



**ASSOCIAÇÃO BENEFICENTE DA INDÚSTRIA  
CARBONÍFERA DE SANTA CATARINA - UNISATC  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALURGICA  
PPGEM/SATC**

MAX GABRIEL STEINER

**INVESTIGAÇÃO *IN SITU* DO DESGASTE DOS CONTATOS DE COMUTAÇÃO DE  
UM REGULADOR DE TENSÃO PARA OBTENÇÃO DE SUBSÍDIOS À  
MANUTENÇÃO PREDITIVA**

Dissertação de Mestrado

Criciúma/SC

2020

**ASSOCIAÇÃO BENEFICENTE DA INDÚSTRIA  
CARBONÍFERA DE SANTA CATARINA - UNISATC  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALURGICA  
PPGEM/SATC**

**Investigação *in situ* do desgaste dos contatos de comutação de um  
regulador de tensão para obtenção de subsídios à manutenção  
preditiva**

Max Gabriel Steiner

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação Mestrado Profissional em Engenharia Metalúrgica da SATC, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Processos de Fabricação.

Criciúma/SC

2020

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica, área de concentração Processos de Fabricação e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação

Orientador: Prof. Dr. Anderson Diogo Spacek  
PPGEM/SATC

Coorientador: Prof. Dr. João Mota Neto  
PPGEM/SATC

**Comissão Examinadora:**

Prof. Dr. Anderson Daleffe – (PPGEM/SATC)

Prof. Dr. Luiz Carlos de César Cavaler – (PPGEM/SATC)

Prof. Dr. Jorge Javier Gimenez Ledesma – (UNILA)

**Suplente:**

Prof. Dr. Daniel Fritzen – (PPGEMSATC)

Prof. Dr. Anderson Daleffe  
Coordenador do PPGEM/SATC

Dedico esse trabalho a Deus pelo dom da vida, por prover todos os subsídios necessários para a realização deste e por iluminar meu caminho sempre ao lado de pessoas incríveis que são verdadeiros anjos em minha jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus e a todas as pessoas que fizeram parte deste trabalho, agradeço a todos que me apoiaram nessa jornada. Ao orientador professor Dr. Anderson Diogo Spacek e ao coorientador Dr. João Mota Neto por terem através de sua valiosa orientação possibilitado a finalização deste trabalho. À COOPERA (Cooperativa Pioneira de Eletrificação) e a CERMOFUL (Cooperativa Fumacense de Eletricidade) representadas pelo gerente de projetos, Sr. Jefferson Diogo Spacek que aportaram os recursos para execução do projeto que culminou no desenvolvimento desta dissertação e agradeço imensamente também à todos os colegas da equipe de desenvolvimento do projeto. Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica da Faculdade SATC e de todos os professores que muito contribuíram. Agradeço também à Leonardo Marghoti dos Santos, coordenador da Manutenção Técnica e à Luiz Augusto Faraco Wasniewski gerente operacional da Faculdade SATC, instituição onde trabalho, pelo estímulo a realização do mestrado frente a melhoria contínua do meu crescimento pessoal, profissional e compreensão por algumas ausências exigidas durante esse processo. Ao Me. Reginaldo Rosso Marcello e Clauber Roberto Melo Marques da Faculdade SATC pelo auxílio em relação aos demais ensaios realizados nesta dissertação. Por fim, gostaria de agradecer a todos familiares, amigos e colegas que de alguma forma contribuíram para o sucesso no cumprimento desta etapa.

“Aprender sempre. Recuar as vezes. Desistir,  
jamais!” (Cleumir Luiz Steiner)

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Alimentador de distribuição com e sem regulador de tensão.....	28
Figura 2 - Circuito de mudança de taps com reator de equalização junto ao reator de comutação.....	30
Figura 3 - Regulador de tensão do tipo A.....	31
Figura 4 - Regulador de tensão do tipo B.....	32
Figura 5 - Diagrama esquemático do regulador de tensão do tipo A geral, na figura Enrolamento Principal equivale ao Enrolamento de Excitação .....	32
Figura 6 - Vista interna da placa de contatos (posição nominal) .....	34
Figura 7 - Desgaste dos contatos móveis .....	35
Figura 8 - Definição da média aritmética do perfil (Ra) .....	36
Figura 9 - Rugosidade de profundidade média Rz, definição do parâmetro de distância máxima entre picos e vales .....	37
Figura 10 - Perfil evidenciando R <sub>máx</sub> e R <sub>y</sub> .....	38
Figura 11 - Entradas e saídas do sistema tribológico.....	45
Figura 12 - Representação esquemática dos elementos do tribossistema .....	46
Figura 13 - Descrição esquemática de quatro principais mecanismos de desgaste .	46
Figura 14 - Fluxograma do processo de execução do trabalho.....	54
Figura 15 - Regulador de tensão monofásico TOSHIBA, durante manutenção na empresa Fluxo transformadores.....	56
Figura 16 - Comutador de derivação em carga CTR-3 Toshiba.....	58
Figura 17 - Contatos móveis estudados neste trabalho .....	59
Figura 18 - Posição dos contatos móveis e fixos no comutador de taps.....	59
Figura 19 - Fluxograma dos ensaios realizados neste trabalho .....	61
Figura 20 - Regulador de tensão sendo instalado na rede da empresa Cooper, após retirada para manutenção .....	62
Figura 21 - Fluxograma dos ensaios realizados nos contatos móveis novos para ensaios destrutivos.....	63
Figura 22 - Corpos de prova utilizados nos ensaios.....	64
Figura 23 - Dimensões dos corpos de prova em mm.....	64
Figura 24 - Medição de rugosidade através do rugosímetro Mitutuyo SJ-310 .....	65

Figura 25 - Direção da medição de rugosidade do corpo de prova.....	66
Figura 26 - Equipamento EDX7000, marca Shimadzu.....	66
Figura 27 - Contato móvel (a) e contato fixo (b) após retirada de amostra de cada contato para realização dos ensaios .....	67
Figura 28 - Durômetro Mitutoyo HR-400 .....	68
Figura 29 - Microdurômetro digital Shimadzu HVM 2T.....	68
Figura 30 - Balança de precisão Sartorius modelo Practum224-10BR .....	69
Figura 31 - Balança de precisão Marte modelo AD500.....	70
Figura 32 - Contato móvel do regulador de tensão durante ensaio de massa .....	70
Figura 33 - Ensaio de desgaste conforme a norma ASTM G65-00. (a) equipamento utilizado no ensaio de desgaste e (b) esquemático do ensaio conforme ASTM G65-00 .....	72
Figura 34 - Imagens da Amostra 1: (a) corpo inteiro (b) região da medida .....	74
Figura 35 - Imagens da Amostra 2: (a) corpo inteiro (b) região da medida .....	75
Figura 36 - Imagens da Amostra 1: (a) corpo inteiro (b) região da medida .....	75
Figura 37 - Imagens da Amostra 2: (a) corpo inteiro (b) região da medida .....	76
Figura 38 - Representação esquemática dos pontos de medidas (a) eixo coordenado (b) localização .....	76
Figura 39 - Contatos fixos desgastados após retirada de operação do regulador de tensão .....	87
Figura 40 - Contato fixo 06 do regulador de tensão .....	88
Figura 41 - Contato fixo 07 do regulador de tensão .....	88
Figura 42 - Corpos de prova após ensaio de desgaste abrasivo por roda de borracha e areia (a) corpo de prova a (b) corpo de prova b.....	90
Figura 43 - Comparativo do resultado do ensaio de desgaste entre os corpos de prova “a” e “b” da Figura 42 .....	90
Figura 44 - Contato fixo 07 do regulador de tensão .....	92
Figura 45 - Imagens obtidas por perfilometria da Amostra 1 no Ponto 1 (a) 2D (b) 3D .....	94
Figura 46 - Imagens obtidas por perfilometria da Amostra 1 no Ponto 2 (a) 2D (b) 3D .....	94
Figura 47 - Imagens obtidas por perfilometria da Amostra 1 no Ponto 3 (a) 2D (b) 3D .....	94

Figura 48 - Imagens obtidas por perfilometria da Amostra 2 no Ponto 1 (a) 2D (b) 3D .....	95
Figura 49 - Imagens obtidas por perfilometria da Amostra 2 no Ponto 2 (a) 2D (b) 3D .....	95
Figura 50 - Imagens obtidas por perfilometria da Amostra 2 no Ponto 3 (a) 2D (b) 3D .....	96
Figura 51 - Contatos móveis desgastados, após período em operação no regulador (a) contato móvel a (b) contato móvel b .....	97
Figura 52 - Pontos analisados em MEV no contato móvel da Figura 51(a). Aumento de 2000x .....	97
Figura 53 - Espectros de EDS analisados nos ponto da Figura 52 .....	98
Figura 54 - Pontos analisados em MEV no contato fixo da Figura 27(b), na zona “corte X”. Aumento de 2000x.....	99
Figura 55 - Espectro de EDS analisado no ponto 1286 da Figura 54 .....	100
Figura 56 - Espectro de EDS analisado no ponto 1287 da Figura 54 .....	100
Figura 57 - Espectro de EDS analisado no ponto 1288 da Figura 54 .....	101
Figura 58 - Pontos analisados em MEV no contato fixo da Figura 27(b), na zona “corte Y”. Aumento de 2000x.....	102
Figura 59 - Espectros de EDS analisados nos ponto da Figura 54 .....	103
Figura 60 - Microscopia eletrônica do corpo de prova da Figura 42(a) em zonas não desgastadas pelo ensaio de desgaste. Aumento de 2000x .....	104
Figura 61 - Espectro de EDS do Ponto 1 da Figura 60 .....	104
Figura 62 - Espectro de EDS do Ponto 2 da Figura 60 .....	105
Figura 63 - Espectro de EDS do Ponto 3 da Figura 60 .....	105
Figura 64 - Espectro de EDS do Ponto 4 da Figura 60 .....	106
Figura 65 - Microscopia eletrônica do corpo de prova da Figura 42(a) em zonas desgastadas pelo ensaio de desgaste. Aumento de 1000x .....	108
Figura 66 - Espectro de EDS do Ponto 1 da Figura 65 .....	108
Figura 67 - Espectro de EDS do Ponto 2 da Figura 65 .....	109
Figura 68 - Espectro de EDS do Ponto 3 da Figura 65 .....	109
Figura 69 - Espectro de EDS do Ponto 4 da Figura 65 .....	110
Figura 70 - Evolução dos gases etileno e acetileno durante período de operação do regulador .....	120

Figura 71 - Evolução dos gases monóxido de carbono e dióxido de carbono durante período de operação do regulador .....	121
Figura 72 - Evolução dos gases combustíveis durante o período de operação do regulador .....	122

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Trabalhos publicados sobre transformadores e reguladores de tensão ...	50
Tabela 2 - Ficha técnica do Regulador de Tensão TOSHIBA .....	57
Tabela 3 – Dados característicos do óleo isolante utilizado LUBRAX AV 70 IN – LI 60	
Tabela 4 - Parâmetros do ensaio de desgaste.....	72
Tabela 5 - Coordenadas dos pontos de medidas das Amostras .....	76
Tabela 6 - Resultados das medições de durezas.....	81
Tabela 7 - Rugosidade média superficial dos corpos de prova.....	82
Tabela 8 - Composição química em peso (wt%) dos contatos móveis conforme ensaio de análise química .....	82
Tabela 9 - Composição química em peso (wt%) do contato fixo no ponto “Corte X” da Figura 27(b) conforme ensaio de análise química.....	83
Tabela 10 - Composição química em peso (wt%) do contato fixo no ponto “Corte Y” da Figura 27(b) conforme ensaio de análise química.....	83
Tabela 11 - Comparativo das massas dos contatos móveis do regulador de tensão	84
Tabela 12 - Perda de massa média dos contatos móveis por manobra de tap.....	85
Tabela 13 - Comparativo das massas dos contatos fixos do regulador de tensão....	86
Tabela 14 - Dados da massa dos corpos de prova analisados durante o ensaio de desgaste.....	89
Tabela 15 - Valores da rugosidade micrométrica obtidos por rugosímetro linear em junho 2019.....	91
Tabela 16 - Valores de rugosidade micrométrica obtidos por rugosímetro linear em julho 2020.....	92
Tabela 17 - Porcentagem dos elementos químicos nos pontos analisados na Figura 51. ....	98
Tabela 18 - Porcentagem dos elementos químicos nos pontos analisados na Figura 54. ....	101
Tabela 19 - Porcentagem dos elementos químicos nos pontos analisados na Figura 54. ....	103

Tabela 20 - Dados EDS dos quatro pontos selecionados do corpo de prova da Figura 27(a) em zonas sem desgaste .....	107
Tabela 21 - Dados EDS dos quatro pontos selecionados do corpo de prova da Figura 42(a) em zonas desgastadas por ensaio de desgaste .....	110
Tabela 22 - Dados EDS dos elementos químicos silício e oxigênio extraídos Tabela 20 e Tabela 21 .....	112
Tabela 23 - Número de manobras do comutador de taps do regulador de tensão em campo .....	113
Tabela 24 - Resultados das análises de aspecto visual do óleo isolante .....	114
Tabela 25 – Resultados das análises de cor do óleo isolante.....	115
Tabela 26 – Resultados das análises de densidade do óleo isolante .....	115
Tabela 27 – Resultados das análises de tensão interfacial do óleo isolante.....	116
Tabela 28 – Resultados das análises de teor de água do óleo isolante.....	116
Tabela 29 - Resultados das análises de índice de neutralização do óleo isolante..	117
Tabela 30 - Resultados das análises de rigidez dielétrica do óleo isolante.....	118
Tabela 31 - Resultados das análises de fator de perdas 90 °C.....	118
Tabela 32 - Comparativo dos resultados obtidos nos ensaios cromatográficos.....	119
Tabela 33 – Comparativo dos resultados obtidos nos ensaios de Teor de PCB.....	122
Tabela 34 - Relação de periódicos já publicados sobre o tema abordado .....	128

## LISTA DE SÍMBOLOS

%	Percentual.
°C	Celsius.
$\rho$	Densidade.
Al	Alumínio.
Ba	Bário.
C	Carbono.
Ca	Cálcio.
Cl	Cloro.
CO	Monóxido de carbono.
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono.
Cu	Cobre.
Ge	Germânio.
HB	Dureza Brinell.
K	Potássio.
KOH	Hidróxido de potássio.
kV	Quilovolts.
kVA	Quilovolt-ampère.
l	Comprimento avaliado.
Lm	Percurso de medição.
LM	Perda de massa.
mm <sup>3</sup>	Milímetro cúbico.
Mn	Manganês.
N	Nitrogênio.
Na	Sódio.
O	Oxigênio.
p	Pico.
P	Fósforo.
ppm	Partes por milhão.
Ra	Rugosidade média.
R <sub>máx</sub>	Rugosidade máxima.

Ry	Máxima distância pico-vale.
Rz	Rugosidade de profundidade média.
S	Enxofre.
Sa	Rugosidade média sobre a superfície.
Se	Selênio.
Si	Silício.
SiO <sub>2</sub>	Óxido de silício.
Sz	Diferença média.
Ta	Tântalo.
Ti	Titânio.
Tm	Túlio.
v	Vale.
V	Vanádio.
VL	Perda de volume.
Vmin	Tensão mínima.
wt%	Composição química em peso.
W	Tungstênio.
W-Cu	Liga Tungstênio e Cobre.
y(x)	Distância de cada ponto até a linha de centro.
Zi	Rugosidades parciais.
Zn	Zinco.

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.
ANSI	<i>American National Standards Institute.</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials.</i>
CERMOFUL	Cooperativa Fumacense de Eletricidade.
CLA	<i>Center Line Average.</i>
COOPERA	Cooperativa Pioneira de Eletrificação.
DC	<i>Direct Current.</i>
DGA	<i>Dissolved Gas Analysis.</i>
DIN	<i>German Institute for Standardization.</i>
EDS	<i>Energy Dispersion Spectroscopy.</i>
EUA	Estados Unidos da América.
FRX	Fluorescência de Raio X.
IEC	<i>International Electrotechnical Commission.</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers.</i>
IoT	<i>Internet of Things.</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LABOIL	Laboratório de Óleos Minerais.
LACAMI	Laboratório de Caracterização de Microestrutural.
LAPEC	Laboratório de Pesquisa em Corrosão.
LPWA	<i>Low Power Wide Area.</i>
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura.
NBR	Norma Brasileira.
OLTC	<i>On-Load Tap-Changer.</i>
OMI	Óleo Mineral Isolante.
OVI	Óleo Vegetal Isolante.
P&D	Pesquisa e desenvolvimento.
PCBs	Bifenilas Poli-Cloradas.
SATC	Associação Benficiente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina.
UNILA	Universidade Federal da Integração Latino-Americana.

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um estudo *in situ* e investigativo acerca da análise do desgaste de contatos de comutação e óleo isolante de um regulador de tensão monofásico de linha de 414 kVA/13,8 kV em operação real em uma rede de distribuição durante um ano. Espera-se com isso contribuir com subsídios pertinentes a manutenção preditiva destes equipamentos, uma vez que a análise do atrito e do desgaste gerado durante as manobras de comutação, podem influenciar nas características principais dos contatos e do óleo isolante. No presente estudo foram avaliados os contatos quanto ao ensaio de perda de massa, perfilometria (norma ABNT ISO 4287:2002), desgaste abrasivo por roda de borracha e areia (norma ASTM G65-00), dureza (norma ABNT NBR 6506-1:2019) e análise em microscópio eletrônico de varredura (MEV). O óleo isolante foi avaliado quanto a análise físico-química de óleo mineral (norma ABNT NBR 8840:2013), análise de gases dissolvidos em óleo isolante (norma ABNT NBR 7070:2006) e análise de PCBs (norma ABNT NBR 13882:2008). Essas propriedades foram avaliadas comparativamente entre si, os contatos foram avaliados antes do regulador ser instalado na rede elétrica e após a sua retirada. As análises de óleo isolante foram realizadas a cada três meses de operação em campo, através da retirada de amostras de óleo. Os resultados obtidos dos ensaios realizados, demonstraram que a cada manobra de comutação o contato móvel perde cerca de 0,002895% da sua massa inicial. Verificou-se também a alteração da topografia da superfície do contato, associado ao desgaste da mesma, sugerindo que o desgaste ocorre de maneira diferente ao longo da superfície analisada. Quanto aos resultados dos ensaios no óleo isolante foi possível identificar a evolução da concentração de gases dissolvidos no óleo, como o etileno e o acetileno, em decorrência supostamente da ação de arcos no óleo durante as manobras de comutação, contudo os resultados encontrados no período de um ano de análises indicam que as concentrações ainda são baixas e não aplicam riscos ao sistema. Verificou-se também o aparecimento de gases como hidrogênio e etano, não identificados inicialmente, indicando falhas térmicas ou elétricas no equipamento.

**PALAVRAS-CHAVE:** Desgaste mecânico. Regulador de tensão. Contatos móveis. Contatos fixos. Óleo Isolante.

## ABSTRACT

The present work aims to develop an *in situ* and investigative study on the analysis of the wear of switching contacts and insulating oil of a single-phase voltage regulator of 414 kVA/13.8 kV line in real operation in a distribution network during one year. This is expected to contribute with relevant subsidies to the predictive maintenance of this equipment, since the analysis of friction and wear generated during switching operations can influence the main characteristics of the contacts and the insulating oil. In the present study, contacts were evaluated regarding the mass loss test, profilometry test (standard ABNT ISO 4287:2002), abrasive wear by rubber wheel and sand, hardness (standard ASTM G65-00), hardness (standard ABNT NBR 6506-1:2019) and scanning electron microscope analysis. The insulating oil was evaluated for physical-chemical analysis of mineral oil (standard ABNT NBR 8840:2013), dissolved gas analysis in insulating oil (standard ABNT NBR 7070:2006) and PCBs analysis (standard ABNT NBR 13882:2008). These properties were evaluated comparatively with each other, the contacts were evaluated before the regulator was installed in the electrical network and after its removal. Insulating oil analyzes were carried out every three months of operation in the field, by taking oil samples. The results obtained from the tests performed, demonstrated that with each switching maneuver the mobile contact loses about 0.002895% of its initial mass. There was also a change in the topography of the contact surface, associated with its wear, suggesting that wear occurs differently along the analyzed surface. As for the results of the tests on the insulating oil, it was possible to identify the evolution of the concentration of gases dissolved in the oil, such as ethylene and acetylene, supposedly due to the action of arcs in the oil during the switching maneuvers, however the results found in the period of a year of analysis indicates that the concentrations are still low and do not apply risks to the system. There was also the appearance of gases such as hydrogen and ethane, not initially identified, indicating thermal or electrical failures in the equipment.

**KEY-WORDS:** Mechanical wear. Voltage regulator. Mobile contacts. Fixed contacts. Insulating oil.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>22</b>
1.1 OBJETIVOS .....	24
<b>1.1.1 Objetivos Específicos</b> .....	<b>24</b>
1.2 JUSTIFICATIVA .....	25
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>27</b>
2.1 REGULADORES DE TENSÃO .....	27
<b>2.1.1 Regulador de tensão com comutador eletromecânico de taps</b> .....	<b>28</b>
<b>2.1.2 Reguladores do tipo A e tipo B</b> .....	<b>31</b>
<b>2.1.3 Chaves comutadoras</b> .....	<b>33</b>
<b>2.1.4 Comutadores Toshiba</b> .....	<b>34</b>
2.1.4.1 <i>Erosão dos contatos dos comutadores</i> .....	35
2.2 PARÂMETROS DE RUGOSIDADE .....	36
<b>2.2.1 Rugosidade média (Ra)</b> .....	<b>36</b>
<b>2.2.2 Rugosidade de profundidade média (Rz)</b> .....	<b>37</b>
<b>2.2.3 Rugosidade máxima (R<sub>máx</sub>)</b> .....	<b>38</b>
2.3 ÓLEO ISOLANTE EM TRANSFORMADORES.....	39
<b>2.3.1 Ensaio físico-químico do óleo isolante</b> .....	<b>39</b>
<b>2.3.2 Índice de neutralização – ASTM D 974</b> .....	<b>40</b>
<b>2.3.3 Tensão interfacial – ABNT NBR 6234</b> .....	<b>40</b>
<b>2.3.4 Estabilidade à oxidação – IEC 74</b> .....	<b>40</b>
<b>2.3.5 Rigidez dielétrica</b> .....	<b>41</b>
<b>2.3.6 Teor de água</b> .....	<b>41</b>
<b>2.3.7 Fator de potência</b> .....	<b>41</b>
<b>2.3.8 Óleo mineral isolante (OMI)</b> .....	<b>42</b>

<b>2.3.9 Óleo vegetal isolante (OVI)</b> .....	<b>43</b>
2.4 DESGASTE .....	44
<b>2.4.1 Tribologia</b> .....	<b>44</b>
<b>2.4.2 Mecanismos de Desgaste</b> .....	<b>46</b>
<b>2.4.3 Desgaste abrasivo</b> .....	<b>47</b>
2.5 ESTADO DA ARTE DE DESGASTE EM COMUTAÇÕES DE TAPS DE REGULADORES DE TENSÃO E ÓLEO ISOLANTE .....	48
2.6 PESQUISAS RECENTES .....	50
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>54</b>
3.1 METODOLOGIA APLICADA .....	54
3.2 ETAPA 01 – PROBLEMATIZAÇÃO .....	54
3.3 ETAPA 02 – DEFINIÇÕES CONSTRUTIVAS E APLICAÇÃO .....	56
<b>3.3.1 Regulador de tensão</b> .....	<b>56</b>
3.3.1.1 <i>Comutador de derivação em carga</i> .....	58
3.3.1.2 <i>Contatos móveis e contatos fixos</i> .....	59
3.3.1.3 <i>Óleo isolante</i> .....	60
3.4 Etapa 03 – Ensaio Preliminares .....	61
<b>3.4.1 Ensaio nos contatos móveis</b> .....	<b>63</b>
3.4.1.1 <i>Contatos móveis novos</i> .....	64
3.4.1.2 <i>Medição de rugosidade dos contatos móveis</i> .....	65
3.4.1.3 <i>Análise química dos contatos móveis</i> .....	66
3.4.1.4 <i>Medição de dureza dos contatos móveis</i> .....	67
3.4.1.5 <i>Ensaio de massa dos contatos móveis e fixos</i> .....	69
3.4.1.6 <i>Ensaio de desgaste abrasivo por roda de borracha e areia</i> .....	71
3.4.1.7 <i>MEV: Microscópio Eletrônico de Varredura</i> .....	73
3.4.1.8 <i>Ensaio de perfilometria</i> .....	74
<b>3.4.2 Óleo isolante</b> .....	<b>77</b>

3.4.2.1 Retiradas de óleo do regulador para análises .....	77
3.4.2.2 Análise físico-química do óleo isolante.....	78
<b>3.4.2.2.1 Análise de aspecto visual.....</b>	<b>78</b>
<b>3.4.2.2.2 Análise de cor.....</b>	<b>78</b>
<b>3.4.2.2.3 Análise de densidade 20/20 °C.....</b>	<b>78</b>
<b>3.4.2.2.4 Análise de tensão interfacial.....</b>	<b>78</b>
<b>3.4.2.2.5 Análise de teor de água.....</b>	<b>79</b>
<b>3.4.2.2.6 Análise do índice de neutralização.....</b>	<b>79</b>
<b>3.4.2.2.7 Análise de rigidez dielétrica.....</b>	<b>79</b>
<b>3.4.2.2.8 Análise do fator de perdas 90 °C.....</b>	<b>79</b>
3.4.2.3 Análise de gases dissolvidos em óleo isolante - cromatografia.....	80
<b>3.4.2.3.1 Determinação dos gases dissolvidos no óleo.....</b>	<b>80</b>
3.4.2.4 Determinação do teor de bifenilas poli-cloradas (PCBS) no óleo.....	80
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	81
4.1 Resultados dos Ensaios nos contatos.....	81
<b>4.1.1 Resultados dos ensaios de dureza.....</b>	<b>81</b>
<b>4.1.2 Resultados dos ensaios de rugosidade.....</b>	<b>81</b>
<b>4.1.3 Resultado do ensaio de análise química.....</b>	<b>82</b>
<b>4.1.4 Resultado do ensaio de massa.....</b>	<b>84</b>
4.1.4.1 Contatos móveis.....	84
4.1.4.2 Contatos fixos.....	86
<b>4.1.5 Ensaio de desgaste abrasivo por roda de borracha e arreja.....</b>	<b>89</b>
<b>4.1.6 Resultados dos ensaios de perfilometria.....</b>	<b>91</b>
<b>4.1.7 Resultados de ensaios em MEV.....</b>	<b>96</b>
4.1.7.1 MEV dos contatos móveis e fixos usados no regulador de tensão.....	96
4.1.7.2 MEV dos contatos móveis novos.....	104
4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS NO ÓLEO ISOLANTE.....	113

<b>4.2.1 Número de manobras do regulador.....</b>	<b>113</b>
<b>4.2.2 Resultado das análises físico-químicas do óleo isolante.....</b>	<b>114</b>
<i>4.2.2.1 Análise de aspecto visual.....</i>	<i>114</i>
<i>4.2.2.2 Análise de cor.....</i>	<i>115</i>
<i>4.2.2.3 Análise de densidade 20/20 °C.....</i>	<i>115</i>
<i>4.2.2.4 Análise da tensão interfacial.....</i>	<i>116</i>
<i>4.2.2.5 Análise do teor de água.....</i>	<i>116</i>
<i>4.2.2.6 Análise do índice de neutralização.....</i>	<i>117</i>
<i>4.2.2.7 Análise da rigidez dielétrica.....</i>	<i>117</i>
<i>4.2.2.8 Análise fator de perdas 90 °C.....</i>	<i>118</i>
<b>4.2.3 Resultados das análises de gases dissolvidos no óleo isolante - cromatografia .....</b>	<b>119</b>
<b>4.2.4 Resultados das análises do teor de bifenilas policloradas (PCBs) no óleo .....</b>	<b>122</b>
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>124</b>
<b>6 PESQUISAS FUTURAS .....</b>	<b>127</b>
<b>7 PRODUÇÃO CIENTÍFICA .....</b>	<b>128</b>
<b>8 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>129</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As distribuidoras de energia elétrica fornecem energia com níveis de tensão que variam o tempo todo em razão da constante conexão e desconexão de equipamentos da rede que fazem com que a carga elétrica oscile, acarretando também na oscilação dos níveis de tensão. Quando os valores de tensão estão muito distantes da tensão nominal de operação da rede uma série de problemas podem ocorrer, desde a falha de operação até mesmo a queima de aparelhos e máquinas elétricas (SIMAS FILHO, 2004).

Os reguladores de tensão de linha são equipamentos eletromecânicos capazes de manter constante os níveis de tensão fornecida por subestações de energia elétrica, o mais próximo possível da tensão nominal da rede elétrica. Na maioria das vezes estes equipamentos são monofásicos, porém são utilizados para regular uma fase de um sistema trifásico, apesar de também existirem reguladores inteiramente trifásicos. Estes equipamentos são transformadores de energia elétrica, a partir da análise dos níveis de tensão de entrada ou de saída os reguladores podem variar a relação entre o número de enrolamentos no primário e no secundário por meio do uso de uma chave rotativa, visando manter a tensão de saída constante (MAGALHÃES, 2005).

Basicamente os reguladores são compostos de um transformador, um módulo de derivação sob carga (OLTC – *On-Load Tap-Changer*), óleo isolante, módulo de controle, carcaça e ferragens de sustentação. O módulo de derivação também é conhecido por comutador de derivação sob carga e é responsável por aplicar uma relação de transformação adequada ao transformador visando manipular a tensão na saída para um nível pré-definido, mesmo que haja mudança de carga ou de tensão na entrada do regulador (SIMAS FILHO, 2004). O comutador é a parte mais susceptível a falhas, em razão de ser um dispositivo eletromecânico que está exposto a esforços mecânicos e elétricos. Portanto, as falhas mais frequentes ocorrem em função de baixa isolação do regulador ou defeitos no sistema de posicionamento do comutador de derivação (SECIC; KUZLE, 2017). Uma série de eventos elétricos e mecânicos ocorre a cada mudança de posição do comutador e contribuem para o desgaste do equipamento uma vez que essas manobras são realizadas sem interromper o fornecimento de corrente elétrica da rede. O número elevado de

chaveamentos causam a deterioração e desgaste dos contatos mecânicos que compõem o módulo de comutação do equipamento, podendo ocasionar falhas catastróficas de operação. Portanto, o bom funcionamento dos reguladores de tensão é crucial para garantir a confiabilidade e operabilidade do sistema de distribuição de energia elétrica através de bons procedimentos de manutenção (KANG; BIRTWISTLE, 2001; KANG; BIRTWISTLE, 2003; SECIC; KRPA; KUZLE, 2019). Entre as técnicas utilizadas atualmente na detecção de falhas, a literatura recente tem proposto sistemas não invasivos de monitoramento de reguladores tais como: análises de características do óleo isolante e isolamento, análises de contatos do comutador, análises mecânicas e através da análise de vibrações emitidas pelo comutador durante a execução de uma manobra de comutação (BELLINI *et al.*, 2008; CUNHA SANTOS; SUETAKE; NUNES DA SILVA, 2012; FEIZIFAR; USTA, 2019; NANDI; TOLIYAT; LI, 2005).

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo apresentar a investigação preliminar do desgaste mecânico dos contatos de comutação do módulo de derivação sob carga e do óleo isolante de um regulador monofásico de tensão elétrica de 414 kVA/13,8kV. O equipamento estudado foi monitorado *in loco* em operação na rede elétrica durante o período de um ano completo. A cada três meses decorridos em operação foram retiradas amostras de óleo isolante para ensaio cromatográfico e físico-químico em laboratório, visando acompanhar o processo evolutivo das características principais do óleo isolante. Posteriormente, após encerrado o período de operações em campo, realizou-se ensaios nos principais componentes de comutação do regulador, buscando avaliar e compreender os mecanismos de desgaste dos contatos para correlacionar com as condições de desgaste em função do número de manobras de comutação durante o período. O objeto deste estudo, portanto é a busca de subsídios para previsão de desgaste destes componentes através da leitura do número de manobras do equipamento para diagnósticos preditivos. Prever os níveis de desgaste e a qualidade de operação dos contatos de reguladores de tensão é algo buscado por companhias de eletrificação, na tentativa de reduzir custos com retiradas precoces de bancos reguladores da rede para manutenção, além de evitar falhas catastróficas e interrupções no sistema elétrico causadas por equipamentos defeituosos e falta de manutenção. As análises dos resultados dos ensaios e dos dados de desgastes obtidos nesta avaliação em escala

real de aplicação demonstram que é possível correlacionar a evolução do desgaste com o número de manobras prevendo um indicativo de intervenção assertivo. Os resultados obtidos apresentam uma excelente contribuição para a distribuidora que a partir do estudo pode otimizar a manutenção do regulador estudado considerando a evolução do desgaste frente a média (cerca de 2500 manobras/ano) de comutações características da região de estudo e pode também aplicar o estudo para os demais reguladores da rede.

O presente trabalho está dividido em: Introdução que traz uma visão geral a respeito dos principais aspectos abordados neste trabalho. Em seguida, a Fundamentação Teórica traz uma revisão bibliográfica sobre reguladores de tensão, comutadores de derivação sob carga, contatos móveis, contatos fixos, óleo isolante e desgaste mecânico. Finaliza-se com uma revisão do estado da arte abordando alguns trabalhos recentes acerca de estudos realizados em reguladores de tensão e equipamentos próximos a este. No item Metodologia Aplicada é descrita a metodologia de desenvolvimento experimental dos ensaios realizados cujos dados são analisados e discutidos no item Resultados e Discussão dos Resultados. Por fim, o item Conclusão relaciona os objetivos inicialmente levantados com os resultados encontrados neste trabalho.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho está pautado na investigação *in situ* de mecanismos de desgaste dos contatos de comutação e óleo isolante de um regulador de tensão, através do monitoramento deste equipamento em operação real na rede elétrica durante um ano completo de operações, visando a obtenção de subsídios técnicos que permitam auxiliar os processos de manutenção preditiva de reguladores de tensão com vistas a tornar este processo eficiente e seguro.

### 1.1.1 Objetivos Específicos

- ✓ Caracterizar o desgaste mecânico dos contatos móveis do regulador de tensão;

- ✓ Estudar a depreciação do óleo isolante do regulador de tensão;
- ✓ Analisar as características físico-químicas e cromatográfica do óleo isolante durante a operação do regulador de tensão, durante 12 meses;
- ✓ Correlacionar o desgaste mecânico dos contatos móveis do regulador com o número de manobras de comutação no período.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O procedimento de manutenção de reguladores de tensão é demorado, caro e requer, em alguns casos, manobras na rede elétrica para desligamento e retirada do equipamento. A manutenção de componentes críticos como os OLTC's é realizada na ocorrência de falhas ou periodicamente (FEIZIFAR *et al.*, 2019).

Por falta de um sistema de monitoramento eficiente algumas vezes reguladores vão para manutenção periódica em boas condições, quando poderiam continuar em operação na rede por mais algum tempo. Além disso, equipamentos pré-dispostos à falhas podem comprometer a qualidade do sistema de distribuição estando em operação mesmo longe de condições seguras e ideais (FERREIRA; SIMAS FILHO, 2018). Portanto, torna-se muito importante a adoção de medidas eficientes de manutenção preventiva sobre os reguladores de tensão em face a garantir melhor desempenho, confiabilidade e maior vida útil do equipamento (ANTELIZ JAIMES, 2012; DE FARIA; COSTA; OLIVAS, 2015; LAZARESCU *et al.*, 2017).

A contribuição da proposta discutida neste trabalho para as companhias de distribuição de energia elétrica é de fato importante, sendo ela inclusive parte integrante de um projeto de pesquisa fomentado pelas empresas cooperativas de energia elétrica COOPERA (Cooperativa Pioneira de Eletrificação) e CERMOFUL (Cooperativa Fumacense de Eletricidade) sendo executado pela Faculdade SATC (Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina), em atendimento ao programa de P&D (Pesquisa e Desenvolvimento) regulado pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). O projeto intitulado "Gerenciamento remoto de parâmetros indiretos visando pré-diagnóstico de reguladores de tensão com interação remota utilizando rede de comunicação baseada em IoT – LPWA –

SIGFOX”, sobre o registro PD-5370-0003/2018, visa o desenvolvimento de um sistema composto de hardware e software para gestão remota das principais variáveis de reguladores de tensão, através da utilização de rede de comunicação baseada em IoT (LPWA – SIGFOX), permitindo pré-diagnóstico da integridade física e interação remota com o equipamento, maximizando a qualidade do fornecimento de energia elétrica.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo, são apresentados os principais conceitos e definições para a consolidação dos conhecimentos aplicados ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

### 2.1 REGULADORES DE TENSÃO

Reguladores de tensão de linha são transformadores com enrolamentos em série ou autotransformadores. São instalados ao longo de alimentadores e possibilitam a manutenção da tensão em um sistema de distribuição, dentro de uma determinada faixa de operação, mesmo quando a variação de tensão fica fora dos níveis estabelecidos (DOS REIS, 2013).

