

**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROJETO E PROCESSOS DE**  
**FABRICAÇÃO - MESTRADO PROFISSIONAL**

**Luciano Favretto da Rocha**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA MANOBRAS DE**  
**SECCIONADORES DE ALTA TENSÃO VISANDO SEU PROCESSO DE**  
**AUTOMAÇÃO**

Passo Fundo

2014

**Luciano Favretto da Rocha**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA MANOBRAS DE  
SECCIONADORES DE ALTA TENSÃO VISANDO SEU PROCESSO DE  
AUTOMAÇÃO**

Orientador: Prof. Dr. Jocarly Patrocínio de Souza  
Coorientador: Prof. Dr. Charles Leonardo Israel

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, da Universidade de Passo Fundo, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Passo Fundo

2014

**Luciano Favretto da Rocha**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA MANOBRAS DE  
SECCIONADORES DE ALTA TENSÃO VISANDO SEU PROCESSO DE  
AUTOMAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, da Universidade de Passo Fundo, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Data de aprovação : 10 de julho de 2014

Os membros componentes da banca abaixo aprovam a dissertação

Prof. Dr. Jocarly Patrocínio de Souza  
Orientador:

Prof. Dr. Charles Leonardo Israel  
Coorientador:

**Comissão de Avaliação:**

Prof. Dr. Adriano Luiz Toazza:  
FEAR / UPF

Prof. Dr. Charles Leonardo Israel:  
FEAR / UPF

Eng. Dr. Gilnei Gonçalves Furtado:  
CEEE GT

Prof. Dr. Charles Leonardo Israel  
Coordenador do ppgPPF

## DEDICATÓRIA

À minha mãe,

Maria.

À minha esposa,

Cris

Ao meu filho,

Stéfano

## **AGRADECIMENTO**

Ao Professor Doutor Charles Leonardo Israel, que me apoiou e incentivou desde o início deste trabalho.

Ao Professor Doutor Jocarly Patrocínio de Souza, pelas observações, orientações e apoio durante o trabalho.

Ao Professor Dr. Luiz Eduardo Spalding, por orientação e apoio.

Ao Professor Dr. Adriano Luiz Toassa, por orientação e apoio.

Ao Professor Dr. Humberto Pinheiro, por incentivo e apoio.

Ao Eng. Ricardo André Pessatto de Toni, pelo apoio e companheirismo.

A todos os professores e funcionários da Engenharia Mecânica e do Mestrado, por compartilharem seus conhecimentos com dedicação e carinho.

À Diretoria da Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica,

Aos meus colegas e amigos, que sempre me apoiaram e incentivaram em buscar novos horizontes.

“O melhor projeto é o mais simples e que funciona”

*Albert Einstein*

## RESUMO

Atualmente, o processo de operação de seccionadores de forma remota tem sido um problema para as empresas que operam dentro do sistema elétrico nacional, necessitando sempre a supervisão de um operador local para certificar o êxito da operação. Este trabalho apresenta uma proposta visando solucionar essa questão, proporcionando algumas mudanças no projeto original de seccionadores do tipo DA. Para avaliar a eficiência da proposta, foram realizados alguns testes e ensaios num protótipo em escala real, usando um seccionador de dupla abertura sob várias condições de operação. Um moto vibrador direcional ajustado na frequência 87Hz foi utilizado com o objetivo reduzir a força de atrito seco entre as partes móveis para proporcionar a correta conexão dos contatos principais, além de aliviar as tensões mecânicas residuais dos mecanismos de fechamento. Um leitor de posição a laser é utilizado para informar ao centro de operação o estado da conexão.

Palavras-chave: Seccionador do tipo DA. Contato elétrico. Motovibrador direcional de...  
posição laser.

## **ABSTRACT**

Currently the process of operation of breakers remotely has been a problem for companies operating within the national electric system, always requiring the supervision of a local operator to ensure the success of the operation. This work presents a proposal to solve this issue by presenting some changes to the original design disconnectors type DA. To assess the efficiency of the proposed some tests and tests in full scale prototype were performed using a double disconnector opening under various operating conditions. A directional motovibrator adjusted in frequency 87Hz was used in order to reduce the strength of dry friction between the moving parts to provide proper connection of the main contacts, in addition to relieving the residual stresses of the mechanical closure mechanisms. A laser is used to inform the center of the operating state of the connection.

Keywords: Disconnector. Electrical contact. Motovibrator directional laser.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Sistema de transmissão ONS (2014) .....  | 18 |
| Figura 2 – Diagrama unifilar sistema elétrico de potência Carvalho, A. C. C.(2012). ..          | 24 |
| Figura 3 – Diagrama dos contatos auxiliares ABNT NBR 7571 (2011).....                           | 26 |
| Figura 4 – Seccionador tipo DA. SCHENAIDER ELECTRIC (2011).....                                 | 27 |
| Figura 5 – Colunas isolantes tipo pedestal do protótipo.....                                    | 27 |
| Figura 6 – Principais partes do seccionador tipo <b>DA</b> (DELMAR, 2013).....                  | 29 |
| Figura 7 – Amostra da estrutura dendrítica do cobre (METALS HANDBOOK, 1992)                     | 31 |
| Figura 8 – Contatos elétrico efetivos conforme norma, IEC/TR 60943 (2009).....                  | 32 |
| Figura 9 – Seccionador instalado na subestação Santa Marta da CEEE GT.....                      | 33 |
| Figura 10 – Efeito corona diferença de potencial elevado .....                                  | 34 |
| Figura 11 – Gráfico demonstra a relação <b><math>M \gamma \beta</math></b> (CAMARGO, 2012)..... | 36 |
| Figura 12 – Seccionador Protótipo CEEE GT.....  | 41 |
| Figura 13 – Seccionador com equipamento de automação (Protótipo CEEE GT). .....                 | 42 |
| Figura 14 – Motovibrador eletromecânico (Protótipo CEEE GT). .....                              | 43 |
| Figura 15 – Engrenagens com massas excêntricas.....   | 44 |
| Figura 16 – Soma das forças do motovibrador direcional RAO (2008).....                          | 44 |
| Figura 17 – Modelo simplificado do motovibrador direcional.....                                 | 45 |
| Figura 18 – Vista frontal do protótipo .....  | 49 |
| Figura 19 – Vista lateral do protótipo.....   | 50 |
| Figura 20 – Foto lateral do protótipo.....  | 51 |
| Figura 21 – Esquema do ensaio para medir a força de fechamento .....                            | 53 |
| Figura 22 – Desenho da inserção do contato móvel.....   | 54 |
| Figura 23 – Modelo dos contatos do protótipo (Laboratório ensaios mecânicos UPF) .              | 55 |
| Figura 24 – Força solicitada no fechamento (Laboratório de Ensaios Mecânicos UPF)               | 56 |
| Figura 25 – Torque motor no fechamento do seccionador CARRASCO (2005).....                      | 57 |
| Figura 26 – Dinamômetro medido força da mola.....   | 61 |
| Figura 27 – Torquímetro acoplado a caixa de redução acionamento manual. ....                    | 63 |
| Figura 28 –Ensaio resistencia ôhmica dos contatos principais.....                               | 70 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 29 – Amostra da estrutura dendrítica do cobre eletrolítico (METALS HANDBOOK, 1992).....   | 85 |
| Figura 30 – Seccionador instalado na subestação Santa Marta da CEEE GT.....  | 86 |
| Figura 31 – Diagrama de um circuito unifilar de uma subestação de energia elétrica (Carvalho, A. C. C., 2012).....   | 87 |
| Figura 32 – Efeito corona na vela ignição.....   | 87 |
| Figura 33 – Rugosidade Ra (NBR ISO 4287, 2002).....  | 88 |
| Figura 34 – Comparativo entre os ensaios da rugosidade Ra acabamento lixa 220 antes e após a exposição ao gás ozônio, em cinco posições aleatórias da amostra..... | 88 |
| Figura 35 – Comparativo entre os ensaios da rugosidade Ra acabamento polido antes e após a exposição ao gás ozônio em cinco posições aleatórias da amostra.....    | 89 |
| Figura 36 – Amostra preparada com lixa 220 ampliada 500x.....  | 89 |
| Figura 37 – Amostra preparada com lixa 220 após 24h em ambiente com alta concentração de ozônio ampliada 500x.....   | 90 |
| Figura 38 – Amostra preparada com polimento ampliada 500x.....   | 90 |
| Figura 39 – Amostra preparada com polimento após 24horas em ambiente com O <sub>3</sub> ampliada 500x.....   | 90 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Características do cobre eletrolítico.....  | 31 |
| Tabela 2 – Ensaio força para fechamento e abertura do protótipo do contato principal.  | 55 |
| Tabela 3 – Dados de placa do seccionador ensaiado.....   | 59 |
| Tabela 4 – Dados caixa de comando Alcace .....   | 60 |
| Tabela 5 – Valores de força medida em cada contato. ....   | 61 |
| Tabela 6 – Dados do torquímetro .....  | 62 |
| Tabela 7 – Variação da resistência do contato submetido a vibração .....   | 66 |
| Tabela 8 – Força de atrito com lubrificação dos contatos .....   | 68 |
| Tabela 9 – Força de atrito sem lubrificação dos contatos.....  | 68 |
| Tabela 10 – Força de atrito com lubrificação dos contatos .....  | 68 |
| Tabela 11 – Força de atrito com lubrificação dos contatos .....  | 69 |
| Tabela 12 – Resistência elétrica em três condições.....  | 69 |
| Tabela 13 – Características do cobre eletrolítico (METALS HANDBOOK, 1992) e<br>(INTERNATIONAL COPPER ASSOCIATION, LTD, 2011). .... | 85 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

| <b>Símbolo</b>       | <b>Significado</b>                 | <b>Unidade SI</b> |
|----------------------|------------------------------------|-------------------|
| <i>Aca</i>           | Corrente alternada                 | A                 |
| <i>Acc</i>           | Corrente contínua                  | A                 |
| <i>A</i>             | Área,                              | m <sup>2</sup>    |
| <i>a</i>             | Raio do contato elementar          | m                 |
| <i>c</i>             | Constante de amortecimento         | N.s/m             |
| <i>c<sub>c</sub></i> | Constante de amortecimento crítico | N.s/m             |
| <i>e</i>             | Excentricidade                     | m                 |
| <i>F</i>             | Força                              | N                 |
| <i>f</i>             | Frequência linear                  | Hz                |
| <i>k</i>             | Força da mola                      | N/m               |
| <i>I</i>             | Corrente                           | A                 |
| <i>M</i>             | Massa total                        | kg                |
| <i>n</i>             | Número de contatos elementares     |                   |
| <i>R<sub>c</sub></i> | Resistência de contato             | Ω                 |
| <i>S<sub>a</sub></i> | Superfície de contato              | m <sup>2</sup>    |
| <i>T</i>             | Torque                             | N.m               |
| <i>t</i>             | Tempo                              | S                 |
| <i>V</i>             | Volts                              | V                 |
| <i>X</i>             | Amplitude da oscilação             | M                 |
| <i>W</i>             | Energia                            | J                 |
| <i>ω</i>             | Frequência de oscilação            | rad/s             |
| <i>ω<sub>n</sub></i> | Frequência natural de oscilação    | rad/s             |
| <i>ρ</i>             | Resistividade do material          | Ωm                |
| <i>σ<sub>0</sub></i> | Resistividade Superficial          | Ωm <sup>2</sup>   |
| <i>μ</i>             | Coefficiente de atrito             | -                 |
| <i>ξ</i>             | Fator de amortecimento             | -                 |
| <i>r</i>             | Razão entre frequências.           | -                 |
| <i>Vca</i>           | Tensão alternada                   | V                 |
| <i>Vcc</i>           | Tensão continua                    | V                 |

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....   | 14 |
| <b>1.2 Objetivo geral</b> .....                                     | 16 |
| <b>1.3 Objetivos específicos</b> .....                              | 16 |
| <b>1.4 Organização deste trabalho</b> .....                         | 16 |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....                                | 17 |
| <b>2.1 Sistema Elétrico Brasileiro</b> .....                        | 17 |
| <b>2.1.1 Geração</b> .....  | 17 |
| <b>2.1.2 Transmissão</b> .....                                      | 19 |
| <b>2.1.3 Distribuição</b> .....                                     | 20 |
| <b>2.1.4 Concessionárias</b> .....                                  | 20 |
| <b>2.2 Comitê, associações e normas</b> .....                       | 21 |
| <b>2.2.1 CIGRE</b> .....  | 21 |
| <b>2.2.2 ABRATE</b> .....   | 22 |
| <b>2.2.3 ABNT e IEC</b> .....                                       | 23 |
| <b>2.3 Seccionador</b> .....  | 23 |
| <b>2.3.1 Tipos construtivos de seccionadores</b> .....              | 24 |
| <b>2.3.2 Contatos auxiliares, de comando e de acionamento</b> ..... | 25 |
| <b>2.3.3 Mecanismos de movimentação</b> .....                       | 26 |
| <b>2.3.4 Colunas isoladoras</b> .....                               | 27 |
| <b>2.3.5 Fabricantes</b> .....                                      | 28 |
| <b>2.3.6 Norma do ensaio mecânico</b> .....                         | 28 |
| <b>2.3.7 Princípio de funcionamento</b> .....                       | 28 |
| <b>2.3.8 Problemas no funcionamento</b> .....                       | 29 |
| <b>2.4 Contato elétrico</b> .....                                   | 30 |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.4.1 Efeito Corona .....   | 33        |
| 2.4.2 Atrito .....  | 34        |
| 2.5 Processo de vibração .....  | 35        |
| 2.6 Alinhamento laser .....   | 37        |
| 3.1 O protótipo .....   | 40        |
| 3.1.1 Instalação de um motovibrador .....   | 42        |
| 3.1.2 Relações importantes de um motovibrador .....   | 44        |
| 3.1.3 Projeto do motovibrador direcional .....  | 45        |
| 3.2 As conexões.....  | 47        |
| 3.2.1 A utilização do laser .....   | 48        |
| <b>4 TESTES E AVALIAÇÃO EXPERIMENTAIS NO PROTÓTIPO.....</b>   | <b>52</b> |
| 4.1 Materiais e Métodos .....   | 52        |
| 4.2 Ensaio Preliminar .....   | 53        |
| 4.2.1 Resultados obtidos .....  | 55        |
| 4.3 Ensaio no protótipo.....  | 57        |
| 4.3.1 Características do protótipo .....  | 58        |
| 4.4 Ensaio para determinação da força de conexão .....  | 60        |
| 4.5 Moto vibrador .....   | 62        |
| 4.6 Ensaio diferença pela diferença do torque .....   | 62        |
| 4.7 Ensaio com medidor de vibrações.....  | 65        |
| 4.8 Ensaio experimental pela resistência de contato .....   | 66        |
| <b>5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS.....</b>   | <b>71</b> |
| 5.1 Perspectivas futuras .....  | 72        |
| <b>6 REFERÊNCIAS.....</b>   | <b>73</b> |
| <b>ANEXO A – DEPÓSITO DE PATENTE: BRASIL/SUL PATENTE Nº BR 10 2013 020198 7, 2013 - DISPOSITIVO DE AUTOMAÇÃO DE SECCIONADOR DE ALTA TENSÃO.....</b> | <b>76</b> |
| <b>ANEXO B – PUBLICAÇÃO .....</b>   | <b>84</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, os avanços tecnológicos têm proporcionado grandes benefícios à sociedade, melhorando e modificando significativamente o dia a dia das pessoas. No meio industrial, os sistemas automatizados têm promovido uma verdadeira revolução nos processos produtivos, propiciando um aumento de produção, redução de custo, tudo isso associado a um produto final de boa qualidade. Esse processo tem sido possível, sobretudo em virtude da popularização dos microcontroladores e/ou microprocessadores com alta performance e uma grande variedade de sensores disponíveis hoje no mercado.

No setor elétrico, esse processo de automação tem sido aplicado, sobretudo, para garantir o fornecimento de energia, aumentar a confiabilidade do sistema e causar o mínimo de interrupções, atendendo assim as regras estabelecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica, a ANEEL. De certa forma, quando se fala de automação do setor elétrico, esse processo está concentrado nas subestações, onde são manipulados e processados os grandes blocos de energia para disponibilizar aos centros consumidores.

Entretanto, dentro de uma subestação de energia elétrica, nem todos os equipamentos são possíveis de automatizar, de forma desassistida. Dentro desse contexto, encontra-se o seccionador, que é um equipamento primordial em subestações de energia elétrica, tanto na distribuição, como na transmissão, sendo concebido para operar motorizado e ser comandado remotamente, nas funções de isolar, conectar e criar um caminho alternativo para o fluxo de potência.

As manobras de abertura e fechamento dos contatos principais, nos seccionadores, têm gerado grandes problemas às concessionárias de fornecimento de energia elétrica. Há vários registros de falhas originadas por esse equipamento quando comandado remotamente, havendo assim a necessidade de um operador local para supervisionar a ação telecomandada e certificar-se de que esta foi realizada com sucesso. Essas falhas consistem basicamente na má efetivação dos contatos principais do seccionador, propiciando o surgimento de arco voltaico, desgaste e conseqüentemente, a oxidação dos mesmos, o que acaba prejudicando ainda mais a efetivação dos contatos.

A incerteza inerente às atividades desse equipamento tem impedido o processo de automação completa de uma subestação de energia elétrica.

Com o intuito de colaborar para a solução desse problema, este trabalho apresenta um sistema eletromecânico com o objetivo de assegurar a efetiva realização dos contatos principais de um seccionador quando controlado remotamente, tornando desnecessária a supervisão de um operador local. Para validação experimental dessa proposição, foi montado um protótipo de seccionador em escala real, do tipo dupla abertura, na subestação Santa Marta, pertencente à CEEE GT, em Passo Fundo.

## **1.1 Justificativa**

Toda a manipulação dos grandes blocos de energia é realizada dentro de uma subestação que tem que adequar os níveis de tensão de acordo com os padrões estabelecidos para atender aos consumidores conforme rege a legislação pertinente. Os processos de automação em subestações têm-se ampliado nos últimos tempos garantindo uma atuação mais rápida e eficiente, aumentando assim a confiabilidade do sistema.

