silva (2004) propõe um algoritmo em complemento a estudos propostos anteriormente. É conhecido da literatura (MALLAT e HWANG, 1992) que a detecção de padrões de um sinal processado através da transformada *Wavelet* pode ser obtido com o cálculo do *modulus maxima*. As linhas de máximo são formadas pelos caminhos de descida do valor máximo dos coeficientes da CWT. A proposta deste trabalho foi desenvolver um algoritmo para eliminar os falsos máximos e a obtenção dos máximos verdadeiros. Por meio das linhas de máximo, pode-se obter uma forma de padronização ou classificação de vários sinais de vibração. As linhas de máximo, extraídas dos coeficientes da transformada contínua *Wavelet*, fornecem um indicador confiável do comportamento da comutação de um OLTC, bem como dos níveis de desgaste dos seus contatos.

Em Magalhães (2005), utilizando a mesma base de dados de Simas Filho (2004), desenvolveu um estudo baseado em Prony. Afirmou que fundamentalmente as técnicas de análise espectral são baseadas na transformada rápida de Fourier (FFT) e são as mais utilizadas em engenharia. A popularidade da FFT se deve a facilidade de implementação e sua eficiência computacional. Porém a FFT tem duas limitações intrínsecas. A primeira delas está relacionada ao ajanelamento do sinal que a aplicação demanda. A segunda limitação é uma consequência da primeira, onde as frequências que estão os pontos amostrados não são captadas. Para contornar estas limitações, geralmente utiliza-se a FFT em janelas longas do sinal amostrado. Porém a disponibilidade de memória nos sistemas de aquisição e armazenamento de sinais é um fator limitante para tais janelas. Uma alternativa interessante para estas limitações é abordagem da estimação paramétrica.

Os parâmetros deste modelo são calculados por meio das amostras do sinal dentro da janela e ele pode gerar os dados fora da janela. Pode-se então, relacionar os valores destes parâmetros com a expressão teórica da densidade espectral de potência – PSD, que é o produto final de uma análise espectral. O sucesso da aplicação de técnicas paramétricas de estimação espectrais está relacionado ao modelo escolhido para o problema.

O método utilizado aqui é o de Prony, uma técnica de estimação paramétrica que toma como base um modelo constituído por uma combinação linear de exponenciais complexas.

Esta técnica que procura ajustar uma exponencial determinística com amostras do sinal analisado.

Com Almeida (2005) através da Transformada Discreta *Wavelet* (*Discrete Wavelet Transform* – DWT) desenvolveu-se uma linha de pesquisa que utiliza banco de filtros, para implementar computacionalmente a transformada de wavelet diádica ortogonal de um sinal, não é necessário nem de função escalonada nem de wavelets, apenas de um simples banco de filtros digitais. O princípio fundamental é analisar o sinal através de uma combinação de uma função escala (passa-baixa) e wavelet (passa-faixa). Esta ideia é essencial na codificação em sub-bandas e na análise de multirresolução. O modo usado na análise para wavelets discreta consiste em projetar filtros passa-alta e passa-baixa de tal modo que divida o espectro do sinal exatamente ao meio. Para muitos sinais, o conteúdo de baixa-frequência (aproximações) fornece sua identidade. Por outro, o conteúdo de alta-frequência (detalhes) fornece sua nuance. Neste trabalho utilizou-se os índices definidos pela equação onde aparece no numerador a energia do sinal da baixa resolução do nível 1 e a energia do sinal de alta resolução para os níveis de decomposição de 1 a 5, totalizando 5 índices.

Em Ferreira (2007) tratou-se de fazer um comparativo de três linhas de pesquisa com a mesma base de dados: Prony, Algoritmos Genéticos e Wavelet. Verificou-se que os mesmos conduzem ao resultado similar, cada um com suas peculiaridades. Ao final deste trabalho, foi dada a sugestão de combinar os índices de wavelet com a curva da banheira através da lógica Fuzzy. Para os equipamentos avariados, como o desgaste dos contatos não ocorreram na mesma intensidade, os valores dos índices medidos ficaram pulverizados num entorno de uma região que se denomina zona crítica ou de falha iminente. Tinha-se em mãos dados que indicavam os contornos (extremos) de um ciclo de vida de um equipamento. Era necessário identificar um método capaz de avaliar a evolução do desgaste dos contatos ao longo da vida útil e determinar com segurança o momento mais apropriado de realizar uma manutenção. Através da lógica Fuzzy, espera-se fazer uma análise combinada do risco de falha de um regulador de tensão com base no seu ciclo de vida e nos índices de Wavelet (análise de sinais de vibração da comutação de derivação de um regulador).

Na busca por uma nova abordagem comparativa, Simas Filho (2008), enfatizou que métodos acústicos não-invasivo para monitoramento de condição de contatos elétricos internos foram recentemente propostos na literatura. Uma limitação dessas análises é que não existe qualquer informação sobre a degradação gradual do estado do equipamento. Neste trabalho, um sistema classificador usado é desenvolvido *Self-Organizing Maps* (SOM), a fim de identificar os diferentes níveis de contatos elétricos desgaste. O método aqui proposto foi

capaz de separar as assinaturas disponíveis em quatro diferentes condições de operação: pós-manutenção (sem desgaste), baixo, intermediário e alto desgaste para fora. O objetivo deste trabalho é a obtenção de um sistema classificador para identificar níveis intermediários de degradação dos contatos. Decomposição Wavelet Discreta foi aplicada para extração de características a fim de obter um compacto da aproximação do sinal de envelope. *Self-Organizing Map* (SOM) foi utilizado para realizar uma ordenação topológica sem supervisão das assinaturas acústicas. Os coeficientes de decomposição wavelet foram utilizados como insumos para o SOM. Sinais de vibração com características semelhantes foram arranjados no mesmo cluster. A técnica proposta foi capaz de separar as assinaturas disponíveis em quatro condições operacionais distintas: pós-manutenção (sem desgaste), baixo, intermediário e alto desgaste para fora. Esta informação é muito útil para prever a vida útil do equipamento restante e agendar o procedimento de manutenção.

Segundo Rivas *et. al* (2009), a operação adequada de um comutador de derivação sob carga (OLTC) é essencial para o funcionamento de um transformador de potência. É extremamente desejável ter alguns indicadores para avaliar as condições dos OLTC's, especialmente se estes indicadores são capazes de ser utilizados num sistema *online* de monitoramento que não afeta a operação normal do transformador – paradas para inspeção interna do equipamento. Este artigo descreve uma metodologia por meio de análise da envoltória do sinal de vibração com base na transformada de Hilbert e decomposição ortogonal da wavelet para determinar os principais parâmetros que permitam a avaliação da condição do OLTC do transformador de potência por meio de medições da vibração durante a operação do comutador.

Neste estudo, Rivas *et al.* (2010), avança suas pesquisas agora investigando componentes importantes do OLTC. Da mesma forma, ressalta que um comutador de derivação sob carga em condições adequadas é essencial para o funcionamento de um transformador de potência. É extremamente desejável dispor de indicadores que ajudem a avaliar as condições do comutador, especialmente se estes indicadores podem ser utilizados num sistema de monitorização *online*, que não afeta o funcionamento normal do transformador. Este artigo descreve um método para detectar falhas no seletor de *tape* por meio de medições de vibração durante o funcionamento do comutador, usando análise de envelope baseado em transformada de Hilbert e na decomposição wavelet. Diferentes falhas no seletor de *tape* podem ser distinguidas na assinatura de vibração e como eles são refletidos em diferentes partes desta assinatura. Os parâmetros de diagnóstico encontrados permitem uma classificação de falha mais seletiva.

Yoshida *et al.* (2013), reforça a utilidade de algumas técnicas não invasivas que foram propostas para a identificação da necessidade da manutenção sem a retirada de funcionamento do transformador.

Em Simas Filho *et al.* (2004), foi realizada uma análise da vibração do equipamento. O processamento foi feito inicialmente com algoritmo RLS (*Recursive Least Square*) para a eliminação dos componentes harmônicos e a classificação do sinal com algoritmo genético para obtenção das principais componentes de frequência, amplitude e envoltória do sinal. Em Simas Filho *et al.* (2008), foi proposto um classificador para identificação de níveis intermediários de desgaste com a utilização de Mapa Auto-Organizável (*SOM – Self Organizing Map*). As entradas do SOM foram os coeficientes da transformada Wavelet do sinal. O SOM também foi proposto como classificador para detecção de falhas em (KANG e BIRTHWHISTLE, 1998). O sinal foi processado através da transformada Hilbert para obtenção da envoltória, a seguir, o resultado da transformada wavelet foi utilizado como entrada do SOM.

Já em Kang e Birtwhistle (2001); Rivas *et al.*, (2009) e Rivas *et al.*, (2010) foi proposta a análise de características temporais do sinal como intervalo entre os acionamentos, o número de assinaturas e amplitude do sinal para detectar faltas e o estado do OLTC. Neste trabalho é utilizado o sinal acústico do equipamento e proposta uma comparação entre a Transformada Rápida de Fourier (FFT) e a Transformada Wavelet Discreta (DWT) como formas de pré-processamento para identificação do estado de desgaste dos contatos do OLTC. O sistema de classificação combina informações de dois discriminadores: um perceptron em Haykin (2001) e um SOM em Kohonen (1990). Visando a redução dos custos computacionais e dos recursos de memória para uma futura implementação do sistema em hardware dedicado, o sinal de vibração captado pelo acelerômetro foi processado usando a FFT, variando o número de coeficientes no domínio da frequência, e através da DWT, com diferentes níveis de decomposição (a cada decomposição o sinal é subamostrado por um fator igual a 2). O objetivo é verificar qual das duas transformadas permite a obtenção de resultados satisfatórios de classificação com o menor número de coeficientes.

Em Ferreira (2018), são abordados outros aspectos peculiares ao monitoramento de sinais de vibração do OLTC através da wavelet de forma isolada ou associada a outros métodos de avaliação. Entre algumas ferramentas de análise de dados, a transformada wavelet parece ser uma das mais eficazes para análise de sinais de vibração.

Asamoah (1999), em seu artigo, trata de forma simples da decomposição e reconstrução de um dado sinal discreto utilizando o algoritmo de Mallat. Considerando outras

abordagens, como por exemplo Wang et al (2000a), foi aplicada a transformada wavelet harmônica (HWT) para detecção e diagnóstico de falhas da vibração de um sistema de rolamento do rotor rachado com a fricção rotor/estator Kar e Mohanty (2014), utilizaram a transformada wavelet discreta (DWT) para estabelecer análise de assinaturas atuais como base de monitoramento de condições de uma caixa de engrenagens de vários estágios.

Andrzej Cichon *et. al* (2011), faz uma análise da influência da falta de concordância dos contatos na operação do comutador através da energia dos sinais registrados pelo método da EA (emissão acústica). Os sinais registrados foram submetidos às análises nos domínios do tempo e tempo-frequência. A análise dos resultados no domínio do tempo foi realizada utilizando a transformada de Hilbert. Uma transformada de Fourier de curta duração foi utilizada para a avaliação dos resultados no domínio tempo-frequência. Andrzej Cichon *et. al* (2015), destaca que a seleção de parâmetros de análise através de Wavelet pode ser difícil, especialmente no que diz respeito à wavelet mãe, pois as diferentes wavelets mãe possuem várias propriedades em relação ao número de momentos nulos e simetria.

Finalmente, Henryk Majchrzak, *et al.* (2017), realizou um estudo mais abrangente no qual analisou-se cerca de dez itens de um OLTC. Foram realizadas medições com o OLTC operando sob carga e a vazio. A análise dos resultados das medições foi feita tanto no domínio do tempo quanto no domínio tempo-frequência.

3.2 Técnicas de processamento de sinais utilizadas neste trabalho

Processamento de sinais abrange o conjunto de técnicas utilizadas para extrair informações importantes dos dados contidos em um sinal coletado de um processo ou sistema. Em sinais determinísticos estas informações geralmente estão relacionadas com componentes dominantes de determinadas frequências. Consequentemente, técnicas de estimação espectral como a transformada de Fourier podem ser aplicadas na análise desse sinal. Para sinais aleatórios (estocásticos), sinais transientes ou sinais contaminados com ruído, é preciso usar uma abordagem estatística, não sendo possível determinar o espectro de frequência exato, mas sim, uma estimativa através de uma rotina de tratamento do sinal.

3.2.1 Transformada de Fourier

A FT (Transformada de Fourier) é um procedimento matemático que permite a partir de um sinal no domínio temporal $x(t)$ obter uma função $X(f)$ ou $X(j\omega)$ descrevendo o comportamento em frequência desse sinal (KAMEN & HECK, 2000).

A Transformada de Fourier pode ser definida por:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt, -\infty < t < \infty \quad (3.1)$$

Onde ω é a função contínua da velocidade angular (em rad/s). A existência da Transformada de Fourier também está atrelada às condições de Dirichlet, descritas abaixo.

- a) $|x(t)|$ deve ser integrável em qualquer período $\int_a^{a+t} |x(t)| dt < \infty$,
- b) $x(t)$ deve possuir um número finito de máximos e mínimos em qualquer período,
- c) $x(t)$ deve possuir um número finito de descontinuidades em qualquer período.

A equação 3.1 permite o cálculo da Transformada Inversa de Fourier, ou seja, a reconstituição do sinal temporal a partir de seu espectro de frequência.

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{j\omega t} dt, \quad (3.2)$$

Com a evolução dos sistemas digitais, adaptou-se a teoria de Fourier para o tratamento de dados amostrados (sinais discretos). No tratamento de dados discretos, usa-se a Transformada Discreta de Fourier (DFT - *Discrete Fourier Transform*).