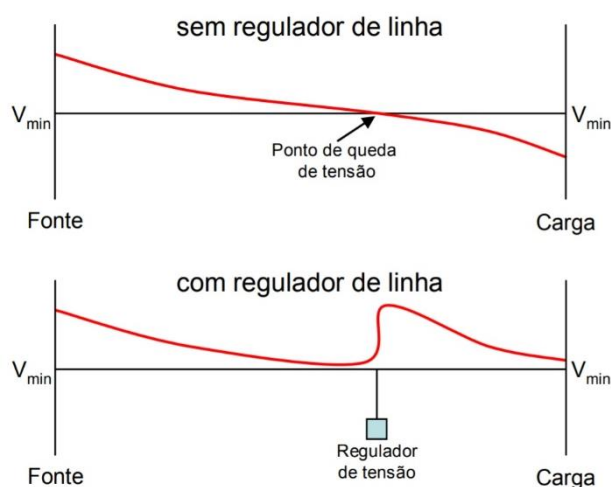
Existe grande preocupação por parte das empresas de distribuição de energia elétrica em manter o nível de tensão fornecido aos consumidores dentro dos níveis de qualidade estabelecidos pelos órgãos reguladores. Os critérios de qualidade de energia requerem uma tensão constante, apesar das variações na corrente da carga (SARAIVA FILHO *et al.*, 2013).

Diferentes tipos de equipamentos podem ser usados para controlar a tensão da linha, tais como reguladores de tensão passo, comutador de tensão em carga (OLTC) e capacitores de derivação. O objetivo principal desses equipamentos é o mesmo, manter os níveis de tensão da rede dentro de uma faixa aceitável (BEDAWY; YORINO; MAHMOUD, 2018).

Os reguladores elevam ou rebaixam os níveis de tensão, diminuindo a flutuação de tensão nos consumidores de energia elétrica. De acordo com a variação da tensão o regulador permite configurar o número de enrolamentos. Dessa forma, é possível regular os níveis de tensão na saída, em relação à tensão de entrada, através de uma faixa de ajuste de -10% a +10% (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, 2017).

Na ausência de um regulador instalado ao longo da linha, a máxima queda de tensão deve estar dentro da faixa de operação do transformador da subestação. Através da Figura 1 é possível verificar a ação de um regulador instalado ao longo da linha de um sistema de distribuição (SHORT, 2004).

Figura 1 - Alimentador de distribuição com e sem regulador de tensão



Fonte: SPATTI; SILVA (2007)

Em um alimentador sem regulador, conforme apresenta a Figura 1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, no “ponto de queda de tensão”, representa-se o local em que a subestação já não é mais capaz de compensar a queda de tensão na linha. A instalação de um regulador, a partir deste ponto, é necessária para que a tensão não fique fora dos níveis operativos, sendo assim elevada pelo regulador para os níveis adequados. A instalação de um regulador ao longo da linha permite cobrir até duas vezes a queda de tensão suportada pelo primário. Da mesma forma, com dois reguladores é possível cobrir até três vezes a máxima queda de tensão do primário e assim sucessivamente (SHORT, 2004).

Destina-se à equipe de planejamento do sistema de distribuição a responsabilidade em estudar o ponto do alimentador onde a subestação já não pode mais compensar a queda de tensão e dessa forma indicar a maneira correta de instalação de reguladores ao longo do alimentador (SPATTI, 2007).

### 2.1.1 Regulador de tensão com comutador eletromecânico de taps

No regulador de tensão o enrolamento primário se encontra em paralelo com a linha, enquanto o enrolamento secundário em série. A tensão do enrolamento em série pode ser somada ou subtraída à tensão do primário, através de taps existentes no enrolamento secundário. Dessa forma, são encontrados valores de

tensão quase que constantes no secundário, mesmo que a tensão do primário varie. Esse ajuste é feito por meio de uma chave rotatória ou OLTC (*On-Load Tap-Changer*) comutador de derivação em carga, através da mudança de posição dos taps. Os taps de um transformador permitem elevar ou reduzir a tensão transformada, através da variação da relação de transformação do equipamento por meio da mudança de posição do tap (DEGENEFF, 1997).

Além de controlar o nível de tensão, ainda é possível obter ajustes de largura de faixa, tempo de retardo e faixa de regulação no regulador automático. O emprego destes equipamentos se dá em subestações, alimentadores, alimentadores longos e alimentadores rurais visando compensar a queda de tensão excessiva e melhorar os níveis de tensão (DOS REIS, 2013).

O regulador de tensão constituído por um autotransformador monofásico imerso em óleo isolante, com vários terminais, derivações ou taps no secundário, que constituem os chamados degraus de tensão (níveis de compensação) é o tipo mais comum de regulador utilizado pelas concessionárias de distribuição de energia elétrica, geralmente são denominados por reguladores de tensão por degraus (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, 2017).

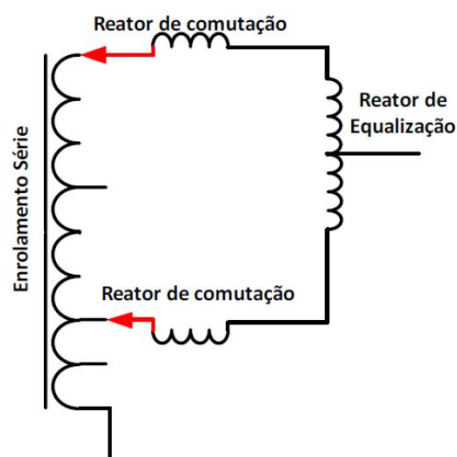
A operação do equipamento é feita sem interrupção no fornecimento de energia, graças a atuação do comutador de derivação em carga. Essa chave é responsável por conectar à carga a cada tap do regulador, sendo que cada tap proporciona um nível ou degrau de tensão à carga. O funcionamento básico de um regulador de tensão por degraus é análogo ao de um autotransformador com derivações que podem ser comutadas em carga (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, 2012, 2017).

A utilização da chave de comutação permite que os taps que formam a bobina de regulação possam ser utilizados de forma aditiva ou subtrativa. Dessa forma, os taps determinam os degraus de tensão a serem computados no circuito e a comutação entre taps adjacentes ocorre sem que a corrente circulante seja interrompida. Isso somente é possível devido a utilização de um reator de comutação (SHUTTLEWORTH *et al.*, 1996).

A utilização do reator é crucial para limitar o desgaste dos contatos durante a troca de tap em decorrência da taxa de variação da corrente. Para evitar o desgaste

dos contatos coloca-se uma bobina (reator de equalização) entre o reator de comutação e as derivações dos taps, conforme a Figura 2 (DOS REIS, 2013).

Figura 2 - Circuito de mudança de taps com reator de equalização junto ao reator de comutação



Fonte: DOS REIS (2013)

Através da inclusão da bobina de equalização o valor da corrente de circulação no reator é mantido constante, independentemente da posição que o comutador estiver operando (DOS REIS, 2013). O comutador eletromecânico de taps em carga é resultado de um complexo circuito, a chave rotativa garante a troca de taps sem que ocorram interrupções na carga ou curtos-circuitos entre as derivações (SHUTTLEWORTH *et al.*, 1996).

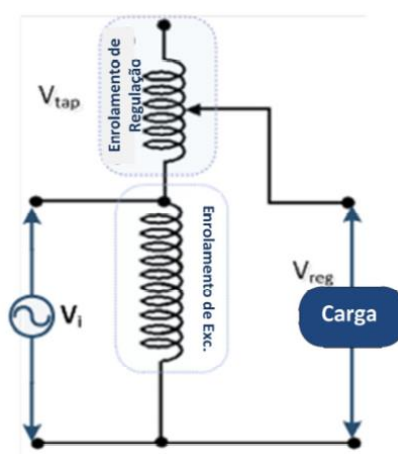
No Brasil são muito utilizados os reguladores do tipo B para alguns níveis de tensão. Em conjunto com o reator esse equipamento possibilita 33 derivações, sendo 16 para cima, 16 para baixo e uma posição neutra. Dessa forma, permite regular a tensão de linha corrigindo desvios de até +10% ou -10% com passos de 0,625% da tensão nominal. As medições e análises dos valores das tensões são realizadas por um dispositivo de controle eletrônico microcontrolado, responsável por comandar automaticamente o comutador de taps e acumular funções de registrador e indicador de posição (ITB, 2019).

### 2.1.2 Reguladores do tipo A e tipo B

Os reguladores de tensão com comutadores de taps são classificados pela norma ANSI/IEEE C57.15, ABNT NBR 11809 e IEC 60076 em dois grupos: tipo A e tipo B (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991a; INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, 2009; INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2011) .

O tipo A, também conhecido por excitação variável, ocorre quando o enrolamento principal (ou de excitação) está em paralelo com a fonte de alimentação. Dessa forma, o enrolamento de excitação fica submetido diretamente às variações de tensão da fonte. A Figura 3 apresenta o diagrama esquemático simplificado de um regulador de tensão do tipo A (DOS REIS, 2013).

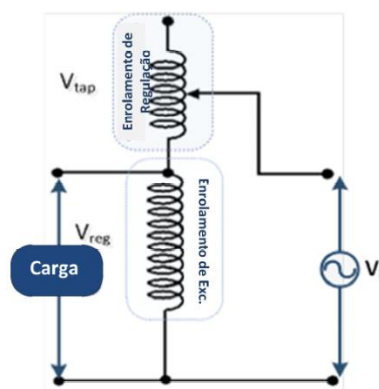
Figura 3 - Regulador de tensão do tipo A



Fonte: DOS REIS (2013)

O tipo B, ou de excitação fixa, ocorre quando o enrolamento de excitação está localizado em paralelo com a carga. Dessa maneira, o enrolamento de excitação fica submetido à tensão regulada. A Figura 4 apresenta o diagrama esquemático simplificado de um regulador de tensão do tipo B (DOS REIS, 2013).

Figura 4 - Regulador de tensão do tipo B

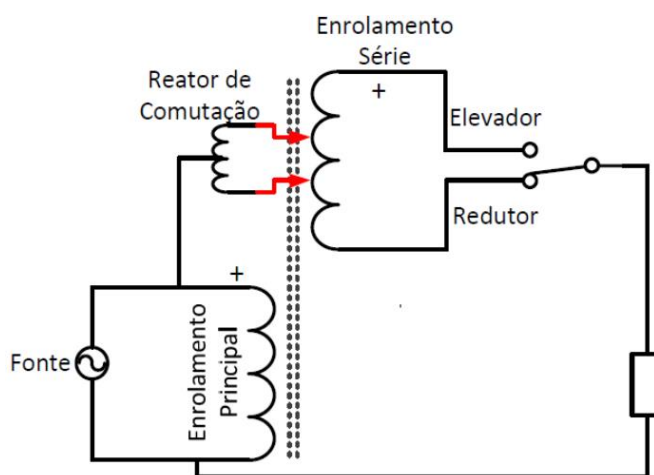


Fonte: DOS REIS (2013)

É importante ressaltar que os enrolamentos de taps da Figura 3 e Figura 4 estão bobinados sobre o mesmo núcleo magnético que os enrolamentos de excitação.

Através da análise dos modelos anteriores é possível identificar a chave seletora em operação no regulador de tensão na Figura 5. A polaridade da bobina série é responsável por operar o equipamento na configuração de redutor ou elevador de tensão. Sendo assim, através de uma chave seletora é possível operar nesses dois modos (DOS REIS, 2013).

Figura 5 - Diagrama esquemático do regulador de tensão do tipo A geral, na figura Enrolamento Principal equivale ao Enrolamento de Excitação



Fonte: DOS REIS (2013)

Dessa forma, é possível subtrair ou adicionar a tensão do enrolamento série, resultando na operação como redutor ou elevador da tensão na saída.

### 2.1.3 Chaves comutadoras

A tecnologia dos comutadores eletrônicos de taps vem sendo desenvolvida e utilizada ao redor do mundo há várias décadas (HANDLEY; REDFERN; WHITE, 2001). Esses equipamentos foram se modificando para atender normas gerais de operação. Algumas dessas regras são estabelecidas por órgãos internacionais (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, 2017). A ANEEL é o órgão responsável pela regulamentação da qualidade de energia e estabelecer os limites dos níveis de tensão. Os reguladores de tensão são construídos seguindo a mesma metodologia em todo o mundo, em geral as resoluções internacionais e nacionais concordam entre si (DOS REIS, 2013).

Durante a operação dos reguladores de tensão a troca de taps resulta em arcos elétricos que deterioram os contatos dos comutadores e contaminam o óleo isolante (FAIZ; SIAHKOLAH, 2002). Dessa forma, torna-se necessário a manutenção periódica dos comutadores mecânicos (MARTINEZ; FERNANDEZ; CANALES, 2013). A manutenção desses equipamentos é considerada crítica, sendo ela um fator preponderante para o desempenho, confiabilidade, tempo, e custos de operação (PECK, 1995). Além disso, segundo (HANDLEY; REDFERN; WHITE, 2001), as causas de degradação do regulador de tensão podem ser:

- ✓ Ambientais - em decorrência à exposição à chuva e sol;
- ✓ “Stresses” térmicos, causados em decorrência dos ciclos de operação de carga (*load cycling*);
- ✓ Umidade interna e perda de óleo;
- ✓ Mecânicas, causadas por falhas no sistema de ventilação, motor e outros elementos que formam o conjunto eletromecânico do comutador de *taps*.

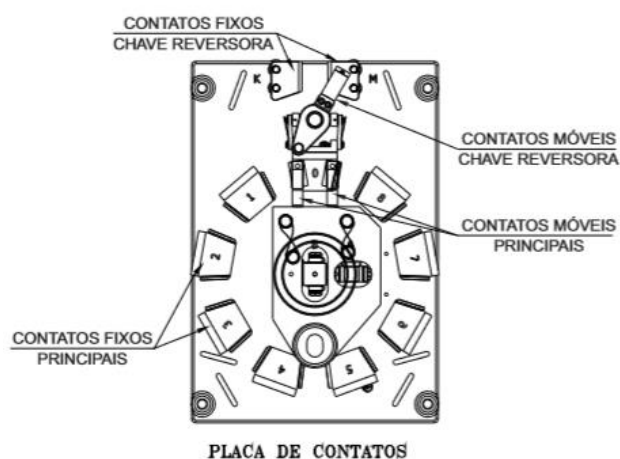
Dentre as falhas citadas, as falhas mecânicas podem ser consideradas as mais graves (SPENCE, 1995).

### 2.1.4 Comutadores Toshiba

Os comutadores modelos CR, da fabricante Toshiba, são comutadores rotativos com acionamento por molas que são carregadas por um acionador motorizado. O mecanismo deste comutador apresenta funcionamento simples, com poucas peças móveis, além de ser muito seguro. O acionamento do motor é independente, ou seja, garante que uma vez iniciado o deslocamento dos contatos móveis não há maneira de ser interrompido (TOSHIBA, 2015).

O comutador CR dispõe de contatos para 8 taps, além do contato “*by-pass*” (posição nominal), dispostos de forma circular conforme a Figura 6.

Figura 6 - Vista interna da placa de contatos (posição nominal)



Fonte: TOSHIBA (2015)

Os dois contatos móveis principais são compostos por dois pares de contatos, acionados um ao outro mecanicamente e independentes eletricamente, comutam-se entre estes contatos fixos em sequência e um por vez, perfazendo assim um total de 16 posições além do “*by-pass*” (ou neutra / posição nominal), conforme apresenta a Figura 6.

Uma chave inversora de polaridade conectada ao contato “*by-pass*”, através de escovas, é responsável por permitir o câmbio entre as extremidades do enrolamento de taps ampliando assim o número de posições em mais 16 níveis de tensão. Cabe ressaltar que esta chave inversora só pode ser movimentada quando os contatos móveis principais se encontrarem posicionados sobre o contato “*by-pass*”, o

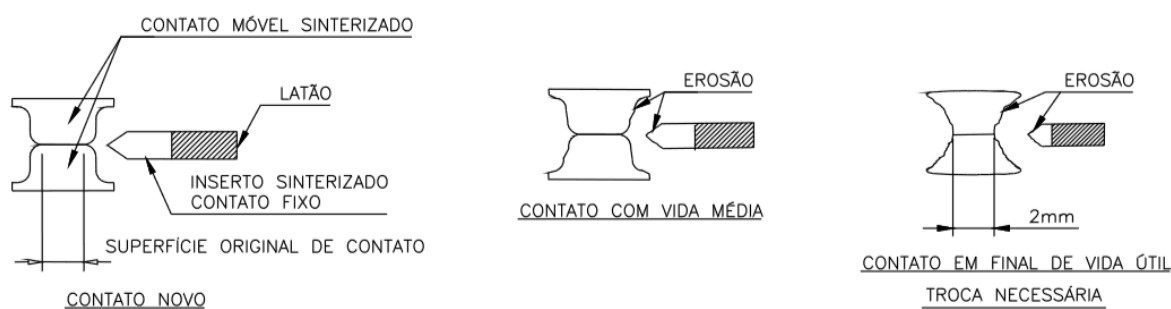
que é garantido pelo mecanismo de acionamento que possui um batente apropriado para essa condição.

O comutador da Toshiba possui um contador de operações visando monitorar a vida útil em número de operações do comutador. Através de um contato que fecha a cada operação do comutador, em qualquer dos sentidos, é possível realizar a contagem dos acionamentos.

#### 2.1.4.1 Erosão dos contatos dos comutadores

Geralmente a erosão dos contatos está em função de muitas variáveis tais como: tensão de “tap”, fator de potência, projeto da bobina de “taps”, número de operações, corrente de carga, projeto do reator, tempo de comutação, folgas dos mecanismos móveis e alinhamento dos contatos. A erosão dos contatos ocorre na maioria das vezes conforme mostra a Figura 7 (TOSHIBA, 2015).

Figura 7 - Desgaste dos contatos móveis



Fonte: TOSHIBA (2015)

Geralmente os contatos fixos têm menor desgaste que os contatos móveis, porém ao se efetuar a troca de um contato é recomendada a troca de todo o conjunto de contatos fixos, móveis e escovas. A troca parcial de contatos fixos, móveis ou escovas poderá provocar um desalinhamento acentuado do comutador, desgaste prematuro aos demais componentes móveis, além de gerar aberturas nos alinhamentos dos contatos, elevando a resistência ôhmica do conjunto, podendo comprometer a elevação de temperatura dos contatos (TOSHIBA, 2015).

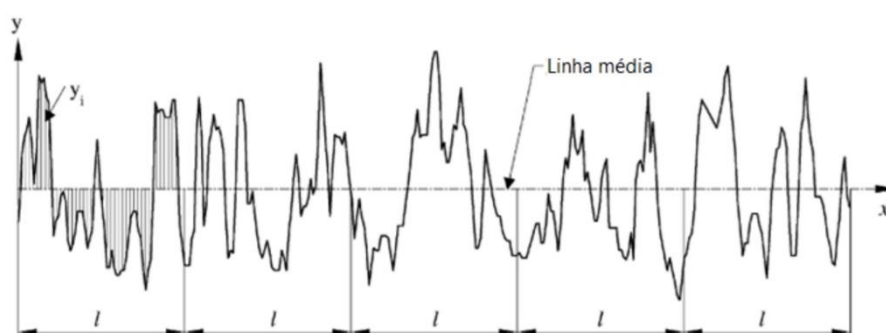
## 2.2 PARÂMETROS DE RUGOSIDADE

A avaliação de rugosidade de uma superfície pode ser considerada a atribuição de um valor numérico ou parâmetro que irá fornecer uma informação expressiva e aceitável a respeito da superfície. A rugosidade de uma superfície pode ser descrita através de uma grande variedade de parâmetros, cada um destes descreve uma determinada característica da superfície (REZENDE, 2006). A Norma NBR ISO 4287:2002 define os parâmetros de rugosidade  $R_a$ ,  $R_z$  e  $R_{máx}$  (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002).

### 2.2.1 Rugosidade média ( $R_a$ )

A média aritmética do perfil é o parâmetro de rugosidade mais usado no controle de qualidade em geral e é conhecido também por CLA (*Center Line Average*) ou linha média central. Define-se esse parâmetro como a média absoluta das alturas das irregularidades ao longo do perfil e como a linha média de todo o perfil, conforme apresenta a Figura 8 (GADELMAWLA *et al.*, 2002).

Figura 8 - Definição da média aritmética do perfil ( $R_a$ )



Fonte: GADELMAWLA *et al.* (2002)

Esse parâmetro oferece uma descrição geral dos valores das alturas das irregularidades. Contudo, esse cálculo não informa acerca do comprimento de onda do perfil, além disso, não é sensível a pequenas variações no perfil. Este parâmetro é em relação à área entre o perfil de rugosidade e a linha média (CASTRO, 2012). Pode-se calcular ainda a integral dos valores absolutos das amplitudes do perfil de rugosidade dentro de um comprimento de amostragem (GADELMAWLA *et al.*, 2002).

$R_a$  pode ser expresso de maneira analítica através da expressão na Equação (1).

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad [\mu m] \quad (1)$$

Sendo:

$l$  = comprimento avaliado [mm];

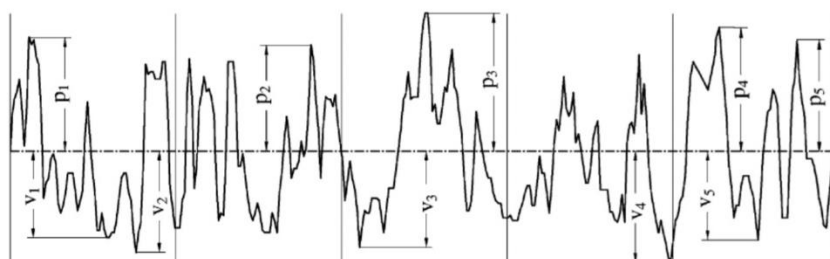
$y(x)$  = distância de cada ponto até a linha de centro [ $\mu m$ ].

O parâmetro  $R_a$  não é muito sensível a algum defeito individual maior, em razão de medir apenas uma média de picos e vales. Portanto, este parâmetro é muito utilizado para monitorar um processo de produção onde mudanças graduais possam ocorrer no acabamento superficial (CASTRO, 2012).

### 2.2.2 Rugosidade de profundidade média ( $R_z$ )

A distância considerada entre o pico mais alto e o vale mais profundo de cada seção de amostragem do perfil de rugosidade é chamada de  $R_z$  (GADELMAWLA *et al.*, 2002). A Figura 9 apresenta a definição de  $R_a$ .

Figura 9 - Rugosidade de profundidade média  $R_z$ , definição do parâmetro de distância máxima entre picos e vales



Fonte: GADELMAWLA *et al.* (2002)

Sendo:

$v$  = vale [ $\mu m$ ];

$p$  = pico [ $\mu m$ ].

Conforme a norma NBR 4287:2002, o comprimento de amostragem (*cut-off*) padrão para cálculos dos parâmetros de rugosidade pode ser dividido em cinco seções (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002). Para cada seção calcula-se a distância vertical entre o maior pico (*p*) e o vale mais profundo (*v*), através dos cinco valores de distância por comprimento de amostragem. Finalmente, calcula-se  $R_z$  por meio da Equação (2).

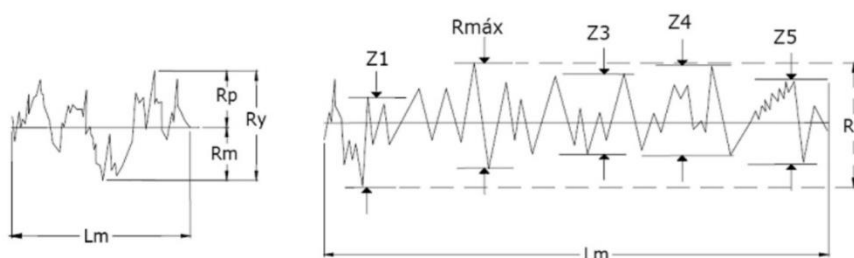
$$R_z = \frac{(p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) - (v_1 + v_2 + v_3 + v_4 + v_5)}{5} [\mu m] \quad (2)$$

A utilização de  $R_z$  pode ser indicada para casos em que pontos isolados influenciam a aplicabilidade do produto, por exemplo, superfícies em contato e com deslizamento como exemplo a estampagem. O parâmetro  $R_z$  possui algumas vantagens tais como: a facilidade de obtenção através de gráficos e à informação sobre distribuição de pontos acentuados. Contudo, essa consideração pode fornecer uma parte pequena da superfície total de análise e ainda não é capaz de possibilitar informações à respeito da forma e distância entre as ranhuras (MACHADO, 2009).

### 2.2.3 Rugosidade máxima ( $R_{m\acute{a}x}$ )

A rugosidade máxima é o maior valor das rugosidades parciais  $Z_i$ , que se apresenta no percurso de medição  $L_m$  da Figura 10. Para medição da rugosidade da superfície um parâmetro semelhante ao  $R_{m\acute{a}x}$  é indicado através da norma DIN 4762. Esse parâmetro corresponde à máxima distância pico-vale, dentro do comprimento da avaliação e pode ainda ser designado por  $R_y$ .

Figura 10 - Perfil evidenciando  $R_{m\acute{a}x}$  e  $R_y$



Fonte: PALMAS (2009)

## 2.3 ÓLEO ISOLANTE EM TRANSFORMADORES

A função do óleo isolante em transformadores e reguladores de tensão é a de garantir isolamento elétrico entre suas partes energizadas e permitir também a refrigeração interna destas partes através da transferência de calor. Além disso, o óleo isolante ocupa o espaço do possível ar existente entre aquelas partes proporcionando assim alta rigidez dielétrica e baixa condutividade elétrica (ARANTES, 2005).

Diferentes meios isolantes de interrupção e refrigeração são comumente usados em equipamentos elétricos, podendo ser gasosos (ar, hexafluoreto de enxofre ou vácuo), líquidos (OMI e silicone), e sólidos (resinas epóxi ou fibra de vidro). Desde 1890, vem sendo utilizado em transformadores o OMI (Óleo Mineral Isolante), além disso, continua sendo o dielétrico líquido mais utilizado em transformadores em associação com o papel isolante (STOCCO, 2009).

A manutenção é um mecanismo que visa conservar o equipamento, tanto estrutural quanto funcional. Em se tratando de transformadores de energia elétrica a manutenção se aplica através de suas componentes corretiva, preventiva e preditiva, visando garantir que o equipamento mantenha uma depreciação natural a sua vida útil, bem como garanta o bom fornecimento de energia elétrica para os equipamentos alimentados por ele (ÉLINE, 2018).

O sistema de isolamento de transformadores passa por vários processos de desgaste e de envelhecimento. As alterações no sistema isolante ocorrem em decorrência dos efeitos de fadiga térmica, química, elétrica e mecânica, tais como, pontos quentes, sobreaquecimentos, sobretensões e vibração. Esses efeitos, devem ser monitorados para garantir a eficiência do equipamento, permitindo intervenções de manutenção preventiva e preditiva, visando evitar paradas e danos aos equipamentos (TULIO, 2008).

### 2.3.1 Ensaios físico-químicos do óleo isolante

A análise físico-química de óleos isolantes é regulamentada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da NBR 10576:2017. Ela permite o prolongamento da vida útil dos equipamentos elétricos, visto que oferece a

possibilidade do controle da qualidade do óleo isolante (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017).

Na sequência serão descritos os ensaios físico-químicos principais para monitorar a qualidade do óleo isolante de transformadores.

### **2.3.2 Índice de neutralização – ASTM D 974**

O índice de neutralização é normatizado pela ASTM D 974, é a medida da quantidade de hidróxido de potássio (KOH) necessária para neutralizar os constituintes do óleo. Este índice representa uma medida indireta do grau de oxidação do óleo, verificam-se quantos miligramas de KOH são necessários para cada grama de óleo (PAIXÃO, 2006).

### **2.3.3 Tensão interfacial – ABNT NBR 6234**

No decorrer do funcionamento do transformador na rede elétrica, o óleo isolante do equipamento passa por um processo de oxidação, permitindo a formação de compostos polares como aldeídos, cetonas e ácidos. Dessa forma, esses compostos diminuem a tensão na interface água-óleo, em decorrência de sua grande interação com a água (BATISTA, 2005).

A tensão interfacial é normatizada pela ABNT NBR 6234:2015, analisando a superfície de separação entre o óleo e a água se forma uma força de atração entre as moléculas dos dois líquidos, sendo medida em N/m e chamada de tensão interfacial. Dessa forma, é possível prever com bastante antecedência o início da deterioração do óleo através da diminuição da tensão interfacial (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015a; CARDOSO, 2005).

### **2.3.4 Estabilidade à oxidação – IEC 74**

A estabilidade à oxidação é regida pela norma IEC 74, ela avalia a resistência dos óleos minerais isolantes a oxidação, quando submetidos a condições de envelhecimento acelerado (ÉLINE, 2018).

### **2.3.5 Rigidez dielétrica**

Rigidez dielétrica, expressa em kV, é a máxima tensão aplicável antes da ocorrência de descargas disruptivas em uma camada de óleo isolante existente entre dois eletrodos. Ela permite medir a capacidade desse líquido isolante quanto a sua resistência ao impacto elétrico, ou seja, quanto a diferença de tensão entre dois condutores (CARDOSO, 2005).

A rigidez dielétrica é uma medida indireta das impurezas contidas no líquido, tais como: água, fibras, celulósicas, partículas, entre outros. Dessa forma, seu valor é indicativo da presença de água e partículas sólidas em equipamentos em operação, além de grande valia quanto a avaliação da função isolante do óleo, visto que a água e as partículas sólidas causam a redução da rigidez dielétrica (BATISTA, 2005).

### **2.3.6 Teor de água**

O teor de água é um indicativo da medida direta da quantidade de água presente no óleo isolante, expresso em mg/kg. Pequenas concentrações de umidade presentes no óleo já são capazes de prejudicar suas características isolantes, visto que diminuem sua rigidez dielétrica. Além disso, a presença de água atua como agente catalisador na degradação do papel isolante, resultando em menor vida útil ao equipamento (BATISTA, 2005).

### **2.3.7 Fator de potência**

O fator de potência (ou perdas dielétricas), expresso em %, fornece o índice de perdas elétricas em um líquido isolante no momento em que este é submetido a um campo elétrico alternado. Essas perdas possuem relação direta com a quantidade de energia dissipada pelo material na forma de calor (BATISTA, 2005).

O equipamento em operação com o passar do tempo terá valores de fator de potência cada vez maiores, conforme a sua deterioração vai avançando, portanto, valores elevados em equipamentos com elevado tempo de serviço não são garantia de condições inadequadas de operação.

### 2.3.8 Óleo mineral isolante (OMI)

Bilhões de litros de óleo estão em uso em equipamentos elétricos espalhados pelo mundo. A popularidade do Óleo Mineral Isolante (OMI) é vista em função da sua disponibilidade e seu baixo custo. Há mais de cem anos este mineral, proveniente do refino do petróleo, tem sido usado como líquido isolante em transformadores, devido também a sua excelência como meio de isolamento e resfriamento (STOCCO, 2009).

O OMI utilizado em equipamentos elétricos é obtido através da destilação do petróleo e corresponde à fração obtida entre 300 e 400 °C. Este destilado pode ser de origem parafínica (óleos empregados na fabricação de lubrificantes) ou naftênica (óleos com menor quantidade de compostos parafínicos em sua composição), sendo os parafínicos de maior predominância (LIPSHTEIN; SHAKHNOVICH, 1970).

A formação da estrutura deste mineral é resultado de uma mistura de compostos, em sua maioria moléculas de carbono e hidrogênio (hidrocarbonetos) e, em pequenas quantidades, compostos que apresentam nitrogênio, enxofre e oxigênio (WILSON, 1980).

Durante a operação dos transformadores e reguladores de tensão, o OMI envelhece e mudanças consideráveis nas suas propriedades físicas, químicas e elétricas ocorrem. Dessa forma, como consequência são apresentados alguns efeitos indesejados, tais como:

- Deterioração das propriedades isolantes do óleo;
- Aceleração do processo de degradação da celulose;
- Formação de borra (material que se deposita na parte ativa dos transformadores, dificultando a transferência de calor).

Devido as mudanças de características do óleo isolante, é importante que os procedimentos de manutenção levem em conta reações de oxidação dos OMIs que ocorrem durante a operação normal dos equipamentos. Sabendo que, este óleo isolante é constituído basicamente por compostos químicos da classe dos hidrocarbonetos, portanto seu comportamento com relação à oxidação será determinado por estes compostos. Sob a ação do calor os hidrocarbonetos reagem com o oxigênio dissolvido no óleo (STOCCO, 2009).

A última etapa da reação de oxidação do OMI é responsável por formar produtos poliméricos, extremamente prejudiciais à operação do equipamento. Devido à alta massa molar desses poliméricos são sólidos que se depositam sobre partes importantes dos equipamentos, impedindo a transmissão de calor. Além disso, por serem oxigenados, tendem a acumular água (MILASCH, 1984).

Durante o tempo de operação dos transformadores é comum que sejam gerados gases e estes permaneçam dissolvidos no óleo. A cromatografia em fase gasosa é usada então para analisar a concentração dos vários gases presentes, visando à emissão de diagnósticos de falhas, conhecida por DGA (*Dissolved Gas Analysis*) (ARANTES, 2005).

### **2.3.9 Óleo vegetal isolante (OVI)**

Óleos vegetais são obtidos sempre a partir de grãos, através de processos de descortificação, descascamento, trituração, laminação, cozimento, prensagem mecânica ou extração por solvente. Dessa forma, tem-se óleo bruto ao final do processo. Então, o óleo passa pelos processos de degomagem, neutralização, branqueamento e desodorização, obtendo-se o óleo refinado (MORETTO; FETT, 1998).

Por volta de 1970 o OVI começou a ser utilizado na substituição do OMI em transformadores em operação, nessa época foi realizado então o primeiro teste em dois transformadores de energia elétrica. Experimentos utilizando óleos vegetais como dielétrico foram realizados na mesma época da realização dos primeiros testes com óleo mineral. No entanto, os óleos vegetais demonstraram ser menos atrativos que o mineral devido à sua estabilidade à oxidação, ponto de fluidez, permissividade e viscosidade distintas (MCSHANE; LUKSICH; RAPP, 2003).

Por volta de 1999 foram desenvolvidos óleos vegetais apropriados para uso em equipamentos elétricos, impulsionados principalmente por questões ambientais. O primeiro fluido comercial lançado era a base de óleo de girassol, obtido a partir de sementes geneticamente selecionadas (OOMMEN, 2002).

Equipamentos isolados com OVI devem ter inseridos em seus ensaios de manutenção preventiva ensaios de viscosidade, índice de neutralização e o fator de perdas dielétricas a 90 °C são parâmetros importantes no monitoramento do

envelhecimento do óleo vegetal (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, 2008).

## 2.4 DESGASTE

É possível considerar que o termo desgaste é um dano progressivo de perda de material da superfície de um corpo em consequência do movimento relativo de um outro corpo sobre o mesmo (ZUM GAHR, 1987).

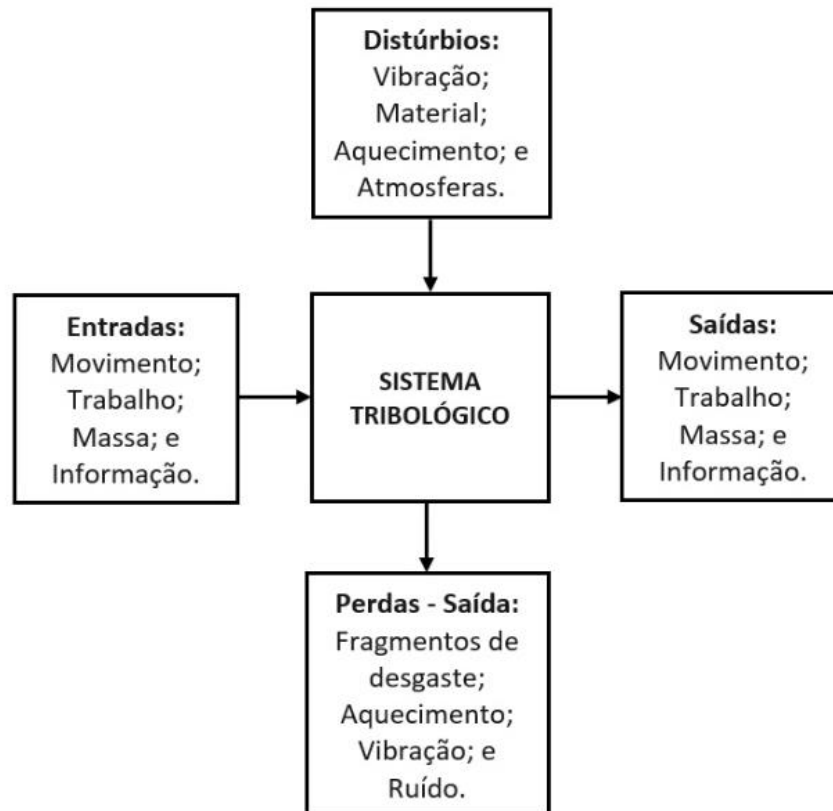
Normalmente o desgaste promove perda de material devido ao movimento, no entanto, nem sempre ocorre a perda de material de uma superfície, por exemplo a mudança na geometria ou nas dimensões de um objeto podem ocorrer, resultantes de uma deformação plástica. O desgaste é um dos fatores que limitam a vida útil e a performance de um componente ou sistema (BAYER, 2004).