Hoje, muitas subestações não são automatizadas por completo, devido à falta de confiabilidade na manobra de seccionadores, pois, os contatos auxiliares que são atuados pelo eixo cardan muitas vezes não representam a real situação dos contatos principais, havendo necessidade de um operador deslocar-se e verificar se houve a efetiva realização dos contatos. Caso isso não tenha ocorrido, o operador, com auxílio de um bastão, ajusta de forma manual o fechamento final dos contatos principais.

Outro problema ocorre quando os contatos móveis não ficam encostados no limitador mecânico. Isso indica que os contatos embora fechados, não estão na posição para a qual foram projetados, propiciando o aparecimento de pontos quentes, pois os contatos estão permanentemente com campo elétrico suficiente para a formação do gás ozônio, que oxida todas as partes que ficam expostas no contato.

Cabe ressaltar, ainda, que mesmo com toda evolução tecnológica experimentada em muitos setores, sobretudo nos processos de operação de uma subestação de energia, o equipamento seccionador continua o mesmo, sem muitas alterações e que muitos encontram-se em plena operação por mais de 20 a 30 anos. Assim sendo, num processo de substituição por um seccionador mais eficiente, certamente demandaria um alto investimento em virtude da grande quantidade existente hoje no setor de transmissão e distribuição.

Há, por parte das concessionárias de energia, um esforço em otimizar seus recursos humanos, reduzir custo, sem afetar a qualidade de seus serviços, o que vem de encontro a essa proposição.

## **1.2 Objetivo geral**

Este trabalho busca apresentar a solução encontrada para um problema real nas subestações de energia elétrica relativo ao seccionador, demonstrando as etapas teóricas e práticas da implementação de uma máquina vibratória nos seccionadores de média e alta tensão, para auxiliar nas manobras de abertura e fechamento, trazendo confiabilidade para o processo.

## **1.3 Objetivos específicos**

- Montar um protótipo em escala real, para realizar manobras de abertura e fechamento, medindo a força necessária para movimentação e conexão dos contatos móveis.
- Calcular a força de atrito existente nos contatos principais e desmembrar o coeficiente de atrito para encontrar a força normal de compressão exercida pela mola.
- Encontrar a frequência de ressonância da conexão principal e a amplitude necessária para haver o alívio da força de atrito, em nível suficiente para concluir a manobra de fechamento.

## **1.4 Organização deste trabalho**

Esse trabalho encontra-se dividido na seguinte forma: o capítulo 2 apresenta de forma sucinta o cenário atual do sistema elétrico brasileiro e uma revisão teórica dos conceitos utilizados no desenvolvimento desse trabalho.

O capítulo 3 aborda a problemática de operação remota de seccionadores e apresenta uma proposta de modificação no projeto original de seccionadores do tipo DA.

Os testes e ensaios realizados sobre o protótipo são apresentados no capítulo 4, onde também se encontram os resultados obtidos. As conclusões e perspectivas são então apresentados no capítulo 5.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Sistema Elétrico Brasileiro**

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), criada no ano de 1997, é o órgão regulador e fiscalizador de toda a cadeia produtiva do setor elétrico brasileiro, desde geração até comercialização de energia.

O sistema elétrico brasileiro é constituído por centenas de usinas, em sua maioria utilizando o potencial hidrelétrico e por uma vasta rede de transmissão com milhares de quilômetros estendida pelo território nacional, operando de forma interligada, estando a coordenação de operação das usinas e da rede de transmissão estão a cargo do Operador Nacional do Sistema (ONS), BRASIL.GOV.BR (2013).

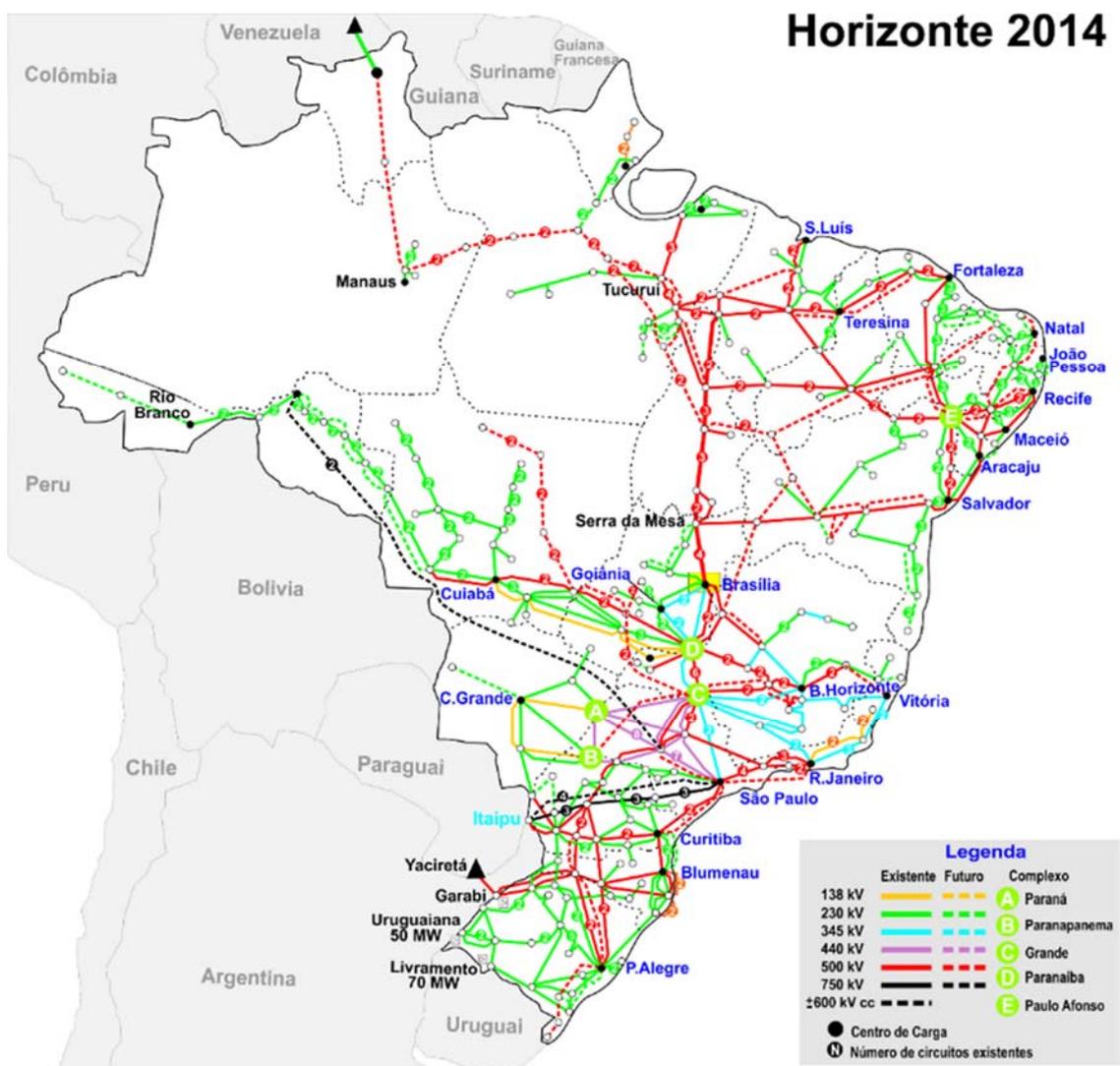
O Sistema Interligado Nacional (SIN), é constituído por empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte, que possui pequenos sistemas isolados, sobretudo na região amazônica, o que representa 3,4% da capacidade de produção de eletricidade do país. Essa operação interligada proporciona algumas vantagens, pois permite minimizar os riscos de interrupção no suprimento de energia, devido ao fato da manutenção de reservas energéticas para suportar períodos de baixa hidrologia, a utilização de energia hidráulica disponível em outros pontos do sistema, uma adequada reprogramação da geração, ajustando-se a mesma às condições verificadas de demanda e hidrologia, entre outros.

#### **2.1.1 Geração**

No Brasil, a geração de energia elétrica proveniente de usina hidrelétrica corresponde a um índice de quase 70%, ficando 29,5% para a geração térmica (gás, biomassa, diesel, carvão mineral, nuclear). A geração eólica, apesar do crescimento nos últimos anos, contribui apenas com 1,7% da geração nacional, de acordo com a Aneel.

O potencial hidrelétrico brasileiro é de 260 Giga Watts (GW), o que coloca o país em destaque no cenário mundial, ocupando a quarta posição no mundo, ficando atrás somente da China, da Rússia e dos Estados Unidos. Entretanto estudos de planejamento consideram apenas cerca de 160 a 180 GW do potencial hidrelétrico como aproveitável, sobretudo, por razões ambientais, considerando a legislação atual sobre o tema, que apresentam dificuldades para o seu aproveitamento. Existem 1.050 empreendimentos de geração hidráulica instalados no território nacional têm capacidade de geração de 84,7 mil MW, de acordo Banco de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica de março de 2013.

Figura 1 – Sistema de transmissão ONS (2014)



Fonte: [http://www.ons.org.br/conheca\\_sistema/mapas\\_sin.aspx](http://www.ons.org.br/conheca_sistema/mapas_sin.aspx)

A Eletrobrás é uma empresa de capital aberto controlada pelo governo brasileiro, atuando na área de geração e distribuição de energia elétrica. Do total dos 123,1 mil MW instalados até março de 2013, considerando todas as fontes de energia, a Eletrobrás, por meio de suas subsidiárias são responsáveis por 41,6 mil MW. Essa potência é oriunda de um sistema constituído por 37 usinas hidrelétricas, 120 usinas termelétricas, duas usinas termonucleares e três parques de geração de energia eólica, representando 33,8% do total da capacidade instalada no país.

Entre as maiores e mais importantes usinas do grupo Eletrobrás, destacam-se Tucuruí (capacidade instalada de 8.535 MW), a parte brasileira de Itaipu Binacional (7.000 MW), o Complexo de Paulo Afonso (3.880 MW), Xingó (3.162 MW), Angra 1 e Angra 2 (2.007 MW), Serra da Mesa (1.275 MW), Furnas (1.216 MW) e Sobradinho (1.050 MW).

### **2.1.2 Transmissão**

Como referido no item anterior, o sistema elétrico é fortemente dependente da energia produzida pelas usinas hidrelétricas e em geral estas estão longe dos grandes centros consumidores. Outras questões a se considerar estão a grande extensão territorial do país e a sua variação climática de uma região para outra que pode refletir em uma escassez ou excesso na produção de energia elétrica. Isso, de um certo modo foi equacionado através da interligação dos sistemas de transmissão, que foi concluído após 1999, com a interligação dos dois subsistemas independentes, o Sul-Sudeste-Cento-Oeste e o Norte-Nordeste, o que permite um contínuo e permanente intercâmbio de energia entre as regiões e uma operação mais econômica, flexível e segura das instalações que compõem o Sistema Interligado Nacional.

A rede de transmissão de energia elétrica no Brasil alcançou, ao final de março de 2013, 107,4 mil quilômetros de extensão – distância equivalente a mais de duas vezes e meia a circunferência da Terra. O sistema Eletrobrás é responsável de cerca de 60 mil quilômetros de linhas desse sistema, considerando a rede básica, formada por sistemas de alta tensão (230 mil Volts ou mais) e pelas demais instalações de transmissão (rede que operam nas tensões entre 69 mil Volts e 138 mil Volts), ANEEL (2011).

### **2.1.3 Distribuição**

Leis e decretos regulam o sistema de distribuição de energia elétrica, que é operado por 64 concessionárias, das quais 22 se localizam na região Sudeste, 17 no Sul, 11 no Nordeste, 9 no Norte e 5 no Centro-Oeste. Segundo a Associação Brasileira da Distribuidores de Energia Elétrica (ABRADEE), do total da energia distribuída no país, 60% é feito sob a responsabilidade do setor privado e 40% do setor público.

Até o início do ano 2000, antes da privatização do setor não havia separação dos negócios da cadeia produtiva (geração, transmissão e distribuição). Hoje as distribuidoras são o elo entre o Setor Elétrico e a sociedade, visto que suas instalações recebem das companhias de transmissão a maior parte do suprimento de energia elétrica destinado ao abastecimento do país.

No Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica (Prodist), está disposto as condições, responsabilidades e penalidades relativas à conexão, planejamento da expansão, operação e medição de energia elétrica, e ainda estabelece critérios e indicadores de qualidade para consumidores, produtores, distribuidores e agentes importadores e exportadores de energia.

Segundo dados de 2012, de acordo com o Boletim de Monitoramento do Sistema Elétrico, o Brasil conta com mais de 72 milhões de Unidades Consumidoras (UCs) dos quais 85% são residenciais.

A conexão e o atendimento ao consumidor do ambiente regulado são realizados pelas distribuidoras de energia. Além delas, as cooperativas de eletrificação rural, entidades de pequeno porte, distribuem energia elétrica exclusivamente para seus associados.

### **2.1.4 Concessionárias**

Os contratos de concessão assinados entre a ANEEL e as empresas prestadoras dos serviços de transmissão e distribuição de energia estabelecem regras claras a respeito de tarifa, regularidade, continuidade, segurança, atualidade e qualidade dos serviços e do atendimento prestado aos consumidores. Da mesma forma, define penalidades para os casos em que a fiscalização da ANEEL constatar irregularidades.

Os novos contratos de concessão de distribuição priorizam o atendimento abrangente do mercado, sem que haja qualquer exclusão das populações de baixa renda e das áreas de menor densidade populacional. Prevê ainda o incentivo à implantação de medidas de combate ao desperdício de energia e de ações relacionadas às pesquisas voltadas para o setor elétrico.

A concessão para operar o sistema de transmissão é firmada em contrato com duração de 30 anos. As cláusulas estabelecem que, quanto mais eficiente as empresas forem na manutenção e na operação das instalações de transmissão, evitando desligamentos por qualquer razão, melhor será a sua receita.

As novas concessões de geração, por sua vez, são outorgadas mediante procedimento licitatório por até 35 anos, não havendo previsão de prorrogação conforme estabelece as Leis nº 8.987/95 e 9.074/95.

Diante do exposto, pode-se compreender a importância dos equipamentos do sistema elétrico de uma subestação em funcionamento.

## **2.2 Comitê, associações e normas**

O setor elétrico mundial conta com comitês e associações destinados a pesquisar e a divulgar os resultados de materiais, métodos e procedimentos utilizados pelas empresas do setor.

Nessa perspectiva, esta dissertação utiliza, como base fundamental, dois estudos na área de seccionadores realizados e publicados por Council on Large Electric Systems (CIGRE), por Carvalho (2012) e Associação Brasileira das Grandes Empresas de Transmissão de Energia Elétrica – ABRATE (2012).

### **2.2.1 CIGRE**

Com sede em Paris, o CIGRE foi fundado em 1921, para promover a colaboração aos especialistas do setor em todo o mundo, produzindo estudos de base com o objetivo de:

- desenvolver e implantar o sistema de energia para o futuro;
- otimizar equipamentos existentes;
- respeitar o meio ambiente;

- facilitar o acesso à informação.

Em 1971, criou-se o Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (CIGRÉ-BRASIL), com o objetivo de estreitar o intercâmbio de experiências e de material científico.

Hoje, o CIGRE BRASIL atua nas áreas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica em assuntos como:

- aspectos elétricos e eletromecânicos da geração de energia elétrica;
- estudos, projetos, construção, operação e manutenção de linhas de transmissão, subestações e equipamentos ou sistemas associados;
- planejamento eletroenergético de sistemas, isolados ou interligados, e sua operação e racionalização ou conservação de energia;
- telecomunicações, controle e proteção em sistemas elétricos;
- desenvolvimentos e aplicação de materiais, equipamentos e sistemas eletroenergéticos;
- desenvolvimento e aplicação de métodos e técnicas destinadas a analisar o sistema elétrico de potência;
- embasamento da regulamentação do mercado de energia.

### **2.2.2 ABRATE**

Em 1999, foi criada a Associação Brasileira das Grandes Empresas de Transmissão de Energia Elétrica (ABRATE).

O modelo do setor elétrico brasileiro formalizou a criação de empresas responsáveis pela transmissão, as quais realizam a disponibilização de equipamentos e instalações para o transporte de energia elétrica, desde as usinas até os centros de consumo.

Participaram da fundação da ABRATE: CEEE, CEMIG, CHESF, COPEL, CTEEP, ELETRONORTE, ELETROSUL, EPTE (posteriormente incorporada pela CTEEP) e FURNAS.

Com objetivos similares ao CIGRE, as finalidades da ABRATE são:

- intercâmbio de informações entre as associadas, tais como técnicas, comerciais, financeiras, legais, jurídicas e institucionais referentes às atividades de transmissão de energia elétrica;

- desenvolvimento de análises, estudos e pesquisas de interesse comum;
- elaboração e defesa de propostas para solução de problemas;
- mútua colaboração entre as associadas;
- acompanhamento dos assuntos de interesse das associadas junto a outras entidades, especialmente o ONS, a ANEEL e o Comitê Coordenador do Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos (CCPE).

Apesar do pouco tempo de existência, a ABRATE já consolidou seu papel de representação das transmissoras, sendo o canal através do qual a posição dos agentes de transmissão é levada aos órgãos de regulação e operação do sistema interligado. Os expressivos resultados alcançados comprovam o acerto da decisão de criar a entidade, que tem colaborado decisivamente para o aperfeiçoamento do setor elétrico brasileiro.