Supondo que a sequência discreta $x[n]$ é zero para $0 < n \geq N$ onde N é um inteiro positivo. A DFT X_k de $x[n]$ é definida por (KAMEN & HECK, 2000):

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j2\pi kn/N}, k = 0, 1, \dots, N-1, \quad (3.3)$$

Para o cálculo da DFT existe um algoritmo bastante eficiente que ficou conhecido como FFT (*Fast Fourier Transform*). Esta contribuição facilitou muito o tratamento de sinais amostrados com grande número de pontos. O algoritmo da FFT está descrito em David J. DeFatta (1988).

3.3 Wavelet

Embora desde 1952 as wavelets já fizessem parte de trabalhos de alguns matemáticos, foi nos anos 1980 que numerosos cientistas passaram a utilizá-las como uma alternativa à

análise de Fourier tradicional. Por volta de 1985, foi dado um novo impulso a esta teoria através das contribuições de matemáticos e experts em processamento de sinal. As wavelets são ferramentas matemáticas bem simples com grandes variedades de possíveis aplicações. E devido à sua interdisciplinaridade tem despertado o interesse de cientistas de diversas áreas.

3.3.1 Wavelet discreta

O mapeamento de sinal unidimensional (no tempo) em uma representação bidimensional (tempo, escala) que é altamente redundante é realizado pela transformada wavelet contínua.

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \Rightarrow \psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a_0^m|}} \psi\left(\frac{t-nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right), \quad (3.4)$$

Onde m e n são inteiros, $a_0 > 1$ é um parâmetro de dilatação fixo, b_0 é o fator de translação e depende do fator de dilatação.

A transformada contínua wavelet é calculada fazendo translações e escalonamentos contínuos de uma função sobre um sinal, calculando uma correlação entre eles. Na prática esta transformada não seria muito útil, pois seriam requeridas infinitas translações e escalonamentos, necessitando muito tempo e recursos computacionais, ainda gerando muita redundância.

As transformadas contínuas são primordialmente empregadas na dedução de propriedades das transformadas. Formas discretas são atraentes do ponto de vista de implementação computacional. A discretização da WT ocorre apenas no domínio dos parâmetros (variáveis de escala e translação), não na variável independente do sinal a ser analisado (tempo ou espaço).

Os coeficientes no domínio da transformada correspondem a pontos em um reticulado bidimensional no plano *escala x translação*. A grade é indexada por dois inteiros m e n , sendo o primeiro associado aos passos na escala discreta e o segundo aos passos das translações discretas. Fixam-se dois valores dos passos, a_0 e b_0 .

Escala discreta (logarítmica): $a = a_0^m \quad m = 1, 2, 3, \dots$

Translações discretas: $b = nb_0 a_0^m \quad n = 1, 2, 3, \dots \text{ fixado } m.$

Assim,

$$WT(a,b) = CTWS(m,n) = \frac{1}{\sqrt{|a_0^m|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t - nb_0}{a_0^m}\right) dt, \quad (3.5)$$

3.3.2 Análise de multirresolução

Análise multirresolução é uma técnica originada na área de processamentos de sinais, que no contexto das wavelets, constitui-se na forma padrão de construção das bases de wavelets e da implementação das transformadas wavelets ortonormais. Uma forma de implementar computacionalmente a transformada wavelet diádica ortonormal pode ser obtida através do algoritmo baseado na representação multirresolução de sinais que, assim como a transformada wavelet, decompõe o sinal em escalas com diferentes resoluções no tempo e na frequência (LIRA, 2004).

Os pesquisadores queriam encontrar algoritmos manipuláveis, permitindo decompor funções arbitrárias em termos de funções especiais, combinando as vantagens do sistema trigonométrico e do sistema de Haar.

Funções do sistema trigonométrico – perfeitamente localizadas em frequência ou variável de Fourier.

Funções do sistema de Haar – perfeitamente localizada na variável de espaço (ou tempo).

Definições:

A análise de multirresolução consiste em uma sequência de subespaço vetoriais.

$$\dots V_{m-1} \subset V_m \subset V_{m+1} \dots$$

1 - A função $\phi(t) \in V_0$ é ortogonal à sua função deslocada $\phi(t-n), n \in \mathbb{Z}$, isto é

$$\int_{-\infty}^{\infty} \phi(t) \phi^*(t-n) dt = \delta(n)$$

2 - E para qualquer $s(t)$ em V_0 ,

$$s(t) = \sum_n c_n \phi(t-n)$$

$$\text{Onde } c_n = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \phi^*(t-n) dt$$

$\phi(t)$ é chamada função escalonada no tempo.

$$3 - s(t) \in V_m \text{ se e somente se } s(2t) \in V_{m+1} \text{ para } m \in \mathbb{Z}$$

Isto significa que o sinal a uma dada resolução contém toda informação de um sinal a uma aproximação grosseira.

$$4 - \widehat{m}V_m = \{0\}$$

Zero é o único objeto comum para todo o espaço V_m .

5 - Qualquer sinal em L^2 pode ser aproximado pela união de sinais dos espaços, isto é: $\lim_{m \rightarrow \infty} V_m = L^2(\mathbb{R})$.

Isto implica que qualquer sinal em L^2 pode ser aproximado com uma precisão arbitrária.

Baseado na condição (2), condição (3) e combinando com a condição (1), pode-se definir os filtros - função escala (passa - baixa) e wavelet (passa-faixa), que serão discutidos mais a frente, e que darão sustentação à formulação da análise de multirresolução e codificação sub-banda.

A função escala (LPF - *Low Pass Filter*), denotada geralmente por $\phi(t)$, foi introduzida por Mallat em 1989. O princípio fundamental é analisar o sinal através de uma combinação de uma função escala $\phi(t)$ (passa-baixa) e wavelet $\psi(t)$ (passa-faixa). Esta ideia é essencial na codificação em sub-bandas e na análise de multirresolução (LIRA, 2004).

3.3.3 Codificações de sub-bandas

O processo de codificação por sub-bandas é uma técnica de processamento de sinais, que tem como objetivo dividir o espectro de um sinal em sub-bandas independentes, através do uso de filtros ortogonais.

A Transformada Wavelet Discreta – DWT - emprega dois conjuntos de funções, chamadas funções de escala e funções wavelet, que estão associados com filtros passa-baixa e passa-alta, respectivamente. A decomposição do sinal em bandas de frequência diferentes é obtida por sucessivas filtragens do sinal no domínio do tempo por esses filtros. O sinal original $x[n]$ é primeiro analisado através de um filtro passa-alta $g[n]$, e um filtro passa-baixo $h[n]$. Após a filtragem, a metade das amostras pode ser eliminada de acordo com a regra de Nyquist, uma vez que o sinal tem agora uma frequência alterada. O sinal pode, portanto, ser subamostrado, simplesmente, descartando uma parte da amostra. Isto constitui um nível de decomposição (NAJARIAN, 2006).

3.3.4 Aproximações e detalhes

Para muitos sinais, o conteúdo de baixa frequência é a parte mais importante. É ele que fornece sua identidade. Por outro lado, o conteúdo de alta frequência concede sua nuance. Considere a voz humana. Se as componentes de alta frequência forem removidas, a voz soará diferente, mas ainda é possível entender o que está sendo dito. Entretanto, se as componentes de baixa frequência forem removidas, ouvir-se-á murmúrios. É por esta razão que, na análise wavelet, fala-se frequentemente em aproximações e detalhes. As aproximações são as altas escalas, isto é, componentes de baixa frequência do sinal. Os detalhes são as baixas escalas, isto é, componentes de alta frequência (LIRA, 2004).

3.3.5 Bancos de filtros

Para implementar computacionalmente a transformada de wavelet diádica ortogonal de um sinal, não é necessário nem de função escalonada nem de wavelets, apenas de um simples banco de filtros digitais.

O princípio fundamental é analisar o sinal através de uma combinação de uma função escala (passa-baixa) e wavelet (passa-faixa). Esta ideia é essencial na codificação em sub-bandas e na análise de multirresolução. O modo usado na análise para wavelets discreta consiste em projetar filtros passa-alta e passa-baixa de tal modo que divida o espectro do sinal exatamente ao meio.

Para muitos sinais, o conteúdo de baixa frequência (aproximações) fornece sua identidade. Por outro, o conteúdo de alta-frequência (detalhes) fornece sua nuance.

Tradicionalmente, amostra-se a wavelet diádica ortogonal CWT(a,b):

$$d_{m,n} = CWT(2^{-m}, n2^{-m}) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi_{m,n}^*(t) dt \quad (3.6)$$

Onde a wavelet dilatada e deslocada da wavelet mãe é definida por:

$$\psi_{m,n}(t) = 2^{m/2} \psi(2^m t - n) \quad (3.7)$$

O sinal $s(t)$ pode ser recuperado por:

$$s(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_{m,n} \hat{\psi}_{m,n}(t) \quad (3.8)$$

A discretização da WT ocorre apenas no domínio dos parâmetros (variáveis de escala e translação), não na variável independente do sinal a ser analisado (tempo ou espaço). A grade é indexada por dois inteiros “m” e “n”, sendo o primeiro associado aos passos na escala discreta e o segundo aos passos da translação discreta.

Baseado na MRA pode-se concluir que se um sinal $s(t)$ está em V_m para um “m” finito, então o sinal $s(t)$ pode determinado completamente por, (QIAN, 2002):

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_{m,n} \phi_{m,n}(t) \quad (3.9)$$

Sendo $V_m = V_{m-1} \oplus W_{m-1}$, pode-se reescrever a equação:

$$\sum_n c_{m_0,n} \phi_{m_0,n}(t) + \sum_{k=m_0}^{m-1} \sum_n d_{k,n} \psi_{k,n}(t) \quad (3.10)$$

$m > m_0$

Os coeficientes $d_{m,n}$ e $c_{m,n}$ são o produto interno entre $s(t)$ e $\psi_{m,n}(t)$ e $\phi_{m,n}(t)$, respectivamente.

Cálculo dos coeficientes $c_{m,n}$.

$$c_{m,n} = 2^{m/2} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \phi^*(2^m t - n) dt \quad (3.11)$$

Aplicando a igualdade de Parseval e considerando que:

$$c_{m,n} = s[n] = s(t) \big|_{t=2^{-m}n} \quad (3.12)$$

Tem-se:

$$c_{m-1,n} = \sqrt{2} \sum_i h_0(t-2n) c_{m,i} \quad (3.13)$$

Coefficientes de baixa resolução $c_{m-1,n}$ podem ser recursivamente computado passando o coeficiente de alta resolução $c_{m,n}$ através de filtros passa – baixa $H_0(w)$.

Similarmente, pode-se provar que:

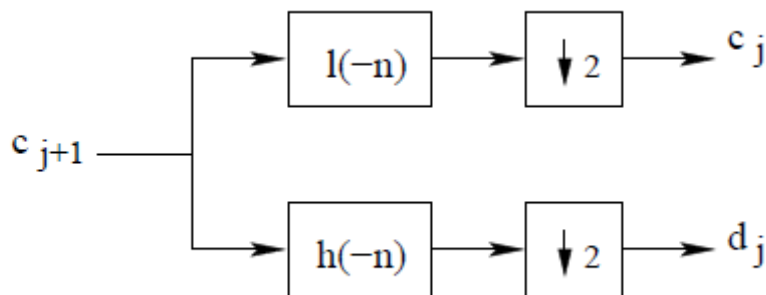
$$d_{m-1,n} = \sqrt{2} \sum_i h_1[i-2n] c_{m,i} \quad (3.14)$$

Onde $h_1[i]$ é definido como um filtro passa-alta e que $d_{m,n}$ são os coeficientes da wavelet. Desta forma, pode-se calcular coeficientes de alta resolução baseado em coeficientes de baixa resolução:

$$c_{m,n} = \sqrt{2} \left(\sum_i h_0[n-2i] c_{m-1,i} + \sum_i h_1[n-2i] d_{m-1,i} \right) \quad (3.15)$$

Implementação da transformada wavelet discreta através de banco de filtro digital.

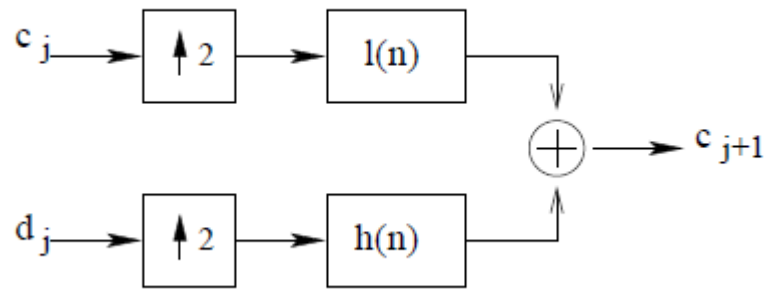
Figura 3.1 - Esquema de decomposição usando banco de filtros



Fonte: Silva (2008)

Recuperação do sinal amostrado através de banco de filtro digital.