### 2.4.1 Tribologia

Tribologia é a ciência e tecnologia de superfícies que interagem, abrangendo o estudo do atrito, do desgaste, da lubrificação e das irreversibilidades. A palavra Tribologia é derivada das palavras gregas *tribos* que significa atrito e *logos* que significa estudo, ou seja, estudo do atrito (HUTCHINGS, 1992).

O sistema tribológico está fundamentado na transmissão e/ou transmissão de entradas em saídas, as quais são utilizadas tecnologicamente. A Figura 11 descreve o sistema tribológico em geral. A relação entre as entradas e saídas pode ser considerado como funções técnicas do tribossistema, de maneira geral os sistemas são formados por movimento, trabalho, massa e informação. Variáveis de entrada como vibrações, tipo de material, aquecimento e atmosfera, pode-se ter fragmentos de desgaste, aquecimento, vibração e ruído como variáveis de saída (CZICHOS; MØLGAARD, 1977).

Figura 11 - Entradas e saídas do sistema tribológico



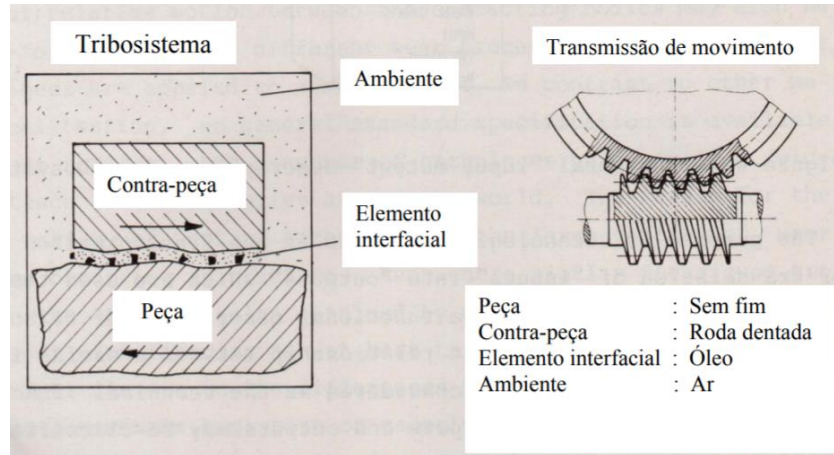
Fonte: CZICHOS; MØLGAARD (1977)

Usualmente um sistema tribológico é constituído de quatro elementos:

- Corpo sólido;
- Contra peça;
- Elemento interfacial;
- Ambiente.

A contra peça pode ser um sólido, um líquido, um gás ou mistura destes. Já os lubrificantes e poeira nos estados sólidos, líquidos, gasosos ou uma combinação entre estes, atuam como elemento interfacial. O elemento interfacial pode estar ausente em casos especiais. A Figura 12 mostra de forma simplificada a estrutura de um tribossistema (CZICHOS; MØLGAARD, 1977).

Figura 12 - Representação esquemática dos elementos do tribossistema



Fonte: DIN (1979)

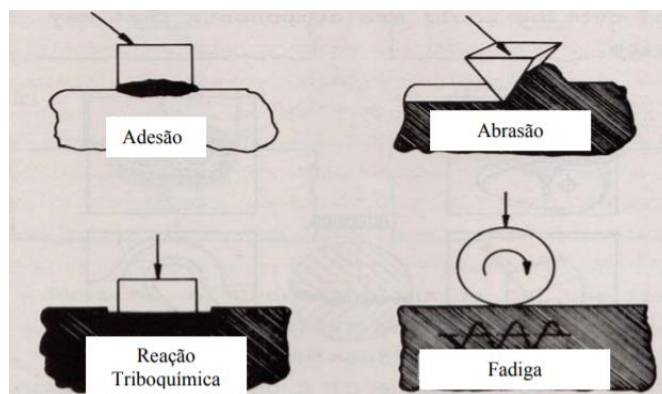
A estrutura do tribossistema é determinada pelos elementos, suas propriedades e interações entre eles.

#### 2.4.2 Mecanismos de Desgaste

Na literatura existem diferentes classificações para desgaste, se sabe que ele pode ocorrer como perda de material ou dano superficial. Dessa forma, a discussão sobre o tema se torna complicada em decorrência do grande número de termos possíveis para descrever o processo (LUDEMA, 1981).

De acordo com a norma DIN 50320 (DIN 50320, 1979) os tipos de desgaste são classificados em quatro tipos, conforme ilustrado na Figura 13, podendo haver uma combinação entre os mesmos.

Figura 13 - Descrição esquemática de quatro principais mecanismos de desgaste



Fonte: DIN (1979)

Conforme a norma DIN 50320 (DIN 50320, 1979) os quatro mecanismos básicos de desgaste são:

- ✓ Desgaste Adesivo ou por deslizamento: ocorre quando as superfícies deslizam uma contra a outra. Deformações plásticas, adesão e o crescimento das junções (espécie de soldagem localizada) ocorrem em decorrência de altas pressões localizadas nas asperezas;
- ✓ Desgaste por Fadiga superficial: carregamentos alternados na superfície sólida são responsáveis pela formação de trincas subsuperficiais no material;
- ✓ Desgaste por Reação Triboquímica: ocorre através do contato entre duas superfícies sólidas, que reagem com o meio, que pode ser gasoso ou líquido, ocorre a formação de produtos de reação química como resultado de interações químicas entre elementos do tribossistema iniciado por ação tribológica;
- ✓ Desgaste Abrasivo: é caracterizado pela remoção de material devido a arrancamento.

### **2.4.3 Desgaste abrasivo**

A interação mecânica de saliências grosseiras ou partículas não metálicas contra as superfícies de trabalho, provocando perda de massa por corte ou por arrancamento, causam o desgaste por abrasão. Um fragmento de desgaste de material de alta dureza ou um mineral como a sílica são exemplos destas partículas. Protuberâncias, como a rugosidade superficial, podem agir como partículas de alta dureza caso esta superfície apresente maior dureza que a contra peça (SUSKI, 2004).

O desgaste abrasivo pode também ser classificado como o deslocamento de material causado pela presença de partículas duras, de partículas duras entre, ou embebidas em uma ou ambas as superfícies em movimento relativo, ou pela presença de protuberâncias duras entre uma ou ambas as superfícies em movimento relativo (PETERSON; WINER, 1980).

De acordo com a maneira com que as partículas duras e/ou protuberâncias duras se apresentam, pela definição (ZUM GAHR, 1987), o desgaste abrasivo pode ser classificado em:

- ✓ Abrasão a dois corpos: quando é causado por protuberâncias duras ou partículas duras embebidas na superfície de dois corpos;
- ✓ Abrasão a três corpos: quando as partículas podem se mover livremente (rolar ou deslizar) entre as superfícies de contato.

Os outros mecanismos básicos de desgastes não serão abordados no texto, pois não serão utilizados neste trabalho.

## 2.5 ESTADO DA ARTE DE DESGASTE EM COMUTAÇÕES DE TAPS DE REGULADORES DE TENSÃO E ÓLEO ISOLANTE

Regular os níveis de tensão é uma questão importante nas redes de distribuição, o número de equipamentos controladores de tensão da linha é cada vez maior, principalmente no que diz respeito aos reguladores de tensão (BEDAWY; YORINO; MAHMOUD, 2018). Além disso, a regulação da tensão torna-se cada vez mais complexa, visto a crescente demanda e os requisitos para melhoria da qualidade de energia e geração (QUEVEDO, 2013).

A aplicação de reguladores de tensão nos sistemas de distribuição de energia elétrica teve início na década de 40, inicialmente nos Estados Unidos da América (EUA), devido sua grande extensão territorial com centros de consumo distantes das plantas de geração e com o surgimento de muitos aparelhos eletroeletrônicos sensíveis às oscilações de tensão. Houve então, a necessidade de investir fortemente na instalação de reguladores de tensão por conta de reclamações dos consumidores, que passaram a exigir boa qualidade no nível de tensão da rede elétrica. É possível inferir nesse contexto que o Brasil possui muita semelhança aos EUA, sendo assim torna-se viável a utilização de reguladores de tensão em solo brasileiro (DOS REIS, 2013).

Estudos indicam que a presença de partículas sólidas em suspensão ou imersas no óleo isolante de transformadores, bem como a presença de água livre em suspensão no óleo, diminui acentuadamente sua rigidez dielétrica (ÉLINE, 2018).

Dessa forma, quanto maior for a quantidade de partículas sólidas em suspensão menor será a rigidez dielétrica. Fibras celulósicas em suspensão no óleo com a água podem reduzir o valor da rigidez dielétrica em até 90%, enquanto que no óleo sem água essa redução é de 20%. A água e o calor são os dois maiores inimigos da isolamento de um transformador, a deterioração das isolações sólidas dá origem a água e outros produtos que resultam no enfraquecimento mecânico e reduzem a rigidez dielétrica do equipamento. Essas alterações podem criar condições propícias para a formação de descargas parciais que levam à ionização e condução (CLARK, 1940; LEWAND, 2002).

De modo geral os contatos móveis do comutador, tal como o óleo isolante, representam a principal razão de falhas de operação do equipamento (MAMEDE FILHO, 2005). Durante a mudança de posição do tap surgem arcos elétricos (FAIZ; SIAHKOLAH, 2002) que deterioram os contatos dos comutadores e contaminam o óleo isolante. Estes dois eventos criam a necessidade de manutenção periódica dos comutadores mecânicos (MARTINEZ; FERNANDEZ; CANALES, 2013). Acompanhar de perto o desgaste das chaves mecânicas do comutador e a característica do óleo isolante é de grande importância para manter o bom funcionamento do regulador de tensão.

No caso dos reguladores de tensão percebe-se que as manobras realizadas pelo comutador de tap oferecem arcos voltaicos, submersos no óleo isolante, bem como desgaste mecânico dos contatos móveis do comutador. Estima-se que o desgaste dos contatos propicie o aparecimento de resíduos metálicos no óleo isolante, somados a própria deterioração das isolações sólidas do equipamento e dos arcos decorrentes das manobras, reduzindo assim a rigidez dielétrica do óleo isolante, além de maior desgaste dos contatos móveis.

Estima-se ainda que a realização de análises das características do óleo em diferentes períodos, e após “n” manobras do comutador, podem indicar uma leitura dos níveis de desgaste dos contatos móveis do comutador através do número de partículas sólidas imersas no óleo. Dessa maneira, seria possível prever um acompanhamento dos níveis de rigidez dielétrica do regulador de tensão e a intensidade do desgaste dos contatos móveis através do acompanhamento dos níveis de partículas sólidas imersos no óleo, além de permitir a criação de medidas preditivas de controle da manutenção do equipamento.

A erosão dos contatos (desgaste) é função de muitas variáveis, como por exemplo a tensão de tap e a corrente de carga. Ao efetuar a troca de um contato é recomendada a troca de todo o conjunto (contatos fixos, móveis e escovas), apesar dos contatos fixos terem menor desgaste que os móveis esse procedimento evita um desalinhamento acentuado do comutador e desgaste prematuro dos demais componentes móveis (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, 1990).

## 2.6 PESQUISAS RECENTES

Buscando a nível acadêmico, não são encontrados trabalhos que abordem a análise *in situ* de reguladores de tensão e muito menos pesquisas que busquem relacionar de maneira direta a análise de comutadores de derivação e análise de óleo isolante ao mesmo tempo. Além disso, grande parte das pesquisas ao entorno deste assunto estão direcionadas a avaliação do óleo isolante de transformadores de energia elétrica, em função do transformador ser um equipamento com maior utilização e disseminação quando comparado aos reguladores de tensão, sem contar que o transformador é também muito parecido com os reguladores de tensão.

A Tabela 1 apresenta alguns trabalhos encontrados acerca de reguladores de tensão e transformadores que mais se aproximam aos assuntos abordados nesse trabalho.

Tabela 1 - Trabalhos publicados sobre transformadores e reguladores de tensão

<b>Autores</b>	<b>Título (Periódico)</b>	<b>Proposta do trabalho</b>
(CHEN <i>et al.</i> , 2018)	<i>Mechanical Fault Diagnosis of On-load Tap Changer of Power Transformer by Clustering Algorithm</i>	Diagnóstico de falha mecânica do comutador de derivação em carga do transformador de potência por algoritmo de agrupamento
(SECIC; KUZLE, 2017)	<i>On the novel approach to the On-Load Tap-Changer (OLTC) diagnostics based on the observation of fractal properties of recorded vibration fingerprints</i>	Nova abordagem para o diagnóstico de OLTCs com base na observação de propriedades fractais de impressões digitais de vibração registradas

Fonte: Do autor (2020)

Tabela 1 - Continuação

<b>Autores</b>	<b>Título (Periódico)</b>	<b>Proposta do trabalho</b>
(LAZARESCU <i>et al.</i> , 2017)	<i>A new approach to predictive maintenance of high voltage switching devices</i>	Uma nova abordagem para a manutenção preditiva de dispositivos de comutação de alta tensão
(DE FARIA; COSTA; OLIVAS, 2015)	<i>A review of monitoring methods for predictive maintenance of electric power transformers based on dissolved gas analysis</i>	Uma revisão dos métodos de monitoramento para manutenção preditiva de transformadores de energia elétrica com base na análise de gás dissolvido
(SECIC; KR PAN; KUZLE, 2019)	<i>Vibro-Acoustic Methods in the Condition Assessment of Power Transformers: A Survey</i>	Pesquisa sobre métodos vibro-acústicos na avaliação da condição de transformadores de potência
(KAMISHIMA <i>et al.</i> , 2012)	<i>Change in corrosivity of insulating oil caused by oxidative deterioration of the oil</i>	Alteração na corrosividade do óleo isolante em decorrência da deterioração oxidativa do óleo isolante
(SPOHNER, 2016)	Study of the dielectric properties of vegetable oils and their constituents	Estudo das propriedades dielétricas de óleos vegetais
(DE OLIVEIRA FERNANDES <i>et al.</i> , 2017)	<i>Ageing performance of Brazilian paraffinic oil and naphthenic insulating oil</i>	Análise do desempenho de óleo parafínico brasileiro e óleo isolante naftênico em transformadores de energia
(KHAYAM <i>et al.</i> , 2014)	<i>Partial discharge characteristics and dissolved gas analysis of vegetable oil</i>	Análise de características de descarga parcial e análise de gás dissolvido de óleo isolante vegetal
(MOHAMMED <i>et al.</i> , 2015)	<i>Studies on critical properties of vegetable oil based insulating fluids</i>	Estudo sobre o comportamento dos fluidos isolantes à base de óleo vegetal quanto as suas propriedades críticas
(PERKASA <i>et al.</i> , 2012)	<i>Investigating bubble formation in vegetable and mineral oil impregnated transformer paper insulation systems</i>	Investigação sobre a formação de bolhas em sistemas de isolamento de papel de transformador impregnados com óleo vegetal e mineral
(AYALEW <i>et al.</i> , 2018)	<i>Dissolved Gas Analysis (DGA) of arc discharge fault in transformer insulation oils (Ester and Mineral Oils)</i>	Análise de gases dissolvidos da falha de descarga do arco em óleos de isolamento de transformadores
(BHUYAN <i>et al.</i> , 2014)	<i>Analysis of the arcing process in on-load tap changers by measuring the acoustic signature</i>	Análise do processo de arco nos comutadores de derivação em carga, através da assinatura acústica

Fonte: Do autor (2020)

Tabela 1 - Continuação

<b>Autores</b>	<b>Título (Periódico)</b>	<b>Proposta do trabalho</b>
(CASTRO <i>et al.</i> , 2017)	<i>Simulation and measuring transients in On-Load Tap Changers</i>	Simulação e medição de transientes em comutadores de derivação em carga
(LIN, 2017)	<i>A practical method estimates on - load tap changers operation status</i>	Um método prático estima o status de operação dos comutadores sob carga
(BANGASH; FARRAG; OSMAN, 2015)	<i>Smart Control of on Load Tap Changer deployed in Low Voltage Distribution Network</i>	Controle inteligente do comutador de carga em carga implantado na rede de distribuição de baixa tensão
(JAHROMI; HOSSEINKHANLOO; LAMARE, 2018)	<i>Under Load Tap Changer Diagnostics Based on Transformer DGA and DC Resistance Tests</i>	Diagnóstico do comutador de derivação de carga com base nos testes de resistência DGA e CC do transformador
(BEDAWY; YORINO; MAHMOUD, 2018)	<i>Management of voltage regulators in unbalanced distribution networks using voltage/tap sensitivity analysis</i>	Gerenciamento de reguladores de tensão em redes de distribuição desbalanceadas usando análise de sensibilidade de tensão/tap
(JIANG <i>et al.</i> , 2015)	<i>A modular three-phase voltage regulator with fictitious dc-link</i>	Um regulador de tensão trifásico modular com ligação fictícia

Fonte: Do autor (2020)

As abordagens desta seção permitem afirmar que a busca por conhecimentos relacionados com as características dos óleos isolantes de transformadores é cada vez mais bem-vinda em um cenário mundial, onde este equipamento é encontrado em grande escala. Dessa forma, por si só, o desenvolvimento da proposta apresentada se torna motivador, haja visto, pela pesquisa de anterioridade, que os indicadores demonstram que nenhuma abordagem se aprofunda na linha de pesquisa contatos de comutação e de óleos isolantes de reguladores de tensão. Aliado a essa certeza, também é inquestionável a necessidade de indicadores que permitam correlacionar o desgaste do óleo isolante em conjunto com o desgaste dos contatos móveis dos reguladores e com o número de manobras de comutação de taps.

Conforme apresentado na Tabela 1, não há estudos que seguem a mesma linha abordada neste trabalho, ou seja, no desenvolvimento de análises que correlacionem o desgaste dos contatos móveis e do óleo isolante de reguladores de tensão. Enquanto as pesquisas de forma geral abrangem os estudos voltados apenas

aos transformadores de energia, os estudos neste tema avaliam outras abordagens no uso dos óleos isolantes, além do desgaste mecânico dos contatos móveis dos reguladores e a relação direta do número de manobras de comutação com esses parâmetros.

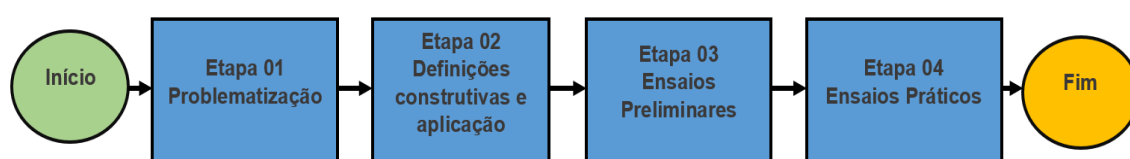
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo apresenta-se a metodologia de desenvolvimento do projeto através da abordagem detalhada de cada etapa.

#### 3.1 METODOLOGIA APLICADA

A presente pesquisa será conduzida através do desenvolvimento de ensaios e análise comparativa dos resultados encontrados para comprovação das hipóteses inicialmente apontadas. O detalhamento da proposta ocorre através da execução de etapas com objetivos parciais que convergem para a consolidação dos objetivos formulados. A Figura 14 apresenta um fluxograma com as etapas em ordem cronológica do desenvolvimento da proposta.

Figura 14 - Fluxograma do processo de execução do trabalho



Fonte: Do autor (2020)

#### 3.2 ETAPA 01 – PROBLEMATIZAÇÃO

Tendo em vista a necessidade de prever e conter falhas de operação de reguladores de tensão, e buscando a melhoria da eficiência e continuidade dos serviços de distribuição de energia elétrica, o presente trabalho propõe correlacionar o desgaste mecânico dos contatos móveis do regulador de tensão com o desgaste e as mudanças nas características físico-químicas e cromatográficas do óleo isolante do equipamento. Busca-se realizar análises do óleo isolante e dos contatos móveis de comutação de taps de um regulador de tensão monofásico, através da realização de ensaios e análises específicas pretende-se identificar a correlação entre os níveis de desgaste dos contatos móveis e do óleo isolante, com vistas a prever a ocorrência de falhas de operação através da execução de medidas preditivas de manutenção.

De forma geral, os reguladores de tensão são compostos por um autotransformador imerso em óleo isolante, equipado com um comutador de derivação em carga, em conjunto com um reator. O comutador de derivação em carga é acionado eletronicamente pelo controlador eletrônico do regulador, que indica a execução das manobras de trocas de taps, elevando ou reduzindo os níveis de tensão da rede conforme necessário. Buscando-se delimitar o estudo, a presente proposta tem enfoque voltado para a análise do desgaste dos contatos móveis do comutador de derivação em carga, e seus efeitos no óleo isolante, em virtude do atrito gerado durante as manobras de troca de taps, além dos efeitos resultantes de arcos voltaicos que incidem essas manobras com carga.

O trabalho em questão visa acompanhar um regulador de tensão de 414 kVA em operação em uma rede elétrica real de 13,8 kV durante o ano inteiro, iniciando em junho de 2019 e finalizando em junho de 2020. Antes da instalação deste na rede elétrica, o equipamento é levado até oficina e passa por manutenção preventiva. Por não se tratar de um equipamento novo, durante a manutenção em oficina o comutador de derivação sob carga do equipamento é trocado por um comutador totalmente novo, acompanhado de contatos móveis e fixos novos também. Além disso, o óleo isolante do equipamento foi também trocado por óleo isolante novo. Dessa forma, pode-se considerar que o equipamento estudado é um regulador praticamente novo. Finalizada a manutenção o equipamento é então instalado na rede elétrica. Daí por diante, acompanha-se as condições de operação do regulador na rede a cada três meses, através de visitas em campo para retirada de amostras de óleo do equipamento, inspeção visual e acompanhamento do número atual de manobras realizadas pelo comutador de taps. Assim que encerrado o período de operações em campo, o equipamento é novamente retirado e encaminhado para oficina. Então, o comutador de derivação é desmontado do regulador e encaminhado para a realização de ensaios mecânicos que visam identificar características de desgaste e operação dos contatos do comutador durante o período em campo. Cabe ressaltar que os contatos utilizados em campo foram previamente ensaiados antes de serem instalados no regulador. Dessa forma, é possível comparar as condições iniciais com as condições após a retirada destes componentes do regulador de tensão.

### 3.3 ETAPA 02 – DEFINIÇÕES CONSTRUTIVAS E APLICAÇÃO

Conhecido, portanto, a problemática analisada e as características básicas, segue-se então acerca das características principais vinculadas ao regulador de tensão estudado neste trabalho.

#### 3.3.1 Regulador de tensão

O equipamento de referência utilizado neste estudo foi o Regulador de Tensão Monofásico TOSHIBA Tipo B, pertencente a empresa COOPERA no patrimônio de nº1697, conforme apresentado na Figura 15 .

Figura 15 - Regulador de tensão monofásico TOSHIBA, durante manutenção na empresa Fluxo transformadores



Fonte: Do autor (2020)

Algumas características técnicas do regulador de tensão de referência, que servirão para o estudo, são apresentadas na

Tabela 2 com dados retirados da placa de identificação do equipamento.

Tabela 2 - Ficha técnica do Regulador de Tensão TOSHIBA

<b>Regulador de Tensão Monofásico - TOSHIBA - Tipo B</b>	
Potência Nominal	414 KVA
Tensão Nominal	13,8 KV
Corrente Nominal	300 A
Frequência	60 Hz
Nº de série	E03001
Óleo isolante	Mineral - Naftênico
Volume do óleo	710 L
Massa de óleo	639 Kg
Massa da parte ativa c/ tampa	995 Kg
Massa total	2130 Kg
Massa do tanque e acessórios	496 Kg
Tipo do comutador	CR-3
Controle Eletrônico	TB-R800
Fabricação	mar/03
Nº Patrimônio Coopera	1697

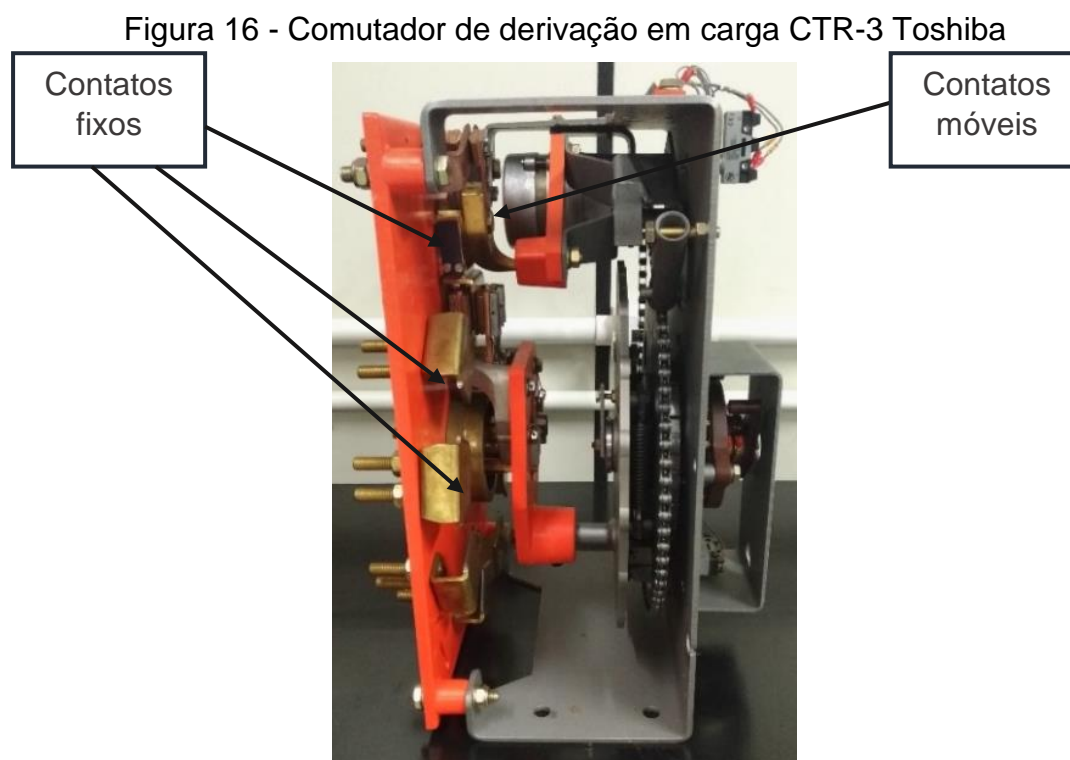
Fonte: TOSHIBA (2015)

Para permitir uma análise mais precisa dos resultados e na tentativa de simular o regulador como se fosse um equipamento novo, o equipamento estudado passou por manutenção preventiva na empresa Fluxo Transformadores, antes de ser instalado em campo. Durante a manutenção preventiva foi realizada a desmontagem do regulador e a substituição de alguns componentes desgastados por novos componentes. O comutador de derivação em carga foi substituído por um comutador novo, acompanhado de jogo de contatos móveis e fixos novos também. Em seguida, realizou-se o procedimento de secagem da parte interna do regulador em estufa e a remontagem do equipamento. Por fim, o regulador foi abastecido com uma carga nova de óleo mineral isolante e foram realizados alguns procedimentos de teste para verificar as boas condições de operação, antes de encaminhar o equipamento à campo.

Os dados eletrônicos arquivados no controlador eletrônico TB-R800, tais como número de manobras e dados operacionais antigos do regulador, foram resetados, visando reiniciar o ciclo de contagem de manobras de taps a partir desta manutenção.

### 3.3.1.1 Comutador de derivação em carga

A Figura 16 apresenta o comutador de derivação em carga presente internamente no regulador de tensão, o equipamento é da fabricante Toshiba, modelo CTR-3.



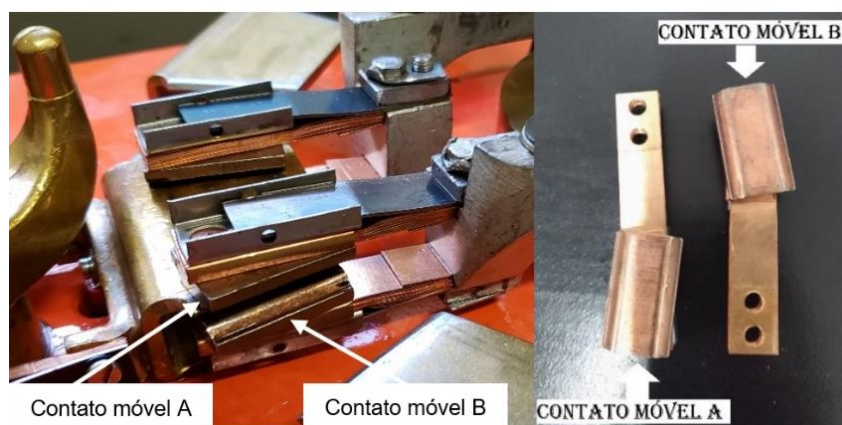
Fonte: Do autor (2020)

O comutador de derivação em carga é o mecanismo responsável por atuar fisicamente na troca de posição dos taps do regulador de tensão. Através dos comandos eletrônicos enviados pelo controlador eletrônico do regulador, o comutador CTR-3 movimenta os contatos móveis do regulador de tensão, trocando a posição desses contatos móveis em relação aos contatos fixos. Este tipo de manobra resulta na elevação ou redução dos níveis de tensão na saída do regulador, visto que a posição dos contatos móveis em relação aos contatos fixos determina o nível de tensão, em razão de que ambos os contatos realizam a conexão das bobinas do regulador de maneira a ajustar a relação de transformação do equipamento conforme a necessidade da rede elétrica.

### 3.3.1.2 Contatos móveis e contatos fixos

Os contatos móveis estudados neste trabalho são apresentados na Figura 17, sendo eles chamados de contato móvel A e contato móvel B.

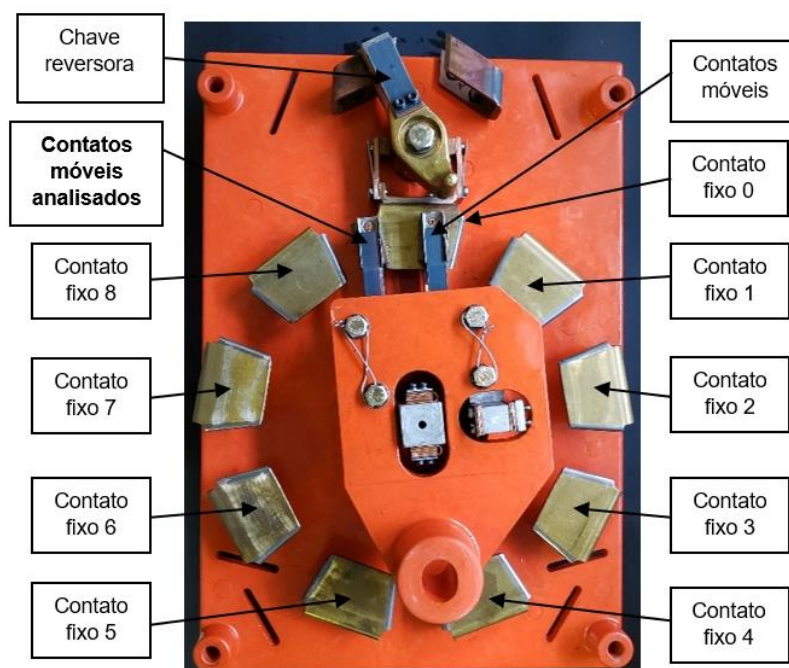
Figura 17 - Contatos móveis estudados neste trabalho



Fonte: Do autor (2020)

O comutador de taps possui sempre dois pares de contatos móveis, neste trabalho será dado enfoque maior aos “contatos móveis analisados” da Figura 18.

Figura 18 - Posição dos contatos móveis e fixos no comutador de taps



Fonte: Do autor (2020)

A Figura 18 apresenta também a disposição dos contatos fixos do regulador de tensão no comutador de taps.

### 3.3.1.3 Óleo isolante

O comutador CTR-3 da Figura 16 fica imerso em óleo isolante no interior do regulador de tensão, assim como as demais partes do regulador com exceção da unidade de controle. O óleo isolante ajuda a absorver arcos voltaicos resultantes das manobras de comutação de taps (manobras realizadas com carga) realizadas pelo comutador, além de refrigerar o sistema. Essas manobras de comutação de taps provocam o desgaste físico dos contatos e a liberação de partículas de material condutor no óleo isolante. Estima-se que os detritos gerados em cada manobra fiquem imersos no óleo isolante e possam ser identificados através de análises do óleo de forma a estimar o nível de desgaste dos contatos (MAGALHÃES, 2005). Portanto, foi utilizado óleo isolante novo no regulador de tensão, visando identificar através das análises no óleo quais características que se alteram ao longo do tempo em operação e do número de manobras realizadas. A Tabela 3 apresenta os dados característicos do óleo isolante utilizado no regulador de tensão, trata-se do óleo LUBRAX AV 70 IN - LI.

Tabela 3 – Dados característicos do óleo isolante utilizado LUBRAX AV 70 IN – LI

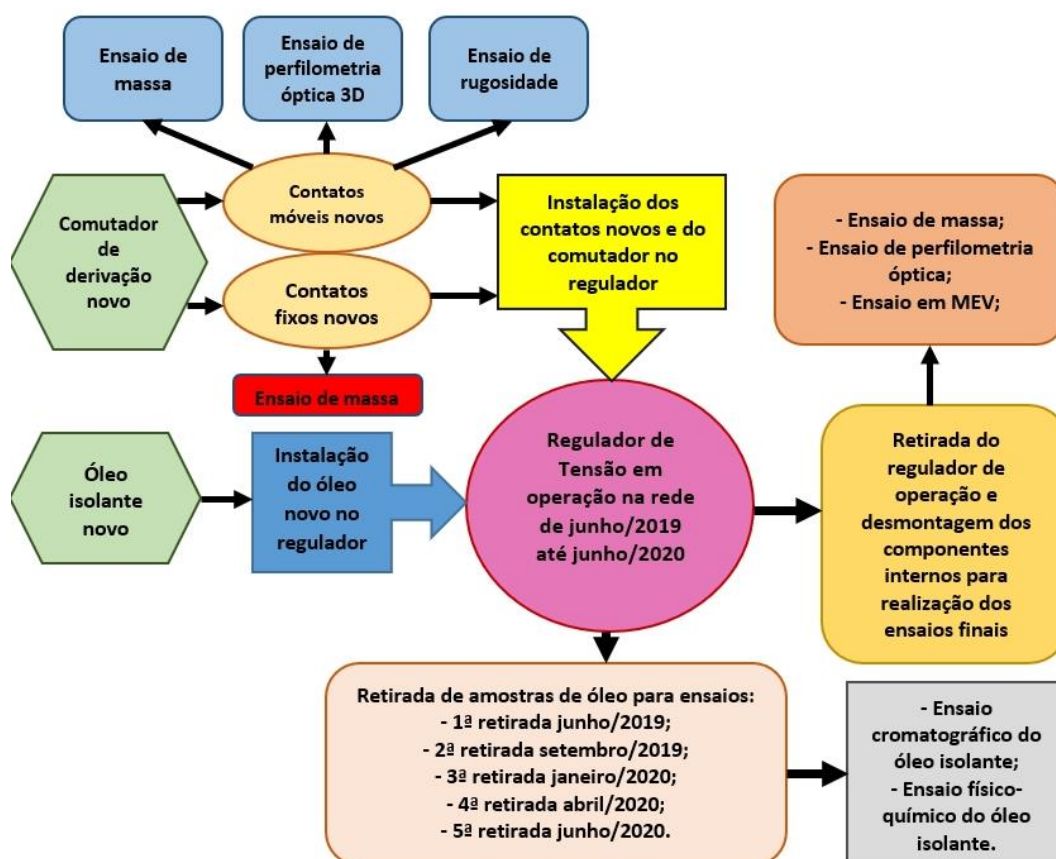
Característica	Método	Resultado	Unidade
Aspecto visual	PE-2BR-136	Límpido	-
Cor	ASTM D6045	L0.5	-
Densidade 20/4 °C	ASTM D4052	0,8796	g/cm <sup>3</sup>
Tensão interfacial	ASTM D971	46,5	mN/m
Água por Karl-Fischer	ASTM D1533	16	ppm(m)
Índice de neutralização	ASTM D2440	0.01	mgKOH/g
Rigidez dielétrica	ASTM D877	37,4	kV
Fator de perdas 90 °C	ASTM D924	0,04	%
Teor de PCB	NBR 13882	Ausente	-
Cloretos	NBR 5779	Ausente	-
Teor de carbono aromático	ASTM D2140	5,6	%
Hidrocarbonetos Arom. Polinucleares	IP-346	0,5	-

Fonte: PETROBRAS (2019)

### 3.4 ETAPA 03 – ENSAIOS PRELIMINARES

A metodologia aplicada nos ensaios se dividiu em duas vertentes: ensaios nos contatos e ensaios no óleo isolante. A Figura 19 apresenta os ensaios realizados e a sequência cronológica de cada etapa realizada.