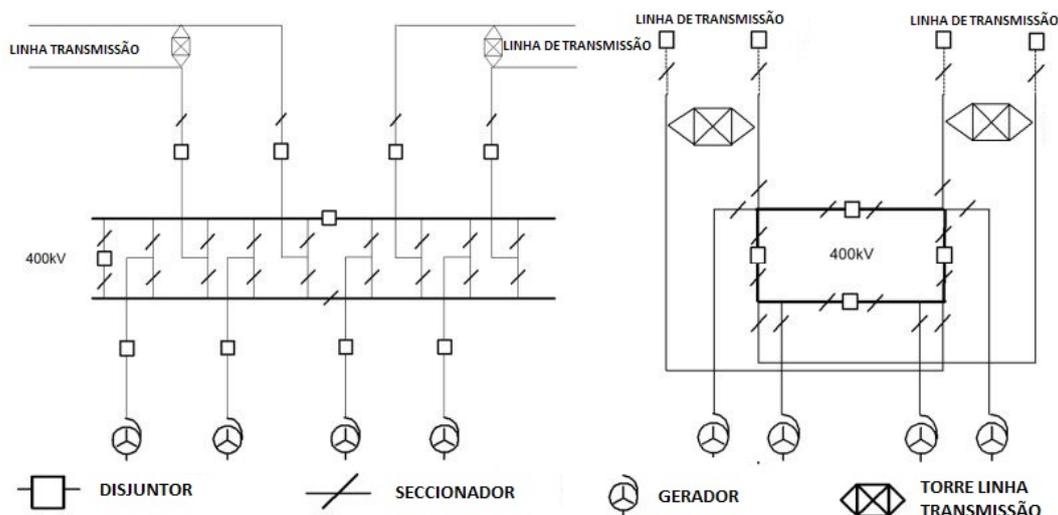
### **2.2.3 ABNT e IEC**

O Brasil conta com a orientação de duas normas, destinadas a caracterizar e a especificar tecnicamente os seccionadores e as chaves de aterramento, são a ABNT NBR 7571 (2011) e a ABNT NBR IEC 62271-102 (2006). A norma internacional mais recente é a IEC 62271-102 (2012). Tal regramento não apresenta evolução significativa quanto aos ensaios mecânicos para seccionadores.

## **2.3 Seccionador**

O seccionador é um dos equipamentos imprescindíveis em uma subestação de energia elétrica, tanto na distribuição quanto na transmissão. Na chegada e na saída de uma subestação é o primeiro e o último equipamento de manobra em que circula o fluxo de potência.

Este equipamento pode ser utilizado em três funções, que são: interligar, isolar e ou criar caminho alternativo para o fluxo elétrico de potência. A F apresenta um diagrama genérico de um sistema de potência onde ilustra sua utilização.



Fonte: (C.CARVALHO, 2012).

### 2.3.1 Tipos construtivos de seccionadores

Os seccionadores são classificados por tipo, podendo ser de abertura lateral e abertura vertical, em conformidade com o disposto na norma ABNT NBR 7571 (2011), na medida em que o contato principal é movimentado para fazer a manobra de fechamento e abertura.

Dentro do tipo abertura lateral, existem três subtipos:

- Abertura lateral simples denominada pela sigla **AL**;
- Abertura lateral central denominada pela sigla **AC**;
- Abertura lateral dupla denominada pela sigla **DA**.

Os modos para a abertura vertical são:

- Abertura vertical simples denominada pela sigla **AV**;
- Abertura vertical reversa denominada pela sigla **VR**;
- Abertura vertical faca denominado pela sigla **FC**.

A direção do movimento de manobra do contato móvel se resume em vertical e horizontal. Comercialmente cada fabricante utiliza um mecanismo para que o seccionador execute este movimento, dando outros nomes e siglas que identificam o tipo de seccionador.

### 2.3.2 Contatos auxiliares, de comando e de acionamento

Todas as informações sobre a posição e o estado do seccionador são fornecidas a partir da condição, dos contatos auxiliares, em geral são utilizadas chaves fim de curso nessa função, sendo a sigla NA indica o contato auxiliar normalmente aberto e NF contato auxiliar normalmente fechado, estas chaves estão instaladas na denominada árvore de contatos, e os cames que atuam estas no eixo cardan que movimenta os contatos principais do seccionador. O diagrama da F demonstra, de forma planificada, a sequência de atuação das chave, que ocorre conforme a posição angular dos contatos principais do seccionador.

A condição inicial são os contatos principais, totalmente abertos representando 0% do movimento de rotação dos contatos de potência do seccionador. Nessa posição, todos os contatos NF das linhas 5 a 8 estão fechados e todos NA das linhas 1 a 4 estão abertos, indicando, por conseguinte, tal informação, que o seccionador está aberto.

Iniciando o movimento de fechamento até atingir a posição  $> 10\%$  da rotação, o primeiro contato da linha 8, NF-b abre e o contato da linha 4, NA-aa fecha, informando ao sistema de monitoramento que está em movimento de fechamento.

Continuando com o movimento, quando os contatos principais atingem a posição  $> 20\%$  da rotação total, o segundo contato linha 7, NF-b abre e o segundo contato da linha 3, NA-aa fecha.

Ainda, a evolução do movimento de fechamento a posição  $> 80\%$ , na qual o contato da linha 6, NF-bb abre e o contato da linha 2, NA-a fecha.

Ainda no que concerne ao movimento de fechamento, quando os contatos principais atingem  $> 90\%$ , o contato da linha 5, NF-bb abre e o contato da linha 1, NA-a fecha. Nesse contexto, o sistema de monitoramento compreende que os contatos principais atingiram 100% da rotação total, sendo o seccionador considerado fechado.

Figura 3 – Diagrama dos contatos auxiliares ABNT NBR 7571 (2011).



Fonte: (ABNT NBR 7571, 2011)

Os contatos auxiliares são responsáveis pela informação da posição na qual se encontram os contatos principais do seccionador.

### 2.3.3 Mecanismos de movimentação

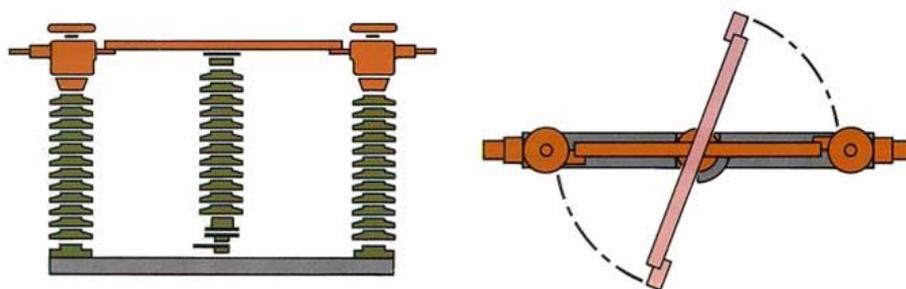
O movimento dos contatos principais do seccionador pode ser do tipo manual, ou manual/motorizado. Os elementos estão instalados na caixa de comando, que abriga os mecanismos responsáveis por receber, transmitir e sinalizar o estado do seccionador.

O sistema manual/motorizado é composto por um motor acoplado a uma caixa de redução, cuja saída é acoplada a um eixo cardan, que movimenta uma biela ligada a um conjunto de hastes móveis, presas na base dos isoladores móveis. Os contatos principais móveis estão fixados no topo dos isoladores.

O mecanismo de acionamento faz com que a coluna central gire aproximadamente 45° em relação à base no sentido anti-horário, observado por cima do seccionador, permanecendo nessa posição até que receba o comando para fechar.

A manobra de fechamento do seccionador ocorre quando a coluna central gira no sentido horário até que a haste do contato principal fique alinhada com a base, conforme evidencia na F.

Figura 4 – Seccionador tipo DA. SCHENAIDER ELECTRIC (2011)



Fonte: (SCHENAIDER ELECTRIC, 2011)

### 2.3.4 Colunas isoladoras

As colunas isoladoras são responsáveis por sustentar a parte ativa, movimentar os contatos móveis e isolar a parte energizada, que, no caso da CEEE GT, trabalha com potencial nos seccionadores de 69 a 230 kV do nível relativo ao da estrutura que está ligada diretamente à malha de terra da subestação.

Os isoladores utilizados em média ou alta tensão estão normatizados pela ABNT NBR 6882 (1998), que descreve as características de dimensionais, capacidade elétrica e mecânica desses componentes, as utilizadas no protótipo estão na F.

Figura 5 Colunas isolantes tipo pedestal do protótipo



Fonte: Protótipo montado na CEEE GT em Passo Fundo.

### **2.3.5 Fabricantes**

Dos seccionadores utilizados no Brasil, alguns são fabricados em território nacional, outros por multinacionais que nacionalizam os produtos.

Em geral, os projetos de seccionadores são feitos no país onde é a matriz da multinacional e adequados às normas vigentes no país onde será instalado.

A F mostra um seccionador tipo abertura lateral dupla DA, que é o objeto de pesquisa deste trabalho.

### **2.3.6 Norma do ensaio mecânico**

Os ensaios mecânicos realizados seguem as orientações da ABNT NBR IEC 62271-102 (2006) para garantir o funcionamento de abertura e fechamento.

Os fabricantes fornecem um produto obedecendo as normas, porem estas permitem que antes de iniciar a bateria de testes, os contatos principais sejam lubrificados.

O seccionador instalado e em funcionamento difere das condições do ensaio normatizado, pois está exposto aos fenômenos da natureza. No decorrer será, descrito os principais problemas de um seccionador.

Neste trabalho, foram estudadas as normas ABNT NBR 6935 (1985), a qual foi substituída pelas ABNT NBR 7571 (2011), e ABNT NBR IEC 62271-102 (2006), a qual é tradução fidedigna da IEC 62271-102 (2006). Foi ainda estudada a IEC 62271-102 (2012), verificando-se, com isso, que não houve evolução na orientação de como devem ser as garantias de funcionamento do seccionador, e não apresentam pontos que possam orientar os fabricantes para aumentar a confiabilidade nas manobras do equipamento.

### **2.3.7 Princípio de funcionamento**

Os seccionadores tem como condições iniciais os contatos principais totalmente abertos, representado por 0% de rotação, na F mostra o seccionador DA (dupla abertura lateral).

Para fechar o seccionador eletricamente, de forma local ou remota, é ligado o moto-reductor, instalado na caixa de comando 01, a saída do moto-reductor está acoplado a um eixo



Para garantir que a manobra foi bem sucedida, é necessário um profissional na função de operador, verificar por vídeo ou ir junto ao seccionador certificar, se houve o não o fechamento dos contatos principais.

Caso não haja a correta conexão, a primeira tentativa é comandar a abertura e tentar novamente o fechamento.

Se mesmo assim não acontecer o fechamento correto, o operador vai junto ao seccionador e com auxílio de um bastão isolado de manobra, empurra os contatos móveis até a posição correta.

A dificuldade, na execução dessa tarefa, é alcançar e acertar os contatos móveis que podem estar distantes do operador de até 5 m de altura conforme tipo e instalação do seccionador.

Cada peça de bastão de manobra tem, 32mm de diâmetro e 1500mm de comprimento e pesando aproximadamente 2kg. Os segmentos podem ser encaixados um ao outro até atingir o comprimento necessário para alcançar os contatos principais.

O número real de vezes que foi necessário intervir no processo de fechamento correto é impreciso devido a falta do registro no livro de ocorrência das subestações. Esses registros são essenciais, para que a equipe de manutenção seja acionada e faça os ajustes necessários, para corrigir o problema e alimentar o histórico de falhas destes equipamentos.

## **2.4 Contato elétrico**

Sempre que existe uma diferença de potencial originada por campos elétricos opostos, podendo ser gerada artificialmente ou por descargas atmosféricas, naturalmente ocorre a busca de um caminho para equilibrar ou neutralizar a diferença destas cargas, este caminho deve ter alguma propriedade condutiva.

O fluxo que percorre o caminho em busca da equalização é a corrente elétrica.

A interligação entre a fonte da diferença de potencial e o caminho é denominado contato elétrico ou terminal.

Nos contatos das conexões elétricas, existe a formação de obstáculo ao fluxo conhecido por resistência elétrica. Ao longo da vida útil estimada, a conexão pode ser estável, sem que haja aumento da resistência ao fluxo de corrente. O aumento da resistência, está associado a fatores do meio onde o contato é utilizado.

Os contatos elétricos podem ser feitos de vários materiais condutores, dependendo do projeto que deve atender. O material mais utilizado para conduzir eletricidade conforme INTERNATIONAL COPPER ASSOCIATION, LTD (2011) é o cobre com 99,99% de pureza, conhecido como cobre eletrolítico.

Exibe estrutura cristalina cúbica de face centrada, apresenta excelente condutividade elétrica e térmica, boa maleabilidade e boa resistência a corrosão.

A F mostra um exemplo de cobre eletrolítico METALS HANDBOOK (1992).

Figura 7- Amostra da estrutura dendrítica do cobre (METALS HANDBOOK, 1992)



Fonte: (METALS HANDBOOK, 1992)

As principais características físicas e mecânicas do cobre eletrolítico podem ser conferidas na Tabela 1, os valores estão disponíveis em METALS HANDBOOK (1992) e em INTERNATIONAL COPPER ASSOCIATION, LTD (2011).

Tabela 1 – Características do cobre eletrolítico

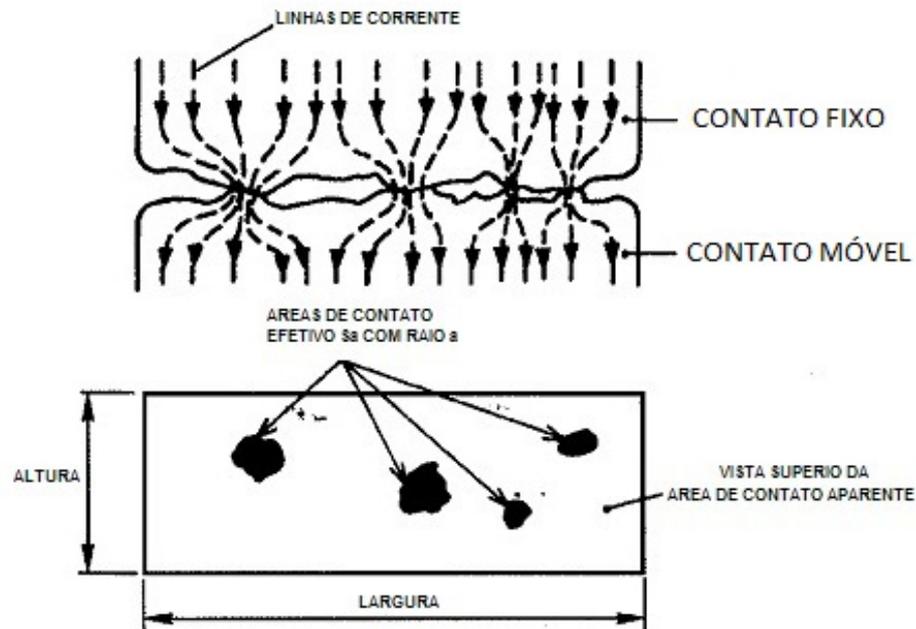
| Número | Composição nominal % | Resistência   | Resistência   | Resistividade                           | Resistividade                           | Dureza Rockwell F |
|--------|----------------------|---------------|---------------|---|---|-------------------|
|        |                      | Tração<br>Mpa | Torção<br>MPa | Encruado<br>$\mu\Omega \cdot \text{cm}$ | Recozido<br>$\mu\Omega \cdot \text{cm}$ |                   |
| C10100 | 99,99 Cu             | 221-455       | 55            | 1,78                                    | 1,7-1,72                                | 54 – 97           |

Fonte: (AMERICAN SOCIETY MATER, 1992) , (CALLISTER, 2007) , (INTERNATIONAL COPPER ASSOCIATION, LTD, 2011)

A resistência elétrica de contato de um metal pode ser dada conforme Eq. (1) e (2), contida na norma IEC/TR 60943 (2009).

Esta norma é dedicada a demonstrar as características do contato elétrico bem como a elevação de temperatura admissível para manter a integridade de um contato elétrico, na F está identificado o que é considerado normal em uma conexão elétrica, pois da área total do contato, apenas alguns pontos são efetivos, fazendo com que ocorra a concentração das linhas de fluxo da corrente elétrica e por consequência um aquecimento pontual.

Figura 8 – Contatos elétrico efetivos conforme norma, IEC/TR 60943 (2009).



Fonte: (IEC/TR 60943, 2009)

$$R_c = \frac{\rho}{2.n.a} + \frac{\sigma_0}{2.n.a^2} \quad (1)$$

Analisando a Eq. (1) pode-se observar os principais fatores envolvidos na resistência de contato, que é a resistividade ( $\rho$ ) dependente do material base do contato. Já a resistividade superficial ( $\sigma_0$ ) depende do acabamento e da quantidade de impurezas presentes na superfície do contato.

Os demais componentes, como o número de contatos elementares ( $n$ ) e raio do contato elementar ( $a$ ) dependem da força de compressão entre os materiais, estes são fatores que podem ser trabalhados a fim de evitar a possibilidade do aumento da resistência de contato.

A Eq. (1) apresenta que o contato elementar ( $a$ ) depende da força de compressão (F), entre os contatos, coeficiente de achatamento ( $\xi$ ) e da dureza do material (H).

$$a = \sqrt{\frac{F}{n \cdot \pi \cdot \xi \cdot H}} \quad (2)$$

Os terminais do contato de potência de um seccionador são feitos de cobre, operam com grande diferença de potencial, na ordem de milhares de Volts e intensidade de corrente na ordem de centenas de Ampere. A associação inevitável dessas duas grandezas é necessária bem como estes são os dois principais fatores degradantes do contato elétrico, sendo o primeiro responsável pelo efeito corona (diferença de potencial elevado gera o gás ozônio altamente oxidante) e o segundo pelo aquecimento (efeito Joule).

Nesta investigação, foram utilizadas duas amostras do contato elétrico de um seccionador marca Galileu fabricada em 1960, isolada para  $145.kV$  e projetada para circular uma corrente permanente de  $600A$  que pode ser vista na F.

Figura 9 – Seccionador instalado na subestação Santa Marta da CEEE GT.



Fonte: Seccionador instalado na subestação Santa Marta em Passo Fundo.

#### 2.4.1 Efeito Corona

Esse efeito possibilita ser observado pelos três sentidos do ser humano, pois é visível a olho nu, causa um ruído característico e tem o cheiro característico o efeito corona fornece energia para a molécula do oxigênio  $O_2$  presente no ar para se transformar em ozônio  $O_3$ . Os

objetos submetidos ao gás ozônio têm a oxidação acelerada conforme relata a norma ABNT NBR 7304 (2010).