Figura 3.2 - Esquema de reconstrução usando banco de filtros



Fonte: Silva (2008)

4 METODOLOGIA

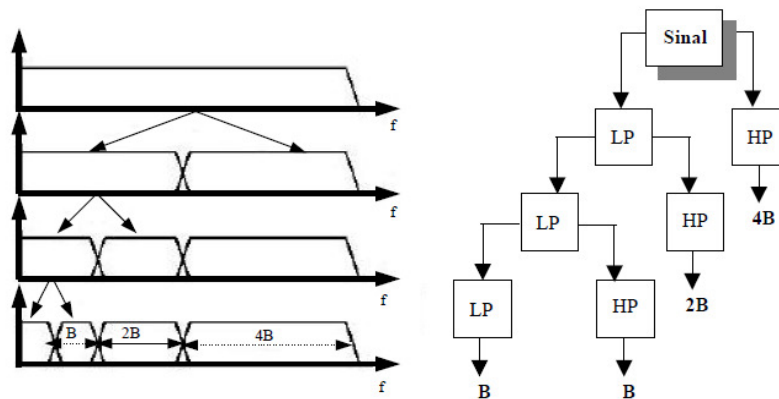
4.1 Desenvolvimento do método

Várias pesquisas utilizando-se da análise de vibração para avaliar o desgaste dos contatos de um *on-load tap-changer* (OLTC) surgiram ao longo do tempo, como foi demonstrado no capítulo anterior. Como forma de evidenciar a importância desta pesquisa e mostrar a sua eficácia na forma clara e direta de apresentação dos resultados, faz-se necessário estabelecer um comparativo entre os métodos e forma de apresentação dos resultados de outras pesquisas desenvolvidas com diferentes metodologias, mas com a mesma finalidade e com a mesma base de dados. No desenvolvimento desta pesquisa, Seção 5, será apresentado um comparativo entre ferramentas matemáticas, que se utilizaram da mesma base de dados e conduziram suas pesquisas, de formas diferentes, a um mesmo resultado. No momento será dada especial atenção à Transformada Wavelet que é a base deste estudo.

Neste trabalho, uma nova métrica baseada no DWT foi proposta para o diagnóstico da avaliação de OLTC em carga. A análise é baseada, principalmente, nas modificações nos coeficientes do DWT causados pelo envelhecimento do contato. A ocorrência de outros defeitos não foi considerada nesta pesquisa, já que o modelo desenvolvido apresenta uma avaliação de maneira aproximada. No entanto, problemas relacionados com o envelhecimento de contatos devido a repetidas mudanças de derivação, deterioração da superfície de contato devido a correntes de corrente elétrica e desalinhamento mecânico no sistema de posicionamento podem ser identificadas com um alto grau de precisão ao empregar a técnica proposta. Desta forma, os resultados mostraram um avanço significativo na identificação e no diagnóstico da condição OLTC, usando uma abordagem não invasiva simples baseada na análise de DWT de sinais de vibração.

O modo usado na análise para wavelets discreta consiste em projetar filtros passa-alta e passa-baixa de tal modo que divida o espectro do sinal exatamente ao meio Figura 4.1. Para muitos sinais, o conteúdo de baixa frequência (aproximações) fornece sua identidade. Por outro, o conteúdo de alta-frequência (detalhes) fornece sua nuance. Neste estudo utilizou-se os índices definidos pela equação onde aparece no numerador a energia do sinal da baixa resolução do nível 1 e a energia do sinal de alta resolução para os níveis de decomposição de 1 a 5, totalizando 5 índices.

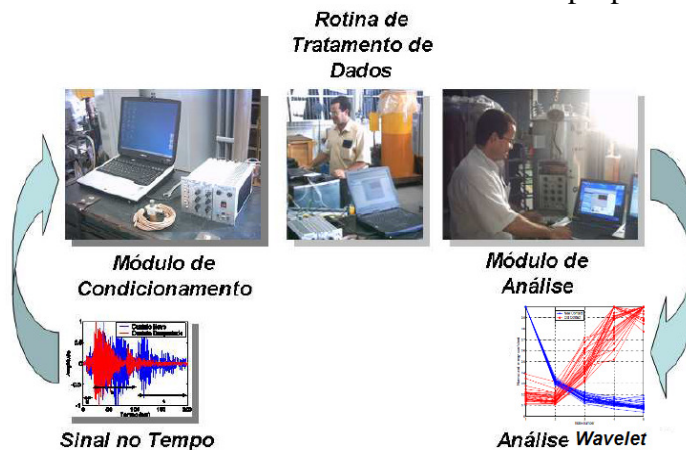
Figura 4.1 – Banco de filtros / codificação em sub-bandas



Fonte: Lira (2004)

Na Figura 4.2, abaixo, pode-se observar o fluxo do sistema não-intrusivo de monitoramento proposto para OLTCs, utilizado para o desenvolvimento da metodologia aplicada neste estudo. O fluxo é composto pelas fases de coleta do sinal de vibração (trabalho de campo), do condicionamento do mesmo, da rotina de tratamento e do módulo de análise no qual se aplica a ferramenta escolhida com este objetivo.

Figura 4.2 – Fluxo do sistema não-intrusivo de monitoramento proposto para OLTCs

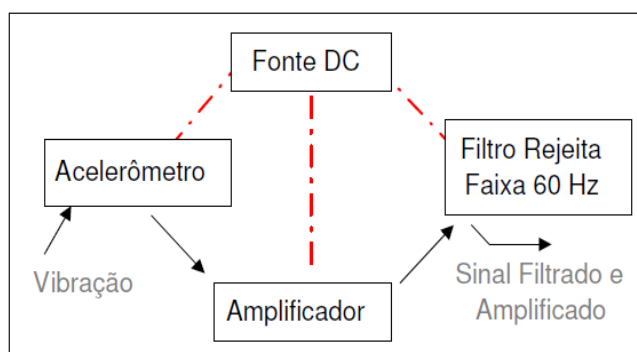


Fonte: Magalhães (2005)

4.2 Módulo de condicionamento de sinais

O esquema representado na figura abaixo mostra, de forma simplificada e através de diagrama de blocos, os diversos componentes do módulo de condicionamento de sinais bem como a sequência de processamento do sinal de vibração desde sua coleta até a entrega final do sinal condicionado.

Figura 4.3 – Módulo de condicionamento de sinais - esquema



Fonte: Simas (2004)

Figura 4.4 – Módulo de condicionamento de sinais



Fonte: Magalhães (2005)

Para a aquisição do sinal de vibração foi aplicado o Módulo de Condicionamento de Sinais Figura 4.4. O módulo é composto por: sensor de vibração (Acelerômetro). Na Figura 4.5, circuito de polarização do acelerômetro triaxial, amplificador de ganho ajustável e filtro analógico passa baixa.

Como sensor de vibração foi utilizado um acelerômetro tipo 4395 do fabricante Bruel Kjaer com alimentação ICP®, sensibilidade de 1 mV/ms^2 , frequência de ressonância de 37 kHz e resposta linear até 18 kHz.

O módulo de condicionamento tem como entrada o sinal de vibração medido pelo acelerômetro e sua saída é conectada a um notebook através da sua placa de som. O sinal

pode ser, então, amostrado com a frequência desejada e salvo em formato de arquivo de som (.wav), para ser tratado e analisado posteriormente. Na Figura 4.4 pode-se ver o módulo de condicionamento de dados montado para aquisição.

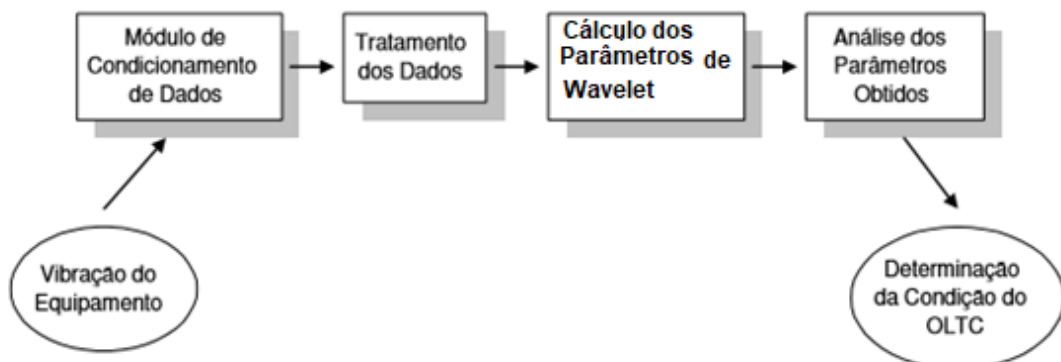
Figura 4.5 – Acelerômetro Tipo 4395 Bruel Kjaer (Alimentação ICP)



Fonte: Magalhães (2005)

4.3 Metodologia de Coleta de Dados

Figura 4.6 – Fluxo do sistema não-invasivo de monitoramento de OLTC's proposto



Fonte: Simas (2004)

4.4 Definição dos Parâmetros de Coleta

Taxa de aquisição..... 44.100 Hz

Aplicação de Filtro Analógico..... 20.000 Hz (Anti Aliasing).

Ponto de Coleta..... A ser definido em registro fotográfico e não deve ser alterado em todo o processo.

Fixação do Sensor..... Medida 01 (Base Magnética)

Medida 02 (Adesivo Sintético de Alta

Rigidez).

Tempo de Coleta..... Iniciando no TAP (0), cumprir o tempo de um ciclo completo (Acionamento de todos os TAP's - Subindo e descendo).

Número de Amostra por Ponto... Repetir três vezes a medida do mesmo ponto.

4.5 Wavelet Mãe

A uma determina base de um sinal em WT (transformada wavelet) chama-se de wavelet mãe a qual é utilizada para análise deste sinal. Diversas são as famílias de wavelets e cada uma delas pode ser utilizada para um determinado tipo de aplicação inerente às suas propriedades. É muito importante estabelecer uma escolha correta de tal forma que os resultados obtidos pela aplicação da transformada wavelet não sejam afetados por uma seleção inadequada da wavelet mãe. O principal objetivo desta seleção deve ser no sentido de encontrar o grau de correlação entre o sinal e wavelet mãe. A correlação é um método que permite determinar a semelhança (ou diferença) entre sinais, baseado na média do seu produto temporal.

More and more bases. Many orthonormal bases can be designed with fast computational algorithms. The discovery of filter banks and wavelet bases has created a popular new sport of basis hunting. Families of orthogonal bases are created every day. This game may however become tedious if not motivated by applications. A WAVELET TOUR OF SIGNAL PROCESSING. (MALLAT, 2000, p. XVI-PREFACE).

Conforme Lira (2004):

Uma das vantagens da análise com wavelets em relação à análise de Fourier é a existência de um maior grau de liberdade na escolha dos sinais básicos da decomposição. Em geral, a extração de uma dada característica do sinal é melhor executada com uma certa família de wavelets. Contudo, não existem critérios definitivos a respeito da escolha de uma “base de wavelets” mais adequada para um dado sinal. Muito embora já se encontrem disponíveis um grande número de famílias, surgem frequentemente novas wavelets, possibilitando novas aplicações. Elas podem ser potencialmente atrativas na representação de sinais com certas simetrias. (LIRA, 2004, p. 40).

Diante do exposto, foi realizada uma pesquisa na literatura disponível de textos que tratassem da seleção da wavelet mãe. De posse dos resultados, foram selecionadas quatro

famílias de wavelet que apresentavam os melhores resultados de desempenho e que estavam relacionadas com a análise de distúrbios em sistemas de energia elétrica e da qualidade de energia. São elas: Coiflets2, Daubechies5, Haar e Symlets2.

A partir desta seleção inicial e como proposta deste trabalho, optou-se pela aplicação Método da Divergência Kullback-Liebler (RICHARD, 2013), (MARTINS, 2005), também chamado de entropia relativa, para avaliação de desempenho das famílias selecionadas. Esta é uma medida estatística que tem por finalidade medir a distância entre duas distribuições. A wavelet mãe que maximizar a Divergência de Kullback-Liebler - apresentar maior distância entre as médias - será selecionada para aplicação nesta pesquisa.

5 RESULTADOS

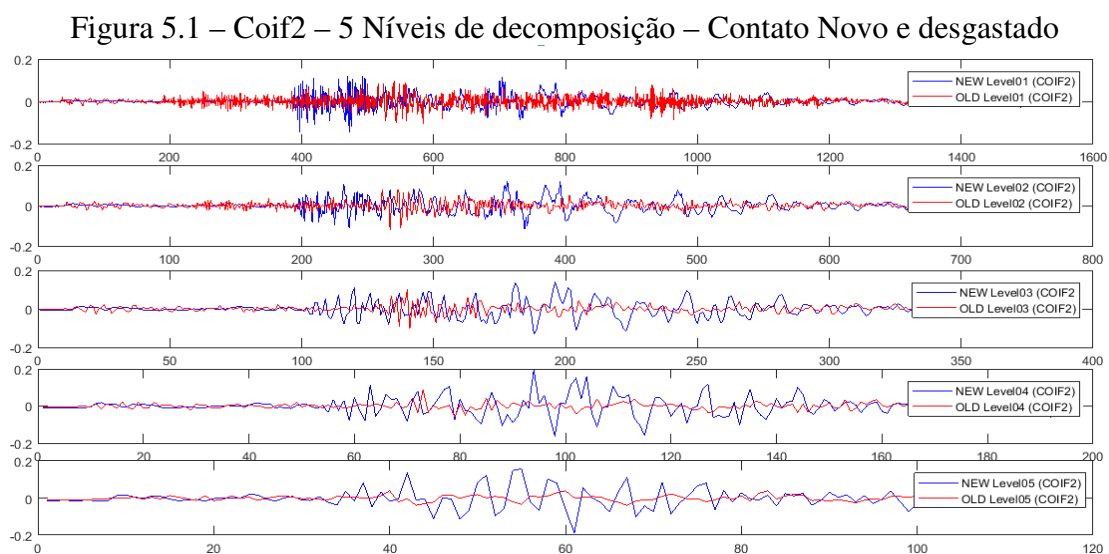
5.1 Resultados da seleção da wavelet mãe

A Figura 2.9, apresentada na Seção 2, mostra, no domínio do tempo, dois sinais de vibração coletados na carcaça de um OLTC. Um dos sinais representa a resposta dinâmica de um contato novo, o outro, a resposta dinâmica de um contato com desgaste avançado, ambos os sinais coletados no momento de uma comutação. Verifica-se um claro deslocamento entre os dois sinais, seja no aspecto da amplitude ou da duração, caracterizando suas diferenças e sendo esta característica a principal razão da existência desta pesquisa. Aqui se aplicou a medida de divergência para saber como as médias estão se distanciando entre si ao comparar o sinal de vibração de um contato novo com o do contato desgastado. O comportamento esperado é de aumento da divergência com o aumento da distância entre as médias.