Figura 19 - Fluxograma dos ensaios realizados neste trabalho



Fonte: Do autor (2020)

Inicialmente os contatos da Figura 18 foram desmontados do comutador de derivação de taps e em seguida encaminhados para os ensaios de massa, perfilometria óptica e ensaio de rugosidade. Esses componentes foram adquiridos novos, e os ensaios anteriormente relatados servirão de parâmetro comparativo para a realização dos mesmos ensaios nesses componentes, após se passado o tempo em operação do regulador em campo. Dessa forma, será possível comparar as características iniciais dos contatos com as características pós retirada, a Figura 19 descreve todas as etapas realizadas. Finalizado os ensaios, os contatos fixos e

móveis foram reinstalados no comutador de derivação e o comutador foi instalado no regulador de tensão. Em seguida, colocou-se óleo isolante novo no regulador de tensão e o equipamento foi remontado e testado na empresa Fluxo Transformadores.

O regulador de tensão foi instalado na rede da empresa Coopera no dia 04 de junho de 2019. Através da Figura 20 é possível visualizar o equipamento sendo colocado na rede.

Figura 20 - Regulador de tensão sendo instalado na rede da empresa Coopera, após retirada para manutenção



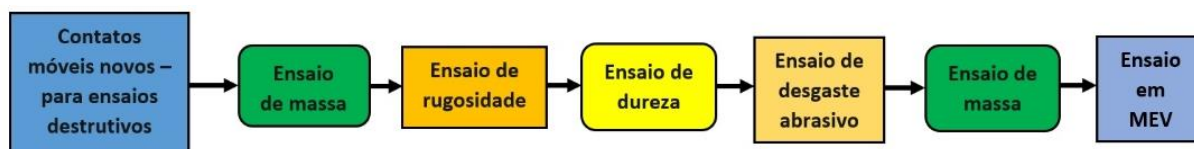
Fonte: Do autor (2020)

O equipamento ficou em operação em campo até a data do dia 29 de junho de 2020, quando então foi novamente retirado de operação e levado para oficina na empresa Fluxo Transformadores. Dessa forma, realizou-se a desmontagem do comutador de derivação em carga do regulador e a retirada dos contatos do comutador. Em seguida, os contatos retirados foram encaminhados para análise e ensaios em laboratório.

Conforme apresenta o fluxograma da Figura 19 durante o período em operação foram realizadas algumas coletas de óleo isolante do regulador. Em média, a cada três meses eram retiradas amostras de óleo isolante do equipamento. Essas amostras eram encaminhadas para ensaio cromatográfico e físico-químico do óleo, visando indicar as condições de operação do óleo isolante ao longo dos meses em razão do número de manobras realizadas pelo comutador de taps até o momento de cada retirada.

Em razão de alguns ensaios deste trabalho serem destrutivos, adquiriu-se um par de contatos móveis novos, extra, visando a realização destes ensaios destrutivos, tal como ensaio de desgaste abrasivo por roda de borracha e areia. A Figura 21 apresenta um fluxograma com os ensaios realizados sobre esses contatos.

Figura 21 - Fluxograma dos ensaios realizados nos contatos móveis novos para ensaios destrutivos



Fonte: Do autor (2020)

Conforme apresenta a Figura 21 inicialmente realizou-se o ensaio de massa dos contatos móveis novos, visando determinar a massa inicial destes. Em seguida, realizou-se o ensaio de rugosidade e dureza, visando determinar as condições iniciais da superfície dos contatos. Então, o ensaio de desgaste abrasivo por roda de borracha e areia foi realizado, conforme a norma ASTM G65-00 (ASTM G65-00, 2000) determina. Na sequência, realizou-se novamente o ensaio de massa, a fim de determinar a massa e o volume perdidos pelos contatos móveis, após serem desgastados no ensaio de desgaste abrasivo por roda de borracha e areia. Por fim, foi realizado ensaio em MEV sobre os contatos para verificar aspectos microestruturais destes em regiões afetadas e não afetadas pelo ensaio de desgaste abrasivo.

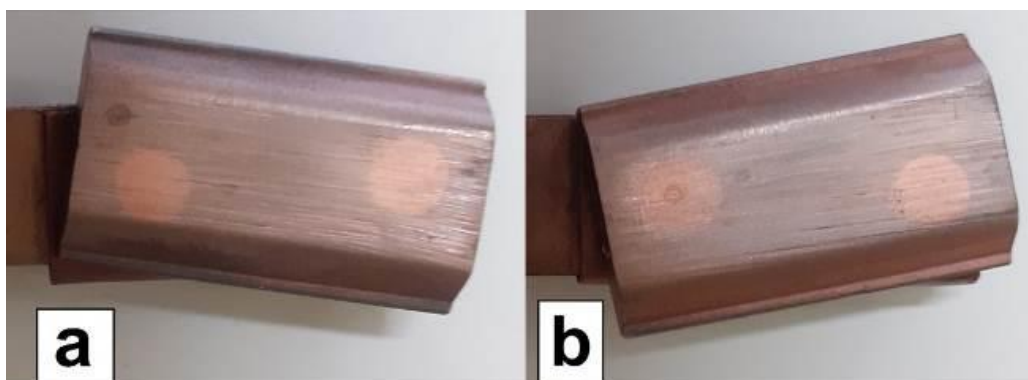
### 3.4.1 Ensaios nos contatos móveis

Esta seção apresenta a metodologia utilizada nos ensaios realizados sobre os contatos móveis do regulador de tensão. Os contatos móveis utilizados no regulador de tensão durante o período de operação em campo foram testados antes de ir a campo e após finalizado as operações em campo. Além disso, alguns ensaios necessários para serem realizados nos contatos móveis eram ensaios destrutivos, portanto, foi adquirido um jogo novo de contatos móveis para a realização destes ensaios destrutivos.

### 3.4.1.1 Contatos móveis novos

Foram adquiridos dois contatos móveis novos, ou seja, isentos de desgaste, idênticos aos utilizados no regulador de tensão da Figura 15, para a realização de ensaios mecânicos destrutivos, visando determinar algumas variáveis de desgaste destes contatos. A Figura 22 apresenta a imagem dos referidos contatos.

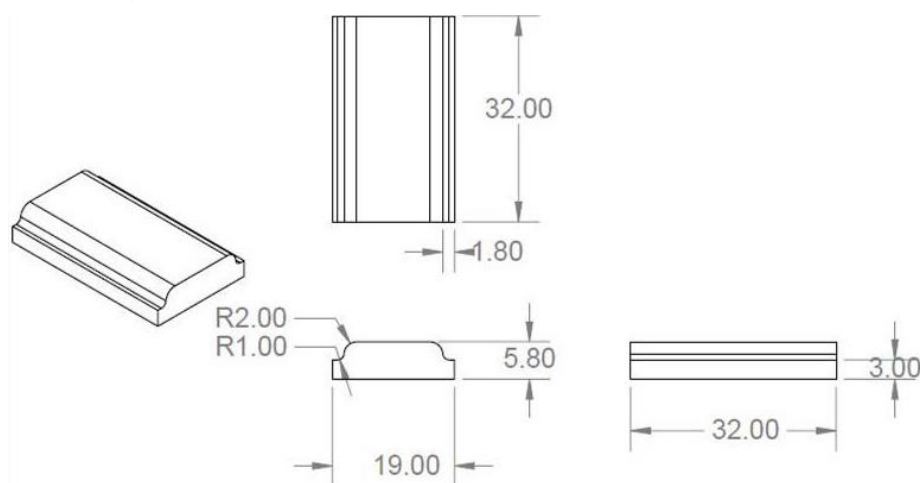
Figura 22 - Corpos de prova utilizados nos ensaios



Fonte: Do autor (2020)

Alguns ensaios mecânicos foram realizados nos corpos de prova da Figura 22, tais como: ensaio de dureza superficial, ensaio de desgaste abrasivo por roda de borracha e areia (ASTM G65-00), ensaio de rugosidade superficial e análise em MEV (microscopia eletrônica de varredura). A Figura 23 apresenta as dimensões iniciais dos contatos móveis utilizados nos ensaios.

Figura 23 - Dimensões dos corpos de prova em mm



Fonte: Do autor (2020)

### 3.4.1.2 Medição de rugosidade dos contatos móveis

Para a realização do ensaio de desgaste por roda de borracha e areia (ASTM G65-00), dos contatos móveis do regulador de tensão, é necessário que os contatos tenham rugosidade  $R_a$  limitada em  $0,8 \mu\text{m}$ , de acordo com a norma ASTM G65-00. Dessa forma, se faz necessário realizar as medições de rugosidade da superfície dos contatos com o rugosímetro Mitutoyo SJ-310 do laboratório de caracterização de materiais (LACAMI) da Faculdade SATC, apresentado na Figura 24. As medições de rugosidade foram realizadas seguindo os parâmetros das normas ABNT NBR ISO 4287:2002 e ABNT NBR ISO 4288:2008 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002, 2008a).

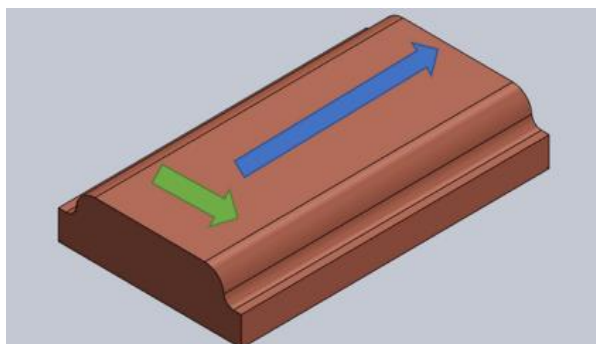
Figura 24 - Medição de rugosidade através do rugosímetro Mitutoyo SJ-310



Fonte: Do autor (2020)

A Figura 25 apresenta a direção da medição de rugosidade adotada durante o ensaio de medição de rugosidade realizada sobre os contatos móveis adquiridos para serem utilizados em ensaios destrutivos.

Figura 25 - Direção da medição de rugosidade do corpo de prova



Fonte: Do autor (2020)

Inicialmente os dados de rugosidade superficial foram coletados na direção indicada pela seta azul conforme apresentado na Figura 25, foram realizadas três medições em três trechos distintos (extremidade – meio – extremidade) do corpo de prova. Em seguida, foram coletados os dados de rugosidade indicados pela seta verde da Figura 25, realizando as medições também em três pontos distintos (extremidade – meio – extremidade) dos contatos móveis. Este procedimento foi aplicado nos dois contatos móveis da Figura 22 e por fim, calculou-se a média aritmética simples dos três resultados obtidos para as análises realizadas em cada direção.

#### 3.4.1.3 Análise química dos contatos móveis

A análise química dos contatos foi realizada no Centro Tecnológico SATC utilizando-se de um equipamento de Espectrometria de Fluorescência de Raio X por Energia Dispersiva (FRX), modelo EDX7000 da fabricante Shimadzu, conforme é apresenta na Figura 26.

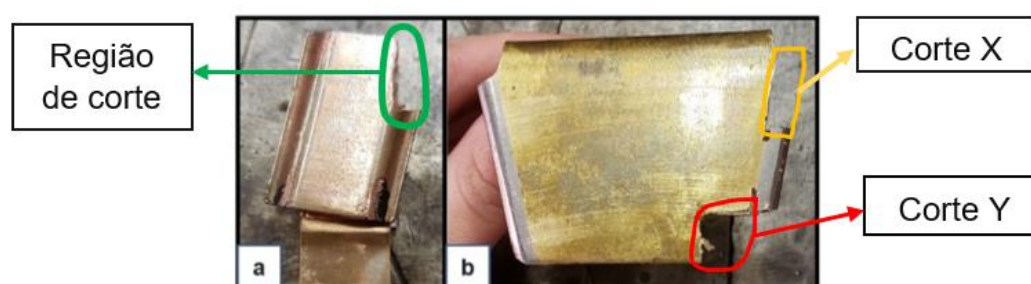
Figura 26 - Equipamento EDX7000, marca Shimadzu



Fonte: Do autor (2020)

Após retirados os contatos móveis e fixos de operação do regulador de tensão, analisou-se estes quanto a análise química, a fim de comparar os resultados encontrados e compreender melhor os componentes químicos aplicados na construção de cada contato. A Figura 27 apresenta o contato móvel e o contato fixo e as regiões utilizadas como amostra destes componentes neste ensaio e no ensaio em MEV.

Figura 27 - Contato móvel (a) e contato fixo (b) após retirada de amostra de cada contato para realização dos ensaios



Fonte: Do autor (2020)

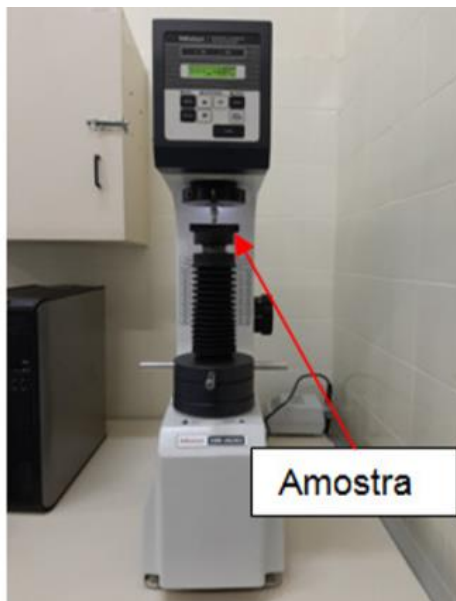
Foi necessário realizar o corte em cada contato da Figura 27 em razão do ensaio químico e ensaio em MEV serem de certa forma destrutivos, afinal os contatos estudados possuem dimensões muito superiores as dimensões máximas suportadas nos equipamentos destes ensaios, tornando obrigatório a retirada de amostras que possam caber nos equipamentos. Além disso, o contato fixo da Figura 27(b) foi cortado em duas regiões distintas, pois visualmente é possível verificar que este contato não possui a mesma composição ao longo de toda a sua superfície útil, verifica-se visualmente que o material que compõe as bordas laterais do contato fixo é diferente do material que compõe a região central. Dessa forma, torna-se interessante cortar o contato fixo em duas regiões distintas e analisar quimicamente em laboratório cada região em separado deste contato.

#### 3.4.1.4 Medição de dureza dos contatos móveis

A fim de avaliar a dureza superficial dos contatos móveis realizou-se no Laboratório LACAMI (Laboratório de Caracterização Microestrutural) da Faculdade SATC, a medição de dureza dos contatos. Três endentações em três diferentes pontos

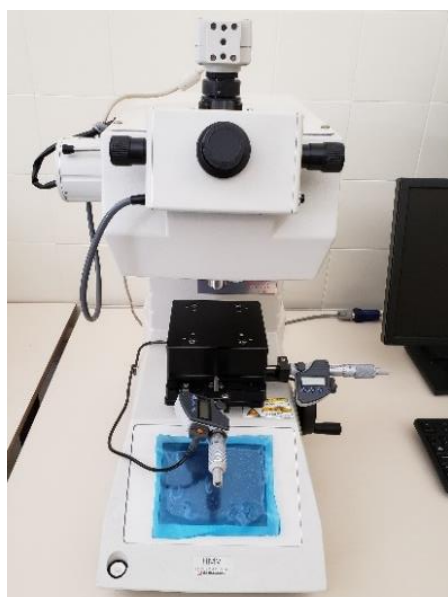
da superfície principal dos corpos de prova foram realizadas e por fim calculou-se a média aritmética simples das três leituras. Este ensaio seguiu orientações da norma ABNT NBR 6506-1:2019 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019a). A Figura 28 e Figura 29 apresentam os dois equipamentos utilizados no ensaio.

Figura 28 - Durômetro Mitutoyo HR-400



Fonte: Do autor (2020)

Figura 29 - Microdurômetro digital Shimadzu HMV 2T



Fonte: Do autor (2020)

### 3.4.1.5 Ensaio de massa dos contatos móveis e fixos

Esta seção apresenta a metodologia utilizada para o ensaio de massa dos contatos móveis e fixos do regulador de tensão.

Inicialmente enquanto o regulador de tensão foi verificado previamente em oficina, antes de ir a campo, os contatos móveis e fixos foram ensaiados quanto a sua massa. Além disso, os contatos móveis novos adquiridos para a realização dos ensaios destrutivos foram também testados quanto a sua massa antes e após a realização dos ensaios, a fim de comparar a perda de massa obtida durante o processo.

A Figura 30 apresenta a balança de precisão da fabricante Sartorius modelo Practum224-10BR utilizada no ensaio de massa dos contatos móveis com resolução de 0,0001 g e a Figura 31 apresenta a balança de precisão da fabricante Marte modelo AD500 utilizada no ensaio de massa dos contatos fixos com resolução de 0,001 g.

Figura 30 - Balança de precisão Sartorius modelo Practum224-10BR



Fonte: Do autor (2020)

Figura 31 - Balança de precisão Marte modelo AD500



Fonte: Do autor (2020)

Foram utilizadas duas balanças para pesagem dos contatos devido a grande diferença no valor de massa destes, a balança dos contatos móveis é mais precisa, porém não é capaz de suportar a massa dos contatos fixos uma vez que a balança da Figura 30 é capaz de medir somente até o limite de 220 g.

Os contatos móveis que foram utilizados no regulador de tensão durante operação em campo, foram pesados com o braço de sustentação do contato no comutador acoplado, pois a retirada deste braço de sustentação acarretaria danos destrutíveis nos contatos móveis, conforme indicado pela Figura 32.

Figura 32 - Contato móvel do regulador de tensão durante ensaio de massa



Fonte: Do autor (2020)

O ensaio de massa dos contatos móveis novos, utilizados no ensaio de desgaste abrasivo por roda de borracha, foram ensaiados sem o braço de sustentação dos contatos no comutador de derivação, pois este braço de sustentação atrapalhava o ensaio de desgaste abrasivo. Dessa forma, quando comparamos o valor de massa dos contatos móveis novos em relação aos contatos móveis do regulador de tensão há grande diferença entre eles, porém ambos os contatos são iguais quando novos.

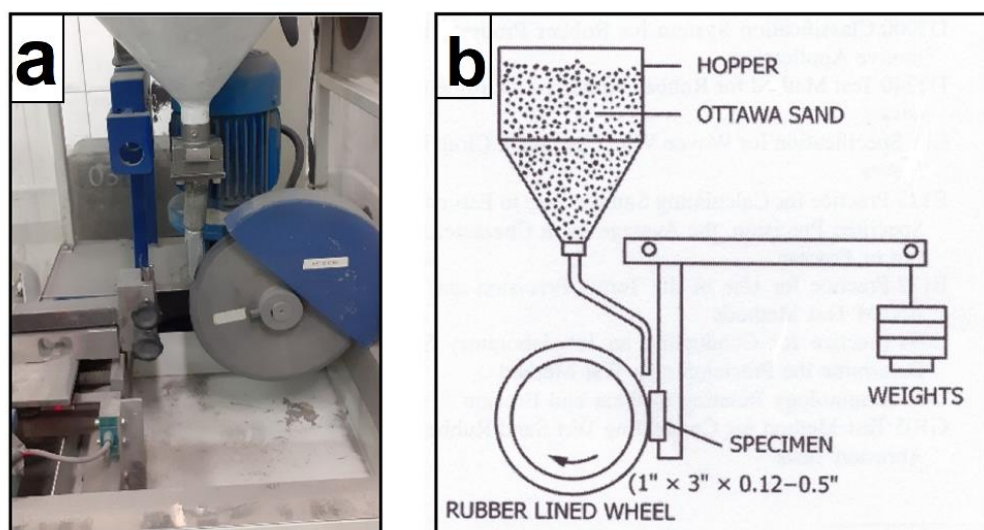
#### *3.4.1.6 Ensaio de desgaste abrasivo por roda de borracha e areia*

Visando identificar propriedades características da resistência ao desgaste dos contatos móveis do regulador de tensão, foi empregado o ensaio de desgaste por roda de borracha e areia (ASTM G65-00). Os resultados deste ensaio foram caracterizados pela perda de massa e volume dos contatos móveis novos obtidos durante o processo.

A norma ASTM G65-00 (ASTM G65-00, 2000) define o ensaio de abrasão a três corpos, ou borracha e areia. Através desta norma é possível definir de maneira simples a resistência ao desgaste abrasivo dos materiais através da análise das medidas de perda de massa obtidas durante o ensaio de abrasão. Conforme específica a norma, geralmente utiliza-se areia de quartzo arredondada como abrasivo do ensaio.

O equipamento utilizado na realização do ensaio de desgaste consiste em desgastar um corpo de prova que é pressionado contra uma roda de borracha que gira com velocidade controlada. O abrasivo vai sendo introduzido entre a roda de borracha e o corpo de prova, provocando assim riscamento na superfície do corpo ensaiado. O fluxo do abrasivo inserido no processo acarreta no arrancamento de material da superfície do corpo de prova. Cabe ressaltar que a areia utilizada possui tamanho de grão e composição controlada, além disso a vazão de areia durante o ensaio é mantida normalmente entre 300 a 400 g/min. Na Figura 33 é apresentado o equipamento durante o ensaio de desgaste e a disposição dos componentes utilizados.

Figura 33 - Ensaio de desgaste conforme a norma ASTM G65-00. (a) equipamento utilizado no ensaio de desgaste e (b) esquemático do ensaio conforme ASTM G65-00



Fonte: Do autor (2020)

A Tabela 4 apresenta valores de alguns parâmetros utilizados durante o ensaio, a fim de atender as condições mínimas exigidas pela norma ASTM G65-00, de acordo com os tipos de corpos de prova ensaiados.

Tabela 4 - Parâmetros do ensaio de desgaste.

Dados do Ensaio	Valores
Diâmetro da roda de borracha	228,6 mm
Tempo de ensaio	10 min
Rotação da roda de borracha	200 rpm
Granulometria da areia	0,212 a 0,300 mm
Vazão da areia (SiO <sub>2</sub> )	320 g/min
Carga aplicada	130 N

Fonte: Do autor (2020)

Os corpos de prova foram devidamente limpos e preparados para a execução dos ensaios. Durante o término de cada etapa do ensaio, foi novamente realizada a limpeza e a pesagem dos corpos de prova, utilizou-se balança de precisão semi-analítica de quatro casas de precisão, com capacidade máxima de 220 g. Dessa forma, a resposta em relação ao desgaste foi determinada por meio da equação fornecida pela norma, através das Equação (3).

$$\text{Perda de volume (VL)} = \frac{\text{perda de massa (LM)}}{\text{densidade } (\rho)} \times 1000 \text{ [mm}^3\text{]} \quad (3)$$

Sendo:

Perda de massa = [g];

Densidade = [g/cm<sup>3</sup>].

Por fim, as regiões das superfícies desgastadas foram analisadas com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura (MEV). A composição química dos corpos de prova foi analisada através da técnica de EDS (espectroscopia por energia dispersiva).

#### 3.4.1.7 MEV: Microscópio Eletrônico de Varredura

A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada no Centro Tecnológico SATC. O equipamento utilizado foi o microscópio eletrônico de varredura (MEV) da fabricante Carl Zeiss, modelo MA10, série EVO com EDS Quantax Bruker. Foram realizados ensaios de microscopia eletrônica sobre os contatos móveis novos (adquiridos para utilização nos ensaios destrutivos) e sobre os contatos móveis e fixos utilizados no regulador de tensão, após a retirada desses componentes do equipamento, assim que encerrado o período em operações em campo. O ensaio em MEV pode também ser considerado destrutivo em razão dos contatos serem maiores que o tamanho mínimo de amostra compatível com o equipamento de análise. Utilizou-se o recurso de EDS (espectroscopia de energia dispersiva) para obter espectrografias dos elementos presentes na superfície dos contatos ensaiados.

A análise em MEV realizada sobre os contatos móveis novos visou observar os micro mecanismos abrasivos, ocorridos após a realização do ensaio de desgaste abrasivo por roda de borracha e areia. Foram analisadas regiões desgastadas e regiões não desgastadas pelo ensaio de desgaste, a fim de comparar os resultados encontrados em MEV em cada uma das regiões.

A análise realizada sobre os contatos móveis e fixos utilizados no regulador de tensão, buscou identificar em MEV as condições superficiais destes componentes, após ficarem em operação durante um ano no regulador. Buscou-se identificar

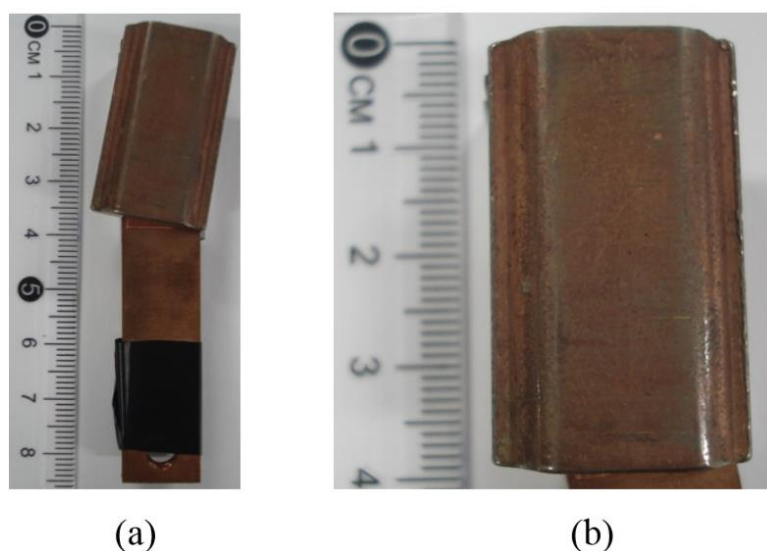
também alguns componentes químicos presentes em determinados pontos da superfície da amostra, a fim de detectar possíveis contaminações nos contatos advindas de outros mecanismos do regulador ou até mesmo do processo de desgaste mecânico ocasionado pelas manobras de comutação de taps.

#### 3.4.1.8 Ensaio de perfilometria

O objetivo deste ensaio é de determinar os valores de rugosidade e obter imagens topográficas da superfície dos contatos móveis em escala micrométrica. Por meio deste busca-se determinar as características dos contatos móveis quanto a rugosidade e topografia da superfície em escala micrométrica, realizando este ensaio antes do regulador estudado ir à campo e após encerrado o período em operação. Desta forma, procura-se analisar e correlacionar os resultados obtidos acerca do comportamento dos contatos móveis antes e após um ano em operação no regulador.

Este ensaio foi realizado pelo LAPEC (Laboratório de Pesquisa em Corrosão) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A Figura 34 e a Figura 35 apresentam as imagens das amostras ensaiadas antes dos contatos móveis serem instalados no regulador de tensão. As medidas foram feitas em triplicata sobre a superfície das amostras, previamente limpas com álcool, nas regiões mostradas na Figura 34(b) e na Figura 35(b).

Figura 34 - Imagens da Amostra 1: (a) corpo inteiro (b) região da medida



Fonte: Do autor (2019)

Figura 35 - Imagens da Amostra 2: (a) corpo inteiro (b) região da medida



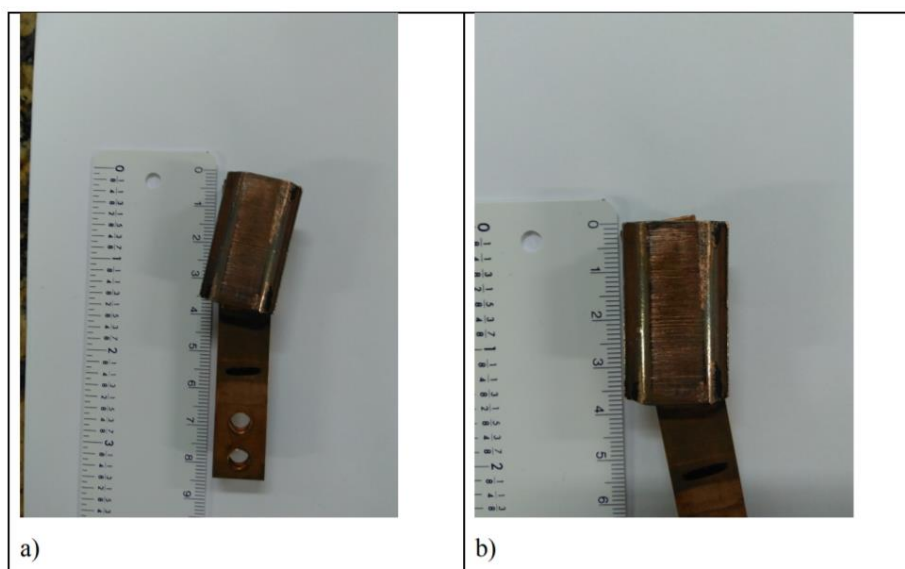
(a)

(b)

Fonte: Do autor (2019)

A Figura 36 e a Figura 37 apresentam as imagens das amostras ensaiadas, após a retirada dos contatos móveis do regulador de tensão, é possível identificar marcas de desgaste nas amostras analisadas. Novamente as medidas foram feitas em triplicata (e em três pontos em três áreas) sobre a superfície das amostras, previamente limpas com álcool, nas regiões mostradas na Figura 36 (b) e na Figura 37 (b).

Figura 36 - Imagens da Amostra 1: (a) corpo inteiro (b) região da medida

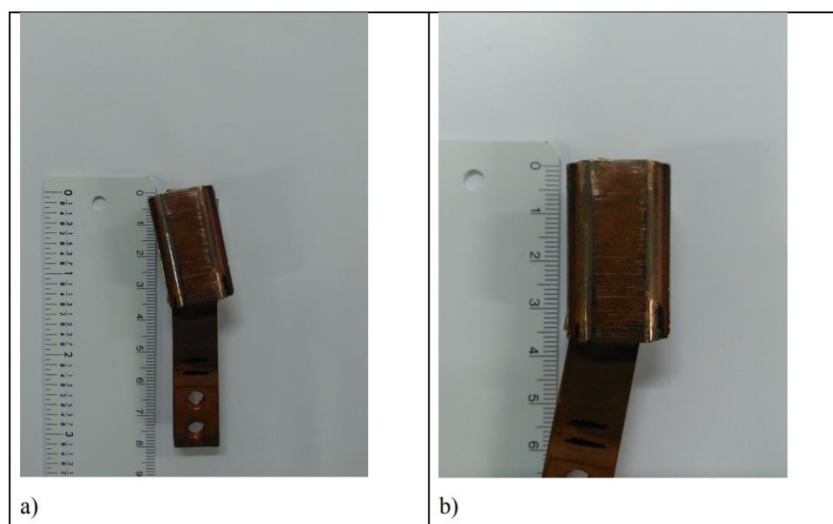


a)

b)

Fonte: Do autor (2020)

Figura 37 - Imagens da Amostra 2: (a) corpo inteiro (b) região da medida



Fonte: Do autor (2020)

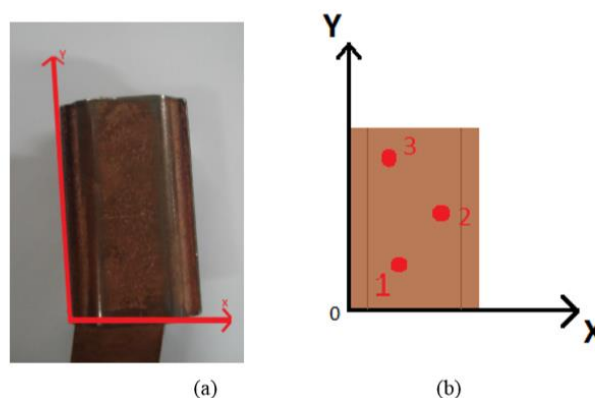
Para as medidas serem feitas nos mesmos lugares em ambas as amostras, foi utilizado um sistema de coordenadas cartesianas, com a origem centrada no canto esquerdo inferior das amostras. As coordenadas dos pontos seguem na Tabela 5 e as representações esquemáticas na Figura 38.

Tabela 5 - Coordenadas dos pontos de medidas das Amostras

Região	Par ordenado (mm)
Ponto 1	(9,5;8,1)
Ponto 2	(11,5;19,7)
Ponto 3	(9,1;27,4)

Fonte: Do autor (2019)

Figura 38 - Representação esquemática dos pontos de medidas (a) eixo coordenado (b) localização



Fonte: Do autor (2019)

A rugosidade micrométrica das amostras foi medida através de um interferômetro óptico da marca GT-K (Bruker, Billerica, Massachusetts), utilizando-se o laser de cor verde, obtendo-se os valores de  $S_a$  ( $\mu\text{m}$ ) e  $S_z$  ( $\mu\text{m}$ ). Conforme as informações disponibilizadas pelo fabricante do interferômetro óptico,  $S_a$  se define como a rugosidade média avaliada sobre a superfície, enquanto o  $S_z$  é baseado na diferença média entre os cinco picos mais altos e cinco vales mais baixos sobre a superfície.

As análises de rugosidade linear das amostras foram feitas usando o Surface Roughness Tester SJ-400, marca Mitutoyo, utilizando-se da norma ISO 4287 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002).

### **3.4.2 Óleo isolante**

Esta seção apresenta a metodologia utilizada nos ensaios realizados sobre óleo isolante do regulador de tensão.

#### *3.4.2.1 Retiradas de óleo do regulador para análises*

Durante o período de operação do regulador de tensão em campo foram retiradas amostras de óleo isolante mineral do regulador durante cinco vezes no período de um ano de operações. Essas amostras de óleo foram extraídas em média a cada três meses decorridos de operação e encaminhadas para laboratório para a realização de uma série de ensaios de aspectos físico-químicos e cromatográficos do óleo, apresentadas nas seções a seguir, a fim de permitir a identificação evolutiva de características do óleo ao longo do período.

As retiradas de amostras foram realizadas com o equipamento regulador energizado na rede elétrica e efetuadas com base na norma ABNT NBR 14274:2013 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013a), norma essa que apresenta uma metodologia para a determinação de retiradas de amostras de líquidos isolantes de reguladores de tensão.

### *3.4.2.2 Análise físico-química do óleo isolante*

Nesta seção apresenta-se a metodologia aplicada em cada ensaio de análise físico-química do óleo isolante, através da aplicação da norma ABNT NBR 8840:2013 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013b). Realizou-se oito tipos de ensaios físico-químicos do óleo, sendo eles: análise de aspecto visual, cor, densidade 20/20 °C, tensão interfacial, teor de água, índice de neutralização, rigidez dielétrica e fator de perdas 90 °C.

#### **3.4.2.2.1 Análise de aspecto visual**

O ensaio de aspecto visual foi realizado pela empresa LABOIL (Laboratório de Óleos Minerais) da cidade de Ivoti, Rio Grande do Sul. Este ensaio levou em conta as características visuais do óleo isolante através da aplicação da norma NBR 10576:2017 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017).

#### **3.4.2.2.2 Análise de cor**

A análise de cor foi realizada através da aplicação da metodologia indicada pela norma NBR 14483:2015 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015b). Este ensaio foi também realizado pela empresa LABOIL e utilizou-se o equipamento colorímetro com disco padrão para óleo mineral isolante.

#### **3.4.2.2.3 Análise de densidade 20/20 °C**

Realizou-se este ensaio através da aplicação da norma NBR 7148:2013 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013c). Este ensaio foi realizado pela empresa LABOIL e utilizou-se o equipamento densímetro automático da fabricante AntonPaar.

#### **3.4.2.2.4 Análise de tensão interfacial**

Este ensaio foi também realizado pela empresa LABOIL, através da aplicação da norma NBR 6234:2015 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS

TÉCNICAS, 2015a). O equipamento utilizado foi o tensiômetro da fabricante Kruss modelo K6.

#### **3.4.2.2.5 *Análise de teor de água***

Utilizou-se a norma NBR 10710:2006 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006a) para a realização deste ensaio na empresa LABOIL. Utilizou-se o equipamento da fabricante Metrohm para realizar a titulação coulométrica Karl Fischer.

#### **3.4.2.2.6 *Análise do índice de neutralização***

Realizou-se este ensaio novamente na empresa LABOIL através da aplicação da norma NBR 14248:2009 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009). O equipamento deste ensaio foi o titulador automático da fabricante Metrohm.

#### **3.4.2.2.7 *Análise de rigidez dielétrica***

A norma NBR/IEC 60156:2019 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019b) foi utilizada neste ensaio, realizado também na empresa LABOIL. O equipamento empregado foi o medidor de rigidez dielétrica da fabricante Baur modelo DTA 100.

#### **3.4.2.2.8 *Análise do fator de perdas 90 °C***

Este ensaio foi realizado pela empresa LABOIL e adotado a norma NBR 12133:1991 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991b). O equipamento utilizado foi o medidor de fator de perdas dielétricas da fabricante Huazheng.

### *3.4.2.3 Análise de gases dissolvidos em óleo isolante - cromatografia*

Nesta seção apresenta-se a metodologia aplicada ao ensaio de análise de gases dissolvidos em óleo isolante. Realizou-se dez tipos de análises de gases dissolvidos no óleo, sendo eles: análise de hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, monóxido de carbono, metano, dióxido de carbono, etileno, etano, acetileno, relação de CO<sub>2</sub>/CO e a quantificação do total de gases combustíveis contidos no óleo.

As análises de gases dissolvidos em óleo foram realizadas pela empresa LABOIL de acordo com a norma NBR 7070:2006 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006b). Os cálculos da taxa de evolução dos gases foram realizados com base na norma NBR 7274:2012 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012).