Sempre que diferenças de potencial passam o valor de  $2kV$  e o campo elétrico encontra um gradiente da variação da superfície, ou seja de uma superfície plana para uma aguda, com raio de curvatura pequenos ou irregularidades acentuadas, todos esses na ordem de aproximadamente  $5\text{ mm}$ , ocorre a concentração de campo elétrico nesta região.

O campo elétrico de uma superfície energizada é proporcional ao nível de tensão e às condições do ambiente. Nas regiões onde há um gradiente de alteração superficial, em qualquer ponta irá ocorrer a concentração do campo e com isso o aumento da ionização do ar, tornando-o condutivo.

Se a região ionizada continua a crescer, irá romper o dielétrico do ar, tornando o ambiente condutivo, formando uma fagulha momentânea, ou até um arco elétrico, a F mostra esse efeito em uma vela de ignição para motor, a região de cor lilás é o gás ozônio. É comum observar ao redor de condutores que operam com alta tensão essa luz azulada.

Figura 10 – Efeito corona diferença de potencial elevado



Fonte: <http://www.faiscas.com.br/bobtesla.html>

#### 2.4.2 Atrito

O atrito é o principal problema dos contatos elétricos deslizantes.

A alternativa de domínio público para reduzir o coeficiente de atrito é a utilização de lubrificantes, porém, no caso de contatos elétricos, os lubrificantes devem ter propriedades condutivas. Isso reduz significativamente a gama de lubrificantes existentes no mercado, e os que têm tal propriedade no primeiro momento funcionam perfeitamente, mas, com o passar do tempo devido o equipamento ser instalado desabrigado, há um ressecamento do lubrificante, e

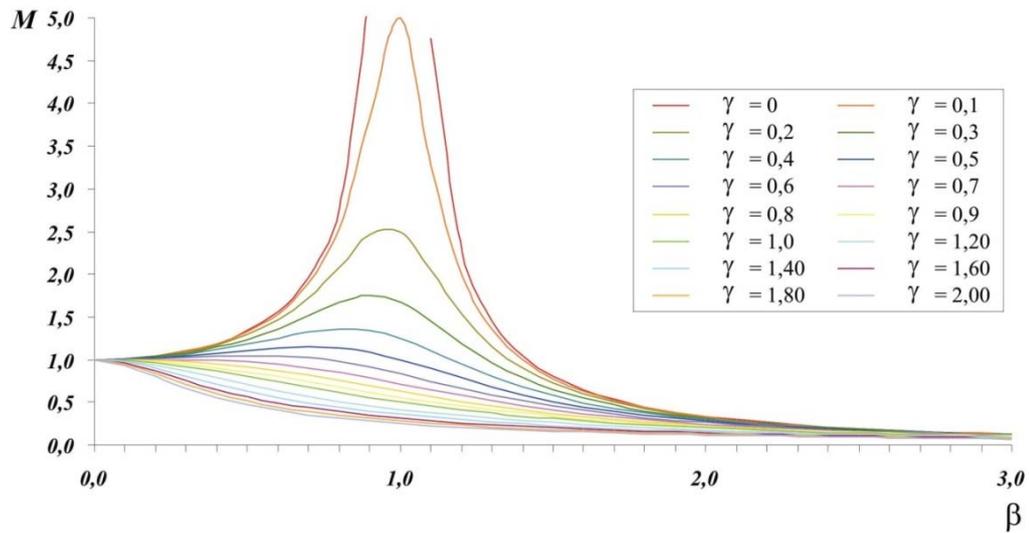
o que era solução passa a ser problema em função da aderência indesejada do contato móvel com o fixo.

## **2.5 Processo de vibração**

Vibração é tema estudado e discutido amplamente, principalmente com o propósito de eliminar a presença desse fenômeno, que pode gerar desconforto, redução na vida útil de estruturas e equipamentos, conforme ABNT NBR 7497 (1984). Na literatura especializada, são encontradas ressalvas a respeito do perigo das máquinas, equipamentos ou estruturas ao serem excitados na sua frequência natural, também conhecida como frequência de ressonância.

A F é clássica, demonstra que o coeficiente de amplificação tende ao infinito quando a frequência de excitação é igual à frequência natural do objeto e o coeficiente de amortecimento é baixo. A amplificação do movimento tende a valores grandes e pode ocorrer o colapso de materiais, quando estes estiverem submetido a essa condição. Há vários registros na literatura que mostram o colapso de estruturas quando excitadas na frequência de ressonância (Tacoma Narrows Bridge 1940, Quebra de vidros STF 2012, helicóptero do corpo de bombeiros 2013) são alguns dos exemplos em que a energia da fonte de excitação entrou em ressonância com a frequência natural dos objetos, causando estragos.

Figura 11 – Gráfico demonstra a relação  $M \gamma \beta$  (CAMARGO, 2012)



Fonte: (CAMARGO, 2012)

Onde:

$M$  - fator de amortecimento

$\gamma$  - Coeficiente de amortecimento,  $\frac{c}{c_c}$

$\beta$  - razão de frequências  $\frac{\omega}{\omega_n}$

Na aplicação industrial, vários estudos a respeito estão em evidência, o que possibilita detectar e tratar tal problema, de forma preditiva, pela análise da frequência e intensidade da vibração gerada por máquinas e equipamentos conforme trabalhos de Almeida (2006) e Lopes (2006). Também há várias aplicações industriais que aproveitam o uso de vibração controlada em seus processos, como por exemplo:

- escoamento facilitado de materiais;
- Classificação de grãos;
- Alimentação de britador;
- Descarga de vagões de trem, entre outros.

## 2.6 Alinhamento laser

Inserir um dispositivo de fim de curso, para ser instalado nos contatos energizado, é economicamente inviável.

O seccionador é eficaz quando o alinhamento dos contatos móveis com os fixos conforme projeto e a superfície envolvida estiverem alinhados para que a área projetada possa existir.

Dessa maneira, a conexão terá repetibilidade no funcionamento, que estará com as mesmas características medidas nos ensaios, de resistência elétrica do contato.

Os mecanismos de movimentação dos contatos, acumula vários erros por folgas, fenômenos de flambagem, torção e flexão dos componentes, quando não houver um sistema com o monitoramento na parte ativa do seccionador a informação é gerada de forma indireta causando desconfiança da real situação.

A proposição é obter a informação a partir do alinhamento com laser utilizando o princípio da reflexão com um prisma 09, instalado no contato móvel, já o emissor 08 e receptor 10 serão instalados na base do seccionador que podem ser vistos na F, não havendo problema com a isolamento elétrica.

O alinhador a laser é o melhor método utilizado para alinhar objetos, acoplados ou desacoplados, oferecendo uma superioridade técnica em todos os níveis, face aos métodos tradicionais.

O método está baseado num emissor e receptor de feixe laser e a principal vantagem é não precisar contato físico entre os objetos a serem alinhados. O sistema laser executa medidas da posição angular e paralela do eixo através da emissão de um laser pelo transdutor (parte fixa) para o prisma (parte móvel). Esse sistema de alinhamento consiste na utilização de duas unidades, sendo uma emissora e a outra receptora do feixe laser.

O alinhamento dos contatos de potência de seccionadores de média e alta tensão, é fundamental para o equipamento poder certificar, sem contato físico com a parte energizada é uma condição que oferece inúmeras vantagens.

Os sensores serão ligados a um microcomputador, por meio de cabos ou por rádio frequência, que irá informar para o sistema supervisor a real posição dos contatos móveis em relação aos fixos.

Esta informação complementar fundamental para poder ser operado e auditado remotamente o seccionador. Com isso, torna-se um método versátil e prático.

Este método poderá apresentar limitações de uso em ambientes poluídos, o qual podem favorecer o acúmulo de sujeira e com isso provocar refração no feixe do laser.

No ensaio feito no protótipo, o funcionamento ocorreu de forma perfeita.

### 3 APRIMORAMENTO DO PROJETO DO SECCIONADOR – O PROTÓTIPO

Pesquisadores e concessionárias de energia têm despendido esforços no sentido de encontrar soluções que corroborem a modernização do sistema energético e aumente sua confiabilidade. Em geral, como consequência, isso necessita grandes investimentos.

Conforme já discutido no capítulo anterior, o seccionador é um equipamento vital dentro de uma subestação, pois permite isolar e direcionar o fluxo de potência de forma a garantir o suprimento de energia elétrica.

Vários registros têm sido feitos em decorrência de manobras (abertura e fechamento) do seccionador, exigindo, assim, a disponibilidade física de um operador para confirmar a conclusão da operação remota. Tal procedimento é fundamentado no conhecimento de campo e ratificado em pesquisas realizadas junto aos comitês especializados, os quais apresentam as seguintes conclusões:

- A ABRATE (2012) coletou informações de seis associadas dos diversos estados brasileiros e apontou várias falhas em subestações da transmissão, as quais envolvem problemas relacionados a seccionadores;
- O CIGRE (2012) internacional fez um estudo no qual coletou informações em 25 países e apontou no relatório que 69% das falhas que ocorrem em subestações da transmissão envolvem problemas relacionados a seccionadores.

Foram realizadas pesquisas nos órgãos internacionais de patentes e encontradas algumas sobre seccionadores. As de maior relevância são aqui citadas:

- A US1793177 (1929), referente a um seccionador de abertura horizontal simples com giro do contato móvel, para possibilitar que a conexão seja pressionada somente após o contato móvel atingir o fim de curso mecânico do contato fixo.
- A US2810799 (1956), referente a um seccionador de abertura horizontal dupla, com giro do contato móvel, para possibilitar que a conexão seja pressionada somente após o contato móvel atingir o fim de curso mecânico do contato fixo de ambos os lados.

O tipo de encaixe do seccionador proposto neste trabalho não foi encontrado em nenhuma patente, provavelmente por ocorrer de forma simples e poder ser considerado de domínio público.

Na procura de trabalhos semelhantes, as buscas apontaram poucas referências disponíveis e atualizadas a respeito de seccionadores de alta tensão, dificuldade também relatada por Penteado (2011). Carrasco (2005) analisou e avaliou a corrente de um motor de movimentação dos contatos principais, com o objetivo de detectar possíveis problemas relacionados a estes.

A proposta principal deste trabalho consiste na implementação de um sistema visando garantir o funcionamento do seccionador (principalmente o processo de fechamento dos contatos), evitando a necessidade da presença de um operador. Sendo assim, foi desenvolvido um protótipo para avaliar todas as questões relacionadas ao funcionamento do seccionador.

### **3.1 O protótipo**

Em uma pesquisa realizada junto ao banco de dados da CEEE GT verificou-se quais os tipos e o número de seccionadores instalados nas 62 subestações da transmissão. Dentro dessa pesquisa, restringindo as que operam nas classes de tensão de 69, 138 e 230KV, obteve-se um total 1872 seccionadores de diversos tipos, sendo que 40% são do tipo dupla abertura, que é o equipamento que, em geral, apresenta maiores problemas no processo fechamento dos contatos.

O protótipo elemento de estudo deste trabalho foi construído a partir da estrutura de um seccionador do tipo dupla abertura, disponível na unidade da CEEE GT em Passo Fundo. A escolha desse equipamento (da marca Galileu fabricado nos anos 60) se deve ao fato de este ser muito robusto, permitindo a realização dos testes e também da existência de peças de reposição disponíveis no almoxarifado da empresa.

O equipamento foi montado num ambiente fechado para que os testes pudessem ser realizados sem interferência climática, conforme ilustra a F. Para utilização desse equipamento alguns reparos foram feitos uma vez que o mesmo se encontrava fora de uso e que pela ação do tempo havia danificado algumas partes. Um desses reparos culminou na substituição da caixa de comando original do seccionador por outra, de marca diferente, mas que se mostrou adequada ao propósito.

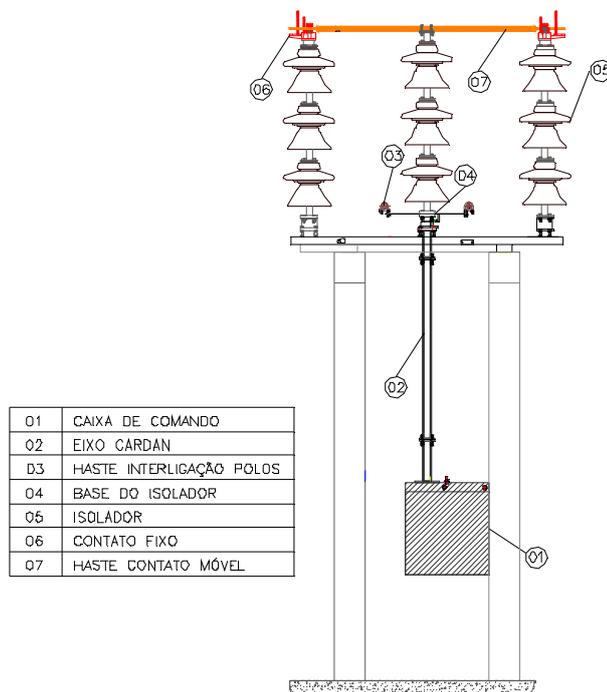
|    |                          |
|----|--------------------------|
| 01 | CAIXA DE COMANDO         |
| 02 | EIXO CARDAN              |
| 03 | HASTE INTERLIGAÇÃO POLOS |
| 04 | BASE DO ISOLADOR         |
| 05 | ISOLADOR                 |
| 06 | CONTATO FIXO             |
| 07 | HASTE CONTATO MÓVEL      |



Fonte: Protótipo montado na CEEE GT Passo Fundo.

Após a montagem e os devidos ajustes, foi possível mapear as regiões susceptíveis de conduzir um mau funcionamento do seccionador. Uma das questões observadas foi o atrito para encaixar o contato móvel no contato fixo (itens 06 e 07 da F) e, em consequência dessa dificuldade, os isoladores (itens 04 e 05 também da F) que sustentam os contatos fixos foram flexionados por falta de rigidez, juntamente com a estrutura.

Figura 13 – Seccionador com equipamento de automação (Protótipo CEEE GT).



Fonte: Protótipo montado na CEEE GT Passo Fundo.

Visando resolver esses problemas, foram adicionados ao protótipo um motovibrador e um inversor de frequência cujos funcionamentos e objetivos dentro dessa proposta de aprimoramento do projeto de seccionadores, serão explanados a seguir.

### 3.1.1 Instalação de um motovibrador

Conforme proposta de solução, foi instalado um motovibrador com o objetivo de melhorar a ação de fechamento dos contatos principais do seccionador. A intenção do uso desse equipamento veio no fato de que a vibração produzida pelo mesmo pudesse conduzir a um efetivo fechamento dos contatos principais, reduzindo assim os efeitos indesejáveis, do atrito entre as superfícies, já descrito anteriormente. Essa ação já tinha sido indicada por RAO (2008), quando explica sobre vibração livre com amortecimento de Coulomb.

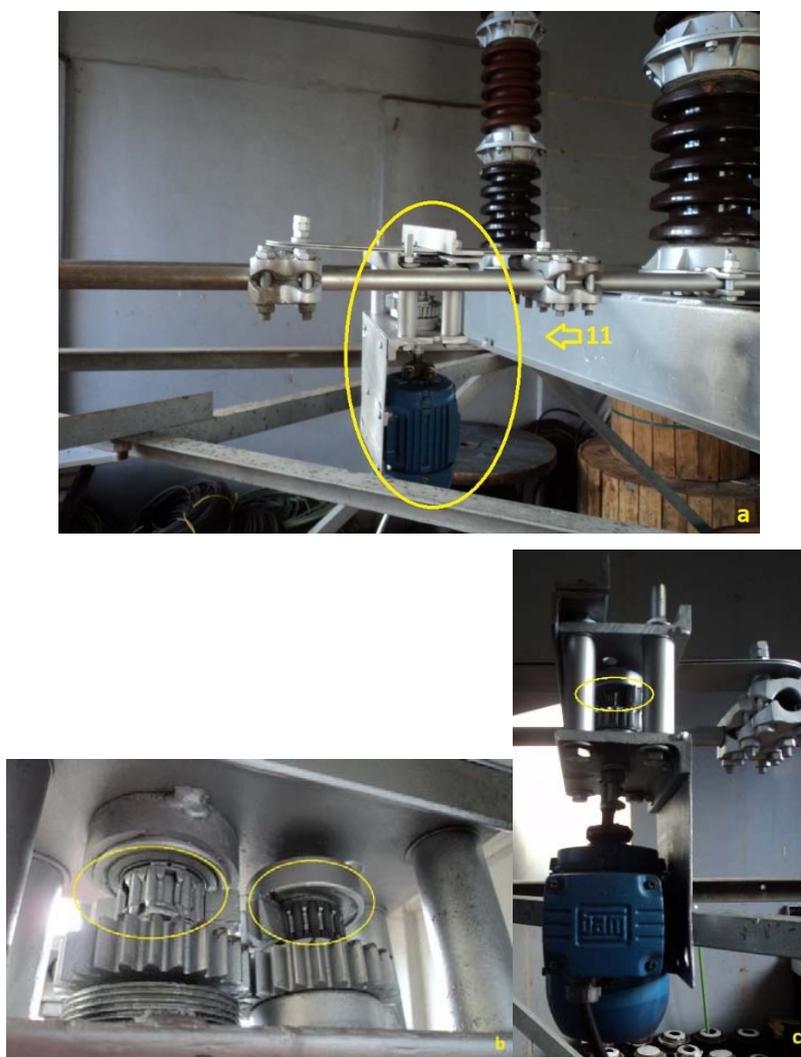
Existem diversos tipos de motovibrador, cujo princípio de funcionamento se baseia na oscilação de energia. Para este trabalho, foi considerado mais adequado o do tipo direcional, pois como o sentido da força impressa para movimentar as colunas possui um grau de liberdade, é melhor direcionar a energia vibratória na direção do movimento. O excitador direcional aqui

utilizado, cujas informações de funcionamento estão na patente US6889820 B2 (2001), se mostrou indicado para este trabalho, sobretudo pela sua simplicidade, eficiência e baixo custo.