O passo inicial para a utilização da divergência de Kullback-Liebler é aplicar cada wavelet escolhida previamente nos sinais de vibração, novo e desgastado, de um mesmo contato, com a decomposição até o quinto nível. Os resultados obtidos com um grupo de wavelets previamente selecionadas serão apresentados abaixo.

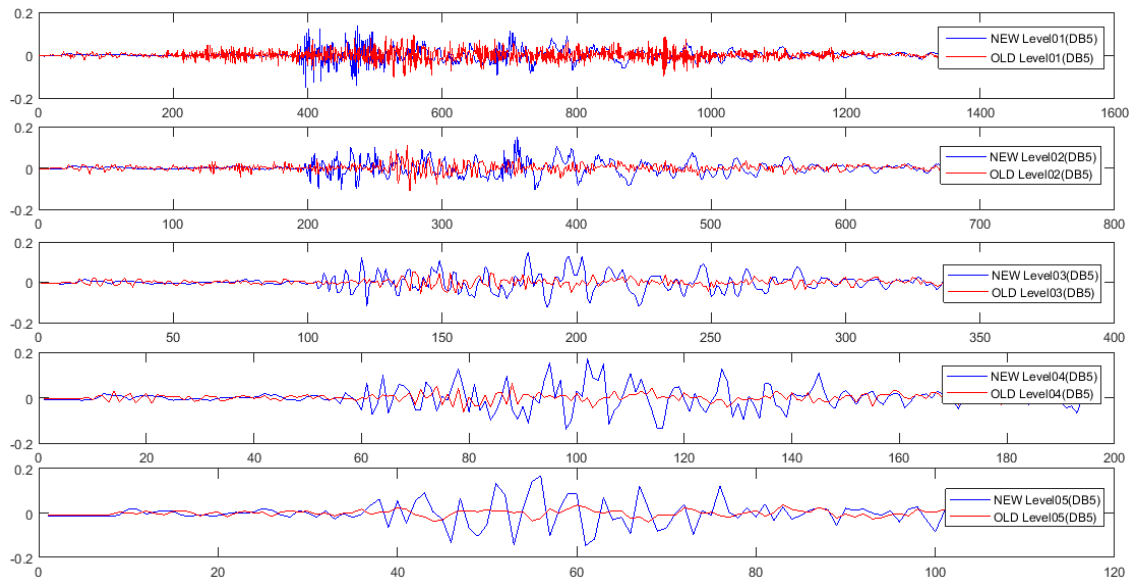
Da Figura de 5.1 até a Figura 5.4, são apresentadas todas as decomposições do nível 1 ao nível 5 para cada wavelet mãe. O fato de se trabalhar com os 5 níveis é para avaliar a evolução da divergência KL das médias em cada nível.

De posse dos sinais de vibração decompostos em cinco níveis, resta a aplicação de uma rotina desenvolvida no Matlab que fornecesse os resultados da medida de divergência para as médias em cada nível.



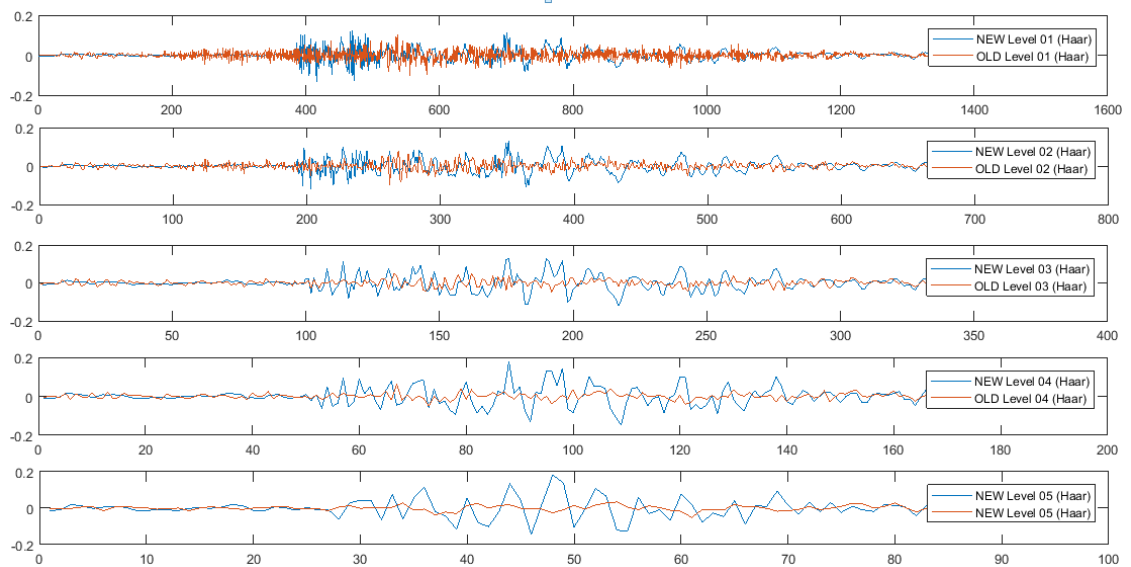
Fonte: Autor (2019)

Figura 5.2 – Db5 – 5 Níveis de decomposição – Contato Novo e Desgastado



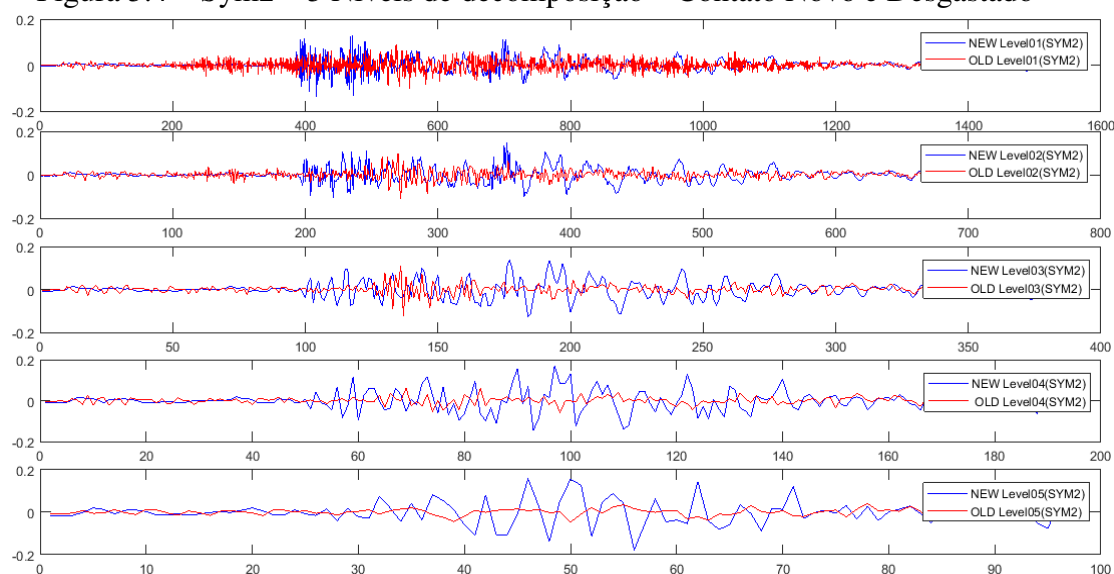
Fonte: Autor (2019)

Figura 5.3 – Haar – 5 Níveis de decomposição – Contato Novo e Desgastado



Fonte: Autor (2019)

Figura 5.4 – Sym2 – 5 Níveis de decomposição – Contato Novo e Desgastado



Fonte: Autor (2019)

Da tabela 5.1 – Resultados do Método da Divergência de Kullback-Liebler, verifica-se que as famílias de wavelet Daubechies foi a que apresentou melhor resultado, ou seja, que mais maximizou o valor da Divergência KL em relação às demais. Como se pode observar nas Figuras de 5.5 a 5.8, abaixo, quanto maior a decomposição do sinal maior a divergência KL, confirmada pela Tabela 5.1.

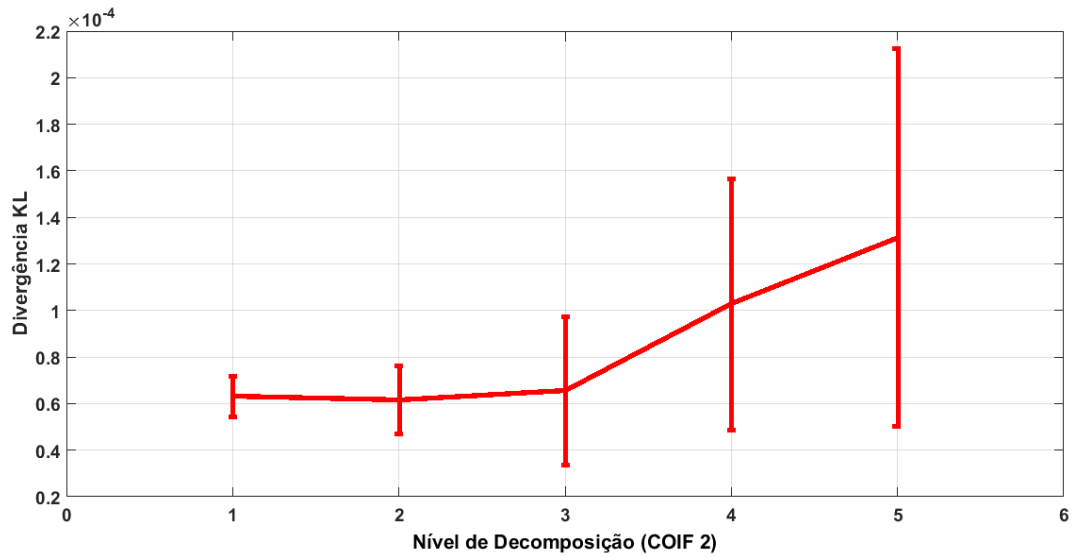
Tabela 5.1 – Resultados do Método da Divergência de Kullback-Liebler

Família	<i>mean_diverg</i>	<i>std_diverg</i>
Coif2-1	6.2969e-05	8.5664e-06
Coif2-2	6.1475e-05	1.4616e-05
Coif2-3	6.5442e-05	3.1846e-05
Coif2-4	1.0274e-04	5.3976e-05
Coif2-5	1.3131e-04	8.1232e-05
Db5-1	6.3635e-05	8.1004e-06
Db5-2	6.0783e-05	1.4305e-05
Db5-3	6.5880e-05	3.2463e-05
Db5-4	1.0556e-04	5.6142e-05
Db5-5	1.3569e-04	8.1390e-05
Haar-1	5.8257e-05	7.5929e-06
Haar-2	6.0348e-05	1.3070e-05
Haar-3	6.6941e-05	3.2069e-05
Haar-4	9.7003e-05	4.9939e-05
Haar-5	1.2359e-04	7.1800e-05
Sym2-1	6.1674e-05	8.0707e-06
Sym2-2	6.2214e-05	1.4773e-05
Sym2-3	6.6088e-05	3.0969e-05
Sym2-4	1.0483e-04	5.5111e-05
Sym2-5	1.3494e-04	8.2639e-05

Fonte: Autor (2019)

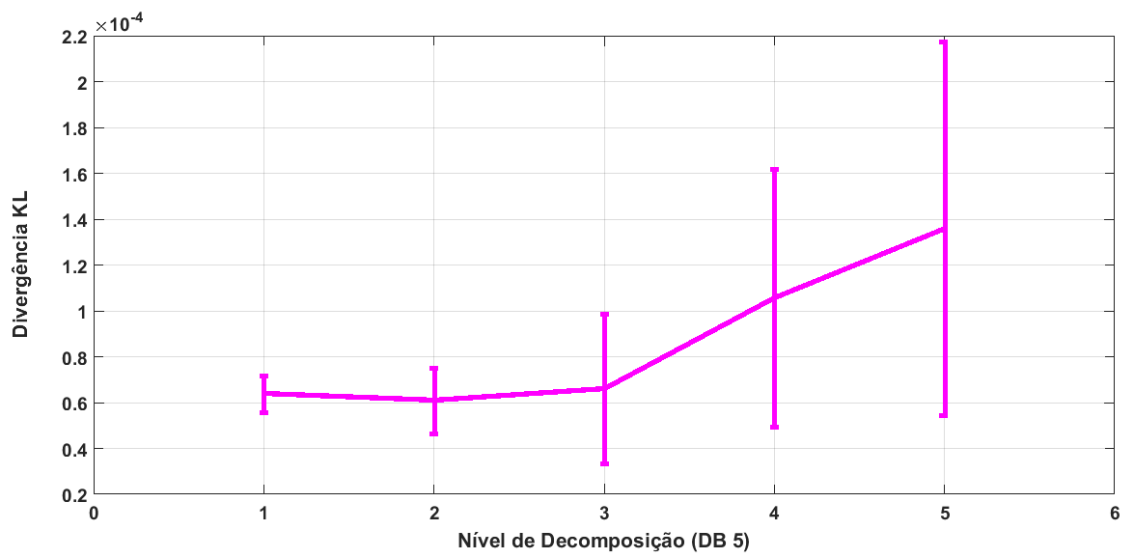
Da Figura 5.5 até a Figura 5.8 serão apresentados graficamente o comportamento da Divergência KL e sua respectiva média.