#### ***3.4.2.3.1 Determinação dos gases dissolvidos no óleo***

Este ensaio foi realizado pela empresa LABOIL através da aplicação da norma NBR 7070:2006 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006b) e da utilização do cromatógrafo gasoso CG90 com detectores FID e TCD, visando determinar os gases dissolvidos no óleo isolante.

#### ***3.4.2.4 Determinação do teor de bifenilas poli-cloradas (PCBS) no óleo***

Este ensaio foi realizado pela empresa LABOIL através da aplicação da norma NBR 13882:2008 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008b). O equipamento deste ensaio foi o cromatógrafo gasoso da fabricante PerkinElmer modelo Clarus 500 com detector ECD, utilizado para a medição da contaminação por Ascarel através da análise do teor de PCBs (Bifenilas Poli-Cloradas) presentes no óleo.

Durante o período de operação do regulador em campo foram realizados dois ensaios de PCBs no óleo isolante, um após decorrido os três meses iniciais de operação e outro realizado brevemente antes da retirada do equipamento de campo, contabilizando um ano decorrido de operação. Realizou-se duas vezes este ensaio a fim de garantir a não existência de PCBs no equipamento estudado.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir das metodologias descritas no capítulo 3. Os resultados são discutidos em duas vertentes: resultados dos ensaios dos contatos e resultados dos ensaios no óleo isolante.

### 4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS NOS CONTATOS

Aqui são apresentados os resultados dos ensaios aplicados aos contatos móveis e fixos do regulador de tensão.

#### 4.1.1 Resultados dos ensaios de dureza

Os resultados de dureza superficial dos contatos móveis novos são apresentados na Tabela 6 em dureza Brinell.

Tabela 6 - Resultados das medições de durezas

MATERIAL EM TESTE	DUREZA BRINELL HB [kgf/mm <sup>2</sup> ]
Corpo de prova a	101,0
Corpo de prova b	92,3

Fonte: Do autor (2020)

Os resultados apresentados na Tabela 6 permitem verificar que o corpo de prova “a” é levemente mais duro que o corpo de prova “b”, além disso, através dos desvios padrões obtidos é possível verificar que houve poucas variações em relação aos resultados encontrados.

#### 4.1.2 Resultados dos ensaios de rugosidade

A Tabela 7 apresenta os resultados de análise da rugosidade superficial dos contatos móveis novos. Através da Figura 25 é possível observar através das setas a direção utilizada na análise de rugosidade superficial para cada contato.

Tabela 7 - Rugosidade média superficial dos corpos de prova

<b>Material</b>	<b>Rugosidade Superficial Direção A (seta verde) [Ra(μm)]</b>	<b>Rugosidade Superficial Direção B (seta azul) [Ra(μm)]</b>
Corpo de prova "a"	0,71	0,69
Corpo de prova "b"	0,79	0,80

Fonte: Do autor (2020)

Através dos resultados da Tabela 7 é possível compreender que os corpos de prova atenderam as solicitações exigidas pela norma ASTM G65-00, apresentando rugosidade Ra limitada em 0,8 μm, e assim estavam aptos para a realização do ensaio de desgaste abrasivo por roda de borracha e areia conforme a norma solicita.

#### 4.1.3 Resultado do ensaio de análise química

Os resultados obtidos através da análise química dos contatos móveis são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Composição química em peso (wt%) dos contatos móveis conforme ensaio de análise química

<b>Cu (%)</b>	<b>W (%)</b>	<b>Al (%)</b>	<b>Cl (%)</b>	<b>Ge (%)</b>	<b>K (%)</b>
49,507	45,909	1,590	0,750	0,722	0,421
<b>S (%)</b>	<b>Ca (%)</b>	<b>P (%)</b>	<b>Mn (%)</b>	<b>Ti (%)</b>	<b>V (%)</b>
0,335	0,265	0,246	0,120	0,095	0,040

Fonte: Do autor (2020)

Através da análise química foi possível identificar que o cobre e o tungstênio são os componentes mais presentes nos contatos, os dois juntos compõem cerca de 95% dos elementos químicos presentes. Os demais componentes químicos detectados foram o alumínio, cloro e o germânio. Além destes, há traços dos elementos potássio, enxofre, cálcio, fosforo, manganês, titânio e vanádio.

Os resultados encontrados na Tabela 8 apresentam altas concentrações de cobre e tungstênio em diferentes regiões do corpo de prova, sugerindo que o contato móvel analisado se trata do compósito W-Cu, obtido por meio de uma sinterização de cobre e tungstênio. Além disso, contatos de W-Cu são amplamente utilizados em equipamentos elétricos de alta voltagem, devido suas propriedades

físicas de alta resistência à solda, erosão por arco, alta condutividade térmica e elétrica, reforçando assim a possibilidade do compósito W-Cu ser utilizado nos contatos analisados (COSTA, 2004).

Os resultados obtidos através da análise química dos contatos fixos são apresentados na Tabela 9 para a região indicada como “Corte X” da Figura 27(b).

Tabela 9 - Composição química em peso (wt%) do contato fixo no ponto “Corte X” da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**(b) conforme ensaio de análise química

<b>W (%)</b>	<b>Cu (%)</b>	<b>Ge (%)</b>	<b>P (%)</b>	<b>Se (%)</b>
61,436	36,139	0,804	0,444	0,359
<b>Ca (%)</b>	<b>S (%)</b>	<b>K (%)</b>	<b>Ba (%)</b>	<b>V (%)</b>
0,243	0,235	0,164	0,128	0,048

Fonte: Do autor (2020)

Através dos resultados apresentados na Tabela 9 verifica-se que o tungstênio e o cobre são os componentes mais presentes nos contatos fixos. Germânio, fósforo, selênio, cálcio e enxofre foram os componentes químicos restantes detectados no ensaio. Além disso, foram detectados traços pequenos de potássio, bário e vanádio.

Os resultados obtidos através da análise química dos contatos fixos para a região indicada como “Corte Y” da Figura 27(b) são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Composição química em peso (wt%) do contato fixo no ponto “Corte Y” da Figura 27(b) conforme ensaio de análise química

<b>Cu (%)</b>	<b>Zn (%)</b>	<b>Ca (%)</b>	<b>Si (%)</b>
67,018	31,870	0,545	0,327
<b>Cl (%)</b>	<b>S (%)</b>	<b>Mn (%)</b>	<b>Tm (%)</b>
0,114	0,063	0,036	0,027

Fonte: Do autor (2020)

Os resultados apresentados na Tabela 10 indicam que cobre e zinco são os componentes mais presentes nessa região do contato fixo analisado, lembrando que a consideração desta análise foi para identificar possíveis composições diferentes do contato fixo através da análise dos materiais no “Corte em Y”. O restante dos

componentes químicos detectados foram cálcio, silício e cloro. Os elementos enxofre, manganês e túlio foram detectados em quantidades muito pequenas.

#### 4.1.4 Resultado do ensaio de massa

Nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios de massa dos contatos móveis e fixos do regulador de tensão, comparando os resultados obtidos antes do equipamento ir a campo e após a retirada do regulador de operações.

##### 4.1.4.1 Contatos móveis

A Tabela 11 apresenta os resultados dos ensaios de massa dos contatos móveis, antes da instalação dos contatos móveis no regulador de tensão e após decorrido o período de operação em campo, e compara a perda de massa resultante em cada contato.

Tabela 11 - Comparativo das massas dos contatos móveis do regulador de tensão

Contatos Móveis	Início de operação – 04/06/2019	Retirada de operação - 29/06/2020	Perda de massa (g)
Massa contato 1 (g)	84,1798	78,0961	6,0837
Massa contato 2 (g)	83,3829	77,2943	6,0886

Fonte: Do autor (2020)

Através da Tabela 11 é possível verificar que os contatos móveis perderam massa durante o período em operação. Do dia 04/06/2019 até o dia 29/06/2020 os contatos móveis (a) e (b) perderam 6,0837 g e 6,0886 g de massa, respectivamente. Percentualmente a perda desses contatos equivale a cerca de 7,22% e 7,30% da massa inicial, respectivamente. Neste período, o comutador do regulador de tensão comutou os taps por 2496 vezes, a Tabela 12 apresenta a taxa média de perda de massa a cada manobra realizada.

Tabela 12 - Perda de massa média dos contatos móveis por manobra de tap

<b>Contatos móveis</b>	<b>Perda de massa média por manobra de tap (mg/manobra)</b>	<b>Perda de massa média por manobra de tap (%/manobra)</b>
<b>Contato móvel (1)</b>	2,4374	0,002895
<b>Contato móvel (2)</b>	2,4393	0,002925

Fonte: Do autor (2020)

Através dos dados apresentados na Tabela 12 entende-se que os resultados dos desgastes obtidos estão intimamente relacionados com condições operacionais deste caso específico, de modo que para a obtenção de parâmetros assertivos que permitam um equacionamento matemático para o desgaste seriam necessários a análise de uma amostra bem maior de reguladores.

Devido a impossibilidade da realização de estudos que atinjam uma amostragem maior de reguladores de tensão neste momento, o presente trabalho considera que os dados de desgaste apresentados na Tabela 11 e Tabela 12 são lineares durante toda a sua vida útil. É possível validar a afirmação da linearidade do desgaste dos contatos do regulador durante sua vida útil uma vez que a curva de carga não muda significativamente na grande maioria dos casos.

A partir da consideração da linearidade dos desgastes obtidos neste regulador durante a amostragem de 12 meses, é possível projetar o desgaste futuro em relação ao número de manobras, e conseqüentemente apontar com maior precisão o momento ideal para retirada de operação do regulador otimizando recursos operacionais e humanos.

Ainda é preciso considerar que o fabricante indica a substituição do contato com 150.000 manobras sem diferenciar as condições de carga e sobrecarga a qual o regulador está submetido (TOSHIBA, 2015). Geralmente as especificações nominais dos fabricantes são para condições ideais de operação o que constantemente não é encontrado em aplicações reais. Neste caso corre-se o risco de que em condições severas de operação, antes mesmo de atingir o número nominal de operações o regulador atinja o limite de desgaste gerando falha catastróficas tirando o regulador de operação e em vários casos gerando danos aos consumidores devidos a surtos elétricos.

#### 4.1.4.2 Contatos fixos

A Tabela 13 apresenta um comparativo da evolução da massa dos contatos fixos durante o período de operações do regulador em campo, comparando os resultados obtidos no ensaio de massa dos contatos fixos antes do regulador ir a campo e após a retirada do regulador de operação.

Tabela 13 - Comparativo das massas dos contatos fixos do regulador de tensão

Contatos Fixos	Início de operação 04/06/2019	Retirada de operação 29/06/2020	Varição da massa no período (g)	Varição da massa no período (%)
Contato fixo 00	272,681	272,795	+0,114	+0,042
Contato fixo 01	220,146	220,390	+0,244	+0,111
Contato fixo 02	217,276	217,422	+0,146	+0,067
Contato fixo 03	218,142	218,321	+0,179	+0,082
Contato fixo 04	225,504	225,609	+0,105	+0,047
Contato fixo 05	222,031	222,133	+0,102	+0,046
Contato fixo 06	219,960	220,044	+0,084	+0,038
Contato fixo 07	226,159	226,224	+0,065	+0,029
Contato fixo 08	225,298	225,460	+0,162	+0,072

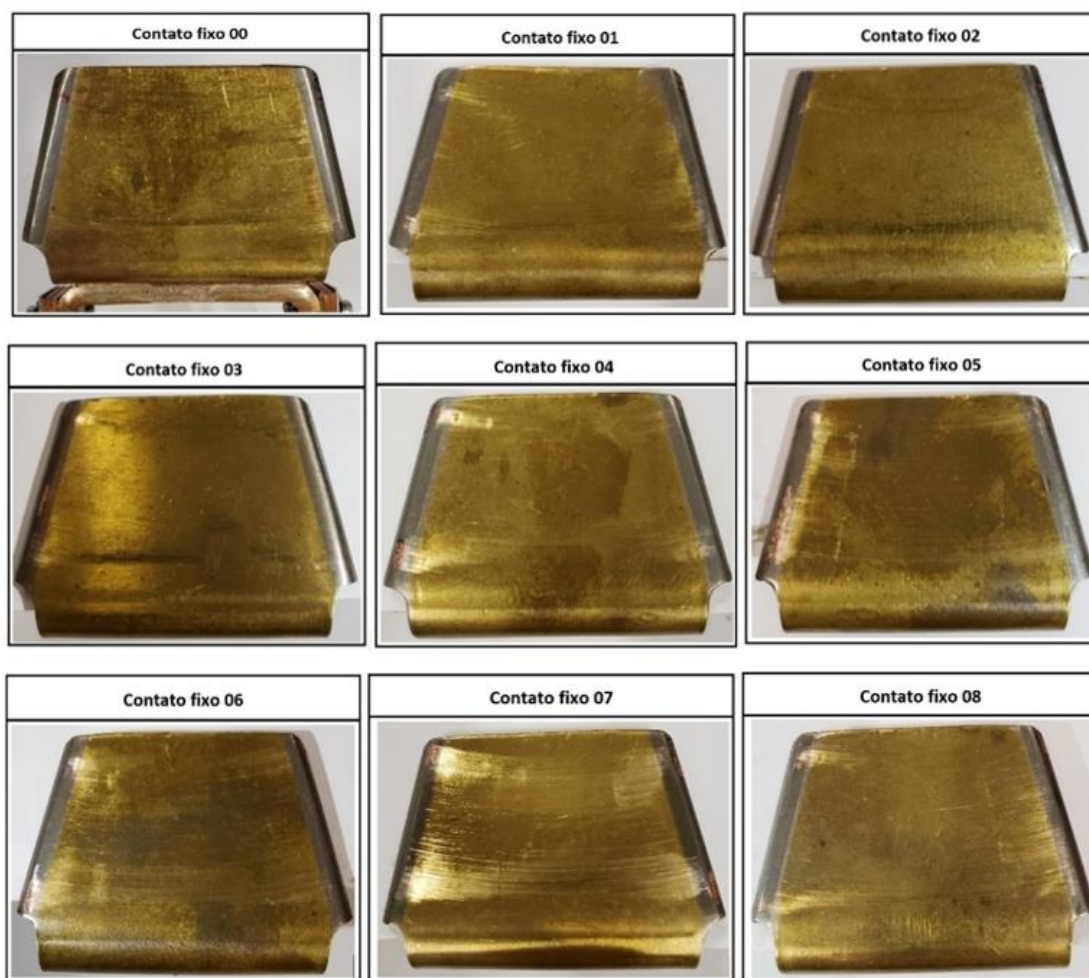
Fonte: Do autor (2020)

Verifica-se através da Tabela 13 que diferentemente dos contatos móveis, que perderam índice de massa, os contatos fixos tiveram leve aumento nos valores de massa. Naturalmente os contatos fixos apresentam por característica menores taxas de desgaste que os contatos móveis (TOSHIBA, 2015). Sendo assim, já era por esperado um desempenho melhor por parte destes contatos quanto a capacidade de resistência ao desgaste. Contudo, os contatos fixos ganharam massa ao invés de perder, através da análise visual é possível perceber que há uma leve camada de “sujeira” impregnada na superfície dos contatos fixos e que talvez esta possa ser capaz de interferir nos níveis de massa. Sugere-se que essa “sujeira” seja adesão de material dos contatos móveis, adquirido durante o atrito gerado nas manobras de comutação de taps.

A Figura 39 apresenta os contatos fixos retirados do regulador de tensão após decorrido o período de operações do regulador em campo e após a consequente

retirada do equipamento de operação e desmontagem dos contatos. Os contatos fixos utilizados no equipamento apresentam leves condições visuais que permitem observar visualmente o nível de desgaste dos contatos, bem como é possível observar também que o desgaste foi mais acentuado em alguns contatos fixos do que em outros, conforme apresenta a Figura 39.

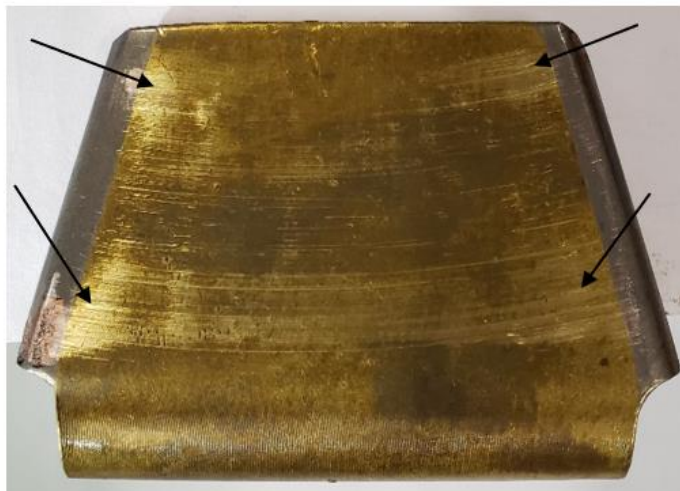
Figura 39 - Contatos fixos desgastados após retirada de operação do regulador de tensão



Fonte: Do autor (2020)

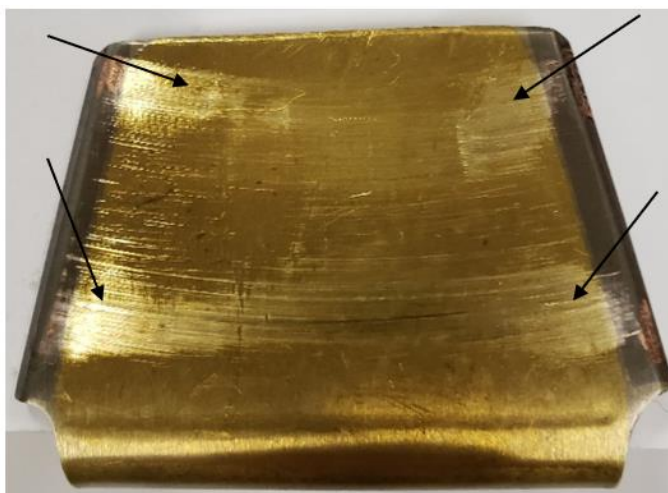
É possível observar visualmente um maior desgaste em alguns contatos, tal como: contato fixo 04, 05, 06 e 07. Através da Figura 40 e Figura 41 é possível verificar melhor o desgaste do contato fixo 06 e contato fixo 07 respectivamente, os pontos desgastados com maior intensidade são indicados pelas setas nas figuras.

Figura 40 - Contato fixo 06 do regulador de tensão



Fonte: Do autor (2020)

Figura 41 - Contato fixo 07 do regulador de tensão



Fonte: Do autor (2020)

Acredita-se que o maior desgaste nos contatos 06 e 07, principalmente, pode estar atrelado as condições de operação do regulador no local onde foi instalado. Tudo leva a crer que o equipamento tenha manobrado mais vezes sobre os contatos mais desgastados visualmente, através da realização de manobras de trocas de taps com mais frequência nestas posições (SHORT, 2004). Além disso, o desgaste mais acentuado nestes contatos pode ser também observado através dos dados de perda de massa da Tabela 13. Verifica-se que os contatos 04, 05, 06 e 07 também tiveram aumento nos seus níveis de massa, porém absorveram sensivelmente menos massa que os demais contatos.

#### 4.1.5 Ensaio de desgaste abrasivo por roda de borracha e areia

Inicialmente foram medidas as massas dos contatos móveis novos, os corpos de prova que são apresentados na Figura 22. Após a realização do ensaio de desgaste abrasivo por roda de borracha e areia, os contatos móveis foram novamente pesados, visando calcular a perda de massa obtida durante o ensaio. A Tabela 14 apresenta os resultados encontrados de perda de massa, após os corpos de prova terem sido ensaiados.

Tabela 14 - Dados da massa dos corpos de prova analisados durante o ensaio de desgaste

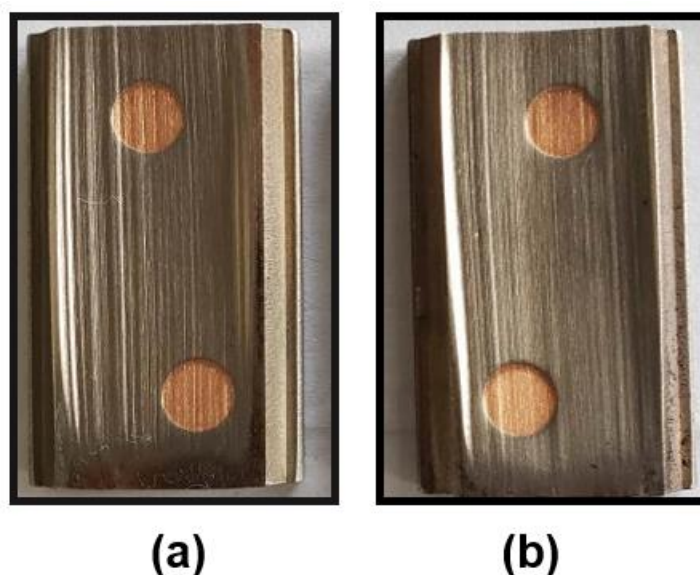
Método	Corpo de prova a		Corpo de prova b	
	[g]	[%]	[g]	[%]
Antes do ensaio de desgaste	33,1564	100	35,4821	100
Após o ensaio de desgaste	30,4885	91,9536	31,6693	89,2543
Total de perda	2,6679	8,0464	3,8128	10,7457

Fonte: Do autor (2020)

Através da Tabela 14 é possível verificar que a massa dos contatos antes da realização do ensaio de desgaste era um pouco maior no corpo de prova da Figura 22(b). Inicialmente os corpos de prova eram praticamente iguais quanto a massa, no entanto, apesar de serem contatos semelhantes foi necessário realizar um processo de usinagem da superfície visando retirar imperfeições e enquadrá-los dentro das especificações de rugosidade requisitadas pela norma ASTM G65-00. Dessa forma, os contatos ficaram com valores de massa pouco diferentes no momento de realizar o ensaio de desgaste abrasivo.

Na Figura 42, após realizado o ensaio de desgaste abrasivo por roda de borracha e areia, é possível verificar o resultado dos contatos móveis ensaiados, apresentando marcas características típicas de desgaste por abrasômetro do tipo roda de borracha na superfície ensaiada.

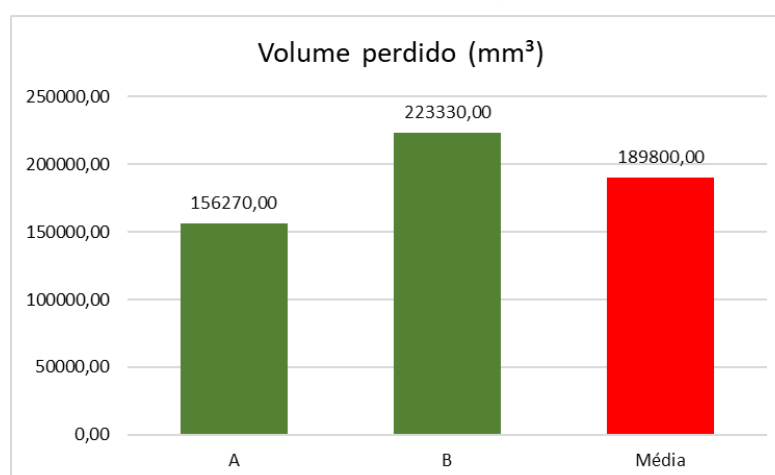
Figura 42 - Corpos de prova após ensaio de desgaste abrasivo por roda de borracha e areia (a) corpo de prova a (b) corpo de prova b



Fonte: Do autor (2020)

Através da Figura 42 é possível observar que ambos os corpos de prova apresentam condição visual de desgaste abrasivo acentuado. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** faz um comparativo entre os volumes perdidos por cada corpo de prova, obtidos através da Equação (3).

Figura 43 - Comparativo do resultado do ensaio de desgaste entre os corpos de prova “a” e “b” da Figura 42



Fonte: Do autor (2020)

Analisando a Figura 43 observa-se que o corpo de prova A apresentou maior resistência ao desgaste e por conseguinte melhor desempenho do que o corpo

de prova B, resultando numa perda de volume de 156.270 mm<sup>3</sup> contra 223.330 mm<sup>3</sup>. Se considerarmos que os dois contatos são praticamente iguais e são utilizados na mesma atividade dentro do regulador, pode-se ainda calcular a média entre eles sendo 189.800 mm<sup>3</sup>.

Apesar dos resultados encontrados no ensaio de desgaste sugerirem que os corpos de prova ensaiados não se mostraram muito resistentes ao ensaio de desgaste abrasivo, contudo deve-se considerar ainda que talvez outras características citadas apontem para a utilização deste compósito nos contatos móveis de reguladores de tensão, em razão da importância maior destas características ao equipamento. Diversos aspectos são relevantes na escolha de um material para utilização como contato elétrico, de forma que atenda a aspectos de propriedades elétricas, térmicas, mecânicas e químicas dos materiais de contato para cada aplicação. Devido à não existência de um material capaz de atender a todas as exigências de operação dos contatos elétricos, vários materiais são utilizados. Dessa forma, eles são usados em aplicações de arco de média e alta tensão, devido a suprir as condições características desses sistemas (ASM HANDBOOKS, 1984).

#### 4.1.6 Resultados dos ensaios de perfilometria

A Tabela 15 apresenta os valores de rugosidade obtidos para as amostras medidas em junho de 2019. Através da Tabela 16, para efeito de comparação, estão apresentados os valores de rugosidade obtidos para essas mesmas amostras nessas mesmas regiões, em julho de 2020.

Tabela 15 - Valores da rugosidade micrométrica obtidos por rugosímetro linear em junho 2019

Regiões	Amostra 1		Amostra 2	
	Ra (µm)	Rz (µm)	Ra (µm)	Rz (µm)
Ponto 1	0,9	6,7	0,6	4,9
Ponto 2	1,1	7,4	0,8	5,1
Ponto 3	0,9	5,7	0,5	4,1

Fonte: Do autor (2020)

Tabela 16 - Valores de rugosidade micrométrica obtidos por rugosímetro linear em julho 2020

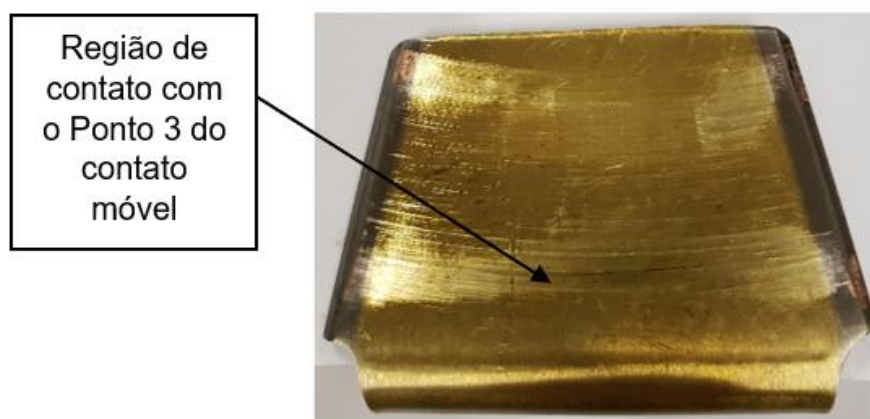
Regiões	Amostra 1		Amostra 2	
	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )
Ponto 1	0,7	6,0	0,6	5,2
Ponto 2	1,1	8,4	0,8	6,0
Ponto 3	1,0	7,7	0,8	5,9

Fonte: Do autor (2020)

Em geral as amostras 1 e 2, comparativamente as medidas realizadas em junho de 2019, tiveram aumento dos valores de rugosidade Rz, ou seja, possuem relação com os picos e vales, isso evidencia uma alteração da topografia da amostra, que pode estar associada ao desgaste dela.

Comparando os valores de Rz no Ponto 3 da Tabela 15 com o da Tabela 16, dados de junho de 2019 e julho de 2020 respectivamente, percebe-se que há aumento considerável do valor de Rz tanto para a amostra 1 quanto para a amostra 2. Sugere-se que essa alteração acentuada na textura em Rz no Ponto 3, ocorra em razão do desgaste nesse ponto ser maior que nos outros dois pontos analisados, aumentando assim a rugosidade na região do Ponto 3. Muito provavelmente esse desgaste é maior no Ponto 3 em decorrência do contato fixo ter uma dimensão maior na região em que o Ponto 3 atua. A Figura 44 permite verificar visualmente o contato fixo 07 e a região que oferece contato físico no Ponto 3 com o contato móvel durante a manobra de comutação de tap.

Figura 44 - Contato fixo 07 do regulador de tensão



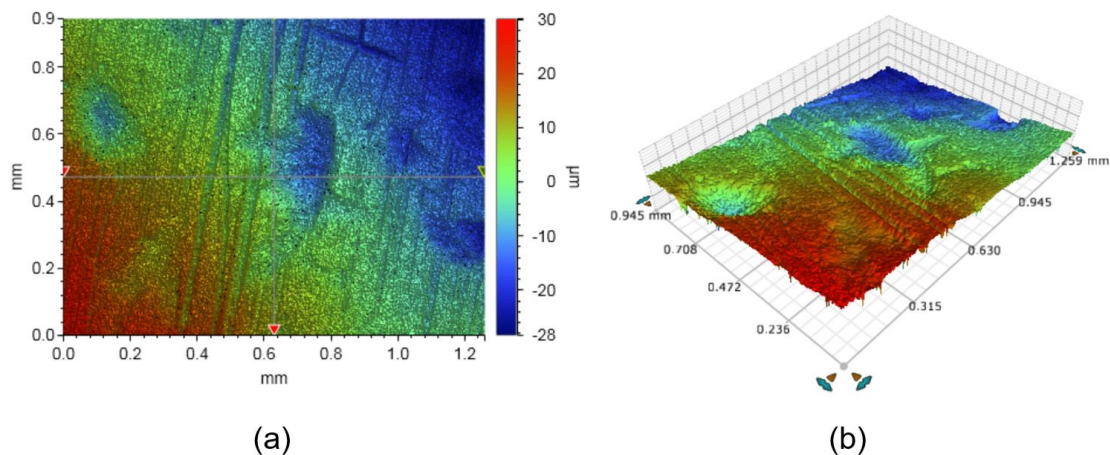
Fonte: Do autor (2020)

Com base na Figura 44 é possível verificar visualmente marcas de desgaste resultante do atrito gerado durante a movimentação do contato móvel sobre o contato fixo, no processo de comutação do regulador. Percebe-se que a região do contato fixo por onde o Ponto 3 do contato móvel analisado percorre é levemente maior que os outros pontos analisados no ensaio de perfilometria. Portanto, sugere-se que o desgaste no Ponto 3 dos contatos móveis e a rugosidade Rz se acentuam em razão do contato fixo ser maior nesse ponto. Além disso, durante o período em que o regulador de tensão ficou em operação em campo, foram verificadas as condições de operação do óleo isolante de três em três meses, através da realização de ensaios físico-químicos e cromatográficos do óleo isolante. Na última análise de óleo realizada no equipamento, antes da então retirada de operação do regulador, foram encontradas partículas sólidas imersas no óleo. Dessa forma, sugere-se também que essas partículas possam influenciar no aumento do desgaste dos contatos, através da interação dessas durante a comutação de taps, agindo no desgaste abrasivo a três corpos.

Seria interessante portanto, diante de tais considerações, a continuidade de pesquisas que norteiem o acompanhamento dos níveis de rugosidade dos contatos e da análise de partículas imersas em óleo durante as manutenções programadas, uma vez que foi possível verificar que a rugosidade dos contatos se altera de maneira desproporcional ao longo de toda a superfície e que a presença de partículas sólidas em meio ao óleo podem influenciar também no desgaste prematuro dos contatos. Esse aumento da heterogeneidade da superfície dos contatos, em função do aumento da rugosidade, a cada nova comutação de taps, é preponderante para acelerar o desgaste dos contatos do regulador, uma vez que o aumento dos níveis de rugosidade diminui o “contato perfeito” entre os corpos e acelera o desgaste. Dessa forma, o desenvolvimento de estudos ou até mesmo a criação de um modelo matemático ou um novo protocolo de manutenções que permita acompanhar mais de perto o desgaste e o envelhecimento dos contatos, poderiam evitar danos graves aos reguladores de tensão ao evitar a ocorrência de falhas precoces destes componentes.

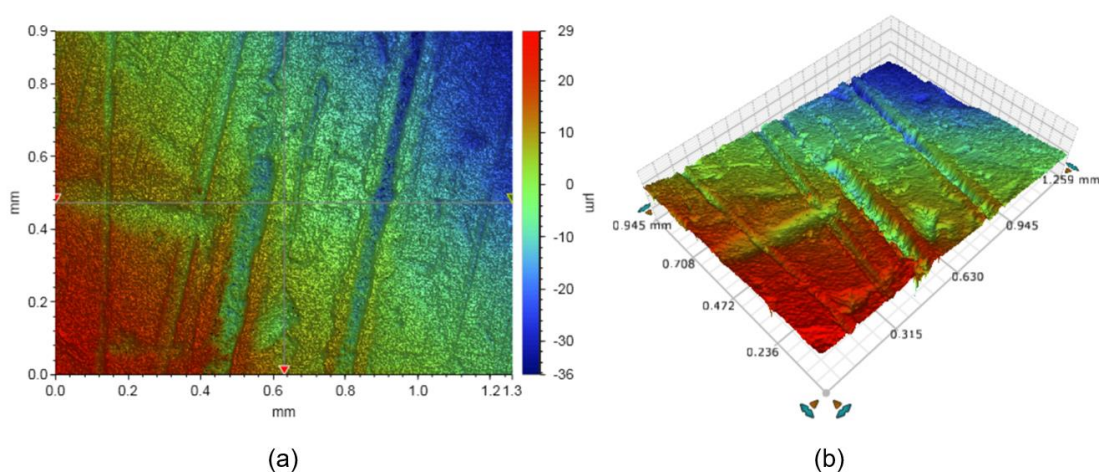
Visando embasar os resultados até aqui encontrados a Figura 45, Figura 46 e a Figura 47 descrevem as imagens obtidas por perfilometria da superfície do contato móvel 1, no formato 2D e 3D respectivamente, antes destes contatos serem instalados no regulador de tensão e irem a campo.

Figura 45 - Imagens obtidas por perfilometria da Amostra 1 no Ponto 1 (a) 2D (b) 3D



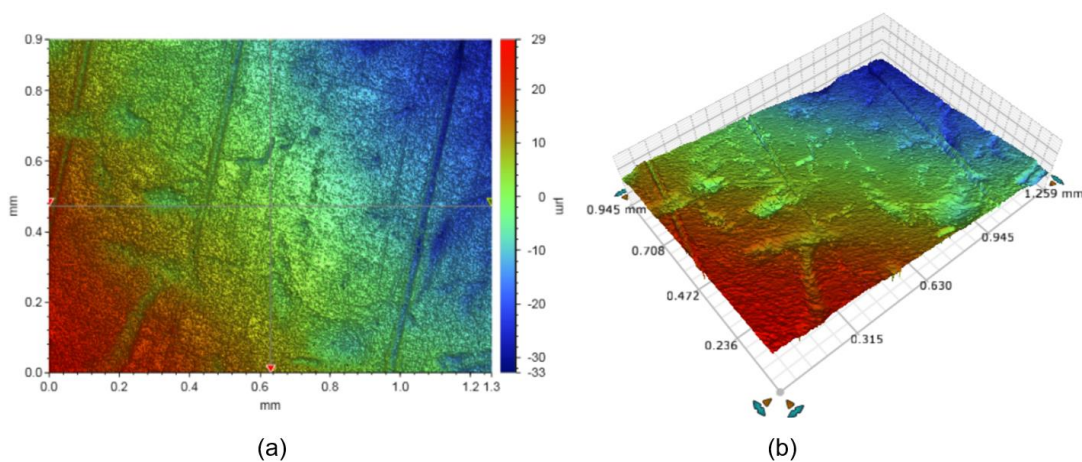
Fonte: Do autor (2019)

Figura 46 - Imagens obtidas por perfilometria da Amostra 1 no Ponto 2 (a) 2D (b) 3D



Fonte: Do autor (2019)

Figura 47 - Imagens obtidas por perfilometria da Amostra 1 no Ponto 3 (a) 2D (b) 3D

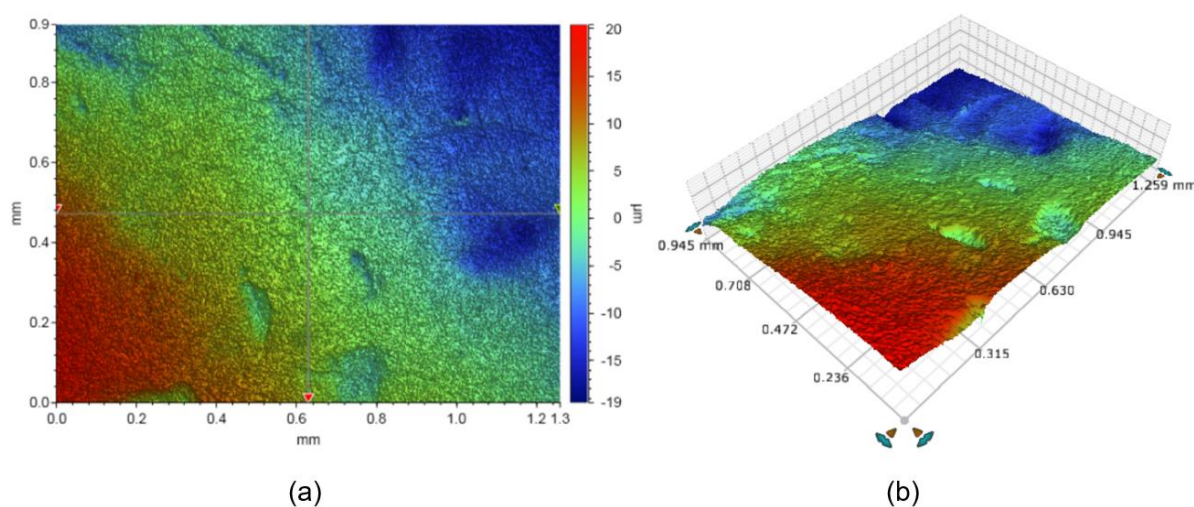


Fonte: Do autor (2019)

A superfície micrométrica do contato móvel 1 apresentada na Figura 45, Figura 46 e Figura 47 permite inferir que a superfície inicial deste contato móvel já continha bastante irregularidades mesmo antes deste ir a campo em operação no regulador.