Para o protótipo foi confeccionado, na oficina da CEEE GT, um motovibrador direcional, utilizando como propulsor de rotação um motor de indução trifásico, acionado por um inversor de frequência para variar sua rotação e, assim, alcançar o controle da frequência de vibração.

A F mostra o motovibrador (11) instalado na haste de movimentação dos isoladores móveis, nas imagens *b* e *c* está realçado as engrenagens desbalanceadas.

Figura 14 – Motovibrador eletromecânico (Protótipo CEEE GT).

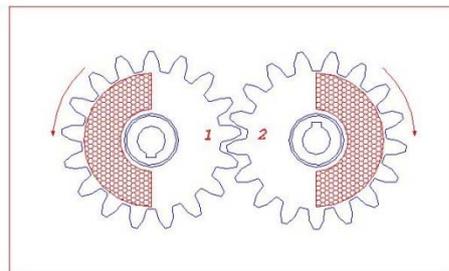


Fonte: Protótipo montado na CEEE GT Passo Fundo.

### 3.1.2 Relações importantes de um motovibrador

O vibrador rotativo direcional está ilustrado na F e F, e descrito por RAO (2008). O princípio de funcionamento desse equipamento consiste na presença de duas massas excêntricas engrenadas, para que as componentes das forças resultantes a  $90^\circ$  e  $270^\circ$  sejam somadas e as componentes de  $0$  e  $180^\circ$  sejam anuladas mutuamente.

Figura 15 – Engrenagens com massas excêntricas.

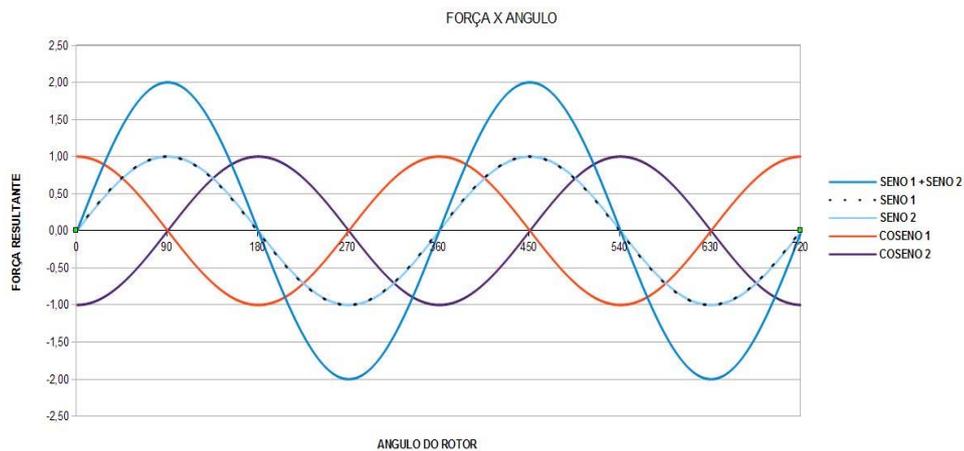


Fonte: Protótipo montado na CEEE GT Passo Fundo

O gráfico da

F demonstra a força resultante na forma de ondas senoidais.

Figura 16 – Soma das forças do motovibrador direcional RAO (2008)



Fonte: Protótipo montado na CEEE GT Passo Fundo.

A equação utilizada para tornar os movimentos vibratórios um modelo matemático pode ser vista na Eq (2), na qual é demonstrado cada componente presente nessa energia.

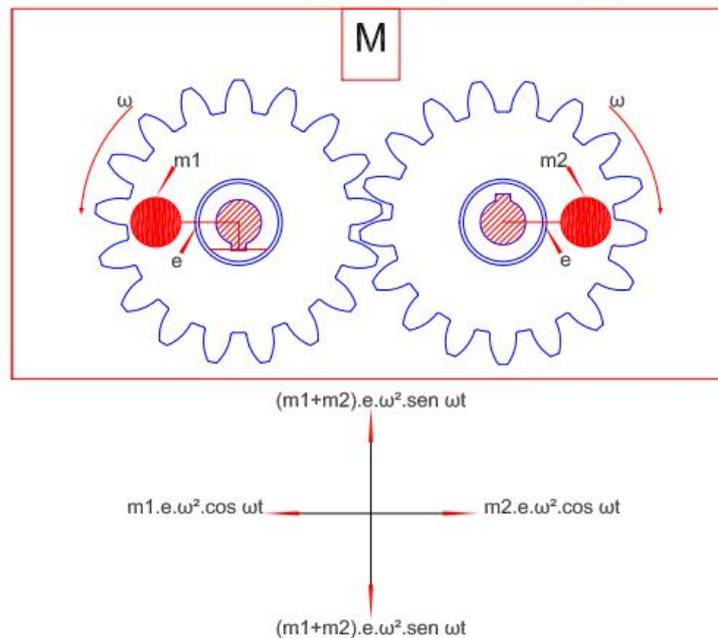
$$m.\ddot{x} + c.\dot{x} + k.x = 0 \quad (3)$$

Onde energia cinética é representada na componente  $m.\ddot{x}$ , a energia dissipada pelo amortecimento é  $c.\dot{x}$  e a força estática ou energia potencial da mola dada  $k.x$

### 3.1.3 Projeto do motovibrador direcional

A representação simplificada do equipamento é mostrado na F. A massa total da máquina é  $M$ , e as duas massas excêntricas  $m_1$  e  $m_2$  giram em sentidos opostos, com uma velocidade angular constante  $\omega$ .

Figura 17 – Modelo simplificado do motovibrador direcional.



Fonte: Protótipo montado na CEEE GT Passo Fundo.

Sendo a força centrífuga:

$$F = m.e.\omega^2 \quad (4)$$

A massa  $m$  causará excitação da massa total  $M$  com proporcional excentricidade  $e$ , rotação  $\omega$ , as componentes horizontais  $x$  e  $-x$  de excitação das duas massas cancelam-se

mutuamente, as componentes verticais da excitação somam-se e agem ao longo do eixo de simetria  $-y$  e  $y$ . Se a posição angular das massas for medida em relação a uma posição horizontal, a componente vertical total da excitação é sempre dada por:

$$F(t) = m \cdot e \cdot \omega^2 \cdot \text{sen } \omega \cdot t \quad (5)$$

Onde  $m = (m_1 + m_2)$

A equação de movimento pode ser derivada conoforme:

$$M \cdot \ddot{x} + C \dot{x} + k \cdot x = m \cdot e \cdot \omega^2 \cdot \text{sen } \omega \cdot t \quad (6)$$

A solução é expressa como

$$x_p(t) = X \cdot \text{sen } (\omega \cdot t - \phi) = \text{Im} \left[ \frac{m \cdot e}{M} \cdot \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \cdot |H(i\omega)| \cdot e^{i(\omega t - \phi)} \right] \quad (7)$$

Onde:

$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ ,  $X$  e  $\phi$  denotam a amplitude e o ângulo de fase de vibração dados por

$$X = \frac{m \cdot e \cdot \omega^2}{[(k - M \cdot \omega^2)^2 + (c \cdot \omega)^2]^{1/2}} = \frac{m \cdot e}{M} \cdot \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \cdot |H(i\omega)| \quad (8)$$

E

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{c \cdot \omega}{k - M \cdot \omega^2} \right) \quad (9)$$

Definindo

$\zeta = \frac{c}{c_c}$ , e  $c_c = 2M\omega_n$ , pode-se escrever

$$M \cdot X = \frac{r^2}{[(1 - r^2)^2 + (2 \cdot \zeta \cdot r)^2]^{1/2}} = r^2 \cdot |H(i\omega)| \quad (10)$$

e

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{2 \cdot \zeta \cdot r}{1 - r^2} \right) \quad (11)$$

A amplitude próxima à ressonância,  $\omega = \omega_n$ , é notável. Assim, se a máquina quando funcionar ressonância será necessário ajustar o mínimo de excitação com a finalidade expressa de evitar amplitudes perigosas.

A velocidades muito altas  $\omega = grande$ ,  $\frac{M.X}{m.e}$  é aproximadamente igual a uma unidade, e o efeito do amortecimento é desprezível.

Para

$$0 < \zeta < \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (12)$$

o máximo de  $\frac{M.X}{m.e}$  e ocorre quando

$$\frac{d}{dr} \left( \frac{M.X}{m.e} \right) = 0 \quad (13)$$

O que resulta em

$$r = \frac{1}{\sqrt{1-2\zeta^2}} > 1 \quad (14)$$

com o valor máximo correspondente de  $\frac{M.X}{m.e}$  dado por

$$\left( \frac{M.X}{m.e} \right)_{max} = \frac{1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (15)$$

Assim, os picos ocorrem à direita do valor de ressonância de  $r = 1$

Para

$$\zeta > \frac{1}{\sqrt{2}}, \left[ \frac{M.X}{m.e} \right] \quad (16)$$

não atinge um máximo. Seu valor cresce de 0, em  $r = 0$  a 1, em  $r \rightarrow \infty$

### 3.2 As conexões

Os seccionadores (do fabricante Galileu) no formato original, do tipo dupla abertura lateral, apresentam problemas de aquecimento indevido decorrentes de um mau contato. Entretanto, não apresentam dificuldades no fechamento dos contatos principais, como praticamente de outros fabricantes do tipo DA.

Dos relatos informais, no caso especial da CEEE GT, o modelo de conexão que mais apresenta problemas de encaixe é o do fabricante Alcace. Sendo assim, considerando esse como sendo o pior caso, seu modelo de contato foi adaptado ao seccionador Galileu, objeto de estudo deste trabalho.

### **3.2.1 A utilização do laser**

O fechamento do seccionador é eficaz quando a áreas da superfície de contato entre as partes móveis e fixas é ótimo. Entretanto, dentro do ciclo de manobras do seccionador, erros vão surgindo devido a atritos, folgas e aos fenômenos de flambagem, torção e flexão dos mecanismos. Assim sendo, problemas relacionados à repetibilidade surgem reduzindo a área de contato efetivo.

Inserir um dispositivo de fim de curso nos contatos energizados é economicamente inviável, sobretudo pela alta tensão que os mesmos estarão submetidos. A proposição é então utilizar o laser através do princípio emissão e reflexão para atestar o fechamento correto dos contatos. Um emissor e um receptor serão instalados na base do seccionador e o refletor instalado na parte ativa (energizada), eliminando, assim, os problemas de isolamento elétrica. Dessa maneira, fica garantida a repetibilidade no funcionamento, que terá as mesmas características medidas nos ensaios de resistência elétrica do contato.

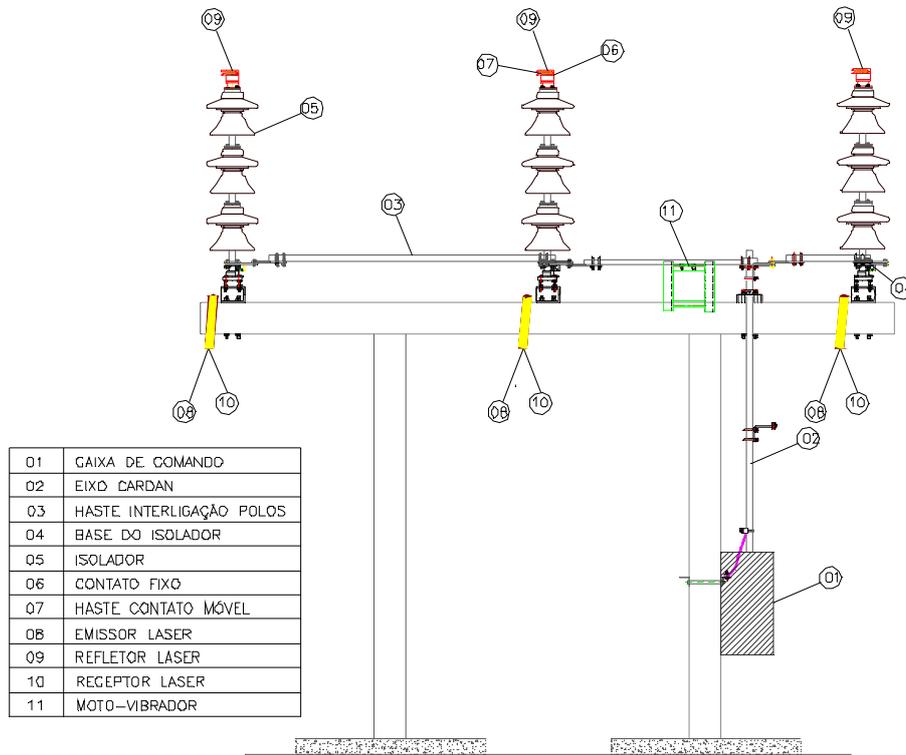
Quando o laser for percebido pelo receptor, um rele auxiliar será acionado informando ao sistema de supervisão que a conexão está correta. Isso possibilitará a operação remota e confiável do seccionador.

O sistema de alinhamento foi composto por um mini projetor laser de 100mW, 650nm e para o circuito de recepção foi realizado a substituição de um foto sensor por um LED receptor de infra vermelho.

O sistema foi instalado com o objetivo de verificar a funcionalidade, uma vez que não existiam registros de tal sistema de monitoramento em seccionadores de alta tensão.

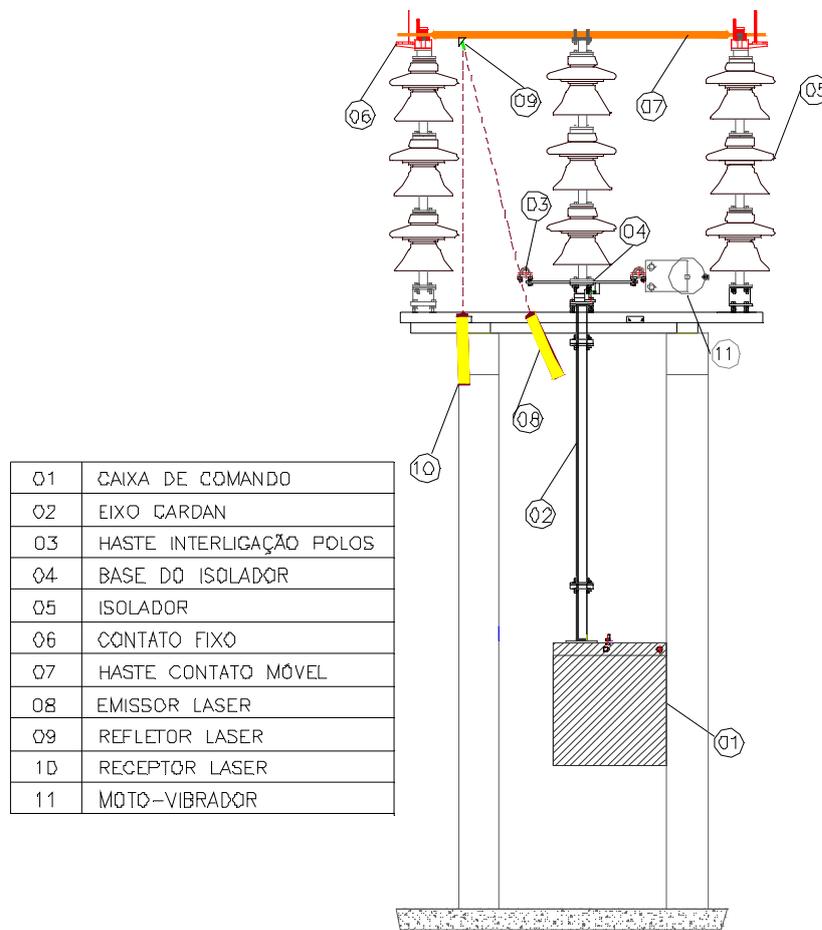
As F, 19 e 20, apresentam os elementos adicionais inseridos no projeto original de um seccionador, conforme descrito acima.

Figura 18 – Vista frontal do protótipo



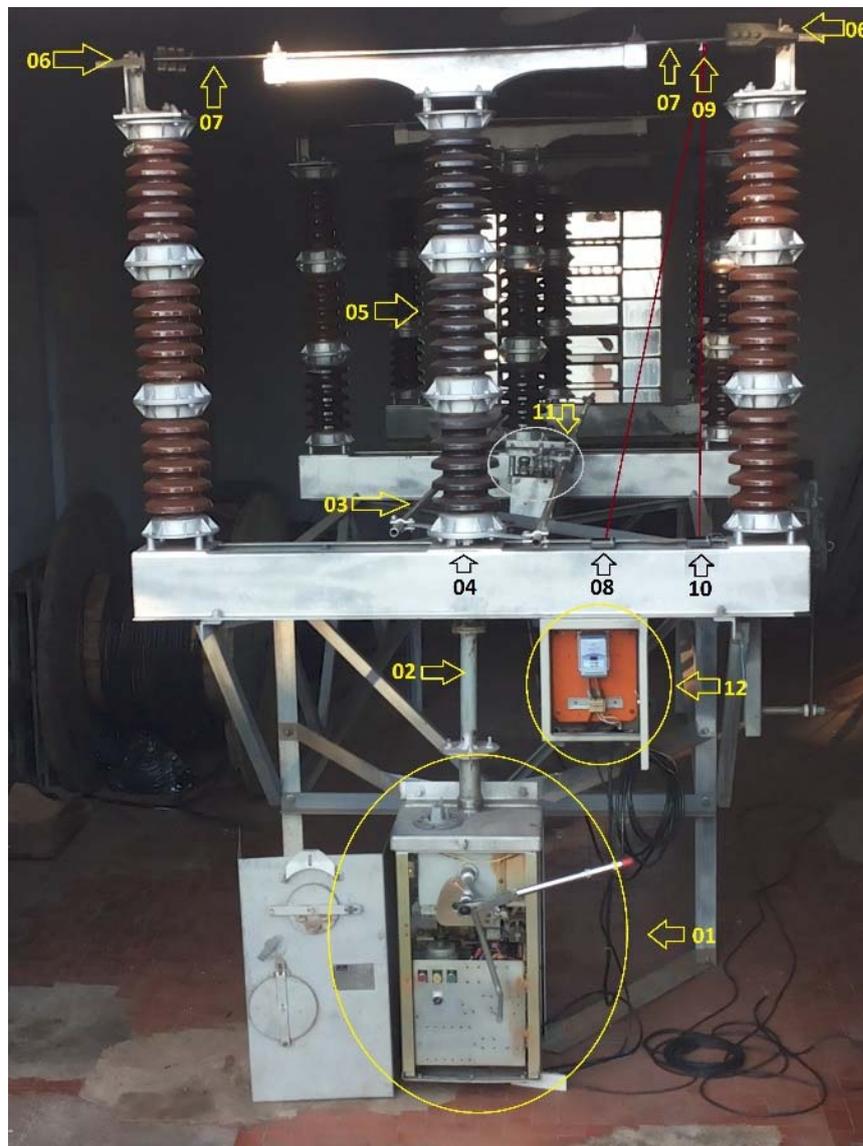
Fonte: Protótipo montado na CEEE GT Passo Fundo.