Figura 5.5 – Divergência KL x média – Coif2 – 5 níveis de decomposição



Fonte: Autor (2019)

Figura 5.6 – Divergência KL x média – Db5 – 5 níveis de decomposição



Fonte: Autor (2019)

Figura 5.7 – Divergência KL x média – Haar – 5 níveis de decomposição

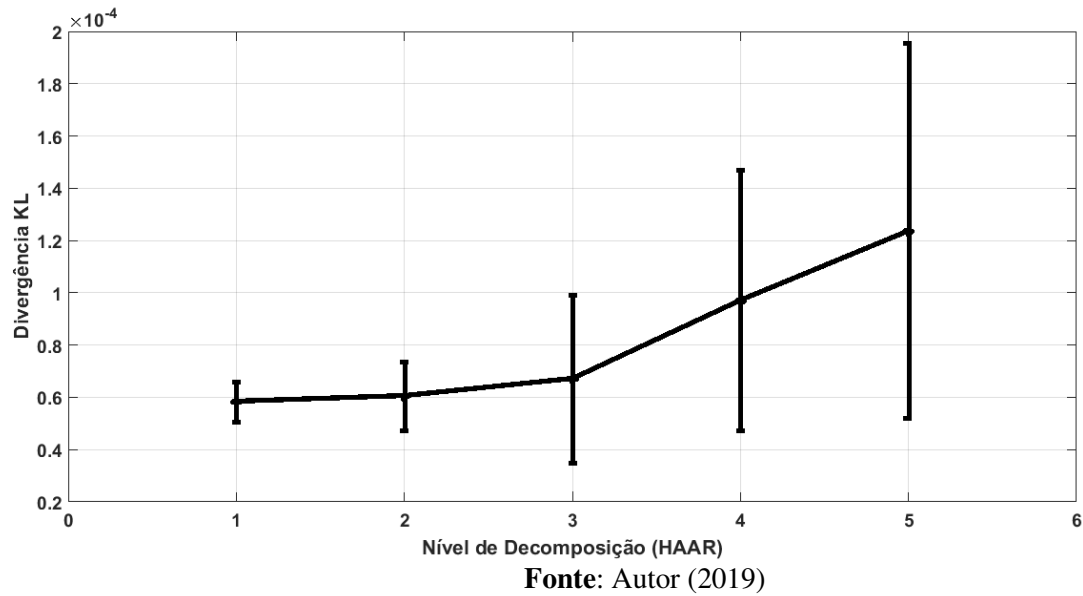
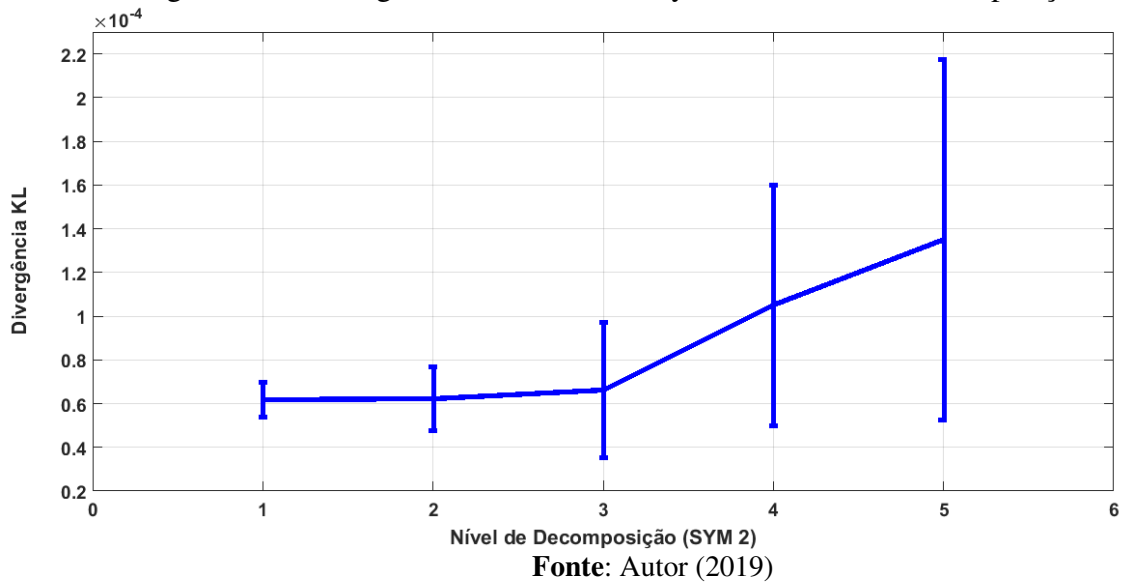


Figura 5.8 – Divergência KL x média – Sym2 – 5 níveis de decomposição



Para confirmar os resultados do Método da Divergência Kullback-Liebler, foram comparados os resultados das quatro wavelets mãe pré-selecionadas quando aplicados ao um mesmo contato, por exemplo, de número trinta.

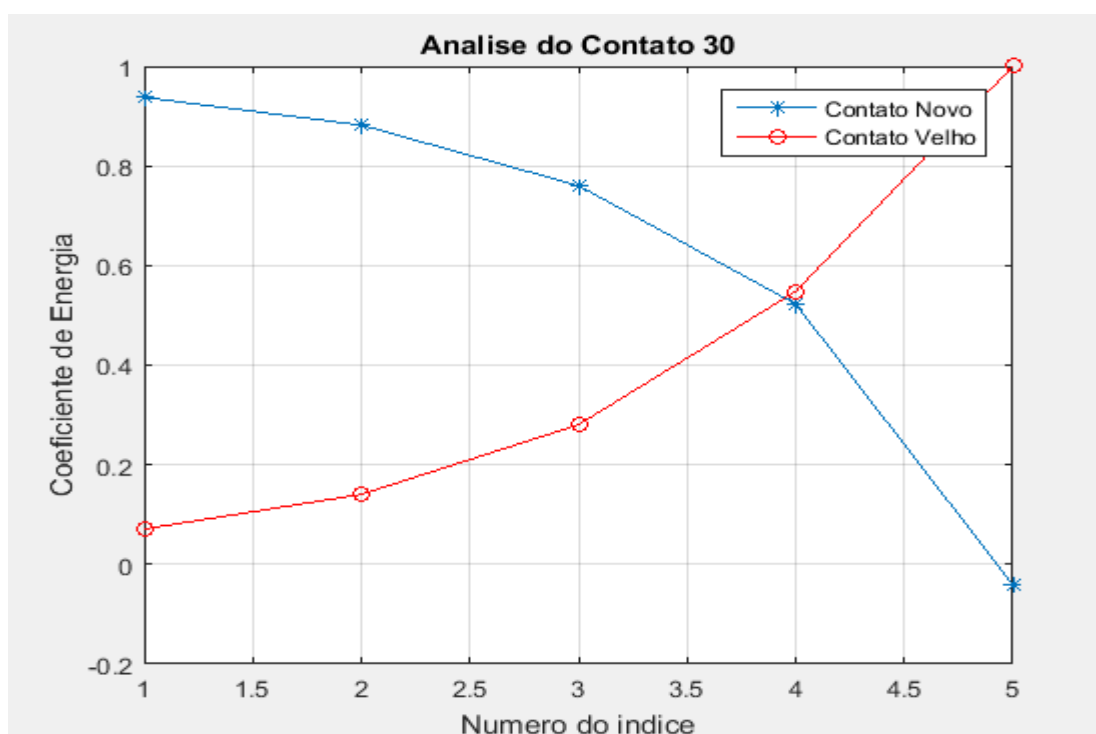
É importante perceber a tendência da curva e comparar os desvios dos coeficientes, principalmente os de índice “i” quatro e cinco. É visível o distanciamento destes coeficientes,

permitindo destacar a diferença numérica dos coeficientes do contato novo para o contato desgastado. Este distanciamento fica mais claro quanto maior for maior o número de decomposição da wavelet.

Foram observados, em alguns contatos, durante o cruzamento das trajetórias das duas curvas, que o coeficiente de índice número quatro do contato novo é superior ao do mesmo contato no estado desgastado. Com efeito, este método comprova também que os contatos têm envelhecimento diferente um do outro. Mais uma vantagem observada na aplicação da wavelet sobre outros tantos métodos conhecidos na literatura.

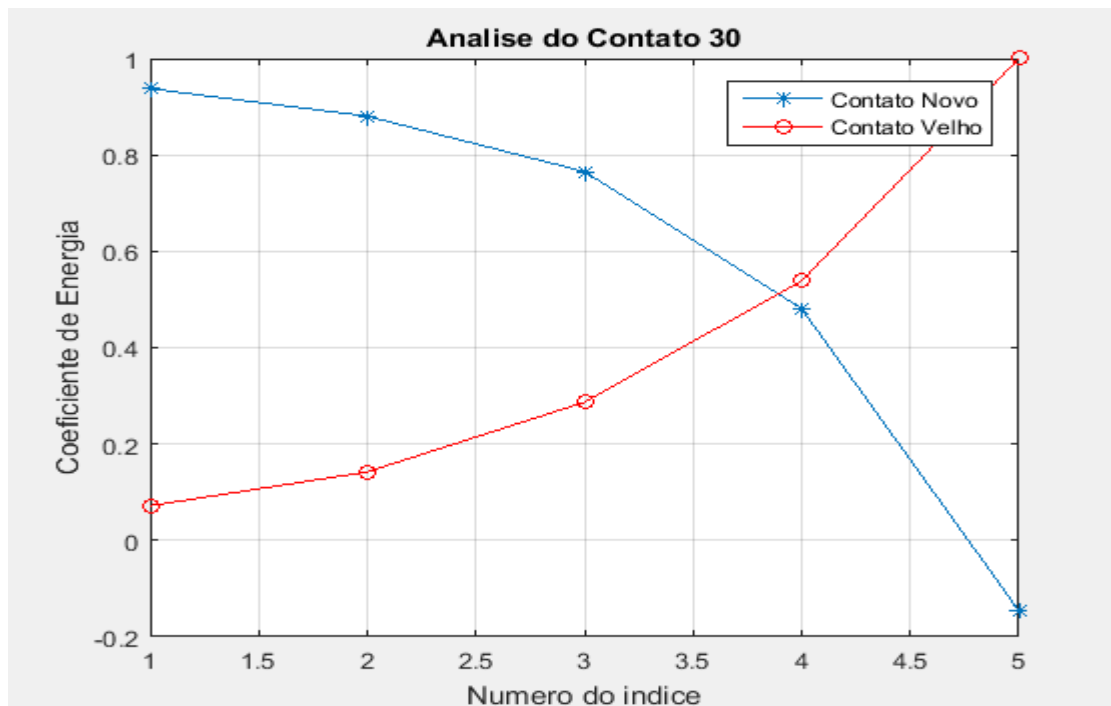
Da Figura 5.9 até a Figura 5.12, abaixo, vê-se claramente o distanciamento entre os coeficientes de índice cinco para cada wavelet.

Figura: 5.9 – Wavelet COIF 2



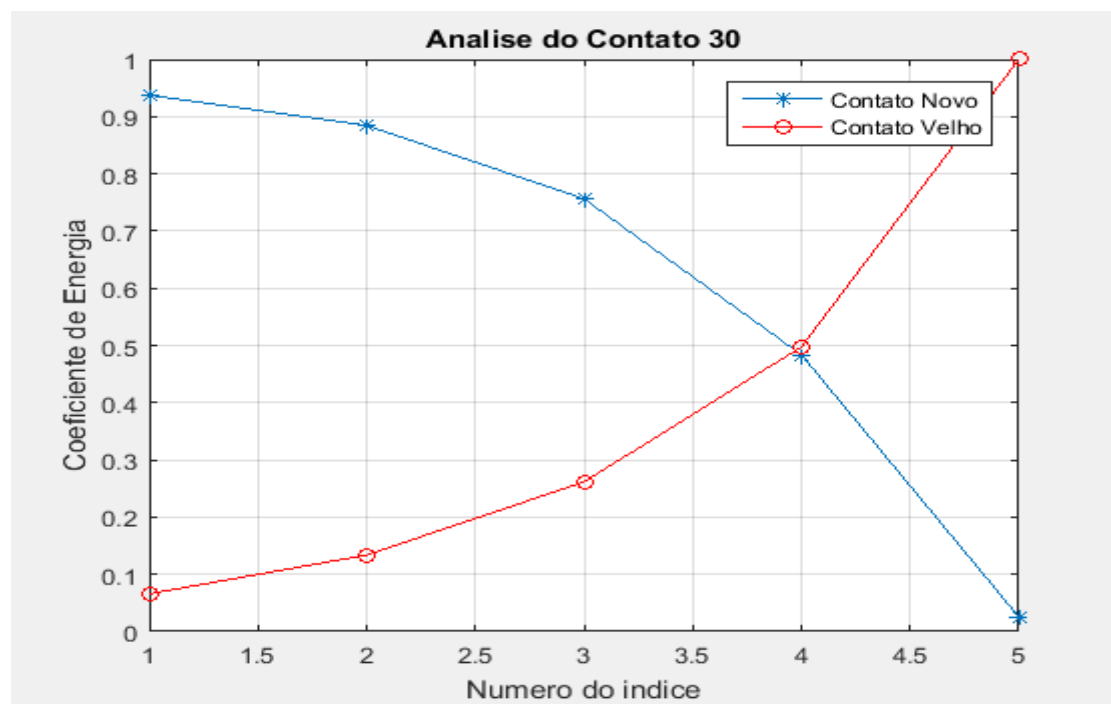
Fonte: Autor (2019)