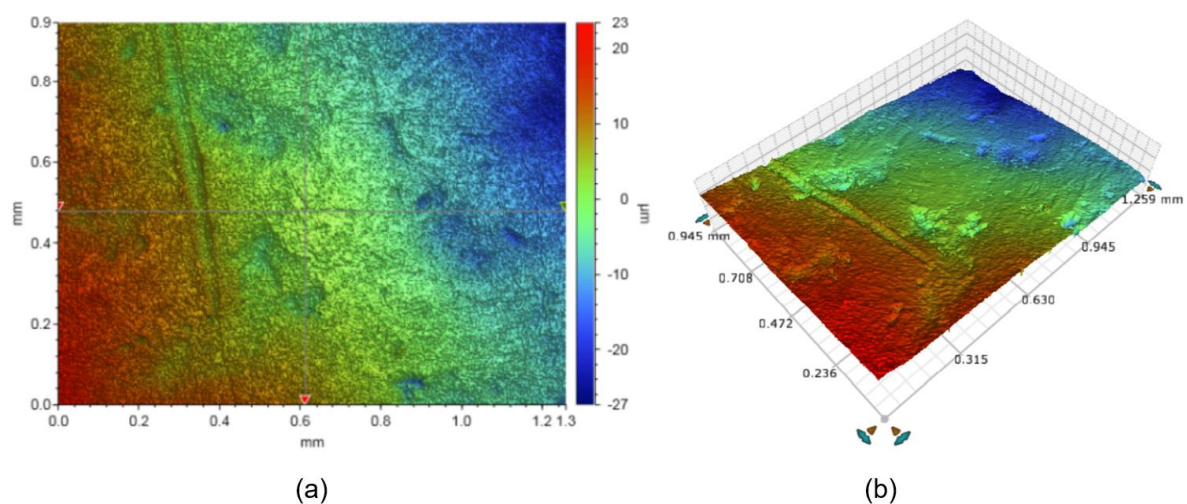
A Figura 48, Figura 49 e a Figura 50 descreve as imagens obtidas por perfilometria da superfície do contato móvel 2, no formato 2D e 3D respectivamente.

Figura 48 - Imagens obtidas por perfilometria da Amostra 2 no Ponto 1 (a) 2D (b) 3D



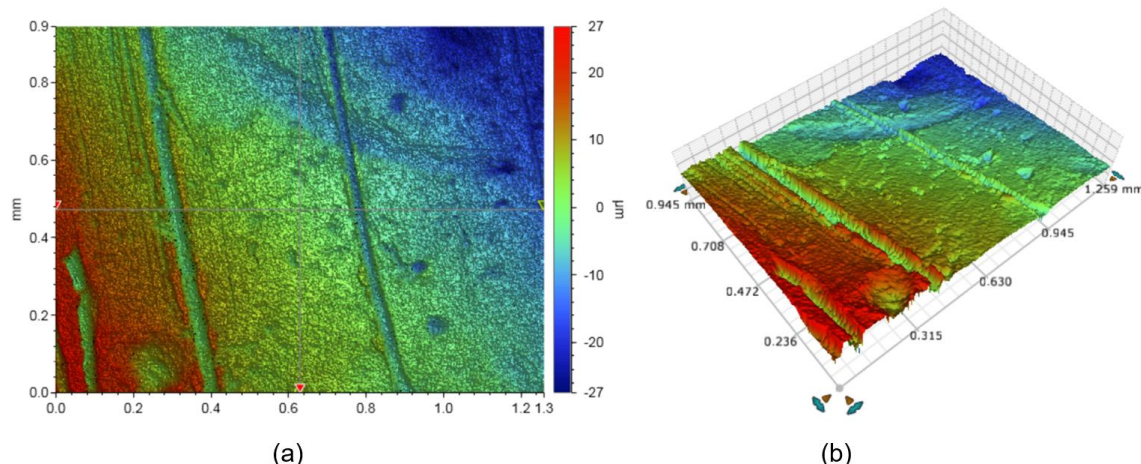
Fonte: Do autor (2019)

Figura 49 - Imagens obtidas por perfilometria da Amostra 2 no Ponto 2 (a) 2D (b) 3D



Fonte: Do autor (2019)

Figura 50 - Imagens obtidas por perfilometria da Amostra 2 no Ponto 3 (a) 2D (b) 3D



Fonte: Do autor (2019)

Novamente a superfície micrométrica do contato móvel 2 apresentada na Figura 48, Figura 49 e a Figura 50 sugere que assim como a superfície do contato móvel 1 a superfície do contato 2 era também bastante irregular antes dos contatos serem utilizados no regulador.

Seria interessante a realização de novos ensaios de imagens perfilométricas da superfície dos contatos, após o retorno destes de operação do regulador de tensão, a fim de comparar a superfície inicial com a final. Contudo, não foi possível realizar novamente este ensaio devido à fatores externos durante a pesquisa.

#### 4.1.7 Resultados de ensaios em MEV

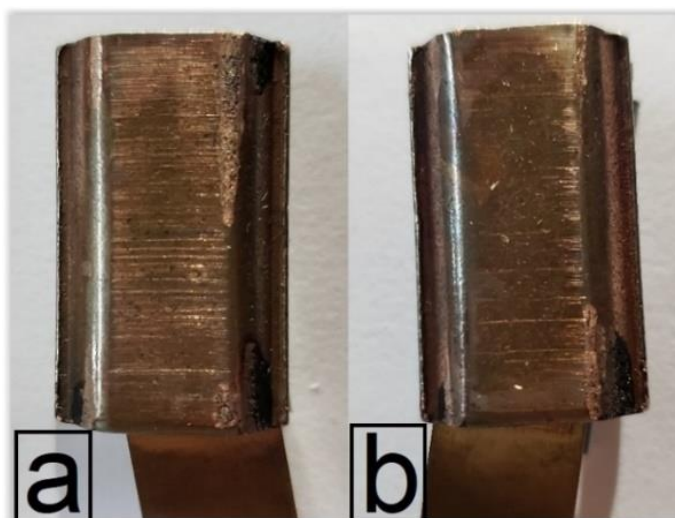
O ensaio em MEV foi aplicado aos contatos móveis e fixos que ficaram em operação no regulador de tensão em campo durante um ano e foi aplicado também aos contatos móveis novos adquiridos, após a utilização destes no ensaio de desgaste abrasivo por roda de borracha e areia.

##### 4.1.7.1 MEV dos contatos móveis e fixos usados no regulador de tensão

Após a utilização dos contatos móveis e fixos no regulador de tensão em campo é possível verificar visualmente através da Figura 51 marcas de desgaste nos

contatos móveis e marcas de desgaste nos contatos fixos como já visto anteriormente na Figura 44.

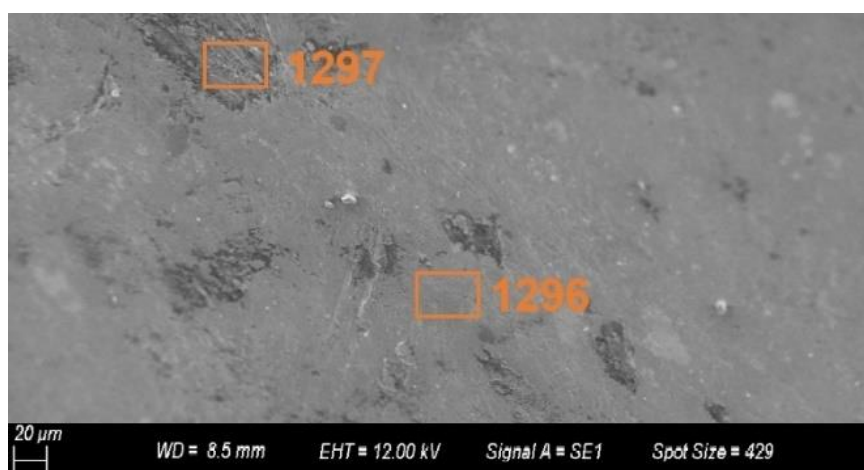
Figura 51 - Contatos móveis desgastados, após período em operação no regulador  
(a) contato móvel a (b) contato móvel b



Fonte: Do autor (2020)

A análise desses contatos em MEV é interessante uma vez que as manobras de troca de taps criam marcas de desgaste na superfície dos contatos, acarretam na perda de massa e danificam a superfície como um todo (SIMAS FILHO, 2004). A Figura 52 apresenta os pontos analisados em MEV na superfície do contato móvel da Figura 51(a).

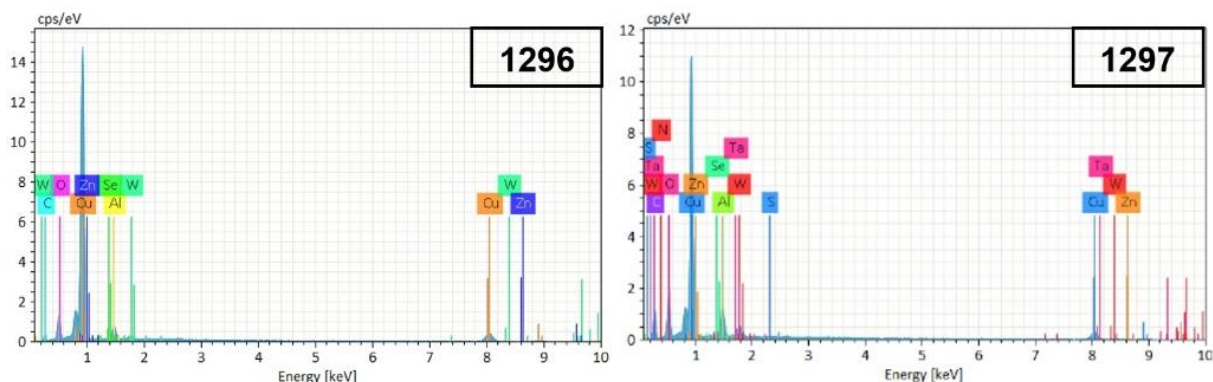
Figura 52 - Pontos analisados em MEV no contato móvel da Figura 51(a). Aumento de 2000x



Fonte: Do autor (2020)

Os espectros de EDS e a quantificação dos elementos químicos encontrados nos pontos analisados da Figura 52 podem ser observados na Figura 53 e na Tabela 17.

Figura 53 - Espectros de EDS analisados nos ponto da Figura 52



Fonte: Do autor (2020)

Tabela 17 - Porcentagem dos elementos químicos nos pontos analisados na Figura 51.

Ponto 1296		Ponto 1297	
Elemento	%	Elemento	%
Cu	83,18	Cu	66,45
O	5,67	C	11,64
C	4,79	O	10,08
Zn	2,72	Al	4,17
Al	2,36	W	3,68
W	1,17	Zn	2,88
Se	0,10	N	0,54
		Ta	0,46
		S	0,09
		Se	0,02

Fonte: Do autor (2020)

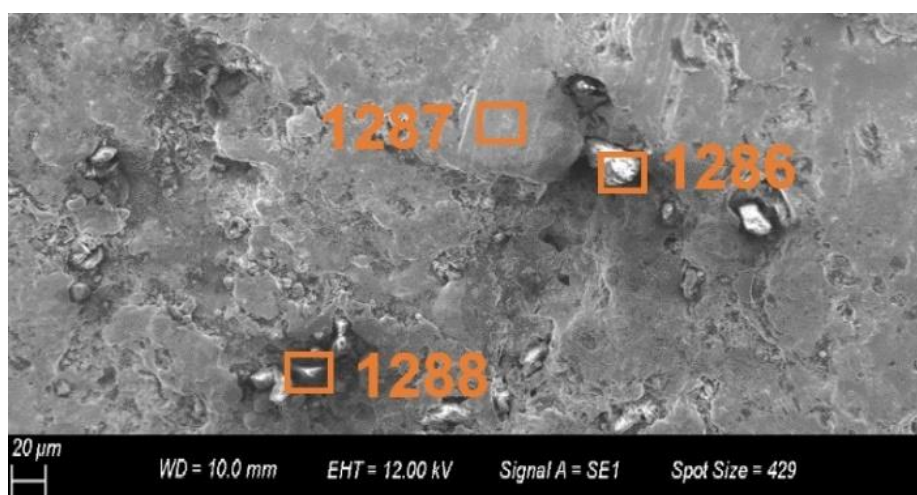
A Tabela 17 apresenta a presença de grande quantidade do elemento cobre e boa quantidade do elemento tungstênio, conforme esperado, afinal a análise química do contato móvel apresentou estes como seus componentes principais (DESFORGES, 1979). Também foi detectada a presença em grande quantidade do elemento carbono na superfície do contato móvel. Isso indica que o carbono encontrado tenha relação com a presença de óleo isolante do regulador de tensão

como contaminante da superfície do contato móvel. Durante o chaveamento de uma nova posição de tap ocorre o surgimento de arco elétrico, essa descarga elétrica provoca a queima do óleo isolante e com isso ocorre a formação de carbono, conseqüentemente esse carbono pode ser facilmente absorvido pelos contatos (FERREIRA, 2019). Além disso, a formação de carbono pode estar associada também a outro mecanismo de envelhecimento, o chamado efeito de longo prazo sobre o comutador. Este efeito começa através da formação de óleo polimerizado sobre os contatos, esse filme orgânico pode prejudicar a eficiência de operação dos contatos em virtude de formar uma camada menos condutora sobre a superfície dos contatos (ERBRINK *et al.*, 2008).

Foi também possível detectar a presença do elemento químico zinco em boa quantidade. O elemento zinco não foi detectado na análise química do contato móvel, mas sim no contato fixo. Dessa forma, pode-se sugerir que ao longo do período em operação e das quase 2500 manobras do regulador pode ter havido adesão de material do contato fixo no contato móvel.

A Figura 54 apresenta os pontos analisados em MEV na superfície do contato fixo da Figura 27(b), quanto a parte “corte X” do contato.

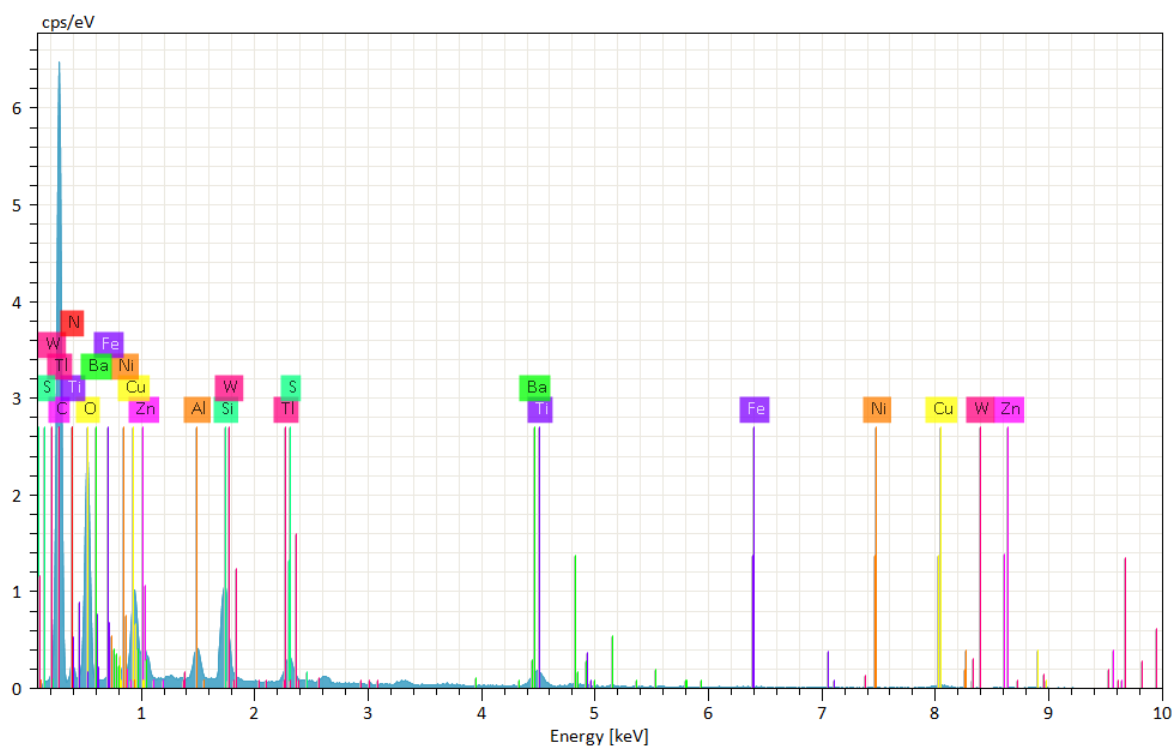
Figura 54 - Pontos analisados em MEV no contato fixo da Figura 27(b), na zona “corte X”. Aumento de 2000x



Fonte: Do autor (2020)

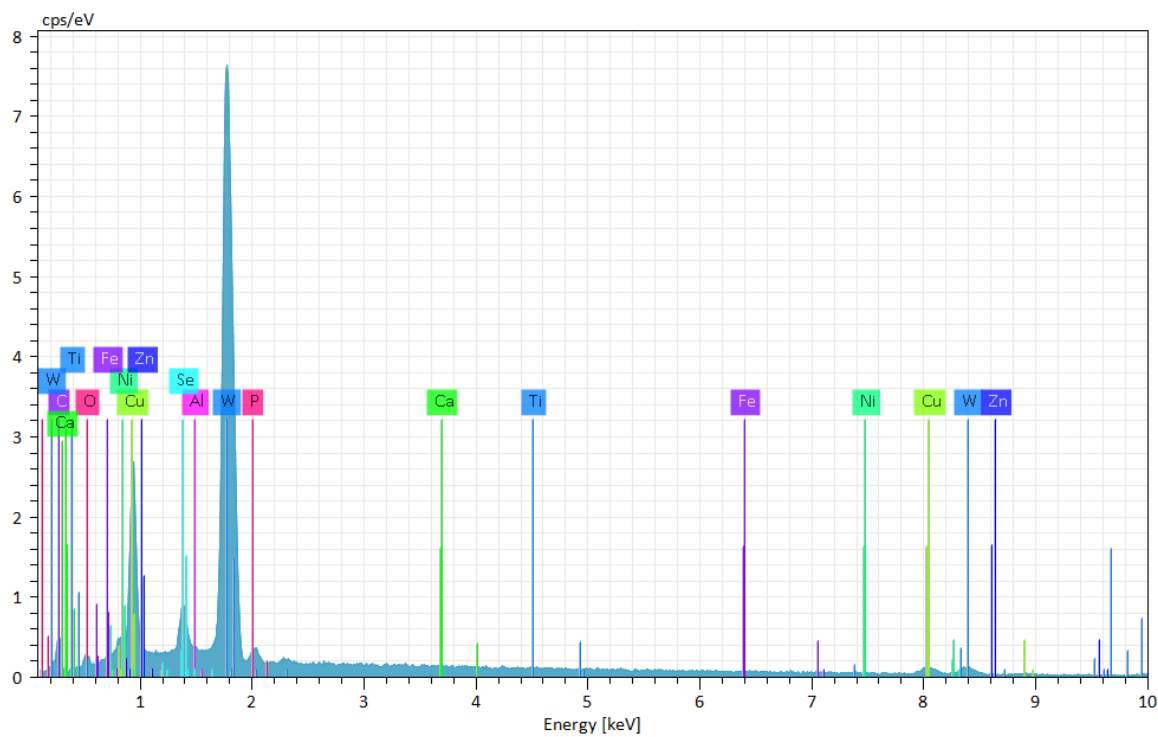
Os espectros de EDS e a quantificação dos elementos químicos encontrados nos pontos analisados da Figura 54 podem ser observados na Figura 55, Figura 56, Figura 57 e na Tabela 18.

Figura 55 - Espectro de EDS analisado no ponto 1286 da Figura 54



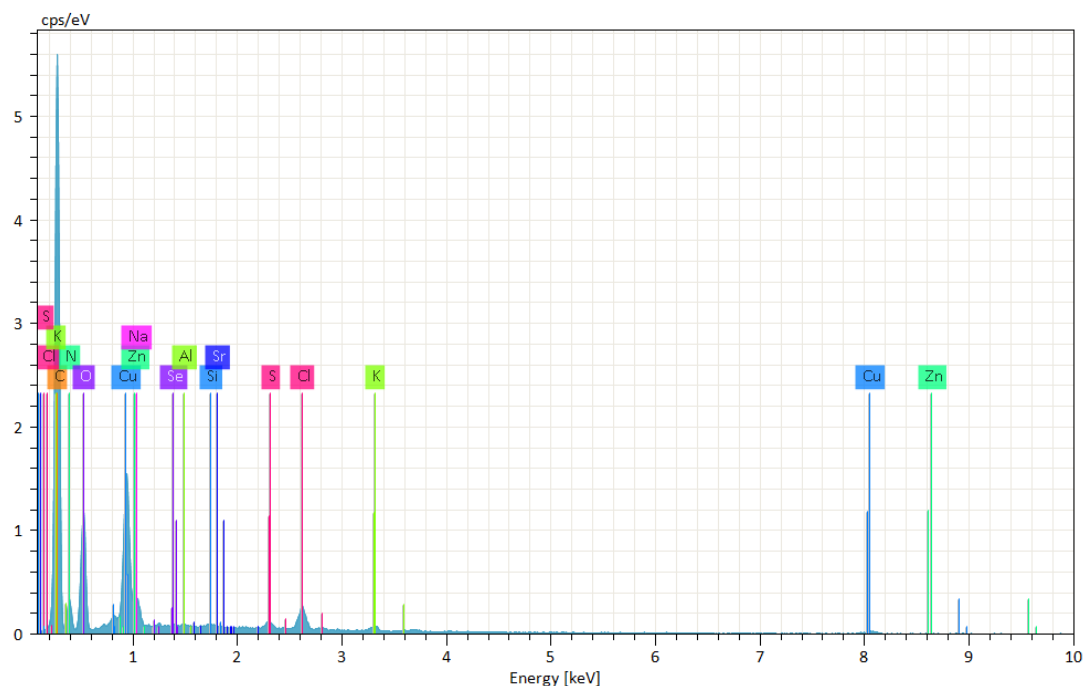
Fonte: Do autor (2020)

Figura 56 - Espectro de EDS analisado no ponto 1287 da Figura 54



Fonte: Do autor (2020)

Figura 57 - Espectro de EDS analisado no ponto 1288 da Figura 54



Fonte: Do autor (2020)

Tabela 18 - Porcentagem dos elementos químicos nos pontos analisados na Figura 54.

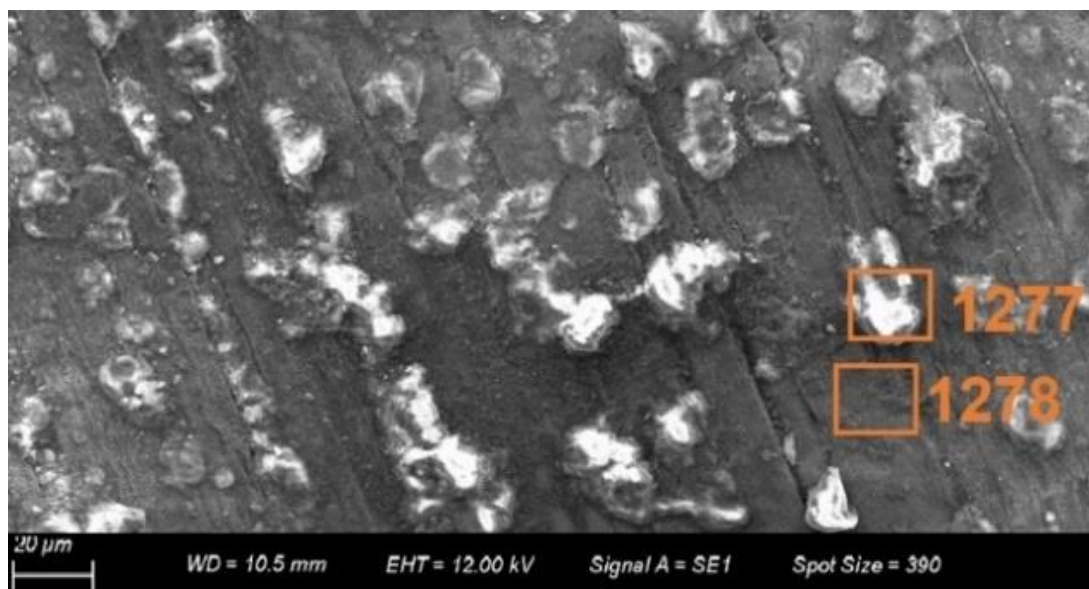
Ponto 1286		Ponto 1287		Ponto 1288	
Elemento	%	Elemento	%	Elemento	%
C	46,53	W	71,29	C	48,59
O	25,94	Cu	19,74	Cu	18,03
Cu	8,75	C	5,65	O	17,22
Si	3,98	O	1,11	N	10,27
Ti	3,68	Zn	0,79	Zn	2,13
Ba	3,28	Se	0,54	Cl	1,84
N	2,48	Ni	0,41	K	0,54
S	1,54	Al	0,19	S	0,49
Zn	1,31	Ti	0,15	Na	0,48
Al	0,98	Fe	0,07	Si	0,14
W	0,93	Ca	0,06	Sn	0,13
Fe	0,35	P	0,00	Al	0,08
Tl	0,25			Se	0,08
Ni	0,00				

Fonte: Do autor (2020)

Através da Tabela 18 é possível identificar a presença dos elementos tungstênio e cobre em grande quantidade, afirmando assim os resultados apresentados durante a análise química, confirmando estes dois elementos como os seus principais elementos químicos. Além disso, detectou-se a presença em grande quantidade do elemento carbono. Assim como no ensaio do contato móvel o carbono foi novamente detectado, porém este não faz parte da composição química inicial de ambos os contatos. Sugere-se novamente que o aparecimento do carbono é um indicativo de que o óleo isolante é capaz de contaminar a superfície dos contatos. Além disso, o aumento sensível na massa dos contatos fixos, detectado no ensaio de massa, pode ser fator direto do acúmulo de óleo isolante impregnado na superfície destes.

A Figura 58 apresenta os pontos analisados em MEV na superfície do contato fixo da Figura 27(b), quanto a parte “corte Y” do contato fixo utilizado no regulador de tensão.

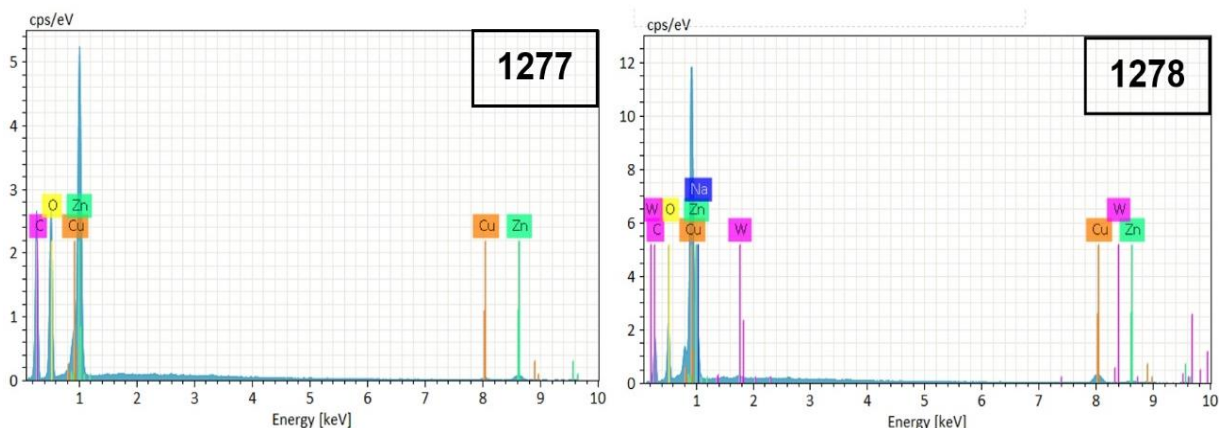
Figura 58 - Pontos analisados em MEV no contato fixo da Figura 27(b), na zona “corte Y”. Aumento de 2000x



Fonte: Do autor (2020)

Os espectros de EDS e a quantificação dos elementos químicos encontrados nos pontos analisados da Figura 58 podem ser observados na Figura 59 e na Tabela 19.

Figura 59 - Espectros de EDS analisados nos ponto da Figura 54



Fonte: Do autor (2020)

Tabela 19 - Porcentagem dos elementos químicos nos pontos analisados na Figura 54.

Ponto 1277		Ponto 1278	
Elemento	%	Elemento	%
C	36,03	Cu	51,17
Zn	33,06	Zn	17,29
O	24,86	C	13,17
Cu	6,05	O	11,32
		Na	0,54
		W	0,51

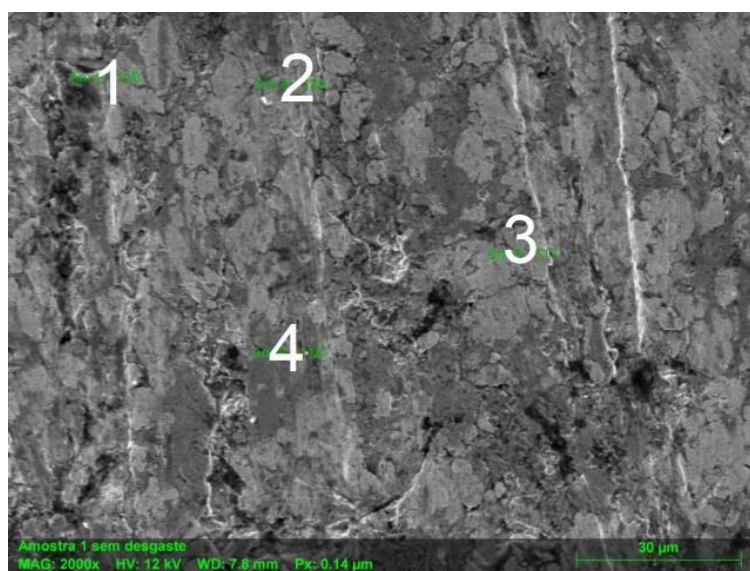
Fonte: Do autor (2020)

A Tabela 19 apresenta novamente grande quantidade dos elementos cobre e zinco, confirmando-os novamente como elementos principais, assim como nos resultados apresentados na análise química desta parte do contato fixo. Detectou-se também a presença novamente de grande quantidade de carbono, supostamente advinda do óleo isolante. Em pequena quantidade o elemento tungstênio foi também encontrado na superfície do contato fixo, criando assim a possibilidade de adesão de material particulado do contato móvel no contato fixo, advindo do atrito gerado durante as manobras de comutação (FERREIRA, 2019).

#### 4.1.7.2 MEV dos contatos móveis novos

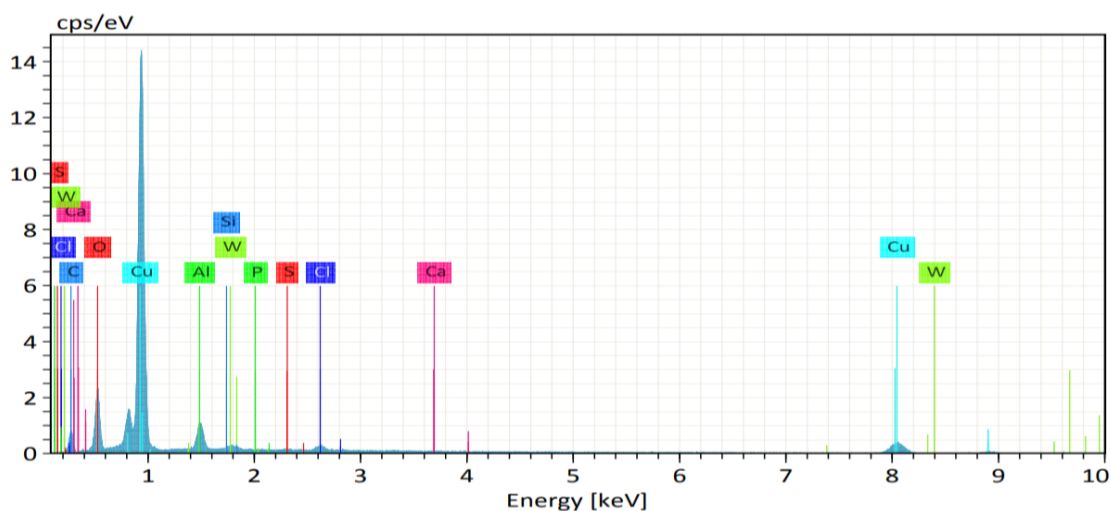
A Figura 60 apresenta quatro pontos analisados no ensaio de microscopia eletrônica por varredura (MEV), foram definidos quatro pontos distintos para análise da superfície do corpo de prova da Figura 42 (a), em regiões que não foram atingidas pelo ensaio de desgaste, indicados com os números 1 a 4 na Figura 60. A Figura 61, Figura 62, Figura 63 e Figura 64 ilustra os espectros EDS para cada ponto ensaiado.