Figura 19 – Vista lateral do protótipo.



Fonte: Protótipo montado na CEEE GT Passo Fundo.

Figura 20 – Foto lateral do protótipo.



Fonte: Protótipo montado na CEEE GT Passo Fundo.

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** a seta indicativa com o número 12 é o inversor de frequência, que alimenta o motovibrador.

Para atestar a validação dessa proposta, foram realizados alguns ensaios e medições no intuito de avaliar as forças e torques exigidos durante a manobra do seccionador. Os ensaios e resultados serão apresentados e discutidos no capítulo seguinte.

## 4 TESTES E AVALIAÇÃO EXPERIMENTAIS NO PROTÓTIPO

### 4.1 Materiais e Métodos

Os testes que devem ser submetidos um seccionador, são realizados seguindo as orientações estabelecidas na norma ABNT NBR IEC 62271-102. A partir de 2006, a NBR traduziu literalmente a norma IEC, dando uma visão ampla do seccionador, entretanto sem apontar os problemas mecânicos característicos do mesmo. A última revisão IEC, publicada no ano de 2012, continua sem exigir condições adequadas para o funcionamento ótimo do seccionador do ponto de vista mecânico.

O principal problema identificado consiste no fato de que, antes dos ensaios de manobras, que podem ser de 1000 a 10.000 ciclos de abertura e fechamento, a norma autoriza aos fabricantes lubrificar os contatos quando realizados os ensaios, bem como no meio do ensaio. Entretanto os seccionadores geralmente instalados em subestações desabrigadas podem ficar períodos longos sem manobra, ocasionando a perda da lubrificação e até o engripamento dos mecanismos móveis.

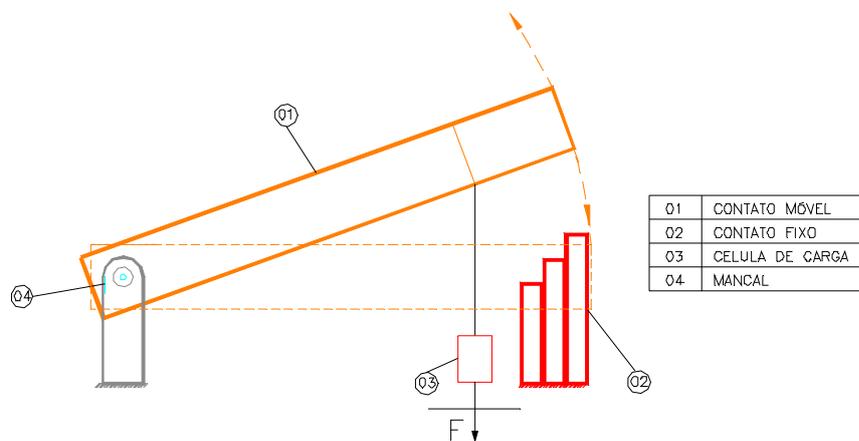
Desse modo, um dos problemas característicos do processo de manobra de um seccionador consiste sobretudo no atrito entre os contatos principais. Na literatura, são encontradas algumas referências relativas ao atrito seco, cujos valores variam entre 0.8 a 1 e para com o uso de lubrificantes esses valores encontram-se na faixa de 0.08 a 0.8. Nesse último caso, a faixa de variação é muito extensa, tornando difícil a utilização desses dados para o propósito aqui estabelecido.

Diante desse fato, entendeu-se que os valores de tabela não seriam interessantes, e também não seria proveitoso realizar o ensaio para encontrar o coeficiente de atrito dos matérias do contato de potência, uma vez que esse poderia representar uma condição ideal o que é muito distante da realidade a qual os contatos são submetidos em um seccionador.

## 4.2 Ensaio Preliminar

Em virtude do exposto acima, com o objetivo de quantificar a força necessária para o processo de manobra do seccionador, foi realizado um ensaio preliminar no Laboratório de Ensaaios Mecânicos da UPF sobre o sistema ilustrado na F que apresenta o esquema utilizado para medir a força de fechamento, para medir a força de abertura a célula de carga foi instalada no lado oposto ao sentido exposto na figura.

Figura 21 – Esquema do ensaio para medir a força de fechamento



Fonte: Protótipo montado na CEEE GT Passo Fundo.

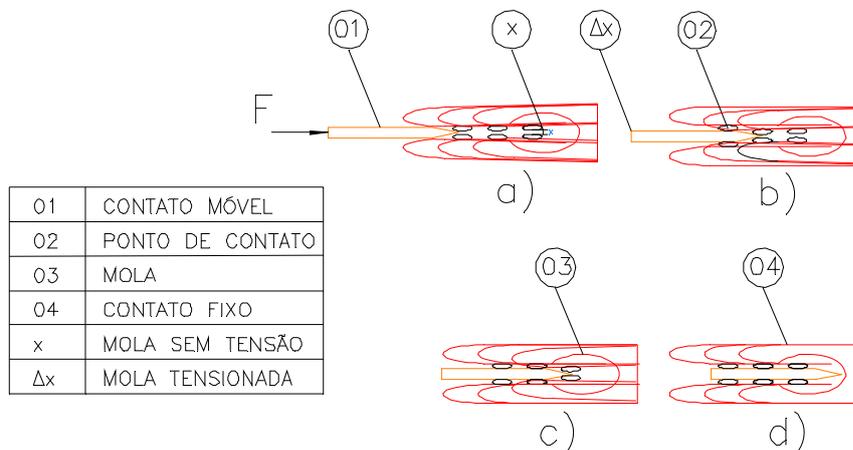
O sistema ensaiado é constituído por um contato móvel (01) e um fixo (02) para simular o processo de manobra do seccionador. Para medir os esforços aplicados manualmente, instalou-se uma célula de carga, cujos resultados foram registrados através de um sistema de aquisição de dados. A célula de carga, modelo U9B, com capacidade de 20KN, o sistema de aquisição utilizado é *DAQ Data Acquisition Systems and Measuring Amplifiers*, com uma taxa de amostragem de 20ms ambos do fabricante HBM.

Os ensaios consistem em tracionar manualmente o contato móvel até o fim de curso mecânico do contato fixo. Foram realizadas várias manobras de fechamento e abertura, focando inicialmente no processo de fechamento, uma vez que este é considerado o ponto crucial para o bom funcionamento do seccionador. A

F mostra a ação de fechamento considerando quatro momentos, identificados pelas letras a, b, c e d, onde:

- a)* mostra o sentido da força aplicada ao contato móvel **01** e o início da conexão na qual os três pontos de contato fixo estão afastados,  $x$  representando a mola na posição de repouso;
- b)* indica o primeiro contato fixo sendo afastado pela espessura do contato móvel representada por  $\Delta x$ , o número **02** indica primeiro ponto de contato que faz parte do contato fixo;
- c)* o número **03** demonstra a mola chata, responsável pela pressão da conexão e consequentemente, pode ser considerada a força normal do atrito;
- d)* mostra o contato móvel atingindo o fim de curso mecânico e, com isso, a correta conexão.

Figura 22 – Desenho da inserção do contato móvel.



Fonte: Protótipo montado na CEEE GT Passo Fundo.

A F mostram fotos com detalhes do sistema em teste. Na figura (b) observa-se o caminho impresso pelos contatos fixos figura (a) no contato móvel durante o processo de conexão.

Figura 23 – Modelo dos contatos do protótipo (Laboratório ensaios mecânicos UPF)



Fonte: Protótipo montado na CEEE GT Passo Fundo.

#### 4.2.1 Resultados obtidos

Foram realizadas 10 manobras de abertura e fechamento, simulando as ações em um seccionador. Considerando o processo de fechamento de maior interesse nesse trabalho, conforme já exposto, os registros relativos à ação de abertura não foram considerados em sua totalidade. Os resultados dos ensaios realizados estão resumidos na Tabela 2

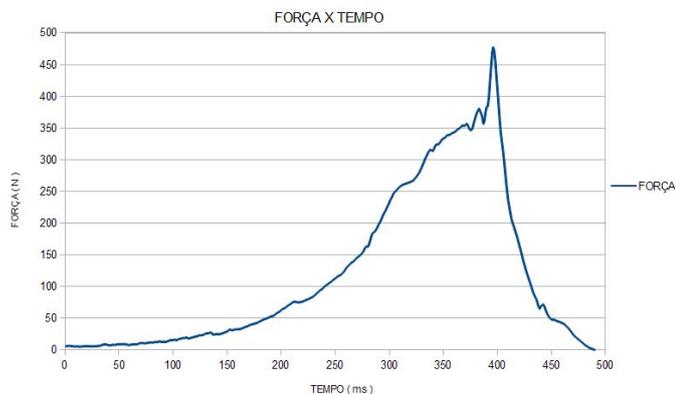
Tabela 2 – Ensaio força para fechamento e abertura do protótipo do contato principal.

| Número do ensaio | Força máxima fechar (N) | Força máxima abrir (N) |
|------------------|-------------------------|------------------------|
| 1                | 474,67                  | 298,50                 |
| 2                | 523,60                  | 322,97                 |
| 3                | 518,71                  | 293,61                 |
| 4                | 472,22                  | 283,82                 |
| 5                | 489,35                  | 299,72                 |
| 6                | 433,07                  | –                      |
| 7                | 418,39                  | –                      |
| 8                | 469,77                  | –                      |
| 9                | 511,37                  | –                      |
| 10               | 462,43                  | –                      |

Fonte: Protótipo montado na CEEE GT Passo Fundo.

O gráfico da F é obtido pela média dos valores registrados em cada um dos ensaios, tendo como referência comum o ponto máximo (força máxima) que consiste na efetiva ação de fechamento dos contatos, os valores foram obtidos com uma taxa de amostragem de 20 ms.

Figura 24 – Força solicitada no fechamento (Laboratório de Ensaios Mecânicos UPF)

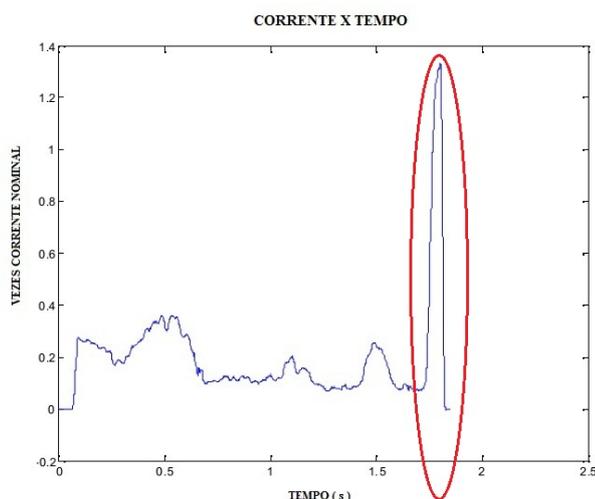


Fonte: Protótipo montado na CEEE GT Passo Fundo.

É possível fazer uma correlação com os resultados apresentado por Carrasco (2005), através da Eq (17), onde relaciona a energia consumida de formas diferentes, sendo o produto tensão vezes corrente vezes tempo e no outro força vezes tempo.

$$W = F \cdot t = V \cdot I \cdot t = [J] \quad (17)$$

Figura 25 – Torque motor no fechamento do seccionador CARRASCO (2005)



Fonte: (CARRASCO, 2005).

O gráfico da F mostra a variação da força do início ao fim da conexão apenas, enquanto que o gráfico da F mostra a variação da corrente durante todo o percurso de fechamento do seccionador. Analisando somente o tempo em que inicia e termina o pico de corrente do gráfico da F com o tempo expresso em milissegundos onde inicia e termina o pico de força da F, pode-se constatar que o aumento da força mostra um comportamento similar ao da corrente em praticamente o mesmo intervalo de tempo.

### 4.3 Ensaios no protótipo

Os ensaios preliminares apresentados na seção anterior permitiram avaliar o comportamento das forças atuantes entre os contatos dando uma ideia da magnitude do atrito envolvido no processo de manobra do sistema simulando uma conexão de um seccionador.

Para avaliar a eficiência das alterações propostas no projeto de seccionadores, conforme F, foram realizados vários ensaios sob diferentes condições operacionais. O objetivo dos ensaios foi para determinar a força necessária para executar a manobra, sobretudo de fechamento dos contatos principais (contatos de potência). Esses ensaios foram necessários em virtude da não disponibilidade de registros das forças atuantes no mecanismo de fechamento/abertura em literaturas e ou trabalhos de acesso público.

A norma orienta apenas a força máxima que uma pessoa precisa fazer em um seccionador que necessitem de mais de uma volta da manivela de acionamento para manobrá-

lo manualmente. Esse valor é de 60 N, admitindo picos de 120 N por no máximo 10% do número de voltas, ABNT NBR IEC 62271-102 (2006, p. 18).

Entretanto, essa força não garante o fechamento dos contatos em condições normais de campo e não se tem referência a que forças os contatos estão sendo submetidos.

Geralmente, essa força é aplicada por intermédio de caixa de redução (no caso do protótipo, 50:1), fazendo com que o operador perca a referência da força aplicada ao equipamento.

#### **4.3.1 Características do protótipo**

As especificações do seccionador (protótipo) são apresentadas nas Tabela 3 e

Tabela 4.

Tabela 3 – Dados de placa do seccionador ensaiado

| <b>SECCIONADOR</b>                 |                    |
|------------------------------------|--------------------|
| Fabricante estrutura               | Galileu            |
| Fabricante contatos fixos e móveis | Alcace             |
| Tipos                              | Dupla abertura     |
| Tensão nominal                     | 145kV              |
| Corrente nominal                   | 600A               |
| Material dos contatos              | Cobre eletrolítico |
| Distância entre fases              | 3m                 |
| Distância fonte carga              | 1,85m              |
| Altura um isolador                 | 0,42m              |
| Altura contatos base               | 1,45m              |
| Diâmetro um isolador               | 24,5cm             |
| Massa um isolador                  | 22,5kgf            |
| Massa polos                        | 607,5kgf           |
| Massa total do seccionador         | 1800kgf            |

Fonte: Protótipo montado na CEEE GT Passo Fundo.

Tabela 4 –Dados caixa de comando Alcace

| <b>CAIXA DE COMANDO</b>        |          |
|--------------------------------|----------|
| Tensão serviço auxiliar        | 127Vca   |
| Frequência operação            | 60Hz     |
| Corrente nominal motor         | 10Acc    |
| Tensão nominal motor           | 125Vcc   |
| Potência motor                 | 0,5cv    |
| Rotação motor vazio            | 3100 rpm |
| Rotação motor carga            | 950 rpm  |
| Relação caixa redução elétrica | 760:1    |
| Relação caixa redução manual   | 50:1     |

Fonte: Protótipo montado na CEEE GT Passo Fundo.

#### 4.4 Ensaio para determinação da força de conexão

O contato fixo do seccionador ensaiado é formado por um conjunto de três lâminas de cobre, no formato de “M”, no qual o vértice central é formado por um canal onde o contato móvel é inserido. Cada lâmina é comprimida por duas molas chatas em paralelo, conforme mostrado anteriormente na F.

A força da mola é direcionada para manter a pressão entre as lâminas de cobre do contato móvel frente ao fixo. Quando o contato móvel não está inserido entre as lâminas de contato, as molas ficam na posição de repouso. A pressão necessária para realizar o contato gera uma dificuldade no acoplamento entre as superfícies dos contatos. O seccionador DA em estudo tem seis contatos fixos, cada um deles formado por três lâminas.

Foi medida a força em cada uma das lâminas do contato, com o auxílio de um dinamômetro, como ilustra a F. Essa força é suficiente para afastar os contatos fixos e inserir uma lâmina com 2mm, que é a metade da espessura do contato móvel,. Esses valores estão expressos na Tabela 5, sendo as fases do seccionador representadas pelas letras *A*, *B* e *C*.

Figura 26 – Dinamômetro medido força da mola



Fonte: Protótipo montado na CEEE GT Passo Fundo.

Tabela 5 – Valores de força medida em cada contato.

| FASE / LADO | CONTATO 01 [kgf] | CONTATO 02 [kgf] | CONTATO 03 [kgf] |
|-------------|------------------|------------------|------------------|
| A / FONTE   | 7,68             | 7,29             | 7,87             |
| A / CARGA   | 7,78             | 7,37             | 7,68             |
| B / FONTE   | 7,12             | 7,26             | 8,05             |
| B / CARGA   | 7,37             | 7,46             | 7,63             |
| C / FONTE   | 8,35             | 8,59             | 7,96             |
| C / CARGA   | 7,66             | 7,23             | 7,48             |

Fonte: Protótipo montado na CEEE GT Passo Fundo.

A média dos valores de força para afastar os contatos e inserir o gabarito de 2mm foi de 7,66 [kgf]=75,11[N]. Com o valor do deslocamento, que é a espessura do contato móvel e a força, é possível estimar a constante  $k$  da mola com a seguinte equação:

$$F = k \cdot x \quad (18)$$

$$k = \frac{75,11}{0,002} = 37555 \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}} \right] \quad (19)$$

Porem a medida realizada dessa forma, não é adequada, devido aos demais componentes que estão envolvidos juntamente com a força exercida pela mola, como por exemplo o contato de cobre que não possui as mesmas características mecânicas, do aço mola.