Figura: 5.10 – Wavelet DB5



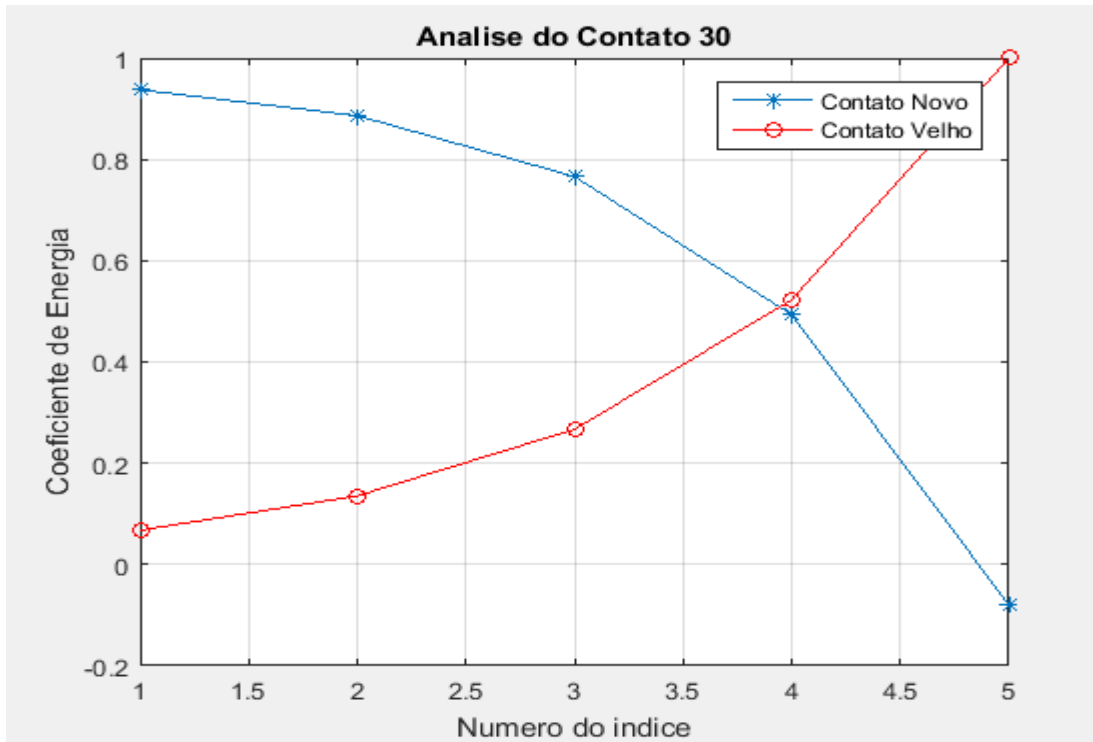
Fonte: Autor (2019)

Figura: 5.11 – Wavelet HAAR



Fonte: Autor (2019)

Figura: 5.12 – Wavelet SYM 2



Fonte: Autor (2019)

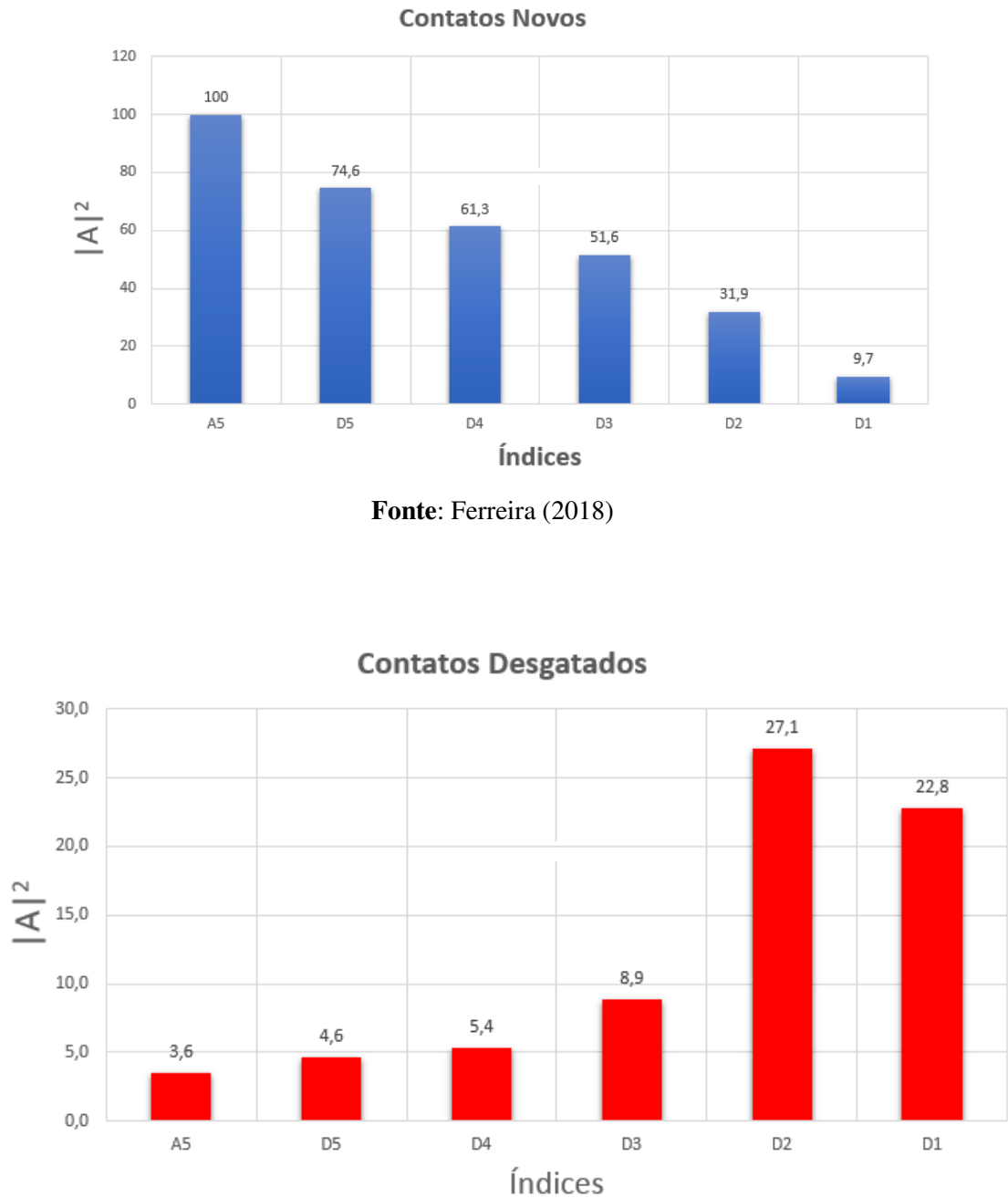
5.2 Resultados Alcançados

Para a coleta do sinal acústico, os acelerômetros foram fixados na parede externa do OLTC. Um sistema de aquisição de dados, operando em 44.100 amostras / segundo, foi utilizado para a coleta do sinal elétrico produzido pelo acelerômetro. Um filtro rejeita-faixa foi utilizado para atenuar o alto nível do sinal de vibração (frequência da rede) do equipamento. O OLTC usado neste experimento tem 32 contatos, e seu sinal de vibração foi capturado e armazenado individualmente para cada contato durante a troca de tape correspondente. O sinal armazenado foi usado com DWT, Wavelet Daubechies, e um parâmetro CoefE (Equação 5.1) foi associado a cada contato.

$$CoefE(i) = \frac{\sum_{n=-\infty}^{\infty} a_j[n] \cdot a_j^*[n]}{\sum_{n=-\infty}^{\infty} d_i[n] \cdot d_i^*[n]}, \quad j=5 \text{ e } i=1 \text{ a } 5 \quad (5.1)$$

As Figuras 5.13 (a) e (b) ilustram o valor médio-quadrático de aproximação e detalhes coeficientes dos contatos novos e contatos desgastados, respectivamente.

Figura 5.13 – Valores médio-quadrático dos coeficientes de aproximação e detalhe:
a) contatos novos e b) contatos desgastados



Fonte: Ferreira (2018)

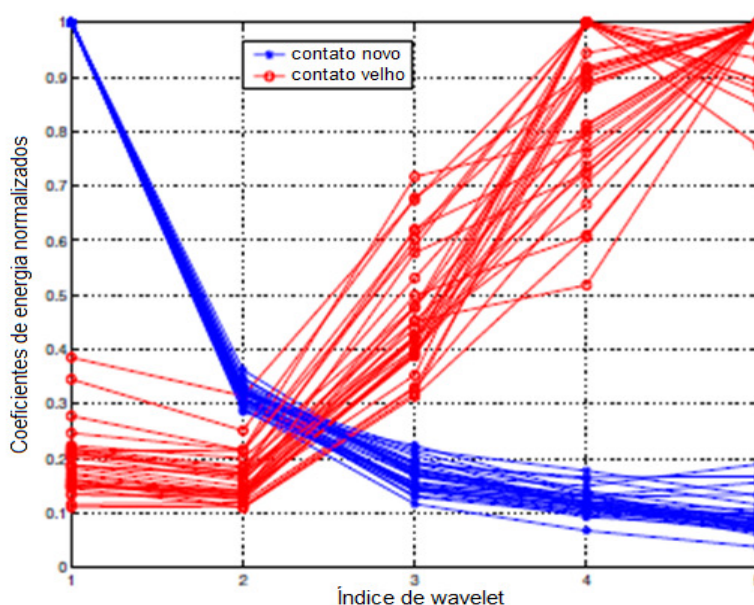
Verifica-se que o valor quadrado dos coeficientes de aproximação e detalhes apresentam uma assinatura distinta entre os contatos novos e desgastados. Para os contatos novos, o valor do quadrado de aproximação A_5 é sempre maior que todos os coeficientes de detalhe D_1 , D_2 , D_3 , D_4 e D_5 do sinal de vibração, enquanto que para os contatos desgastados A_5 é sempre menor que todos os coeficientes de detalhe D_1 , D_2 , D_3 , D_4 e D_5 do sinal de

vibração. Os coeficientes de detalhe também apresentam uma característica que difere na vibração de sinal dos novos e antigos contatos. O valor quadrado dos coeficientes de detalhe para novos contatos aumenta com i , enquanto que para os contatos antigos diminui com “ i ” (índice de cada coeficiente). Desta forma, a razão entre os valores quadrados da aproximação e detalha coeficientes (ver Equação 5.1) de propósitos para métrica que maximiza as diferenças entre os contatos novos e antigos da análise de OLTC.

A Figura 5.14 ilustra uma dependência típica dos coeficientes de energia CoefE normalizados para 32 contatos usando a wavelet Daubechies (nível 5) e a decomposição DWT.

Observou-se que os contatos novos (azul) mostram uma semelhança de uma dependência exponencial decrescente no parâmetro CoefE, enquanto que para os contatos desgastados (vermelho), a dependência é semelhante a uma função sigmóide crescente. Como esses dois padrões são claramente distintos e estatisticamente repetitivos, esses indivíduos podem ser empregados para a avaliação da condição de contato. É verificado que a análise da DWT dos sinais de vibração dos contatos novos e dos contatos desgastados apresentação características próprias que se repetem independentemente do número do contato. Essa característica é suficiente para identificar e diagnosticar o estado dos OLTC's.

Figura 5.14 – Dependência típica dos coeficientes de energia CoefE normalizados para os contatos em uma condição nova (azul), e em uma condição desgastada (vermelho)



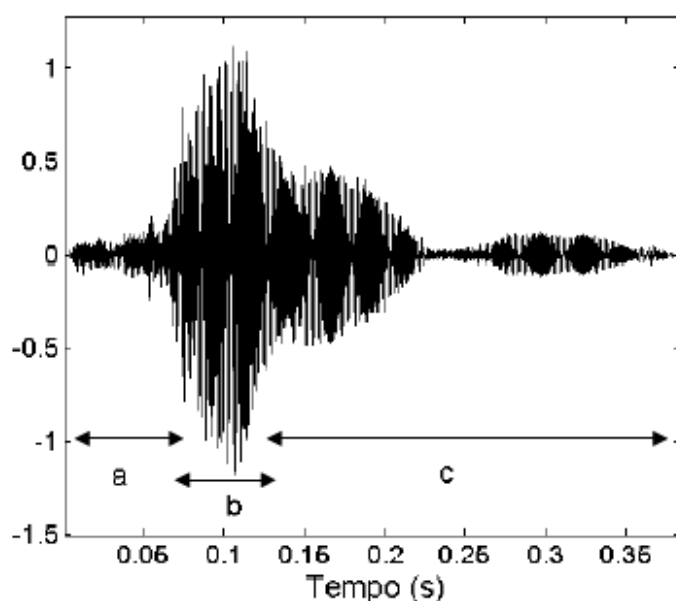
Fonte: Almeida (2005)

5.3 Análise comparativa com outras ferramentas

Para se obter coerência e consistência na análise comparativa dos resultados obtidos nas diversas pesquisas, partiu-se do princípio de que a base dos dados deveria ser a mesma. Foi construída uma plataforma experimental com a participação de todos os envolvidos na mesma pesquisa, mas que trabalhavam com ferramentas diferentes, e geradas e coletadas as mesmas sequências de vibrações oriundas das comutações dos contatos da comutadora, tanto para aquela que tinha os contatos desgastados e que foram retiradas do sistema por uma falha, quanto para aquela que tinha seus contatos novos. Esta base de dados foi distribuída entre os membros deste grupo de pesquisa e a partir daí cada qual tomou sua direção na busca do melhor resultado dentro da ferramenta escolhida – Algoritmo Genéticos, Transformada de Wavelet e Método de Prony. Como dito anteriormente, estes trabalhos desenvolveram, cada qual, uma sistematização para identificar e diagnosticar o estado dos OLTC's.