Figura 60 - Microscopia eletrônica do corpo de prova da Figura 42(a) em zonas não desgastadas pelo ensaio de desgaste. Aumento de 2000x



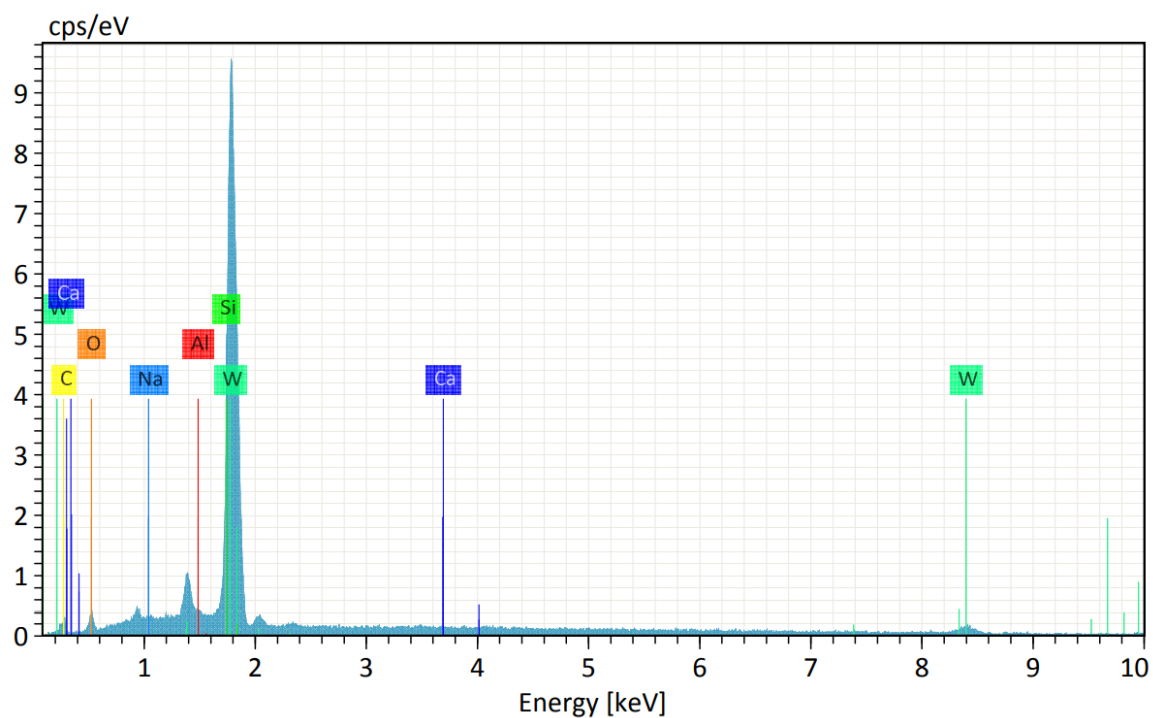
Fonte: Do autor (2020)

Figura 61 - Espectro de EDS do Ponto 1 da Figura 60



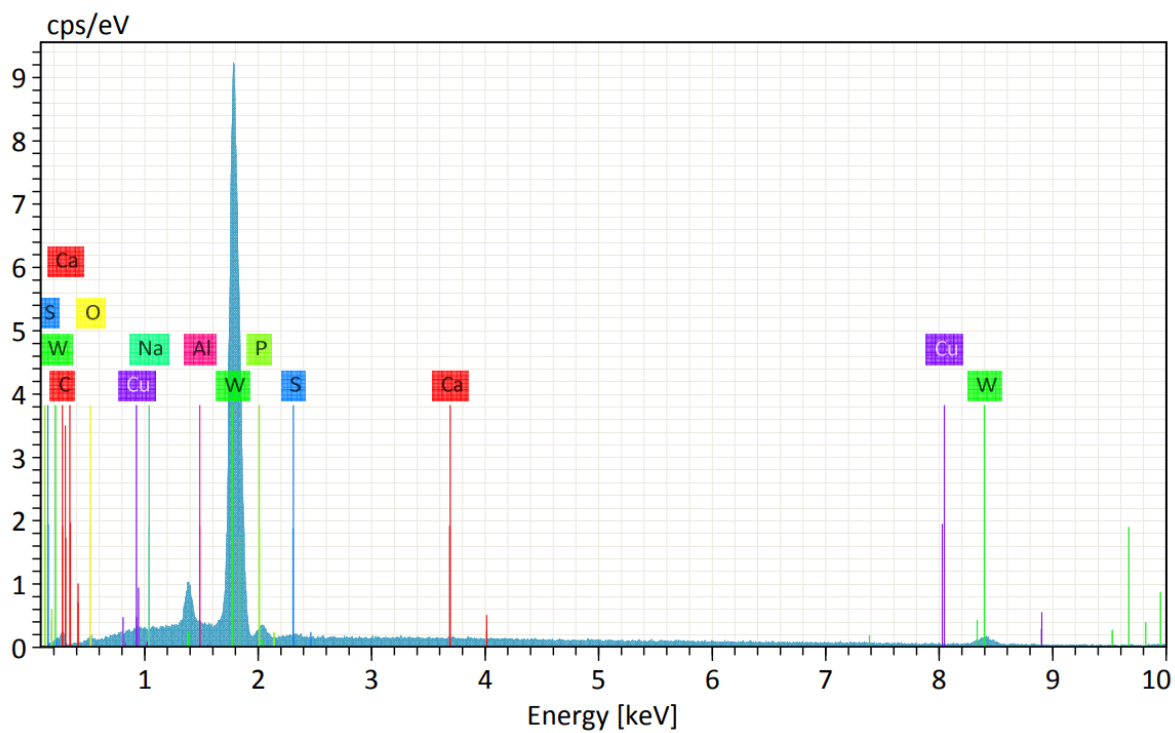
Fonte: Do autor (2020)

Figura 62 - Espectro de EDS do Ponto 2 da Figura 60



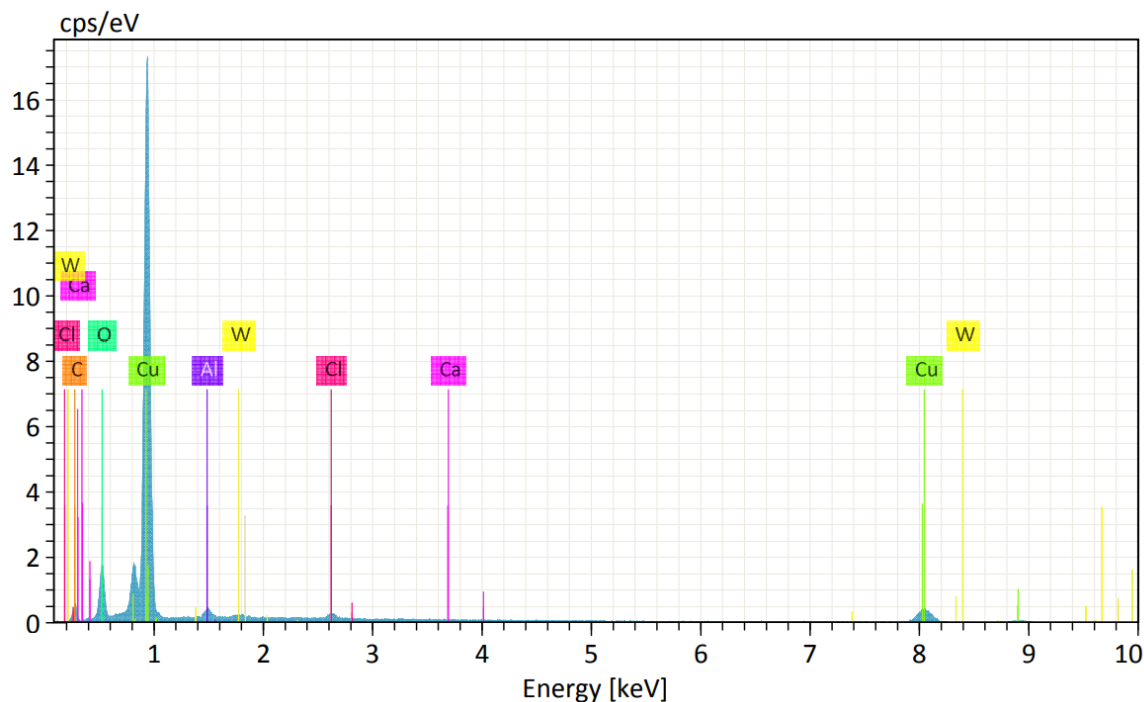
Fonte: Do autor (2020)

Figura 63 - Espectro de EDS do Ponto 3 da Figura 60



Fonte: Do autor (2020)

Figura 64 - Espectro de EDS do Ponto 4 da Figura 60



Fonte: Do autor (2020)

Os resultados apresentados nos espectros extraídos dos pontos da Figura 60 indicam a presença de elementos químicos como fósforo, silício, alumínio, cálcio e enxofre, compostos em pequenas quantidades conforme apresentado na Tabela 20. Esses elementos podem ser encontrados nessas condições em pós de cobre por exemplo. Além disso, é comum a presença em baixa quantidade de ferro, níquel, oxigênio e molibdênio, conforme apresenta a Tabela 20, em pós de tungstênio. Portanto, tem-se uma relação apropriada entre os dois elementos principais encontrados em maior quantidade nas análises, cobre e tungstênio respectivamente, tal como um processo de sinterização entre eles. Assim, os elementos encontrados em pequenas quantidades podem estar inseridos no corpo de prova em virtude dos dois elementos principais (COSTA, 2004).

A Tabela 20 apresenta um comparativo quantitativo dos percentuais pontuais de cada elemento químico, localizadas através dos espectros de EDS analisados nos pontos indicados pela Figura 60.

Tabela 20 - Dados EDS dos quatro pontos selecionados do corpo de prova da Figura 27(a) em zonas sem desgaste

Elemento	Ponto 1 [Peso%]	Ponto 2 [Peso%]	Ponto 3 [Peso%]	Ponto 4 [Peso%]
Cobre	77,35	0,00	0,56	86,58
Oxigênio	9,77	3,38	1,06	7,02
Carbono	7,12	4,16	2,78	3,97
Alumínio	3,28	0,54	0,36	1,08
Tungstênio	1,28	92,77	91,30	0,38
Cloro	0,90	0,00	0,00	0,82
Cálcio	0,12	0,00	0,05	0,15
Enxofre	0,08	0,00	0,00	0,00
Silício	0,06	0,00	0,00	0,00
Fósforo	0,05	0,00	0,19	0,00
Sódio	0,00	0,09	0,00	0,00

Fonte: Do autor (2020)

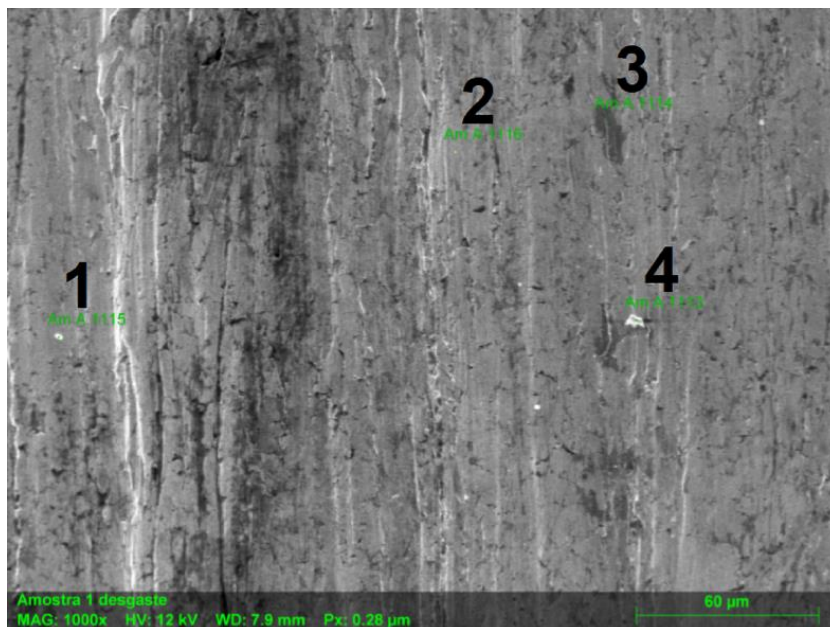
Os resultados encontrados na Tabela 20 apresentam altas concentrações de cobre e tungstênio em diferentes regiões do corpo de prova, sugerindo que o corpo de prova analisado se trata do compósito W-Cu, obtido por meio de uma sinterização de cobre e tungstênio. Além disso, contatos de W-Cu são amplamente utilizados em equipamentos elétricos de alta voltagem, devido suas propriedades físicas de alta resistência à solda, erosão por arco, alta condutividade térmica e elétrica, podendo assim serem utilizados em reguladores de tensão (COSTA, 2004).

Geralmente o compósito W-Cu é produzido por metalurgia do pó e a combinação de um metal de alta condutividade com um metal refratário é o único caminho para obtenção das características necessárias à esse compósito. Dessa forma, os resultados apresentados na Tabela 20 apontam o cobre como material de alta condutividade e o tungstênio como metal refratário. As propriedades requeridas são dependentes da composição e do processo de fabricação, ou seja, o tamanho da partícula, a forma e a distribuição da fase refratária, a homogeneidade da microestrutura e a quantidade de poros afetam as propriedades elétricas, mecânicas e térmicas do material compósito (COSTA, 2004).

A Figura 65 apresenta quatro pontos analisados em MEV, foram definidos quatro pontos distintos para análise do corpo de prova da Figura 27(a), em regiões atingidas pelo ensaio de desgaste realizado. Os pontos analisados foram identificados

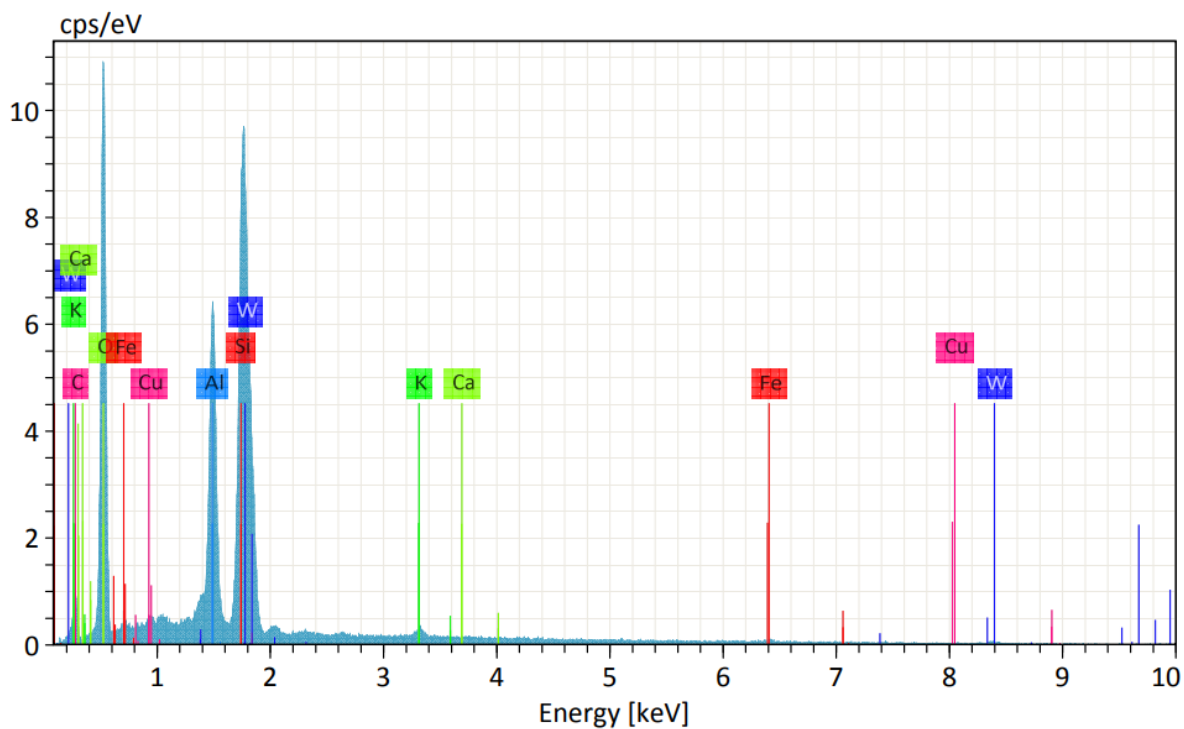
com os números de 1 a 4 na Figura 65, além disso, a Figura 66, Figura 67, Figura 68 e Figura 69 apresenta o resultado dos espectros EDS destes pontos.

Figura 65 - Microscopia eletrônica do corpo de prova da Figura 42(a) em zonas desgastadas pelo ensaio de desgaste. Aumento de 1000x



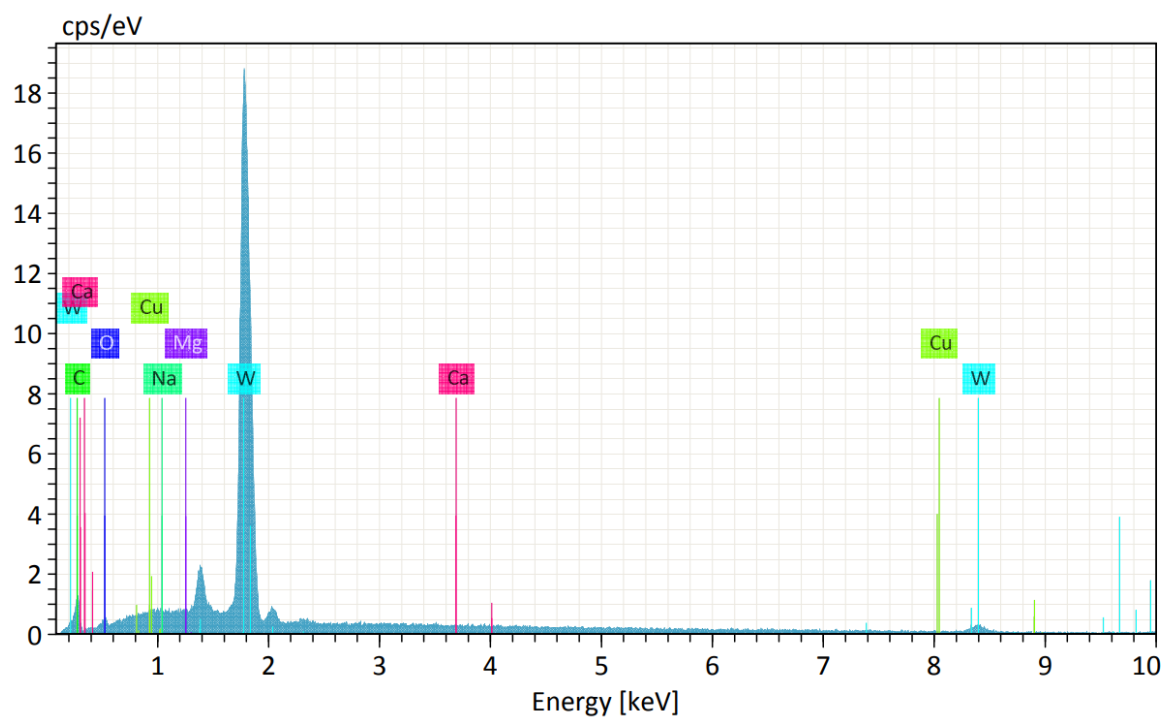
Fonte: Do autor (2020)

Figura 66 - Espectro de EDS do Ponto 1 da Figura 65



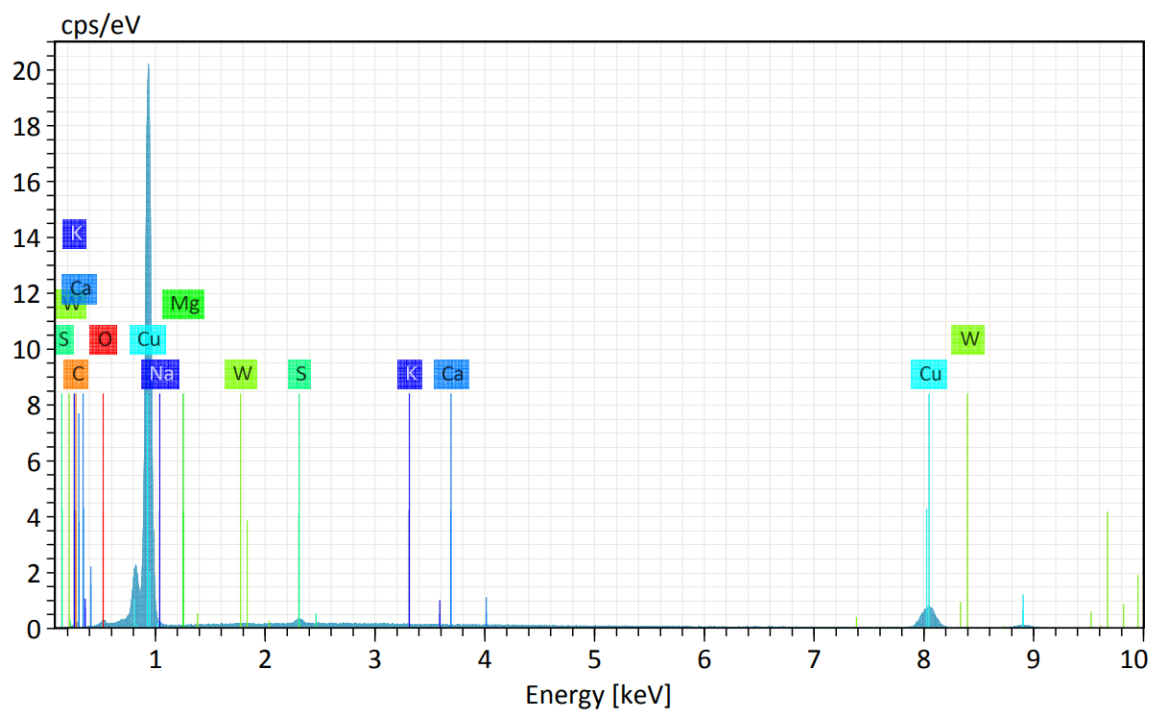
Fonte: Do autor (2020)

Figura 67 - Espectro de EDS do Ponto 2 da Figura 65



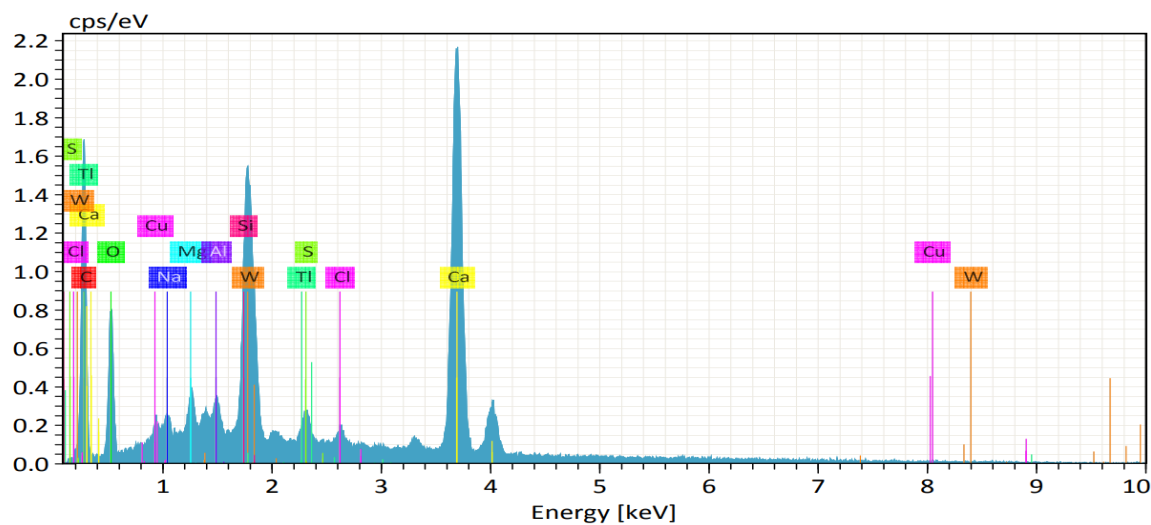
Fonte: Do autor (2020)

Figura 68 - Espectro de EDS do Ponto 3 da Figura 65



Fonte: Do autor (2020)

Figura 69 - Espectro de EDS do Ponto 4 da Figura 65



Fonte: Do autor (2020)

A Tabela 21 apresenta um comparativo quantitativo das massas pontuais de cada elemento químico, localizadas através dos espectros de EDS analisados nos pontos indicados pela Figura 65.

Tabela 21 - Dados EDS dos quatro pontos selecionados do corpo de prova da Figura 42(a) em zonas desgastadas por ensaio de desgaste

Elemento	Ponto 1 [Peso%]	Ponto 2 [Peso%]	Ponto 3 [Peso%]	Ponto 4 [Peso%]
Cobre	0,32	0,17	95,64	1,38
Oxigênio	38,33	1,49	0,54	14,55
Carbono	4,98	4,07	2,29	19,92
Alumínio	9,94	0,00	0,00	0,83
Tungstênio	33,59	94,26	0,22	17,89
Cloro	0,00	0,00	0,00	0,65
Cálcio	0,00	0,00	0,00	40,71
Enxofre	0,00	0,00	0,65	1,04
Silício	10,67	0,00	0,00	1,25
Fósforo	0,00	0,00	0,00	0,00
Sódio	0,00	0,00	0,62	0,67
Ferro	1,26	0,00	0,00	0,00
Potássio	0,91	0,00	0,03	0,00
Magnésio	0,00	0,00	0,00	0,95
Tálio	0,00	0,00	0,00	0,17

Fonte: Do autor (2020)

A Tabela 21 indica uma menor quantidade de cobre e tungstênio em alguns pontos, quando comparada com os dados obtidos na Tabela 20, provavelmente em função dos efeitos causados pelo ensaio de desgaste abrasivo aplicado no corpo de prova analisado. Dessa forma, é possível supor que os resultados encontrados na Tabela 21 apresentam alguns outros elementos químicos que compõem os materiais de base do corpo de prova, além do próprio cobre e tungstênio. Em razão da considerável perda de massa sofrida pelo corpo de prova, durante o ensaio de desgaste, é possível que as características químicas internas do contato sejam diferentes da superfície externa, ao analisar a superfície desgastada através do MEV. Além disso, a produção do compósito W-Cu é geralmente obtida pela infiltração de cobre líquido em um corpo poroso de tungstênio pré-sinterizado, essa técnica possui limitações, visto que produz defeitos na estrutura, tais como poros, lagos de cobre e aglomerados de tungstênio, permitindo assim que tais variações sejam observadas em análises em MEV (CHIAVERINI, 1992).

Os resultados obtidos quanto a composição química, nas Tabelas 20 e 21, reforçam a limitação existente na faixa de composição química do material, visto que o esqueleto sólido do compósito W-Cu admite apenas um determinado limite da fase líquida infiltrante, sem haver desintegração do corpo durante o processo. Além disso, o processo de infiltração (característico da infiltração de cobre líquido em corpo de tungstênio pré-sinterizado) geralmente requer que as peças construídas devam ser trabalhadas posteriormente para realizar ajustes na forma do corpo e eliminar irregularidades da superfície (COSTA, 2004).

Ainda correlacionando os dados apresentados na Tabela 20 e Tabela 21, a Tabela 22 apresenta um comparativo quantitativo das massas pontuais dos elementos químicos: silício e oxigênio, comparando os dados analisados em MEV para os pontos em zonas não desgastada e zonas desgastada pelo ensaio abrasivo para os dois elementos em questão.

Tabela 22 - Dados EDS dos elementos químicos silício e oxigênio extraídos Tabela 20 e Tabela 21

Elemento	Local analisado	Ponto 1 [Peso %]	Ponto 2 [Peso %]	Ponto 3 [Peso %]	Ponto 4 [Peso %]
Silício	Zona não desgastada	0,06	0,00	0,00	0,00
Silício	Zona desgastada	10,67	0,00	0,00	1,25
Oxigênio	Zona não desgastada	9,77	3,38	1,06	7,02
Oxigênio	Zona desgastada	38,33	1,49	0,54	14,55

Fonte: Do autor (2020)

A Tabela 22 apresenta um comparativo interessante entre os elementos químicos silício e oxigênio, visto que a análise de EDS de pontos desgastados pelo ensaio de desgaste apresentou níveis maiores de massa pontual para ambos. Portanto, sabendo que o ensaio de desgaste abrasivo por roda de borracha utiliza a areia ( $\text{SiO}_2$ ) como elemento abrasivo, é possível supor que o abrasivo aderiu ao corpo de prova da Figura 42(a), considerando que o silício e o oxigênio são os principais elementos químicos da areia utilizada no ensaio.

Em se tratando do compósito analisado e de acordo com algumas pesquisas, supõe-se que estamos trabalhando especificamente com o compósito W-50 Cu, ou seja, contendo 50% de massa de cobre. Tais afirmações podem ser confirmadas através da Tabela 8, afinal tem-se como resultado da análise química um percentual de aproximadamente 50% de cobre. Esses compósitos podem ser produzidos comercialmente com teor de 10 – 60% em massa de cobre, através da técnica de infiltração, fator que deixa marcas nos contatos como pode ser visto na Figura 22. Essas ligas, tem menor custo e possuem acesso mais fácil, porem são mais sensíveis aos ataques de oxidação de forma que não podem ser aplicadas em meio corrosivo (SANTOS, 1998). Além disso, pesquisas indicam que o compósito W-50 Cu tem uma dureza muito próxima dos valores apresentados na Tabela 6 (resultados do ensaio de dureza dos corpos de prova), cabe ressaltar que quanto maior o teor de cobre na mistura, menor será a dureza desses materiais (COSTA, 2004).

## 4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS NO ÓLEO ISOLANTE

Aqui são apresentados os resultados dos ensaios aplicados as coletas de óleo isolante do regulador de tensão.

### 4.2.1 Número de manobras do regulador

O contador de manobras de mudança de tap do regulador foi reiniciado durante a manutenção do equipamento na empresa Fluxo Transformadores. Durante os testes de manutenção o comutador foi acionado por 117 vezes, então o equipamento foi colocado de volta em operação na rede de 13,8 kV da empresa COOPERA. A Tabela 23 apresenta o número total de manobras do regulador de tensão em cada retirada de amostra de óleo do equipamento em campo em alguns períodos distintos.

Tabela 23 - Número de manobras do comutador de taps do regulador de tensão em campo

Data da análise	Número de manobras
04/06/2019	117
26/09/2019	597
20/01/2020	1302
21/04/2020	2187
29/06/2020	2496

Fonte: Do autor (2020)

Conforme apresenta a Tabela 23 em um período de aproximadamente um ano e um mês, o regulador de tensão estudado realizou cerca de 2496 manobras de mudança de taps. Analisando estes dados pode-se calcular que em média são realizadas 192 manobras por mês ou então a média de 6,4 manobras ao dia, é claro que esta realidade de operações é um fator característico do local onde o regulador de tensão foi instalado, pois o número de manobras depende de vários parâmetros, tais como: total da carga instalada sobre o equipamento, sazonalidades de consumo e demanda, entre outros.

Os dados de comutação apresentados nesta seção são de grande importância para a melhor compreensão dos dados das análises de óleo a seguir. Torna-se interessante o acompanhamento do número de manobras de comutação de taps no período em que o regulador de tensão ficou em operação em campo, uma vez que a elevação no número de manobras causa a deterioração dos componentes de comutação e do óleo isolante (KANG; BIRTWISTLE, 2001).

#### 4.2.2 Resultado das análises físico-químicas do óleo isolante

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos através das análises físico-químicas do óleo isolante do regulador de tensão durante as coletas de óleo no período em que o regulador ficou em operação em campo.

##### 4.2.2.1 Análise de aspecto visual

A Tabela 24 apresenta os resultados dos ensaios de aspecto visual do óleo isolante, durante o período de operação do regulador em campo.

Tabela 24 - Resultados das análises de aspecto visual do óleo isolante

Ensaio	04/06/2019	26/09/2019	20/01/2020	21/04/2020	29/06/2020
Aspecto Visual	Límpido	Límpido	Límpido	Límpido	Com partículas

Fonte: Do autor (2020)

Os resultados apresentados na Tabela 24 indicam que durante o período de operação do equipamento o óleo isolante se manteve dentro dos níveis exigidos pela NBR 10576:2017 para reguladores de tensão de até 36 kV, mantendo a característica “Límpida” de aspecto visual durante praticamente todas as análises de aspecto visual realizadas. Contudo, o último ensaio realizado no dia 29/06/2020 remeteu a presença de partículas imersas no óleo isolante, o ideal seria refazer este ensaio para confirmar a presença de partículas, porém o regulador de tensão já havia sido retirado de campo, não sendo possível refazer o ensaio. Ainda assim, é possível sugerir que o tempo que o equipamento ficou em operação não foi tempo o suficiente para causar alterações de aspecto visual no óleo.

#### 4.2.2.2 Análise de cor

Os resultados dos ensaios de cor são apresentados na Tabela 25. Foram coletadas cinco amostras de óleo isolante do regulador durante operação em campo.

Tabela 25 – Resultados das análises de cor do óleo isolante

Ensaio	04/06/2019	26/09/2019	20/01/2020	21/04/2020	29/06/2020
Cor	L0,50	L0,50	L0,50	L0,50	L0,50

Fonte: Do autor (2020)

É possível observar através dos dados apresentados na Tabela 25 que as características de cor do óleo isolante se mantiveram inalteradas durante todas as análises realizadas, muito provavelmente em decorrência do “baixo” tempo de operação deste óleo. Além disso, a manutenção dos níveis de cor descarta a possibilidade de contaminação ou deterioração do óleo.

#### 4.2.2.3 Análise de densidade 20/20 °C

A Tabela 26 apresenta os resultados dos ensaios de densidade 20/20 °C realizados no óleo isolante durante a operação do regulador em campo.

Tabela 26 – Resultados das análises de densidade do óleo isolante

Ensaio	04/06/2019	26/09/2019	20/01/2020	21/04/2020	29/06/2020
Densidade 20/20 °C (g/cm <sup>3</sup> )	0,8781	0,8781	0,8779	0,8784	0,8817

Fonte: Do autor (2020)

É possível observar através dos dados apresentados na Tabela 26 que os resultados encontrados nos ensaios foram praticamente os mesmo durante todos os ensaios. Além disso, este ensaio permite sempre apurar o tipo de óleo isolante ensaiado, seja ele parafínico ou naftênico, neste caso óleo mineral naftênico.

#### 4.2.2.4 Análise da tensão interfacial

A Tabela 27 apresenta os dados obtidos dos ensaios de tensão interfacial no óleo isolante durante o equipamento em operação em campo.

Tabela 27 – Resultados das análises de tensão interfacial do óleo isolante

Ensaio	04/06/2019	26/09/2019	20/01/2020	21/04/2020	29/06/2020
Tensão interfacial (mN/m)	50	48	47	47	46

Fonte: Do autor (2020)

Os resultados apresentados na Tabela 27 mostram pouca variação quanto aos valores encontrados para tensão interfacial. A diminuição dos valores de tensão interfacial indica o aumento da deterioração do óleo, neste caso é possível inferir que não há mudança nos níveis de deterioração do óleo para o equipamento analisado. Além disso, conforme a norma NBR 10576:2017 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017) os valores encontrados devem ser maiores ou iguais a 20 mN/m para garantir a boa operabilidade do equipamento, neste caso todos os ensaios apresentaram valores significativamente maiores que o mínimo exigido pela norma.

#### 4.2.2.5 Análise do teor de água

A Tabela 28 apresenta os valores obtidos nos ensaios de teor de água do óleo isolante analisado.

Tabela 28 – Resultados das análises de teor de água do óleo isolante

Ensaio	04/06/2019	26/09/2019	20/01/2020	21/04/2020	29/06/2020
Teor de água (ppm)	10	6	11	12	49

Fonte: Do autor (2020)

É possível inferir na Tabela 28 que o valor do teor de água do óleo isolante variou um pouco de uma análise para outra, entretanto não foi relativamente expressiva essa variação. Além disso, a norma NBR 10576:2017 (ASSOCIAÇÃO

BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017) indica que os teores de água sejam sempre menores ou iguais a 40 ppm, para equipamentos que operem até 36,2 kV, neste caso, os resultados obtidos nos ensaios estão praticamente todos em conformidade com a norma, exceto o ensaio do dia 29/06/2020. Nesta última análise o teor de água apresentou resultado muito elevado, o ideal seria a realização de um novo ensaio para definir a contra prova, entretanto o regulador de tensão já havia sido retirado de operação e não foi possível realizar outro ensaio para confirmar os valores encontrados.

#### 4.2.2.6 Análise do índice de neutralização

A Tabela 29 apresenta os resultados dos ensaios de índice de neutralização do óleo isolante analisado.

Tabela 29 - Resultados das análises de índice de neutralização do óleo isolante

Ensaio	04/06/2019	26/09/2019	20/01/2020	21/04/2020	29/06/2020
Índice de neutralização (mgKOH/g)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Fonte: Do autor (2020)

É possível avaliar através da Tabela 29 que os resultados encontrados nos ensaios foram os mesmos para todas as análises. Além disso, os resultados dos ensaios estão em conformidade com a norma NBR 10576:2017 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017), sendo eles menores que 0,20 mgKOH/g para equipamentos de até 36,2 kV. Dessa forma, é possível sugerir que durante o período em operação do regulador de tensão em campo não houve praticamente nenhum envelhecimento do óleo isolante quando analisamos apenas os dados obtidos nos ensaios do índice de neutralização.

#### 4.2.2.7 Análise da rigidez dielétrica

A Tabela 30 apresenta os resultados do ensaio de rigidez dielétrica do óleo isolante coletado em cinco datas distintas do regulador de tensão em operação em campo.

Tabela 30 - Resultados das análises de rigidez dielétrica do óleo isolante

Ensaio	04/06/2019	26/09/2019	20/01/2020	21/04/2020	29/06/2020
Rigidez dielétrica (kV)	64	76	67	68	12

Fonte: Do autor (2020)

É possível inferir através dos dados de ensaio contidos na Tabela 30 que os níveis de rigidez dielétrica do óleo isolante se mantiveram estáveis durante as análises. Além disso, segundo a norma NBR 10576:2017 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017), para reguladores de até 36,2 kV, os níveis de rigidez dielétrica devem ser maior ou igual a 40 kV, portanto o equipamento manteve-se dentro destes níveis em praticamente todos os ensaios de rigidez e descarta-se a possibilidade de contaminação grave do óleo com grandes quantidades de água, sujeira, fibras ou outras partículas. Entretanto, a última análise realizada, no dia 29/06/2020, apresentou resultado de rigidez dielétrica muito baixa, o ideal seria refazer o ensaio, contudo o regulador de tensão já havia sido retirado de operação e não foi possível realizar a contra prova deste ensaio.

#### 4.2.2.8 Análise fator de perdas 90 °C

A Tabela 31 apresenta os resultados obtidos no ensaio de análise do fator de perdas 90 °C.

Tabela 31 - Resultados das análises de fator de perdas 90 °C

Ensaio	04/06/2019	26/09/2019	20/01/2020	21/04/2020	29/06/2020
Fator de perdas 90 °C (%)	0,110	0,290	0,376	0,546	0,154

Fonte: Do autor (2020)

Ao decorrer das análises do fator de perdas é possível verificar através da Tabela 31 que o fator de perdas vem crescendo levemente. O aumento nos níveis do fator de perdas pode indicar a presença de substâncias que causam condutividade e é capaz de indicar a deterioração e contaminação do óleo isolante. Contudo, apesar do aumento visível deste fator o equipamento ainda opera com grande margem de segurança conforme apresenta a norma NBR 10576:2017 (ASSOCIAÇÃO

BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017), sendo aceitável um fator de perdas de até 15%, para equipamentos de até 36,2 kV.

#### 4.2.3 Resultados das análises de gases dissolvidos no óleo isolante - cromatografia

A Tabela 32 apresenta os resultados obtidos através dos ensaios cromatográficos do óleo isolante do regulador de tensão durante as coletas de óleo no período em que o equipamento ficou em operação em campo. Os valores de referência de gases em transformadores imersos em óleo isolante em condições normais de operação foram aplicados conforme a norma NBR 7274:2012.