#### 4.5 Moto vibrador

Com a implementação do moto vibrador, foi possível obter o alívio da força para manobra de fechamento, a energia adicional inserida pelo motovibrador, foi variado a frequência de alimentação do motor de indução que alimenta o vibrador, para verificar em qual valor a vibração inserida ocorria o alívio na referida força. A

Quando a frequência atingiu 87Hz, ocorreu o alívio significativo da força necessária para manobra de fechamento, com esse valor a rotação de motor é de 2610 RPM equivalente a  $\omega = 273[\frac{rad}{s}]$ , com esse valor é possível calcular por meio da Eq. (4), a força adicional que é inserida no movimento.

Massa desbalanceada,  $m_1 + m_2 = 0,18[\text{kgf}]$ , raio do ponto de desequilíbrio  $e = 0,05[m]$ ,

Velocidade angular de  $273 \frac{rad}{s}$  na haste de movimentação dos polos móveis, é acrescentado a haste de fechamento

$$F = 0,18 \cdot 0,05 \cdot (273)^2 \cdot 1 = 670[\text{N}]$$

#### 4.6 Ensaio diferença pela diferença do torque

Diante das dificuldades de se medir as forças exercidas sobre os contatos, foi empregado um método indireto, através de um torquímetro acoplado à tomada manual da caixa de redução do movimentador dos contatos móveis, conforme mostrada na F, as características do torquímetro estão na Tabela 6.

Tabela 6 – Dados do torquímetro

| Descrição | Valor        |
|-----------|--------------|
| Marca     | Britool      |
| Tipo      | Estalo       |
| Escala    | 25 a 135 N.m |
| Precisão  | 5 N.m        |

Fonte: Protótipo montado na CEEE GT Passo Fundo

Figura 27 – Torquímetro acoplado a caixa de redução acionamento manual



Fonte: Protótipo montado na CEEE GT Passo Fundo.

O torque aplicado ao sistema foi ajustado lentamente até conexão total dos contatos do seccionador e seu valor registrado.

Com o auxílio do torquímetro foi possível verificar na caixa de redução a força manual, necessária para realizar o fechamento, este valor é de  $T_{total} = 120 \text{ N.m}$ .

Foi necessário medir o torque para movimentar em vazio. Essa medida leva em consideração apenas a força necessária para movimentar os contatos móveis, somados com as perdas por atrito e de todas as conexões móveis juntamente com as perdas. Nas engrenagens da caixa de redução, obtendo  $T_{vazio} = 10 \text{ N.m}$

Com esses valores, pode-se chegar ao torque necessário para fazer o fechamento do seccionador, sabendo que o torque total é a soma do torque a vazio mais o torque para vencer a força de atrito.

$$T_{total} = T_{vazio} + T_{F_{atrito}} \quad (20)$$

Assim, tem-se  $T_{F_{atrito}} = 110 \text{ N.m}$ , considerando que a relação da caixa de redução na tomada para fechamento manual é de 50:1, chega-se à força de atrito multiplicando o torque da força de atrito pela relação da caixa de redução e dividindo o resultado pelo centro de giro até o centro de atrito do contato fixo.

$$T_{F_{atrito}} \cdot 50:1 = F_{atrito} \cdot l_{contato\ movel} \text{ [N.m]} \quad (21)$$

Assim

$$110 \cdot 50:1 = F_{atrito} \cdot 0,925 = 5945,9 \text{ [N]}$$

$$F_{atrito} = 5945,9 \text{ [N]}$$

Com a força adicional do motovibrador, observa-se que o torque total de fechamento reduz para 60 [N.m]. Considerando que o atrito e as perdas das articulações continuam atuando, tem-se a força em 50 [N.m].

Assim, a força necessária em fechamento, pode ser obtida através das expressões

$$T_{F_{aritro}} \cdot 50:1 = F_{vibração} \cdot l_{contato\ móvel}$$

$$50 \cdot 50:1 = F_{vibração} \cdot 0,925 = 2702,7 \text{ [N]}$$

Tem-se que fazer a diferença para encontrar a redução dessa força foi devido a redução do coeficiente de atrito

$$F_{atrito} - F_{vibração} = F_{aliviada}$$

$$5945,9 - 2702,7 = 3243,2 \cdot 0,8 = 3378,3 \text{ [N]}$$

$$F_{aliviada} = 3378,3 \text{ [N]}$$

O amortecimento que ocorre em contatos elétricos deslizantes pode ser considerado amortecimento a seco ou de Coulomb. Matematicamente, a força de atrito seco é representada pela equação seguinte:

$$F = \mu \cdot N \quad (22)$$

Sendo  $F$  a força necessária para iniciar o movimento,  $\mu$  o coeficiente de atrito estático entre as superfícies em contato e  $N$  é a força normal entre as superfícies. A resposta dos

contatos móveis do seccionador à excitação do motovibrador direcional controlado eletronicamente reduz a força normal  $N$ .

O coeficiente de atrito estático do *cobre x cobre* é uma incógnita dinâmica. As tabelas encontradas apresentam valores de **0,55** da ASM(1992), e **1** da Sulcromo ( 2009).

A pressão que a mola exerce sobre os contatos pode ser considerada a força normal, do coeficiente de atrito de Coulomb. Considerando ser 0,8 o coeficiente de atrito do cobre, o que é um valor médio adotado, na Eq. (22), considerando a  $F_{alívio}$  igual a 3243,2 N e  $\mu_{cobre}$  0,8, assim:

$$K= 4054,1[N/m]$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{4054,1}{0,18}} = 150[\text{rads/s}]$$

Isso é a frequência angular de ressonância do sistema, precisamos transformar para rotação do motor e após frequência aplicada ao motor pelo inversor de frequência temos:  $\omega_n = \text{RPM} \cdot \frac{2\pi}{60}$  o que resulta em 1432,4 [RPM].

É preciso encontrar a frequência que irá alimentar o motor de indução, para isso, tem-se que  $\text{RPM} = \frac{f \cdot 60}{n_{\text{numero polos}}}$  isso resulta na frequência de 47,74 [Hz], porem nessa frequência embora é observado um aumento na vibração do seccionador, não ocorre o alívio da força.

#### 4.7 Ensaio com medidor de vibrações

Foi realizado medidas com o instrumento medidor de vibração, fabricado pela TEKNIKAO, modelo NK300, em alguns pontos do seccionador como eixo cardan, base móvel do isolador, haste de interligação, contato móvel e contato fixo. Foi variado a frequência de alimentação do moto vibrador e os valores de máxima vibração encontrados, nesses pontos, não representavam o valor onde ocorre o alívio significativo da força de fechamento.

#### 4.8 Ensaio experimental pela resistência de contato

Das formas de verificar a frequência que possibilita o alívio do atrito nas conexões, de modo geral necessitam do conhecimentos e dimensão de todas as variáveis envolvidas na conexão e equipamentos específicos, não estavam disponíveis.

A forma encontrada está baseada na Eq. (1) e (2) onde a variável força de compressão está diretamente ligada ao valor da resistência elétrica da conexão de dois materiais

Sendo assim foi realizado o ensaio medindo a resistência da conexão em repouso e gradualmente foi aumentado a rotação do moto vibrador, por meio do inversor de frequência o qual possibilita variar a rotação de aplicando a vibração por meio de um moto vibrador, os valores deste ensaio estão apresentados na Tabela 7

Tabela 7 – Variação da resistência do contato submetido a vibração

| Hz | $\mu\Omega$ | Hz | $\mu\Omega$ | Hz | $\mu\Omega$ | Hz | $\mu\Omega$ | Hz  | $\mu\Omega$ | Hz  | $\mu\Omega$ | Hz  | $\mu\Omega$ |
|----|-------------|----|-------------|----|-------------|----|-------------|-----|-------------|-----|-------------|-----|-------------|
| 3  | 94,6        | 23 | 94,8        | 43 | 94,7        | 63 | 98,3        | 83  | 98          | 103 | 101,6       | 123 | 102,9       |
| 4  | 94,6        | 24 | 94,7        | 44 | 95,6        | 64 | 98,1        | 84  | 98,1        | 104 | 101,3       | 124 | 103,1       |
| 5  | 94,6        | 25 | 94,6        | 45 | 95,4        | 65 | 97,4        | 85  | 105,4       | 105 | 101,9       | 125 | 102,9       |
| 6  | 94,6        | 26 | 94,7        | 46 | 95,7        | 66 | 97,6        | 86  | 106,4       | 106 | 101,2       | 126 | 102,6       |
| 7  | 94,6        | 27 | 94,4        | 47 | 95,6        | 67 | 97,3        | 87  | 112,7       | 107 | 101,5       | 127 | 102,7       |
| 8  | 94,6        | 28 | 94,7        | 48 | 95,7        | 68 | 99,4        | 88  | 111,2       | 108 | 101,5       | 128 | 103,3       |
| 9  | 94,6        | 29 | 94,6        | 49 | 95,3        | 69 | 96,6        | 89  | 99          | 109 | 101,4       | 129 | 104,5       |
| 10 | 94,6        | 30 | 95,4        | 50 | 95,1        | 70 | 96          | 90  | 97,2        | 110 | 102,4       | 130 | 103,9       |
| 11 | 94,6        | 31 | 95,1        | 51 | 94,8        | 71 | 95,9        | 91  | 97,7        | 111 | 101,7       | 131 | 106,5       |
| 12 | 94,6        | 32 | 94,8        | 52 | 94,6        | 72 | 96,2        | 92  | 97,2        | 112 | 104,6       | 132 | 108,7       |
| 13 | 94,6        | 33 | 95,7        | 53 | 95,6        | 73 | 96,6        | 93  | 101,3       | 113 | 101,3       | 133 | 102,3       |
| 14 | 94,6        | 34 | 94,5        | 54 | 95,2        | 74 | 96,7        | 94  | 98          | 114 | 101,1       | 134 | 103,2       |
| 15 | 94,6        | 35 | 95,1        | 55 | 95,7        | 75 | 96,7        | 95  | 95,6        | 115 | 101,1       | 135 | 101,3       |
| 16 | 94,6        | 36 | 94,7        | 56 | 96,1        | 76 | 95,4        | 96  | 98          | 116 | 100,9       | 136 | 102,9       |
| 17 | 94,6        | 37 | 95,7        | 57 | 95,4        | 77 | 95,3        | 97  | 100,4       | 117 | 103,1       | 137 | 105,2       |
| 18 | 94,6        | 38 | 95,8        | 58 | 95,7        | 78 | 95,3        | 98  | 100         | 118 | 104,8       | 138 | 108,7       |
| 19 | 94,6        | 39 | 95,9        | 59 | 96,1        | 79 | 95,1        | 99  | 107         | 119 | 104,2       | 139 | 110,9       |
| 20 | 94,9        | 40 | 95,4        | 60 | 95,7        | 80 | 95,4        | 100 | 101,3       | 120 | 102,8       | 140 | 114,3       |
| 21 | 94,6        | 41 | 95,1        | 61 | 95,9        | 81 | 96,2        | 101 | 101,8       | 121 | 102,6       |     |             |
| 22 | 94,7        | 42 | 94,7        | 62 | 96,1        | 82 | 97,2        | 102 | 100,9       | 122 | 102,9       |     |             |

Fonte: Protótipo montado na CEEE GT Passo Fundo.

Quando a frequência é ajustada em 87 [Hz], que equivale à rotação de 2610 [RPM], o equipamento começa a vibrar com maior intensidade, proporcionando a redução na força para realizar a manobra e garantir conexão desejada.

#### **4.9 Ensaios para validação da proposta**

Os ensaios realizados no item anterior foram necessários para determinação da frequência que proporciona o alívio da força de atrito sobre a conexão. A partir do conhecimento dessa variável outros ensaios foram realizados com o objetivo de validar a proposta desse trabalho. Sendo assim, quatro novos ensaios foram realizados nas seguintes condições:

- 1) sem lubrificar e sem vibrar – condição de funcionamento normal em campo;
- 2) lubrificado e sem vibrar – condição de fábrica;
- 3) sem lubrificar e vibrando – condição proposta;
- 4) lubrificado e vibrando – nova condição de análise.

Os procedimentos para cada um dos ensaios visando avaliar a influência do atrito entre os contatos nas manobras de seccionador foram:

- lubrificação de todos os mecanismos móveis do seccionador;
- ajustados os mecanismos para o correto fechamento dos contatos;
- realização de 20 manobras de abertura e fechamento, verificando a correta conexão dos contatos.

##### **4.9.1 Ensaio 1: contatos lubrificados**

Nesse ensaio, os contatos principais do seccionador foram limpos, secos e então aplicado uma camada de óleo. Foram realizados vários ciclos de abertura e fechamento, registrando o valor dos torques, cujos valores médios encontram-se na Tabela 8

Tabela 8 – Força de atrito com lubrificação dos contatos

| DESCRIÇÃO             | VALOR | UNIDADE |
|-----------------------|-------|---------|
| Força para abertura   | 85    | [N.m]   |
| Força para fechamento | 110   | [N.m]   |

Fonte: Protótipo montado na CEEE GT Passo Fundo.

#### 4.9.2 Ensaio 2: contatos sem lubrificante

Para realizar o ensaio com os contatos secos, isto é, sem lubrificante, foi usado benzina para remoção. Também foram executadas vinte manobras, até o valor do torque se estabilizar, cujos valores médios estão na Tabela 9.

Tabela 9 – Força de atrito sem lubrificação dos contatos

| DESCRIÇÃO             | VALOR | UNIDADE |
|-----------------------|-------|---------|
| Força para abertura   | 100   | [N.m]   |
| Força para fechamento | 120   | [N.m]   |

Fonte: Protótipo montado na CEEE GT Passo Fundo.

#### 4.9.3 Ensaio 3: contatos sem lubrificante submetido a vibração

Neste ensaio, os contatos estão a seco e submetidos a uma vibração através do motovibrador direcional ajustado na frequência de ressonância da conexão. Foram executadas vinte manobras, e seus valores médios registrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Força de atrito com lubrificação dos contatos

| DESCRIÇÃO             | VALOR | UNIDADE |
|-----------------------|-------|---------|
| Força para abertura   | 50    | [N.m]   |
| Força para fechamento | 60    | [N.m]   |

Fonte: Protótipo montado na CEEE GT Passo Fundo.

#### 4.9.4 Ensaio 4: contatos lubrificados e submetido a vibração

Essa condição é apenas informativa pois, na prática, irá acontecer apenas quando houver manutenção no seccionador, os valores estão na Tabela 11.

Tabela 11 – Força de atrito com lubrificação dos contatos

| DESCRIÇÃO             | VALOR | UNIDADE |
|-----------------------|-------|---------|
| Força para abertura   | 40    | [N.m]   |
| Força para fechamento | 50    | [N.m]   |

Fonte: Protótipo montado na CEEE GT Passo Fundo.

#### 4.9.5 Ensaio para medir resistência elétrica

É desejável que em uma conexão a resistência elétrica seja o menor possível, sendo assim um dos principais objetivos deste trabalho foi o desenvolvimento de um sistema para auxiliar no correto fechamento dos contatos principais o que favorece para a obtenção de valores de resistência conforme projeto. A avaliação desse sistema, foi possível e optou-se por medir a resistência elétrica dos contatos, para verificar se há redução com o sistema proposto.

Isso foi realizado injetando uma corrente de 200(A) DC, medindo a queda de tensão sobre os contatos, conforme ilustra a F, onde as setas 1 e 2 são os pontos onde está sendo medido a resistência, a seta 3 indica o contato fixo e a seta 4 o contato móvel.

Foram realizados vinte ensaios para medir cada situação, os resultados estão listados na Tabela 12, onde cada linha apresenta a média dos valores de cada ensaio.

Tabela 12 – Resistência elétrica em três condições

| CONDIÇÃO | DESCRIÇÃO                                  | VALOR | UNIDADE         |
|----------|--|-------|-----------------|
| 1        | Fechado sem vibração                       | 96    | [ $\mu\Omega$ ] |
| 2        | Fechado e mantida a vibração               | 103   | [ $\mu\Omega$ ] |
| 3        | Fechado com vibração e retirado a vibração | 90    | [ $\mu\Omega$ ] |

Fonte: Protótipo montado na CEEE GT Passo Fundo.

Além de minimizar a ação do atrito foi possível verificar a redução da resistência, esses valores embora pequenos, comprovam os benefícios da implementação do sistema proposto.

Figura 28 – Ensaio resistencia ôhmica dos contatos principais



Fonte: Protótipo montado na CEEE GT Passo Fundo.

## 5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

A proposta desse trabalho consiste em apresentar um sistema que permite comandar uma seccionadora de forma remota, uma vez que hoje, mesmo operada a distância, há ainda a necessidade de supervisão local que, geralmente é feita de modo manual visando garantir o correto fechamento dos contatos. Conforme discutido e apresentado neste, as alterações no projeto original do seccionador consistem em adicionar um motovibrador direcional com a intenção de minimizar o atrito entre os contatos bem como reduzir as tensões residuais dos mecanismos. Além disso, foi instalado um sistema a laser para informar a condição de fechamento efetiva para o centro de operação.

A justificativa de se usar um laser nessa aplicação está no fato de ser uma medida de segurança, uma vez que o equipamento trabalha com valores elevados de tensão, superiores a 69kV.

Em virtude das poucas referências bibliográficas ligadas ao tema, principalmente sobre os esforços necessários no processo de manobra (abertura e fechamento dos contatos de uma seccionadora) em condições normais de operação, foram realizados os ensaios preliminares com o intuito de direcionar as ações aqui investigadas.

Os 4 ensaios realizados sobre o protótipo permitiu avaliar a influência do atrito na manobra do equipamento (foco no processo de fechamento). Como pode ser visto nos resultados há uma visível redução do torque solicitado no processo quando submetido a vibração direcional na frequência de 87Hz, comprovando assim a eficiência da proposta aqui apresentada. A Tabela 11 relativa ao ensaio com os contatos lubrificados e submetidos a vibração apresenta um resultado ainda melhor, entretanto, essa não é uma condição de operação normal do equipamento que fica sujeito a todas ações climáticas.