Os Algoritmos Genéticos mostraram que é possível identificar e classificar o estado de um contato do OLTC a partir da análise da amplitude do parâmetro estimado. Para as frequências de 890 a 2500Hz, na análise do sinal completo, as amplitudes nos contatos novos são 5 vezes maiores que nos contatos desgastados. A avaliação de outros parâmetros possibilita a diferenciação entre contatos novos e desgastados. Para esta análise, dividiu-se o sinal amostrado em três intervalos e por questões técnicas selecionaram-se os intervalos “a” e “b” regiões onde se concentram as características mais marcantes do sinal, Figura 5.15.

Figura 5.15 – Intervalos de Tempos do Sinal



Fonte: Simas (2004)

Tabela 5.2 – Resumo dos Parâmetros obtidos por Algoritmos Genéticos

Sinal Completo							
Contatos Novos				Contatos Desgastados			
Amp (V)	Alfa (s^{-1})	Freq (Hz)	To (s)	Amp (V)	Alfa (s^{-1})	Freq (Hz)	To (s)
0.1368	28.7770	440	0.0863	0.0120	26.5268	440	0.0794
0.1092	28.0561	890	0.0872	0.0260	23.9088	890	0.0855
0.0279	26.8052	2500	0.0493	0.0045	19.2180	2500	0.0694

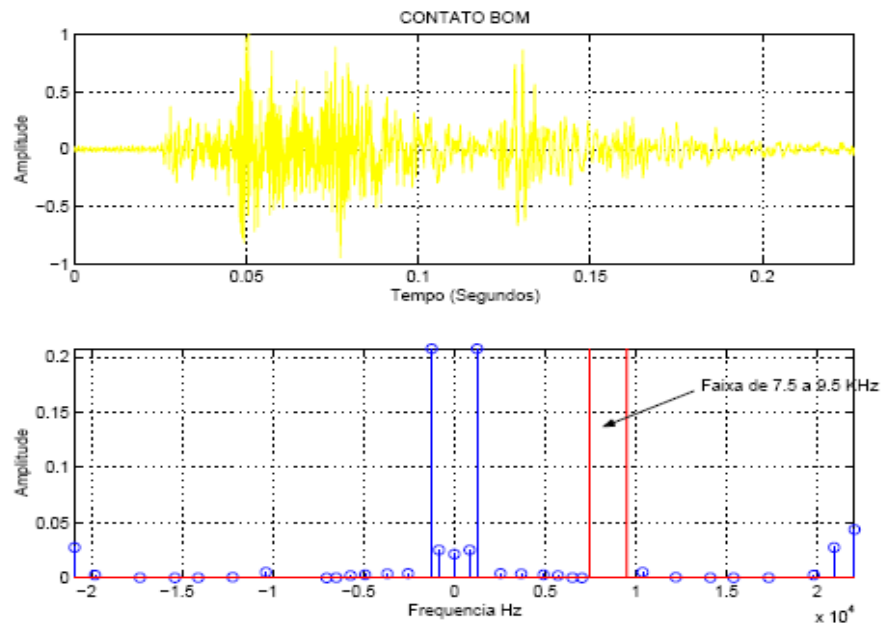
Intervalo a							
Contatos Novos				Contatos Desgastados			
Amp (V)	Alfa (s^{-1})	Freq (Hz)	To (s)	Amp (V)	Alfa (s^{-1})	Freq (Hz)	To (s)
0.0535	24.9125	200	0.0065	0.0049	21.7613	200	0.01146
0.0962	33.5525	740	0.0058	0.0121	29.7682	740	0.0104
0.1024	28.5993	890	0.0039	0.0019	21.3687	890	0.0083

Intervalo b							
Contatos Novos				Contatos Desgastados			
Amp (V)	Alfa (s^{-1})	Freq (Hz)	To (s)	Amp (V)	Alfa (s^{-1})	Freq (Hz)	To (s)
0.1276	21.6815	150	0.0123	0.0064	23.0605	150	0.0004
0.044	24.3674	450	0.0131	0.0185	17.3662	450	0.0176
0.1127	32.9445	1000	0.0107	0.0311	25.9204	1000	0.01414

Fonte: Simas (2004)

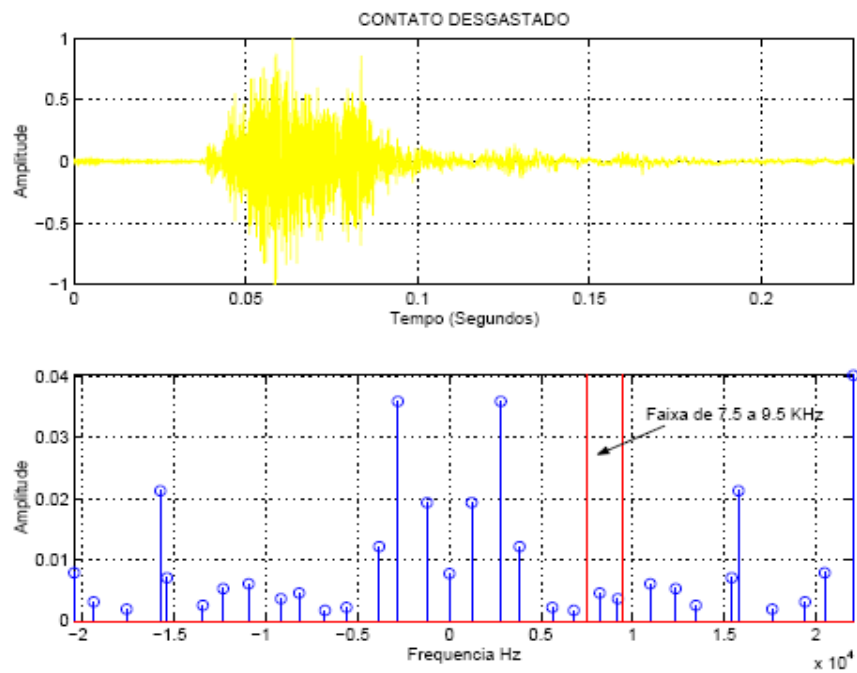
O Método de Prony foi utilizado para analisar os modos de vibração. Foi possível identificar três padrões explícitos utilizando o modelo da trigésima segunda ordem, destacam-se: a diferença do número de raias encontradas nas frequências acima de 9,5 kHz, há ausência de raias entre 7,5 e 9,5 kHz para os sinais oriundos dos contatos novos e a concentração de raias em frequências abaixo de 5 kHz para sinais oriundos dos contatos novos.

Figura 5.16 – Análise de Prony para Contato Novo



Fonte: Magalhães (2005)

Figura 5.17 – Análise de Prony para Contatos Desgastados



Fonte: Magalhães (2005)

Ficou constatado que os modelos apresentados são apropriados para diagnosticar o estado de operação do OLTC. Entretanto, eles reproduzem apenas de forma aproximada o estado real do OLTC. É possível que problemas imediatos, sem aviso prévio, não sejam identificados pelos métodos utilizados no sistema de diagnósticos e ocorram falhas e/ou problemas no equipamento. Muito embora possa ser feita uma relação entre a degradação do óleo mineral isolante com o arco elétrico formado na mudança de posição dos contatos; da sedimentação de partículas sólidas provenientes do desgaste dos contatos, em todas as partes internas do equipamento, comprometendo a sua isolamento elétrica e de peças soltas internamente devido à vibração provocada pelo choque dos contatos durante uma operação de comutação, entre outras ocorrências.

No entanto, os problemas relacionados com o desgaste dos contatos, folgas no posicionamento e outras características que são modificadas continuamente, essas são identificadas e diagnosticadas ao longo da vida útil do equipamento.

Desse modo, os resultados obtidos, utilizando-se a abordagem de sinais de vibração, ainda que aproximados, representam um avanço significativo na identificação e diagnósticos de OLTC's.

Wavelet mostrou-se mais objetiva na forma de apresentar os resultados, além de ser de fácil implementação e de permitir que pessoas que não têm conhecimento em ferramentas de Processamento Digital de Sinais possam avaliar os resultados obtidos e emitir parecer técnico a respeito das condições operacionais de um regulador de tensão monofásico sob análise. Essa é sua maior contribuição: levar tecnologia no tratamento de dados coletados diretamente de equipamentos por método não intrusivo e facilidades para os usuários que vão manusear estes dados.

6 CONCLUSÕES

Para que o sistema elétrico de potência opere em conformidade com os requisitos de rede exigidos pelos órgãos reguladores e por um mercado consumidor cada vez mais exigente deve estabelecer como meta a busca contínua pela qualidade da energia no fornecimento da mesma aos seus consumidores. É neste contexto que está inserido o regulador de tensão monofásico.

A previsão do estado de funcionamento dos reguladores de tensão é muito importante para as equipes de manutenção em concessionárias de energia elétrica. O OLTC é um dos responsáveis pela regulação de tensão na rede de distribuição. Por ser dotado de um dispositivo de acionamento mecânico de seus contatos, está mais sujeito a falhas e apresenta um elevado custo de manutenção, quando comparado aos demais equipamentos desta rede. A condição de operação dos OLTC's está diretamente relacionada ao nível de desgaste dos contatos elétricos do módulo comutador.

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema não-invasivo de monitoramento de OLTC, através da análise da vibração emitida pelo equipamento a cada mudança de posição dos contatos, sendo proposta uma modelagem do sinal utilizando transformada wavelet. Entretanto, o modelo desenvolvido reproduz apenas de forma aproximada o estado real do OLTC. É possível que algum modo de falha, sem indícios, não seja identificado pelo método utilizado no sistema de diagnósticos e, portanto, ocorram falhas e/ou problemas no equipamento. No entanto, os problemas relacionados aos desgastes dos contatos, mudanças superfícies dos contatos, folgas no posicionamento e outras características que são modificadas continuamente e relacionadas diretamente na condição dos contatos, tais situações podem ser identificadas e diagnosticadas ao longo da vida útil do equipamento.

Desse modo, os resultados obtidos neste trabalho, ainda que aproximados e preliminares, representam um avanço na identificação e diagnósticos de OLTC's utilizando a abordagem de sinais de vibração. O sistema de monitoramento proposto apresenta baixo custo, é de fácil implementação, não exige grandes recursos computacionais e pode ser aplicado a outros modelos de reguladores.

Em resumo, a sobrevivência do negócio depende da produtividade e da capacidade plena para a produção. Alcançar um índice de disponibilidade dos equipamentos próximo aos cem por cento deve ser a meta do setor operacional de uma indústria. Entretanto, isto não ocorre na realidade. É neste ponto que se manifesta de maneira positiva a aplicação e a importância desta pesquisa. A Indústria 4.0 já é uma realidade e os movimentos ocorridos na

direção de sua consolidação, seja na área de sistema de engenharia ou na área de processos, são expressivos. Tamanha é a sua dimensão que não há espaço para o retorno. Ela é a base para o aumento da produtividade. Dentro deste contexto, a principal função deste trabalho é desenvolver um método baseado em tecnologia digital de monitoramento de sinais de vibração, do processamento destes sinais através da transformada discreta de wavelet e da devolução dos resultados aos centros de tratamentos de dados estatísticos do setor de planejamento da manutenção. Antecipar a ocorrência de falhas/defeitos em equipamentos de forma clara e segura, evitando danos em pessoas, materiais de meio ambiente, é a proposta central deste trabalho.

6. 1 Trabalhos futuros

O método desenvolvido por este trabalho pode ser aplicado, em princípio e a depender da disponibilidade de coleta de sinais de vibração, em qualquer sistema no qual ocorra desgaste que pode ser definido como remoção indesejável de material de superfícies em contato decorrente de uma ação mecânica. Este caso deve estar restrito ao desgaste adesivo que ocorre quando duas superfícies metálicas ou de material orgânico escorregam uma em relação à outra. Pressões locais muito altas são exercidas pelas asperezas em contato, com deformação plástica, adesão e formação de junções.