Tabela 32 - Comparativo dos resultados obtidos nos ensaios cromatográficos

Ensaio	Limite quantificação (LQ) <sup>4</sup>	04/06/2019	26/09/2019	20/01/2020	21/04/2020	29/06/2020
Hidrogênio	1	0	37	86	134	150
Oxigênio	50	33985	27671	19687	25984	27922
Nitrogênio	50	72417	65106	63727	69711	70584
Monóxido de Carbono	1	16	134	189	127	209
Metano	1	3	20	35	38	48
Dióxido de Carbono	25	790	1519	1649	1460	1942
Etileno	1	5	18	23	24	27
Etano	1	0	3	5	4	4
Acetileno	1	12	112	116	171	155
Relação CO <sub>2</sub> /CO	**	49,40	11,30	8,70	11,50	9,30
Total de Gases Combustíveis (ppm)	-	36	324	454	498	593

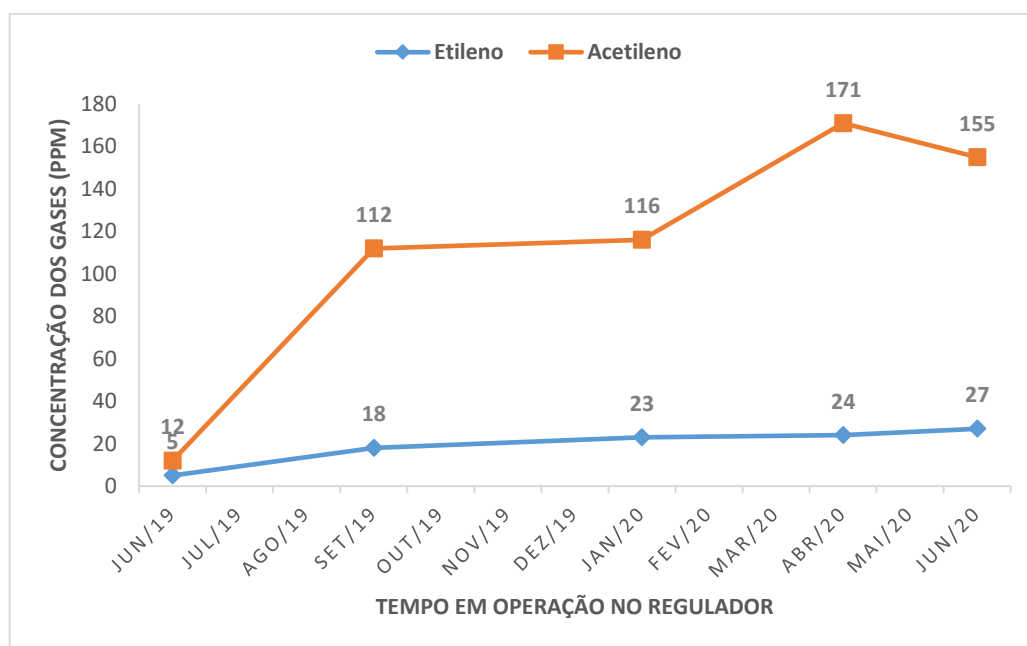
Fonte: Do autor (2020)

Através da Tabela 32 é possível identificar a evolução dos gases dissolvidos no óleo isolante, desde a não existência inicialmente de alguns gases, como o hidrogênio e o etano, e o aparecimento destes a partir do avanço de manobras do regulador. Óleos minerais isolantes são feitos da mistura de diferentes

hidrocarbonetos contendo  $\text{CH}_3$ ,  $\text{CH}_2$  e grupos  $\text{CH}$  que são mantidos unidos pelas ligações moleculares de carbono-carbono. O aparecimento destes dois gases nos ensaios pode indicar a cisão de ligações C-H e C-C advindas de falhas térmicas ou elétricas no interior do equipamento (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012).

Verifica-se através da Figura 70 o avanço da concentração dos gases etileno e acetileno, supostamente em decorrência de aumentos frequentes na temperatura do óleo isolante em razão de arcos resultantes das manobras de comutação de taps.

Figura 70 - Evolução dos gases etileno e acetileno durante período de operação do regulador



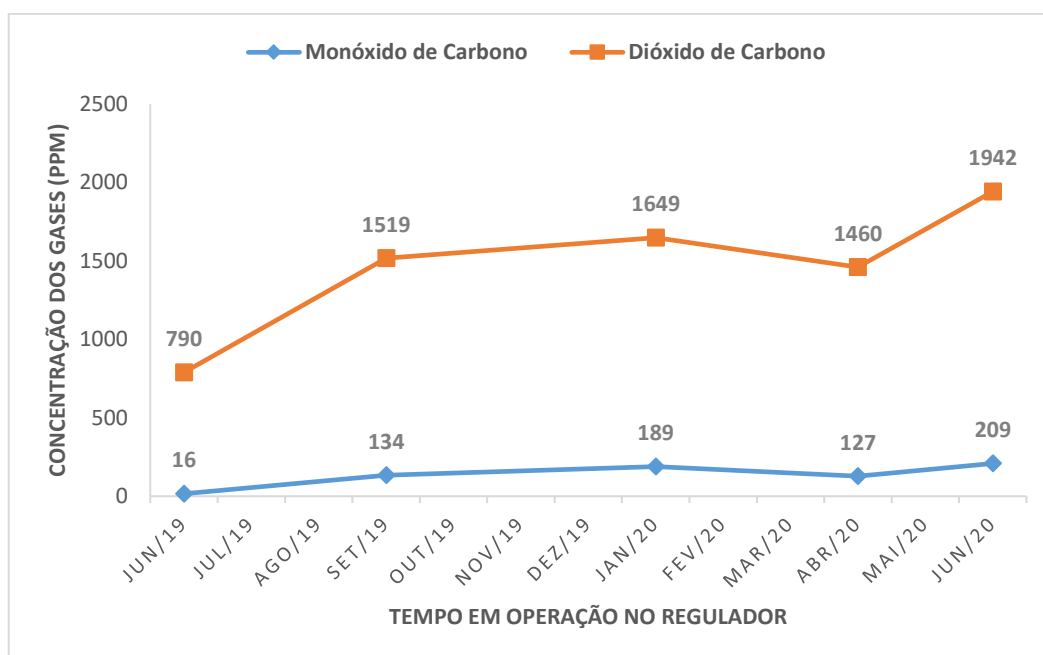
Fonte: Do autor (2020)

O acetileno é formado no interior de reguladores de tensão, em quantidades significativas, principalmente na ocorrência de arco elétrico. A formação de etileno é mais favorecida em temperaturas acima de  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  enquanto que a formação de acetileno ocorre em temperaturas entre  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  em conjunto com um rápido decréscimo a temperaturas mais baixas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012). Os resultados confirmam a existência de arco elétrico, o que se considera normal em equipamentos deste tipo. Além disso, como a

concentração está baixa, conclui-se que o equipamento não corre riscos imediatos em relação a qualidade atual de operação do sistema.

A Figura 71 apresenta a evolução dos gases monóxido de carbono e dióxido de carbono no interior do regulador de tensão durante o período de operações em campo.

Figura 71 - Evolução dos gases monóxido de carbono e dióxido de carbono durante período de operação do regulador

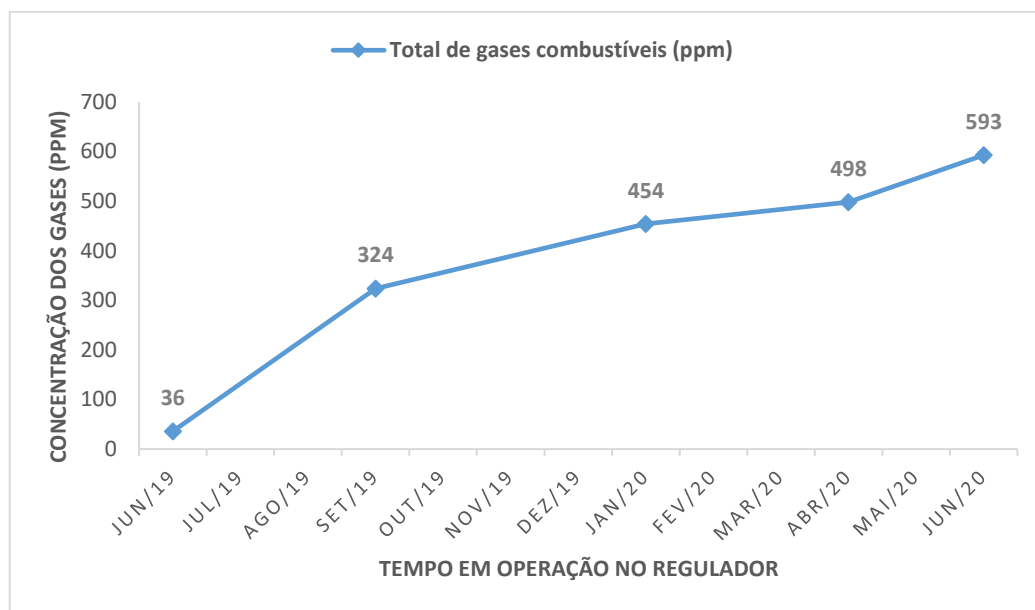


Fonte: Do autor (2020)

Nota-se por meio da Figura 71 o aumento gradativo na concentração de gases CO e CO<sub>2</sub> imersos no óleo isolante. Partículas de carbono podem se formar através de temperaturas de 500 °C a 800 °C e são comumente observadas após um arco no óleo ou até mesmo ao redor de pontos quentes. A formação de pequenas quantidades de CO e CO<sub>2</sub> pode acarretar no início da oxidação do óleo isolante, mesmo que estes só atinjam valores significativos se acumulados por grande período de tempo. O aumento no teor de oxigênio no óleo ou o aumento no teor de umidade no papel isolante do transformador podem também elevar a formação de CO e CO<sub>2</sub> (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012).

Observa-se também a evolução dos gases combustíveis imersos em óleo isolante através da Figura 72.

Figura 72 - Evolução dos gases combustíveis durante o período de operação do regulador



Fonte: Do autor (2020)

Os dados apresentados na Figura 72 sugerem que durante o período de um ano em operação este regulador ainda está em condição normal de operação quanto a análise de gases combustíveis no óleo. O monitoramento de gases combustíveis é muito importante para garantir a segurança e operabilidade do regulador de tensão dentro de níveis seguros, uma vez que este opera com presença de arcos constantes durante as manobras de comutação (GOUVEIA, 2008).

#### 4.2.4 Resultados das análises do teor de bifenilas policloradas (PCBs) no óleo

A Tabela 33 apresenta os resultados obtidos nas análises do teor de Bifenilas Policloradas (PCBs) no óleo isolante. Utilizou-se a norma NBR 8371:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005) para analisar os limites dos valores encontrados.

Tabela 33 – Comparativo dos resultados obtidos nos ensaios de Teor de PCB

Ensaio	26/09/2019	29/06/2020
PCB (mg/Kg)	<2	<2

Fonte: Do autor (2020)

Conforme apresenta a Tabela 33 os níveis de PCBs foram menores que dois mg/Kg nas duas análises realizadas, confirmando realmente a não existência deste no regulador estudado. A análise destes elementos torna-se interessante uma vez que são contaminantes ambientais devido à sua alta concentração de substâncias desconhecidas, além disso, no Brasil é proibido a sua fabricação, comercialização e uso em todo o território nacional (PENTEADO; MOREIRA, 2001). Conforme a NBR 8371:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005) líquidos isolantes que contenham teor de PCBs menor que 50 mg/Kg são considerados como “Não contaminados com PCBs”, portanto não há preocupação quanto a existência de PCBs no regulador de tensão estudado.

## 5 CONCLUSÃO

Após o acompanhamento *in situ* deste equipamento em operação real na rede elétrica durante 12 meses consecutivos, foi possível conceber um conjunto de conclusões que permitem o desenvolvimento futuro de metodologias e equacionamentos matemáticos para otimização das manutenções destes equipamentos.

A análise química dos contatos móveis e fixos permitiu a identificação das características principais destes elementos permitindo o esclarecimento de dúvidas ocasionadas pela falta de informações bibliográficas, indicando precisamente a composição química dos contatos, que é um dado importante para a melhor compreensão do processo de desgaste abrasivo entre eles.

Os resultados do ensaio de rugosidade e a observação das condições físicas dos contatos móveis desgastados, sugerem que o desgaste mecânico ocorre de maneira desproporcional ao longo da superfície dos contatos. Um aumento no valor de Rz em dado ponto da superfície do contato foi detectado durante o ensaio de rugosidade, isso evidencia uma alteração da topografia do mesmo o que provavelmente está associada ao desgaste da superfície. Diante disso, sugere-se a continuidade de pesquisas que acompanham os níveis de rugosidade das superfícies dos contatos, uma vez que a detecção do aumento da rugosidade evidenciada neste trabalho serve de alerta, pois o descontrole no aumento da heterogeneidade da superfície dos contatos pode acelerar o seu desgaste.

Utilizando a norma ASTM G65-00 verificou-se que a perda de volume dos contatos móveis frente ao ensaio de desgaste abrasivo por roda de borracha e areia apresentou alta taxa de desgaste e taxas sensivelmente diferentes para cada corpo de prova, 156,27 cm<sup>3</sup> e 223,33 cm<sup>3</sup> respectivamente. Além disso, os resultados do ensaio em MEV, realizado sobre esses contatos após serem ensaiados por desgaste abrasivo, apontam que houve adesão do abrasivo (areia) do ensaio de desgaste sobre a estrutura do contato móvel.

Através da comparação dos resultados de perda de massa e número de manobras dos contatos móveis utilizados no regulador com os dados de durabilidade informados pelo fabricante, é possível concluir que há grande diferença na durabilidade dos contatos que vem de fábrica já instalados no equipamento em

comparação com contatos substituídos após manutenção em oficina. Reguladores novos saem de fábrica sob condições ideais de montagem de modo que todos seus componentes são montados seguindo rigorosos padrões e procedimentos. Por outro lado, após algum tempo de uso reguladores são comumente submetidos a ações invasivas de manutenção e tem seus contatos substituídos, as condições já não seguem os mesmos padrões de montagem. É possível concluir que a diferença entre estas duas condições gera diferentes desgastes, sendo que após a primeira substituição dos contatos necessariamente o desgaste passa a ser maior, e portanto, a indicação do fabricante para a manutenção dos contatos em função do número máximo de manobras já não reflete o que se pode constar na prática. Dessa forma, o presente trabalho traz uma importante contribuição em direção a obtenção de um melhor entendimento sobre os mecanismos de desgaste em função da vida operacional do regulador.

A análise em MEV realizada sob os contatos móveis e fixos do regulador levantou a possibilidade de interação mecânica entre os contatos, pois identificou a presença de partículas de contato móvel em contato fixo e vice-versa. A presença desses particulados nos contatos e no óleo isolante pode ser muito contaminante para o sistema, resultando na possibilidade de diminuição da condutividade elétrica do conjunto de contatos. Além disso, os resultados da análise em MEV nos permitem uma visão melhor quanto a estrutura microscópica dos contatos analisados e a comparação microestrutural do sistema antes e após encerrado o período em operação real desses contatos no regulador.

Quanto aos ensaios realizados sob o óleo isolante verifica-se que a grande maioria dos resultados encontrados no período, através das análises de cromatografia gasosa, análises físico-químicas e PCBs estão dentro das conformidades exigidas por norma. Considera-se também que durante o período de um ano de operações do regulador em campo, o envelhecimento das propriedades do óleo isolante foi muito baixo. Além disso, não foi possível criar correlação direta acerca do envolvimento do desgaste mecânico dos contatos de comutação com os resultados dos ensaios no óleo, pelo menos dentro do período analisado. Ainda assim, foi possível detectar a evolução dos gases analisados no período e o aparecimento de gases inicialmente não existentes, como o hidrogênio e o etano, possivelmente provenientes de falhas térmicas ou elétricas resultantes das manobras de comutação de taps.

Os resultados obtidos neste estudo elucidam várias questões que esclarecem questões importantes para avaliação assertiva da necessidade de manutenção do regulador em função do número de manobras. Porém, entende-se que é preciso ampliar o estudo para uma amostra maior de reguladores *in situ*, em diferentes condições, para validar com maior precisão a evolução dos mecanismos de desgaste.

## 6 PESQUISAS FUTURAS

Para ampliar o estudo apresentado, sugere-se para trabalhos futuros a avaliação de outros pontos que por falta de disponibilidade não foi possível contemplar:

- Avaliar uma amostra maior de reguladores *in situ*, em diferentes condições de operação visando validar com maior precisão o comportamento evolutivo dos mecanismos de desgaste;
- Realizar um estudo maior que acompanhe os níveis de rugosidade das superfícies de contatos conforme aumento do número de manobras de comutação de taps.

## 7 PRODUÇÃO CIENTÍFICA

O presente trabalho deu origem a algumas publicações com abordagem geral sobre a proposta e também com alguns subprodutos da proposta principal, conforme pode ser visto na Tabela 34.

Tabela 34 - Relação de periódicos já publicados sobre o tema abordado

<b>Título</b>	<b>Periódico</b>	<b>ISSN</b>	<b>Autores</b>	<b>Ano</b>	<b>Qualis</b>
"In Situ" Evaluation of Mechanical Wear of Mobile Contacts of Electricity Voltage Regulator	Energies - Open Access Energy Research, Engineering and Policy Journal	1996-1073	Steiner, M.G.; Spacek, A.D.; Neto, J.M.; Moura, P.R.S.; Junior, O.H.A.; Izidoro, C.L.; Bilessimo, L.D.; Spacek, J.D.	2020	A1
Internet Das Coisas (IOT) Aplicada A Monitoramento De Parâmetros De Fontes Renováveis De Energia: Uma Revisão Sobre Sigfox	39 th SENAFOR - 9 th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies	--	Steiner, M.G.; Spacek, A.D.; Neto, J.M.; Rocha, M.A.O.; Izidoro, C.L.; Ando Junior, O.H.; Spacek, J.D. Moura, P.R.S.	2019	--
Sistema de Supervisão e Pré- Diagnóstico aplicado em Regulador de Tensão Considerando Parâmetros Elétricos, Mecânicos e Químicos	XII CBPE – Congresso Brasileiro de Planejamento Energético 2020	--	Spacek, A.D.; Rocha, M.A.O.; Izidoro, C.L.; Neto, J.M.; Steiner, M.G.; Rosa, G.S.; Moura, P.R.S.; Spacek, J.D.; Ando Junior, O.H.	2020	--

Fonte: Do autor (2020)

## 8 REFERÊNCIAS

ANTELIZ JAIMES, A. A. Maintenance predictive in electric transformers, applying spectral analysis to the flow of magnetic dispersion. **XVII Symposium of Image, Signal Processing, and Artificial Vision, IEEE**, 2012.

ARANTES, J. G. **Diagnóstico De Falhas Em Transformadores De Potência Pela Análise De Gases Dissolvidos Em Óleo Isolante Através De Redes Neurais**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI. p. 99, 2005.

ASM HANDBOOKS. ASM Committee on Electric Contact Materials. Electric contact materials. In: **ASM Metals Handbook**. (Ed.). Park, OH, v.3, p. 662-694, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11809**: Reguladores de tensão - Especificação. Rio de Janeiro. p. 58, 1991a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12133**: Líquidos isolantes elétricos - Determinação do fator de perdas dielétricas e da permissividade relativa (constante dielétrica) - Método de ensaio. Rio de Janeiro. p. 8, 1991b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 4287**: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros de rugosidade. Rio de Janeiro. p. 18, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8371**: Ascarel para transformadores e capacitadores - Características e riscos. Rio de Janeiro. p. 14, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10710**: Líquido isolante elétrico - Determinação do teor de água. Rio de Janeiro. p. 7, 2006a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7070**: Amostragem de gases e óleo mineral isolantes de equipamentos elétricos e análise dos gases livres e dissolvidos. Rio de Janeiro. p. 19, 2006b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 4288**: Especificações geométricas de produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil -

Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. Rio de Janeiro. p. 10, 2008a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13882**: Líquidos isolantes elétricos - Determinação do teor de bifenilas policloradas (PCB). Rio de Janeiro. p. 10, 2008b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14248**: Produtos de petróleo - Determinação do número de acidez e de basicidade - Método do indicador. Rio de Janeiro. p. 15, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7274**: Interpretação da análise dos gases de transformadores em serviço. Rio de Janeiro. p. 18, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14274**: Óleo mineral isolante — Determinação da compatibilidade de materiais empregados em equipamentos elétricos. Rio de Janeiro. p. 4, 2013a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8840**: Diretrizes para amostragem de líquidos isolantes. Rio de Janeiro. p. 25, 2013b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7148**: Petróleo e derivados de petróleo — Determinação da massa específica, densidade relativa e °API — Método do densímetro. Rio de Janeiro. p. 11, 2013c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6234**: Óleo mineral isolante - Determinação da tensão interfacial de óleo-água pelo método do anel - Método de ensaio. Rio de Janeiro. p. 8, 2015a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14483**: Produtos de petróleo - Determinação da cor - Método do colorímetro ASTM. Rio de Janeiro. p. 7, 2015b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10576**: Óleo mineral isolante de equipamentos elétricos - Diretrizes para supervisão e manutenção. Rio de Janeiro. p. 38, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 6506-3**: Materiais metálicos - Ensaio de dureza Brinell - Parte 3: Calibração de blocos de referência. Rio de Janeiro. p. 10, 2019a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR IEC 60156**: Líquidos isolantes — Determinação da rigidez dielétrica à frequência industrial — Método de ensaio. Rio de Janeiro. p. 14, 2019b.

ASTM G65-00. Standard Test Method for Measuring Abrasion Using Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA., 2000.

AYALEW, Z.; et al. Dissolved Gas Analysis (DGA) of Arc Discharge Fault in Transformer Insulation Oils (Ester and Mineral Oils). **IEEE Electrical Insulation Magazine**, p. 150–153, 2018.

BANGASH, K. N.; FARRAG, M. E. A.; OSMAN, A. H. Smart Control of on Load Tap Changer deployed in Low Voltage Distribution Network. **2015 4th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS)**, p. 1–6, 2015.

BATISTA, D. A. **Desenvolvimento de Metodologia Colorimétrica para Dosagem de Compostos Furânicos em Óleo Mineral Isolante**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba. 2005.

BAYER, R. G. **Mechanical Wear Fundamentals and Testing**. v.1. 396 p. New York: [s.l.] M. Dekker, 2004. v. 1

BEDAWY, A.; et al. Management of voltage regulators in unbalanced distribution networks using voltage/tap sensitivity analysis. **2018 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE)**. Aswan, pp. 363-367. 2018.

BEDAWY, A.; YORINO, N.; MAHMOUD, K. Management of voltage regulators in unbalanced distribution networks using voltage/tap sensitivity analysis. **Proceedings of 2018 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering**, ITCE 2018, v. 2018-March, n. 1, p. 363–367, 2018.

BELLINI, A.; et al. Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 55, n. 12, p. 4109–4126, 2008.

BHUYAN, R.; et al. Analysis of the arcing process in on-load tap changers by measuring the acoustic signature. **IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)**, p. 193–197, 2014.

CARDOSO, P. M. **Eficiência de Transformadores de Média Tensão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI. 2005.

CASTRO, J. C.; LAGOS, G. S.; GONZALEZ, O. A. Simulation and measuring transients in On-Load Tap Changers. **IEEE Latin America Transactions**, v. 15, n. 10, p. 1901–1907, 2017.

CASTRO, R. M. **Avaliação das Propriedades de Superfície e do Comportamento ao Desgaste Abrasivo de Hastes de Cilindros Hidráulicos Revestidas pelos Processos HVOF e Cromo Duro Eletrodepositado**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 2012.

CHEN, P.; et al. Mechanical Fault Diagnosis of On-load Tap Changer of Power Transformer by Clustering Algorithm, Kota Kinabalu. **2018 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)**, p. 60–64, 2018.

CHIAVERINI, V. **Metalurgia do pó: técnicas e produtos**, 3 ed., São Paulo, SP, ABM. 1992.

CLARK, F. M. Water Solution in High-Voltage Dielectric Liquids. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. 59, n. 8, p. 433–441, ago. 1940.

COSTA, F. A. **Síntese e sinterização de pós compósitos do sistema W-Cu**. 177f. Tese de D.Sc. - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, SP, Brasil, 2004. Tese, p. 1–177, 2004.

CUNHA SANTOS, F. M.; SUETAKE, M.; NUNES DA SILVA, I. Sobre a Aplicação de Sistemas Inteligentes para Diagnóstico de Falhas em Máquinas de Indução – Uma Visão Geral. **Revista Controle & Automação**, v. 23, n. 5, p. 553–569, 2012.

CZICHOS, H.; MØLGAARD, J. Towards a general theory of tribological systems. **Wear**, v. 44, n. 2, p. 247–264, 1 set. 1977.

DE FARIA, H.; COSTA, J. G. S.; OLIVAS, J. L. M. A review of monitoring methods for predictive maintenance of electric power transformers based on dissolved gas analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2015.

DEGENEFF, R. C. A new concept for a solid-state on-load tap changers. **14th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 1997 - Distributing Power for the Millennium)**. Anais...IEE, 1997. Disponível em: <[https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp\\_19970447](https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp_19970447)>. Acesso em: 11 fev. 2019

DESFORGES, C. D. Sintered materials for electrical contacts. **Powder Metallurgy**, n. 3,. p. 138–144, 1979.

DIN 50320. Verschleiß - Begriffe, Analyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes. Beuth Verlag, Berlin. 1979.

DOS REIS, M. S. **Implementação de um regulador de tensão com comutador eletrônico de tap**. Tese de doutorado em engenharia elétrica - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro. 2013.

ÉLINE, R.; et al. Estudo das características físico-químicas do óleo mineral isolante na manutenção de transformadores elétricos. **III Congresso nacional de Engenharia de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**, p. 9, 2018.

ERBRINK, J. J.; et al. Advanced on-site diagnosis of transformer on load tap changer. **Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation**, p. 252–256, 2008.

FAIZ, J.; SIAHKOLAH, B. Optimal configurations for taps of windings and power electronic switches in electronic tap-changers. **IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, v. 149, n. 5, p. 517, 2002.

FEIZIFAR, B.; et al. A Collective Condition Monitoring Algorithm for On-Load Tap-Changers. **2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical**

**Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEEIC / I&CPS Europe)**, p. 1–6, 2019.

FEIZIFAR, B.; USTA, O. A new arc-based model and condition monitoring algorithm for on-load tap-changers. **Electric Power Systems Research**, v. 167, n. August 2018, p. 58–70, 2019.

FERREIRA, L. A. R. **Uma nova abordagem para a avaliação do estado de reguladores de tensão usando transformada discreta wavelet**. Dissertação de mestrado, PPGEE/UFBA, Salvador, BA, Brasil. p. 74, 2019.

FERREIRA, L.; FILHO, E. F. DE S. A voltage regulator fault risk assessment method through discrete wavelet analysis of an acoustic vibration signal. **2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)**, p. 1–6, 2018.

GADELMAWLA, E. S.; et al. Roughness Parameters. **Journal of Materials Processing Technology**. n. 123, p. 123–145, 2002.

GOUVEIA, D. A. G. GOUVEIA, Dênis Augusto Genaro. **Determinação de gases combustíveis em óleo isolante para transformadores, por meio de aquecimento prévio**. Dissertação (Mestrado em Sistemas Elétricos de Potência) - Escola de Engenharia de São Carlos, 2008.

HANDLEY, B.; REDFERN, M.; WHITE, S. On load tap-changer conditioned based maintenance. **IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, v. 148, n. 4, p. 4–8, 2001.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology**: friction and wear of engineering materials. [s.l.] CRC Press, 1992.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. **IEEE**: Power quality-two different perspectives. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 5, n. 3, p. 1501–1513, jul. 1990.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. **IEEE**: Guide for Acceptance and Maintenance of Natural Ester Fluids in Transformers. **IEEE Power & Energy**, p. 31, 2008.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. **IEEE** Standard Requirements, Terminology, and Test Code for Step-Voltage Regulators. IEEE Std C57.15-2009 (Revision of IEEE Std C57.15-1999), p. 103, 2009.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. **IEEE** C57.131-2012 - IEEE Standard Requirements for Tap Changers. 2012.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. **IEEE** C57.15-2017 - IEEE Approved Draft Standard Requirements, Terminology, and Test Code for Step-Voltage Regulators. 2017.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60076-1 Ed. 3.0 b:** Power transformers - Part 1: General. p. 147, 2011.

ITB. Reguladores automáticos de tensão monofásicos | ITB. Disponível em: <<http://itb.ind.br/produtos/reguladores-automaticos-de-tensao-monofasicos/>>. Acesso em: 12 fev. 2019.

JAHROMI, A. N.; HOSSEINKHANLOO, M.; LAMARE, L. **Under Load Tap Changer Diagnostics Based on Transformer DGA and DC Resistance Tests.** IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), p. 323–326, 2018.

JIANG, M.; JIANG, Y.; LIU, T. **A modular three-phase voltage regulator with fictitious dc-link.** 2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia), p. 2857–2862, 2015.

KAMISHIMA, S.; ITO, T.; MORISHIMA, Y. **Change in corrosivity of insulating oil caused by oxidative deterioration of the oil.** IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 19, n. 2, p. 505–509, 2012.

KANG, P.; BIRTWISTLE, D. **Condition assessment of power transformer on-load tap-changers using wavelet analysis.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 16, n. 3, p. 394–400, 2001.

KHAYAM, U.; et al. **Partial discharge characteristics and dissolved gas analysis of vegetable oil.** Proceedings of 2014 International Symposium on Electrical Insulating Materials, p. 330–333, 2014.

LAZARESCU, E.; et al. **A new approach to predictive maintenance of high voltage switching devices**. 2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), p. 1–4, 2017.

LEWAND, L. Which Insulating Oil Analytical Tests to Request and When. **Chemist's Perspective**. Neta World, p. 4, 2002.

LIN, M. A practical method estimates on - load tap changers' operation status. 2017 International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC), p. 912–916, 2017.

LIPSHTEIN, R. A.; SHAKHNOVICH, M. I. **Transformer oil**. p. 275, 1970.

LIU, V. L.; NAKHLA, G.; BASSI, A. Treatability and kinetics studies of mesophilic aerobic biodegradation of high oil and grease pet food wastewater. **Journal of Hazardous Materials**, v. 112, n. 1–2, p. 87–94, 2004.

LUDEMA, K. C. **Selecting material for wear resistance, in wear of materials** 1981. p. 1–6, 1981.

MACHADO, A. **Avaliação da Rugosidade em Superfícies Complexas**. Dissertação de Mestrado, Sociedade Educacional de Santa Catarina - SOCIESC, Joinville, SC, 2009. 103p. 2009.

MAGALHÃES, R. DA S. **Avaliação da condição de desgaste de contatos elétricos em OLTCs utilizando a análise espectral de prony do sinal de vibração acústica**. Dissertação (Mestrado), UFBA, Salvador, BA, Brasil. p. 110, 2005.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de equipamentos elétricos**. 3. ed., LTC, ISBN: 8521614365. p. 792, 2005.

MARTINEZ, E.; FERNANDEZ, I.; CANALES, J. M. Thyristor based solid state tap changer for distribution transformers. **2013 IEEE 11th International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their application to Mechatronics**, p. 1–5, jun. 2013.

MCSHANE, C. P.; LUKSICH, J.; RAPP, K. J. Retrofilling aging transformers with natural ester based dielectric coolant for safety and life extension. **Cement Industry Technical Conference, 2003**. Conference Record. IEEE-IAS/PCA 2003, p. 141–147, 2003.

MILASCH, M. **Manutenção de Transformadores em Líquido Isolante**. 1. ed., ISBN 8521201400. p. 380, 1984.

MOHAMMED, L. S.; et al. Studies on critical properties of vegetable oil based insulating fluids. **2015 Annual IEEE India Conference (INDICON)**, p. 1–4, 2015.

MORETTO, E.; FETT, R. **Tecnologia de óleos e gorduras vegetais**. São Paulo: Varela, ISBN 85-85519-41-X. p. 150, 1998.

NANDI, S.; TOLIYAT, H. A.; LI, X. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors-A Review. **IEEE Trans. on Energy Conversion**, v. 20, n. 4, p. 719–729, 2005.

OLIVEIRA FERNANDES, P.; et al. Ageing performance of Brazilian paraffinic oil and naphthenic insulating oil. **2017 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)**, p. 360–363, 2017.

OOMMEN, T. V. Vegetable oils for liquid-filled transformers. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 18, n. 1, p. 6–11, jan. 2002.

PAIXÃO, L. A. **Avaliação da qualidade do óleo em transformadores com o emprego da função discriminante quadrática**, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná - UFPR. p. 268, 2006.

PALMAS, E. **Tolerâncias de Acabamento Superficial - Rugosidade**. Apostila de Graduação, PUC/Minas - Pontifícia Universidade Católica. Minas Gerais, MG, 2009. 19p. 2009.

PECK, D. A. On-load tap-changers current experience and future developments. Principles and resulting benefits of separate tank (external) tap-changers. **Developments On-Load Tapchangers: Current Experience and Future, IEE European Seminar on 1995**, p. 3/1-3/9, 1995.

PENGJU, K.; BIRTWISTLE, D. Condition assessment of power transformer onload tap changers using wavelet analysis and self-organizing map: field evaluation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 18, n. 1, p. 78–84, 2003.

PENTEADO, J. C. P.; MOREIRA, J. O legado das bifenilas policloradas (PCBs). **O Quím. Nova**, v. 24, n. 3, p. 390–398, 2001.

PERKASA, C. Y. Investigating bubble formation in vegetable and mineral oil impregnated transformer paper insulation systems. **2012 22nd Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)**, p. 1–5, 2012.

PETERSON, M.B.; WINER, W. O. **Wear Control Handbook**. American Society of Mechanical Engineers, 1980.

PETROBRAS. **Petrobras BR Distribuidora S.A**, Certificado de Qualidade LUBRAX AV 70 IN - LI, 23/03/2019.

QUEVEDO, J. O.; et al. Smart distribution transformer applied to Smart Grids. **2013 Brazilian Power Electronics Conference**, p. 1046–1053, out. 2013.

REZENDE, C. R. **Correlação entre Modelagem Numérica e Resultados Experimentais na Análise de Estabilidade Dinâmica do Torneamento de Aços**. Dissertação de Mestrado, PUC/Minas - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Minas Gerais, MG, Fevereiro, 2006. 198p. 2006.

SANTOS, C. A. **Compactação e sinterização de compósitos de cobre-grafite para uso em contatos elétricos**, Dissertação (Mestrado), UENF, Campo dos Goytacazes, RJ, Brasil, 1998.

SARAIVA FILHO, F. C.; et al. Portable voltage regulator: An industrial solution for amending voltage in low voltage networks. **2013 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies**, ISGT LA 2013, p. 1–6, 2013.

SECIC, A.; KUZLE, I. On the novel approach to the On Load Tap Changer (OLTC) diagnostics based on the observation of fractal properties of recorded vibration fingerprints. **IEEE EUROCON 2017 -17th International Conference on Smart Technologies**, p. 720–725, 2017.

SECIC, A.; KR PAN, M.; KUZLE, I. Vibro-Acoustic Methods in the Condition Assessment of Power Transformers: A Survey. **IEEE Access**, v. 7, p. 83915–83931, 2019.

SHORT, T. A. **Electrical distribution handbook Short**. [s.l: s.n.].

SHUTTLEWORTH, R. et al. New tap changing scheme. **IEE Proceedings - Electric Power Applications**, v. 143, n. 1, p. 108, 1996.

SIMAS FILHO, E. F. DE. **Monitoramento de reguladores de tensão utilizando análise de vibração através de sistemas inteligentes**, Dissertação (Mestrado), UFBA, Salvador, BA, Brasil. p. 99, 2004.

SPATTI, D. H. **Sistema Inteligente para Controle de Relés Reguladores de Tensão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, São Paulo, p. 99, 2007.

SPENCE, G. Users' experience and perspective. **IEE European Seminar on 'On-Load Tapchangers: Current Experience and Future Developments'**, 1995.

SPOHNER, M. Study of the dielectric properties of vegetable oils and their constituents. **2016 Diagnostic of Electrical Machines and Insulating Systems in Electrical Engineering (DEMISEE)**, p. 16–19, 2016.

STOCCO, M. B. C. Avaliação do potencial de aplicação de óleos vegetais como fluidos isolantes em transformadores de distribuição da rede elétrica. **Annals of Physics**, v. 54, p. 129, 20 set. 2009.

SUSKI, C. A. **Estudo do efeito de tratamentos e revestimentos superficiais na vida de ferramentas de conformação mecânica à frio**. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis. p. 88, 2004.

TOSHIBA. **Manual de instruções para reguladores de tensão monofásicos**. Disponível em: <<http://www.tseaenergia.com.br/arquivos/pdf/regulador-monofasico/manual-de-instrucoes-reguladores.pdf>>. Acesso em: 5 abr. 2019.

TULIO, L. **Estudo do envelhecimento acelerado de óleo vegetal isolante em**

**escala laboratorial.** Dissertação de mestrado - Instituto de Eng. do Paraná (IEP), Instituto de Tecn. para o Desenvolvimento (LACTEC) e Programa de Pós-graduação em Desen. de Tecn., Curitiba. p. 123, 2008.

ZUM GAHR, K.-H. **Microstructure and wear of materials.** p. 560, 1987.