- Projeto de um sistema embarcado dedicado para realizar inspeções em tempo real dos equipamentos.
- Avaliar o método para outros reguladores de tensão monofásicos bem como para OLTC de transformadores de potência trifásicos.
- Fazer uma avaliação conjunta entre os contatos e outros componentes do OLTC.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, L. A. L. de, *et al.* A New Approach for Condition Assessment of On-Load Tap Changers using Discrete Wavelet Transform. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Ottawa, Ontario, Canada, 17-19 May, 2005.
- ASAMOAHA, F. Discrete wavelet analysis of signals. Intern. J. Electr. Eng. Education, vol. 36, pp. 255–265, 1999.
- BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL - Resolução N° 505, de 26 de novembro de 2001.
- CICHON, A.; *et al.* Diagnosis of the Non-Concurrent Operation of the On-Load Tap Changer Contacts by the Acoustic Emission Method, Faculty of Electrical Engineering, Automatic Control and Computer Science. Opole University of Technology. S. Mikolajczyka 5, 45-271 Opole, Poland, 36, 4, 823–830, 2011.
- CICHON A.; *et al.* Select Mother Wavelet for Wavelet Analysis of On-Load Tap Changer Acoustic Emission, Faculty of Electrical Engineering, Automatic Control and Computer Science. Opole University of Technology. S. Mikolajczyka 5, 45-271 Opole, Poland, Vol. 128, 2015.
- DEFATTA, D. J.; *et al.* Digital Signal Processing: A System Design Approach, John Wiley and Sons. 1988.
- FERREIRA, L. Análise de Vibração – Estudo Comparativo, Monografia do CICOP IV, Universidade Federal da Bahia, 2008.
- FERREIRA, L.; SIMAS FILHO, E. F. A Voltage Regulator Fault Risk Assessment Method through Discrete Wavelet Analysis of an Acoustic Vibration Signal, SBSE. VII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Niterói-RJ, 2018.
- FOATA, M., *et al.* On-line testing of on-load tap changers with a portable acoustic system. IEEE 9th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance Proceedings, 2000, pp. 293-298.
- GUUINIC, P.; AUBIN, J. CIGRE's Work on Power Transformers. In: IX EPRI - SUBSTATION EQUIPMENT DIAGNOSTICS CONFERENCE. New Orleans, 2001.
- HAYKIN, S. Neural Networks, Principles and Practice. Bookman, 2001.
- KAMEN, E. W.; HECK, B. S. Fundamentals of Signals and Systems, Using the Web and Matlab, second edn, Prentice Hall, 2000.
- KANG, P. J.; *et al.* Non-invasive on-line condition monitoring of on load tap changers. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, vol. 3, pp. 2223-2228, Jan. 2000.
- KANG, P.; BIRTWHISTLE, D. Condition monitoring of power transformer on-load-tap-changers. Part 1: Automatic condition diagnostics. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution 148(4): 301306, 2001.

_____. Condition monitoring of power transformer on-load-tap-changers. Part 2: Detection of ageing from vibration signatures, IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution 148(4): 307-311, 2001b.

KANG, P.; *et al.* Non-invasive on-line condition monitoring of on load tap changers, IEE Proceedings on Generation. Transmission and Distribution 3: 2223-2228, 2000a.

KANG, P.; BIRTWHISTLE, D. Condition assessment of power transformer on load tap changers using wavelet analysis and self-organizing map: Field evaluation, IEEE - Transactions on Power Delivery 18, 2003.

KAR, C.; MOHANTY, A. Monitoring gear vibrations through motor current signature analysis and wavelet transform. Mechanical Systems and Signal Processing, vol. Article in press, 2014.

KOHONEN, T. The self-organizing map. Proceedings of the IEEE, vol. 78, pp. 1464-1480, September 1990.

LIRA, M. M. da S. Wavelets na Compactação e Processamento de Sinais de Distúrbios em Sistemas de Potência para Classificação Via redes Neurais Artificiais, Universidade Federal de Pernambuco, 2004.

MAJCHRZAK, *et al.* Application of the Acoustic Emission Method for Diagnosis of On-Load Tap Changer, Faculty of Electrical Engineering, Automatic Control and Computer Science, Opole University of Technology, Prószkowska 76, 45-758 Opole, Poland, Vol. 42, No. 1, pp. 29-35, 2017.

MAGALHÃES, R. S. Avaliação da Condição de Desgaste de Contatos Elétricos em OLTC Utilizando a Análise Espectral de Prony do Sinal de Vibração Acústica, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, 2005.

MALLAT, S.; HWANG, W. L. Singularity detection a processing with wavelets. IEEE - Transactions on Information Theory 38(2), 1992.

MALLAT, S. A Wavelet Tour of Signal Processing. Second Edition. Academic Press, 2000.

MARTIGNONI, A. Transformadores, Ed. MEC-EI, 1967.

MARTINS, A. M. Contribuições aos processos de clustering com base em métricas não-euclidianas. 125fls. Tese (Doutorado em Automação e Sistemas) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2005.

NAJARIAN, K.; SPLINTER, R. Biomedical Signal and Image Processing CRC Press - Taylor & Francis Group, 2006.

RICHARD, J. F. C. Divergência de Kullback-Leibler: Uma aplicação à Modelagem. 56 fls. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 2013.

RIVAS, E.; BURGOS, J. C. Condition Assessment of Power OLTC by Vibration Analysis Using Wavelet Transform. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 2, april 2009.

_____. Vibration Analysis Using Envelope Wavelet for Detecting Faults in the OLTC Tap Selector, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, No. 3, July 2010.

SILVA, P. R. A. D.; *et al.* Um novo algoritmo para cálculo do wavelet modulos maxima em sinais de vibração de transformadores de potência, XV Congresso Brasileiro de Automática-CBA2004, Gramado-RS. 2004.

SILVA, R. D. Segmentação de Imagens Baseada em Descritores de Textura Extraídos por Transformadas Wavelets. 118fls. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná. 2008.

SIMAS FILHO, E.F., *et al*, Monitoramento de comutadores de derivação em transformadores utilizando Análise de Vibração. CBA 2004 Congresso Brasileiro de Automática, Gramado, Rio Grande do Sul, vol. 1,pp. 1-5, 2004.

SIMAS FILHO, E. F. Monitoramento de reguladores de tensão utilizando análise de vibração através de sistemas inteligentes. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, 2004.

_____. Self-Organized Classification of On-load Tap Changers Acoustic Signatures, I2MTC 2008 - IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Victoria, Canada, May 12-15, 2008.

SISTEMA DE GESTÃO DE ATIVOS DA BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI) PAS 55 (Referência BSI PAS 55-1:2008).

QIAN, S. Introduction to Time-Frequency and Wavelets Transforms, Prentice Hall PTR, 2002.

WANG, Z. H.; L. Y.; GRIFFIN, P. Artificial intelligence in oltc fault diagnosis using dissolved gas-in-oil information, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 4: 2422-2427, 2000a.

WEICHBRODT B.; SMITH, K. A. Signature Analysis – Non-Intrusive Techniques for Incipient Failure Identification Application to Bearings and Gears, General Electric and Development Center. Schenectady, New York, 1972.

YOSHIDA, B. Y. D. *et al.* Pré-Processamento Eficiente para um Sistema Automático de Monitoramento Acústico de Reguladores de Tensão. In: Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2013, Fortaleza-CE. Anais do Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2013. v. 1. p. 1-6.

APÊNDICES

APÊNDICE A – PUBLICAÇÕES ASSOCIADAS AO PROJETO

1 - A New Approach for Condition Assessment of On-Load Tap-Changers using Discrete Wavelet Transform

Technology Conference - Ottawa, Ontario, Canada – 2004

L.A.L. de Almeida, M. Fontana, F.A. Wegelin, and L. Ferreira

Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade Federal da Bahia

On-load tap changers (OLTCs) are electromechanical devices used in the voltage regulation of the electrical networks. A non-invasive monitoring method was developed using discrete wavelet transform (DWT) for condition assessment of on-load tap changers using vibration Analysis signals. The transient vibration signals emitted during a tap change are recorded and processed using spectral analysis and standards recognition techniques. The monitoring systems which detect failure during the OLTC operation are quite complexes. In order to reduce this complexity, in this work we demonstrated a new approach based on DWT analysis. The proposed technique is presented and the experimental results as well as its simulation are discussed.

2 - A Voltage Regulator Fault Risk Assessment Method through Discrete Wavelet Analysis of an Acoustic Vibration Signal

SBSE – VII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – Niterói – RJ - 2018

L. Ferreira e E. F. de Simas Filho

Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade Federal da Bahia

The technique proposed in this work is to use a noninvasive method to evaluate the wear out of tap-changer switch contacts through signal vibration analysis. The risk of failures is measured by a joint evaluation between the fifth order wavelet index and the probability of failure in time using the Weibull distribution. In this way, the critical tap-changer switch start to have a systematic and individualized monitoring throughout their useful life.

APÊNDICE B - FORMAÇÃO DE UM CONJUNTO DE FUNÇÕES BASE WAVELET

O termo sinal geralmente se refere a uma função de uma ou mais variáveis independentes que contém informações sobre o comportamento ou natureza de algum fenômeno. Alguns exemplos comuns de sinais incluem corrente elétrica, sinal da fala, índices de mercado, etc., que são todos produzidos por processo variante no tempo. A primeira tarefa da análise de sinais é entender qual informação pode ser retirada do sinal. Uma ferramenta matemática para a análise de sinal é comparar o sinal com um conjunto de funções conhecidas, (QIAN, 2002), isto é,

$$cn = \langle s, \psi_n \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi_n^*(t) dt, \quad (B.1)$$

Para sinal no tempo contínuo $s(t)$, ou

$$cn = \langle s, \psi_n \rangle = \sum_m s[m] \psi_n^*[m], \quad (B.2)$$

Para sinal no tempo discreto $s[m]$.

As operações descritas acima são chamadas de produto interno. O processo do produto interno pode ser entendido como uma escala matemática. Enquanto o sinal s corresponde ao objeto medido, o conjunto de funções pré-selecionadas $\{\psi_n\}_{n \in \mathbb{Z}}$ pode ser considerado como o objeto a ser peso padrão. O produto interno é a medida da similaridade entre o sinal “ s ” e a função ψ_n , e é proporcional ao grau de proximidade entre “ s ” e ψ_n . Quanto mais o sinal s é similar à função ψ_n , maior é o produto interno (QIAN, 2002).

Propriedades do produto interno:

Se $s_i = s_k$, então $\langle s_i, \psi_n \rangle = \langle s_k, \psi_n \rangle$ para todo n .

Se s_i é similar a s_k , então o produto interno de $\langle s_i, \psi_n \rangle$ também é similar a $\langle s_k, \psi_n \rangle$

Esta propriedade pode ser escrita da seguinte forma:

$$\sum_n |\langle s_i, \psi_n \rangle \langle s_k, \psi_n \rangle| \leq B \|s_i - s_k\|^2, \text{ para } 0 < B < \infty \quad (B.3)$$

Onde B é um número real não-negativo. Ao fazer $s = s_i - s_k$ e tem-se a seguinte expressão

$$\sum_n |\langle s, \psi_n \rangle|^2 \leq B \|s\|^2 \quad (\text{B.4})$$

Da mesma forma, considerando A um número real não-negativo, esta propriedade pode ser descrita por

$$A \|s\|^2 \leq \sum_n |\langle s, \psi_n \rangle|^2, \text{ para } 0 < A < \infty \quad (\text{B.6})$$

Combinando as duas propriedades acima vem

$$A \|s\|^2 \leq \sum_n |\langle s, \psi_n \rangle|^2 \leq B \|s\|^2, \text{ para } 0 < A \leq B < \infty \quad (\text{B.7})$$

Neste caso, diz-se que o conjunto de sequências $\{\psi_n\}_{n \in \mathbb{Z}}$ forma um suporte, uma família de vetores que caracteriza qualquer sinal s pelos seus produtos internos. A condição de um frame implica em duas condições.

- Se $\|s\| > 0$, o sinal s tem pelo menos um ponto diferente de zero.
- Se $\|s\|^2 < \infty$, então $\sum_n |\langle s, \psi_n \rangle|^2 < \infty$.

Se existe um conjunto de funções dual $\{\hat{\psi}_n\}_{n \in \mathbb{Z}}$ para um suporte $\{\psi_n\}_{n \in \mathbb{Z}}$, então poder-se-á no futuro reconstruir o sinal original s pelo produto interno $[c_n]$, isto é,

$$s = \sum_n \langle s, \psi_n \rangle \hat{\psi}_n = \sum_n c_n \hat{\psi}_n \quad (\text{B.8})$$

Funções duais formam um dual frame, isto é,

$$\frac{1}{B} \|s\|^2 \leq \sum_n |\langle s, \hat{\psi}_n \rangle|^2 \leq \frac{1}{A} \|s\|^2, \text{ para } 0 < A \leq B < \infty \quad (\text{B.9})$$

Usualmente, chama-se de produto interno, Eq. B.1 e Eq. B.2, como análise ou transformada, e de modo análogo, a reconstrução Eq. B.8 como síntese, transformada inversa ou decomposição.

Para um dado frame $\{\psi_n\}_{n \in \mathbb{Z}}$ o seu frame dual $\{\hat{\psi}_n\}_{n \in \mathbb{Z}}$ em geral não é único. Além disso, o cálculo do frame dual correspondente não é simples, a não ser que $A=B$ (suporte compacto) (QIAN, 2002). Neste caso tem-se:

$$\hat{\psi}_n = \frac{1}{A} \psi_n \quad (\text{B.10})$$

Consequentemente, a reconstrução do sinal vem

$$s = \frac{1}{A} \sum_n \langle s, \psi_n \rangle \psi_n = \frac{1}{A} \sum_n c_n \psi_n \quad (\text{B.11})$$

Onde o parâmetro A pode ser usado como medida da redundância na expansão do conjunto. Quando $A=B=1$, $\{\psi_n\}_{n \in \mathbb{Z}}$ forma uma base ortogonal. Neste caso, não existe redundância no resultado da expansão. Diz-se que um conjunto de $\{\psi_n\}_{n \in \mathbb{Z}}$ é uma base de um espaço $\mathcal{S}$ se $\{\langle s, \psi_n \rangle\}_{n \in \mathbb{Z}} \in \mathcal{S}$ é única para qualquer s .

Neste caso, o conjunto de $\{\psi_n\}_{n \in \mathbb{Z}}$ e $\{\hat{\psi}_n\}_{n \in \mathbb{Z}}$ formam uma base biortogonal. Enquanto uma base biortogonal é um caso especial de um suporte geral, uma base ortogonal é um suporte compacto especial. Quando base uma não é ortogonal, ela não reproduz exatamente a energia do sinal, e a reconstrução do sinal através destes coeficientes pode amplificar o erro introduzido nos mesmos.