O resultado dos ensaios da verificação do comportamento da resistência elétrica dos contatos nas condições expressas na Tabela 12, observa-se a sensível redução de seu valor após ser submetido a ação de vibração, indicando um contato ainda mais efetivo.

Outro ponto importante a salientar é que um projeto inteiramente novo de um seccionador poderia resultar na sua inviabilidade econômica e dificuldades de implantação, uma vez que envolve a aprovação pelo sistema elétrico brasileiro, já a implantação do sistema proposto custa aproximadamente 10%, do custo de um seccionador novo.

As medidas obtidas através do torquímetro verificou-se uma grande diferença da força necessária para manobra de fechamento/abertura, com e sem o auxílio da vibração.

Comprovou-se que a vibração minimiza a ação do atrito existente entre contato móvel e fixo fazendo que o contato móvel atinja o fim de curso mecânico sem dificuldade. Dessa forma o contato irá permanecer com baixa resistência elétrica para o fluxo de corrente e como consequência a conexão não irá trabalhar em temperaturas a cima do recomendado pela norma IEC/TR 60943 (2009).

Os resultados alcançados atendem aos objetivos esperados e a proposta deste trabalho deu origem ao depósito da patente (Brasil Patente Nº BR 10 2013 020198 7, 2013) ANEXO e à produção de um artigo que foi apresentado no COBEF, em 2013, sob o título de “Estudo do comportamento da superfície de contato elétrico submetidos a diferenças de potencial elevado” ANEXO B .

## **5.1 Perspectivas futuras**

Os ensaios realizados para a validação da proposta aqui apresenta foram realizados usando um modelo de seccionador do tipo DA (dupla abertura), que é a maioria dos instalados em subestações dentro do sistema elétrico. A decorrência natural desse trabalho é avaliar seccionadores com outros tipos de manobras (diferentes do tipo DA). Outra questão a ser avaliada é a aplicação dessa proposição em seccionadores também do tipo DA com contatos autolimpantes, conforme patente US2810799A (1956). Além disso, sugere-se um estudo mais detalhado sobre o processo e vibração implementado, visando determinar com maior precisão a frequência e sua intensidade necessária para o êxito da conexão e sua possível influência em toda estrutura (mecânica e elétrica) do seccionador. Isto é, avaliar se a vibração gerada para facilitar a conexão não irá prejudicar os demais elementos acessórios do seccionador.

## 6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6882**: 1998 - Isolador suporte pedestal de porcelana Unidades e colunas Padronização de dimensões e características. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR 6935**: 1985 - Seccionadores chave de terra e aterramento rápido. São Paulo, 1985.

\_\_\_\_\_. **NBR 7304**: 2010. Condutores Elétricos de Alumínio Corona em Cabos de Alumínio. São Paulo, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 7571**: 2011. Seccionadores – Características técnicas e dimensionais (2ª ed.). São Paulo, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR IEC 62271-102**: 2006. Equipamentos de alta-tensão Parte 102: Seccionadores e chaves de aterramento. São Paulo, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR IEC 62271-200**: 2007. Conjunto de manobra e controle de alta-tensão Parte 200: Conjunto de manobra e controle de alta-tensão em invólucro metálico para tensões acima de 1 kV até e inclusive 52 kV. São Paulo, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR ISO 4287**: 2002. Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS GRANDES EMPRESAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ABRATE. **Relatório técnico GTM/SGME nº 004200**. 2012. Disponível em: <<http://www.abrate.org.br>>. Acesso em 01 mar. 2012.

ALMEIDA, R. G. **Estudo da relação entre viscosidade do lubrificante e vibração em uma caixa de engrenagens**. São Paulo: Universidade de São Paulo Escola Politécnica departamento de engenharia mecânica, 2006.

AMERICAN SOCIETY MATER. **Friction lubrication and Wear Technology**. ASM: Handboock, 1992.

AMERICAN SOCIETY MATER. **Metallography and Microstructures**. ASM: Handbook, 1992. v.9.

ARTECHE. **Manual de instruções AV-400**. Propriedade CEEE GT, 2011.

ASHBY, M. F. ; JONES, D. R. (1996). **Engineering materials introduction to their properties and applications**. 2. ed. New York: Butterworth-Heinemann, 1996. v. 1.

ASHBY, M. F. ; JONES, D. R. (1998). **Engineering materials an introduction to microstructures processing and design**. 2. ed. New York: Butterworth-Heinemann, 1998. v.2.

BRASIL.GOV.BR. **Organização do setor energético**. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/sobre/economia/energia/organizacao-do-setor-energetico>>. Acesso em: 01 fev. 2013.

BURDESHEW, T. A. ; D.CARMICHAEL, R. Patente U.S. n. **2810799 A**. 1956.

BURDSHAW, T. A. C. R. Patente. U. S. n. **PI 2810799**. 1956.

CARVALHO, A. C. **Reliability of high voltage equipment, resultados do questionário de falhas em equipamentos de AT, CIGRE WG A3.06: HV Equipment Reliability**. 2012. Disponível em: <<http://a3.cigre.org/Technical-activities/Presentation-of-Activities>>. Acesso em 01 fev. 2013.

CALLISTER, W. D. **Materials Science and Engineering**. 7. ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.

CAMARGO, M. N. **Mecânica vibratória**. Santa Maria: Universidade de Santa Maria, 2012.

CARRASCO, A. C. **Sistema de detecção de falhas de manobras em seccionadores de alta tensão baseado em processamento de sinais e RNA**. Itajuba: UNIFEI, 2005.

CORREA, C. **Secionador**. Propriedade CEEE GT, 2011.

DELMAR. **Secionadores**. Disponível em: <<http://www.delmar.com.br/pdf%5Cac.pdf>>. Acesso em 02 jan. 2013.

FAVERO, A. A. et al (coord.). **Apresentação de trabalhos científicos: normas e orientações praticas**. 5. ed. Passo Fundo: UPF, 2014.

FIELDSTEDT, T. A. Patente. U.S. n. **PI 2830144 A**, 1958.

IEC 62271-102. **Alternating current disconnectors and earthing switches**. Geneva, 2006.

IEC 62271-102. **High-voltage switchgear and controlgear alternating current disconnectors and earthing switches**. 11. ed, 2012.

IEC/TR 60943. **Guidance concerning the permissible temperature rise for parts of electrical equipment, in particular for terminals**, 2009.

INTERNATIONAL COPPER ASSOCIATION, LTD. **A vantagem do cobre, guia para trabalhar com o cobre e suas ligas**. Disponível em: <<http://procobre.org/pt/cobre/tecnologia/2011>>. Acesso em 14 out. 2012.

KOPPITZ, C. G. Patente. U. S. n. **PI 1793177**, 1929.

LOPES, R. D. **Análise de estruturas sujeitas a vibrações induzidas por vórtices**. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <[http://wwwp.coc.ufrj.br/teses/mestrado/estruturas/2006/Teses/LOPES\\_RKD\\_06\\_t\\_M\\_est.pdf](http://wwwp.coc.ufrj.br/teses/mestrado/estruturas/2006/Teses/LOPES_RKD_06_t_M_est.pdf)>. Acesso em: 14 out. 2012.

METALS HANDBOOK. **Metallography and microstructures**. ASM, 1992. v.9.

PADILHA, F. A. **Materiais de engenharia micro estrutura e propriedades**. Curitiba: Hemus, 2000.

PAHL, G. A. **Produção na engenharia mecânica fundamentos do desenvolvimento eficaz de produtos**. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

PAHL, G. ; BEITZ, W. **Produção na engenharia mecânica fundamentos do desenvolvimento eficaz de produtos**. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

PENTEADO, B. J. **Análise do desempenho de subestação de energia elétrica a partir de critério de confiabilidade**, 2011.

RAO, S. S. **Vibrações mecânicas**. 4 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

ROCHA, L. F. Estudo do comportamento da superfície de contato elétrico submetidos a diferenças de potencial elevado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 7, 2013, Penedo. **Anais...** Penedo: COBEF, 2013.

ROCHA, L. F. ; ISRAEL, C. L. Patente. **BR n. PI 020198- 7**, 10 out. 2013.

RUBIE, P. et al. **Patente. n. US 6889820 B**, 2001.

SCHENAIDER ELECTRIC. **Gama de seccionadores AT e EAT**. Propriedade da CEEE GT, 2011.

SIEMENS. **Catalogo Secionador**. 2012. Disponível em:  
<<http://www.energy.siemens.com/br/pt/transmissao-de-energia/produtos-de-alta-tensao/disconector-de-seccionadores-de-aterramento.htm>>. Acesso em 02 jan. 2013

STOLARSKI, T. A. **Tribology in machine desing**. Oxford: Butterworth Heinemann, 2000.

WEG. **Catalogo Secionador**. 2012. Disponível em:  
<<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-catalogo-seccionadores-equipamentos-de-alta-tensao-para-subestacoes-50026204-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em 02 jan. 2013.

**ANEXO A – DEPÓSITO DE PATENTE:**  
**BRASIL/SUL PATENTE Nº BR 10 2013 020198 7, 2013**  
**DISPOSITIVO DE AUTOMAÇÃO DE SECCIONADOR DE ALTA TENSÃO**

**Campo de aplicação**

A presente invenção pertence ao campo de aplicação da rede elétrica de alta tensão, em particular aos interruptores de circuito em sistemas de distribuição de energia elétrica e refere-se, mais especificamente, a um dispositivo de automação de seccionador de alta tensão, a ser utilizado como dispositivo auxiliar na conclusão de fechamento dos contatos principais de chave seccionador de alta tensão para uso em subestações de energia elétrica.

**Estado da Técnica Conhecido**

Uma chave seccionador é um interruptor de desativação que tem a capacidade de interromper a energia para um circuito elétrico ou para um grupo de circuitos elétricos. As chaves seccionadoras, também chamadas de interruptores de desconexão, são usadas em uma grande variedade de configurações e são empregadas como dispositivos de segurança que desenergizam circuitos para que as pessoas possam trabalhar com eles de forma segura. Os dispositivos de segurança elétricos são tão úteis quanto a sua manutenção e os procedimentos de segurança em torno de um interruptor de desativação devem ser revisados apropriadamente, a fim de serem eficazes.

Um exemplo comum de um cenário em que esses interruptores são usados está na distribuição de energia. A chave seccionadora pode ser aproveitada para gerenciar a rede de distribuição, para mudar cargas em toda a rede, para interromper a energia enquanto a manutenção ocorre e para desligar uma área da rede se uma ameaça à segurança surge. Um interruptor de desconexão é geralmente usado com um sistema de bloqueio, em que o interruptor é bloqueado após ser ativado, de modo que ele não possa ser acidentalmente ligado novamente.

Muitos sistemas elétricos para estruturas maiores, como de prédios e instalações industriais, também têm um interruptor de desconexão. Neste caso, a chave pode ser usada para interromper o fornecimento de energia em caso de emergência, reduzindo a voltagem para alternar para outro modo de voltagem, e desligar o sistema para manutenção. Mais uma vez, os sistemas de bloqueio são fortemente recomendados quando se pretende cessar o fornecimento de eletricidade a um circuito em um momento inoportuno.

Interruptores de desconexão são concebidos para operação manual, na maioria dos casos, necessitando que uma pessoa treinada e habilitada posicione os contatos com auxílio de um bastão de manobra isolado. Alguns podem exigir uma chave à prova de falhas ou algo similar, a fim de confirmar que um usuário realmente queira ativar o interruptor. Outros sistemas servem com a finalidade de gerenciar problemas de segurança, conforme observado quando um pico de potência representa uma ameaça para a segurança, então, o sistema é desligado automaticamente.

No modelo de utilidade MU 9002232-7, é mostrado uma disposição construtiva aplicada em controlador remoto para automação de equipamentos de proteção e manobra de redes de distribuição de energia elétrica, compreendendo estrutura caixa dotada internamente de motor acionador, cuja operação é controlada por micro switches, o qual, por meio de uma bucha de acoplamento ligada à bucha do eixo, está provido de acionadores de micro em posições-limite, que orientam internamente a posição do garfo acionador, conduzindo-o num movimento radial para cima ou para baixo, de acordo com a necessidade. Esse modelo de utilidade se mostra desvantajoso, visto que é aplicado apenas para chaves seccionadoras de média tensão.

A patente de invenção PI 0205911-8 propõe um interruptor móvel para conexão de circuitos e equipamentos de alta tensão em linha viva, sendo constituído de um dispositivo de interrupção elétrico montado em veículo. Tal dispositivo apresenta o inconveniente de ser móvel, fazendo com que sua manutenção seja mais frequente e tornando seu manuseio perigoso. Além disso, a interrupção da conexão de circuitos ainda será feita via processo humano, acentuando ainda mais o risco do uso deste dispositivo e os erros oriundos dele.

O modelo de utilidade MU 8301511-6 apresenta uma chave seccionadora sobre andaime modular móvel isolado, com comando à distância, e processo para sua utilização, sendo o aparato constituído de um dispositivo de interrupção de circuitos elétricos montado em um andaime sobre rodas com acionamento de mecanismo mecânico através de acionamento por uma corda em conjunto com bastão isolado. Esse modelo de utilidade torna-se desfavorável, visto que, sendo constituído de dispositivo móvel, torna-se perigoso seu manuseio em se tratando de rede elétrica de alta tensão. Além disso, possui mecanismo de acionamento mecânico, o que induz a erros humanos.

Com base no estado da técnica descrito acima, pode-se notar uma lacuna no que se refere à tecnologia de chaves seccionadoras, visto que os já existentes no mercado e nos documentos de patentes exemplificativamente descritos possuem limitações quanto à sua aplicabilidade, falta de segurança e confiabilidade de seus resultados.

### **Novidades e objetivos da invenção**

O modelo de utilidade aqui descrito é capaz de ser instalado junto a qualquer tipo de seccionador que opere em ambiente aberto, utilizando-se todas as funcionalidades de forma conjunta ou separada, sendo que seu objetivo é fornecer um dispositivo de automação de seccionador de alta tensão que auxilie na conclusão de fechamento dos contatos principais de chave seccionadora de alta tensão para uso em subestações de energia elétrica, gerando confiabilidade na manobra de fechamento de chaves, monitorando de forma direta o alinhamento entre os contatos principais móveis com relação aos fixos e trazendo segurança e eficácia em relação aos métodos de fechamento e supervisão convencionais.

O objeto deste relatório consiste em utilizar uma moto-vibração controlada para aliviar a força de atrito existente entre o contato fixo e o contato móvel, além de monitorar, através de um raio laser, pelo princípio da reflexão, o correto fechamento dos contatos.

O modelo de utilidade aqui proposto diferencia-se dos já existentes por permitir que a instalação de tal dispositivo junto à seccionadora não altere em nada o projeto estrutural e permita sua instalação junto a qualquer tipo de seccionador operando em ambiente aberto. Além dessas vantagens, o dispositivo foi projetado e construído de tal forma que possibilita ser instalado com facilidade, permitindo uma rápida substituição ou retirada para revisões, quando necessário.

Outra facilidade relacionada ao modelo de utilidade aqui exposto, está no fato de existir a possibilidade do uso de um sistema de leitura proporcional, o que oportunizaria o conhecimento remoto sobre o quanto faltou para a conclusão do fechamento do circuito, servindo como informação para o operador, de modo que ele possa tomar as devidas providências com base nas informações da leitura do sistema.

### **Descrição dos desenhos anexos**

A fim de que o modelo de utilidade, objeto do presente relatório descritivo, seja plenamente compreendido e levado à prática por qualquer especialista deste setor tecnológico, são apresentados os seguintes desenhos anexos que o ilustram e subsidiam:

**Figura 1** representa a vista superior do dispositivo de automação de seccionador de alta tensão;

**Figura 2** representa a vista lateral do dispositivo de automação de seccionador de alta tensão;

**Figura 3** representa a vista frontal do dispositivo de automação de seccionador de alta tensão;

### **Descrição detalhada da invenção**

Conforme pode ser inferido das figuras anexas, o objeto do presente relatório descritivo possui uma base estrutural retangular, alongada no sentido vertical, onde nesta base é instalado um sistema moto-vibrador fixo (4), que oscila no sentido vertical, com intensidade e frequência de vibração ajustadas conforme o tipo de chave seccionadora que se deseja auxiliar no comando de fechamento. A vibração é então direcionada para a haste do contato móvel (5), que desempenha a função de aliviar a força de atrito existente entre os contatos móveis e fixos.

O dispositivo de automação de seccionador de alta tensão possui ainda um sistema de alinhamento a laser, caracterizado pelo conjunto emissor de laser (2) e receptor de laser (3), que monitoram o moto-vibrador fixo (4), indicando quando o mesmo está ligado, através da caixa de comando (1). Quando o fim de curso indicar que a manobra de fechamento foi concluída, o sistema de alinhamento a laser irá verificar a posição correta, caso esta posição não tenha sido alcançada, o sistema moto-vibrador fixo (4) será acionado para que efetue a correta conexão e gere o alívio das tensões residuais dos mecanismos de manobra do seccionador. Sendo assim, o modelo de utilidade aqui descrito faz com que as chaves seccionadoras sejam manobradas à distância, sem perigo de haver falha na conexão devido à geração de informação do sistema automatizado.

As figuras e descrição realizadas não possuem o condão de limitar as formas de execução do conceito inventivo ora proposto, mas sim de ilustrar e tornar compreensíveis as inovações conceituais reveladas nesta invenção, de modo que as descrições e imagens devem ser interpretadas de forma ilustrativa e exemplificativa, mas não limitativa, podendo existir outras formas equivalentes ou análogas de implementação do conceito inventivo ora revelado e que não fujam do espectro de proteção delineado nesta invenção.

Tratou-se no presente relatório descritivo de um peculiar e original dispositivo de automação de seccionador de alta tensão, dotado de novidade, atividade inventiva, suficiência descritiva e aplicação industrial e, conseqüentemente, revestido de todos os requisitos essenciais para a concessão do privilégio pleiteado.

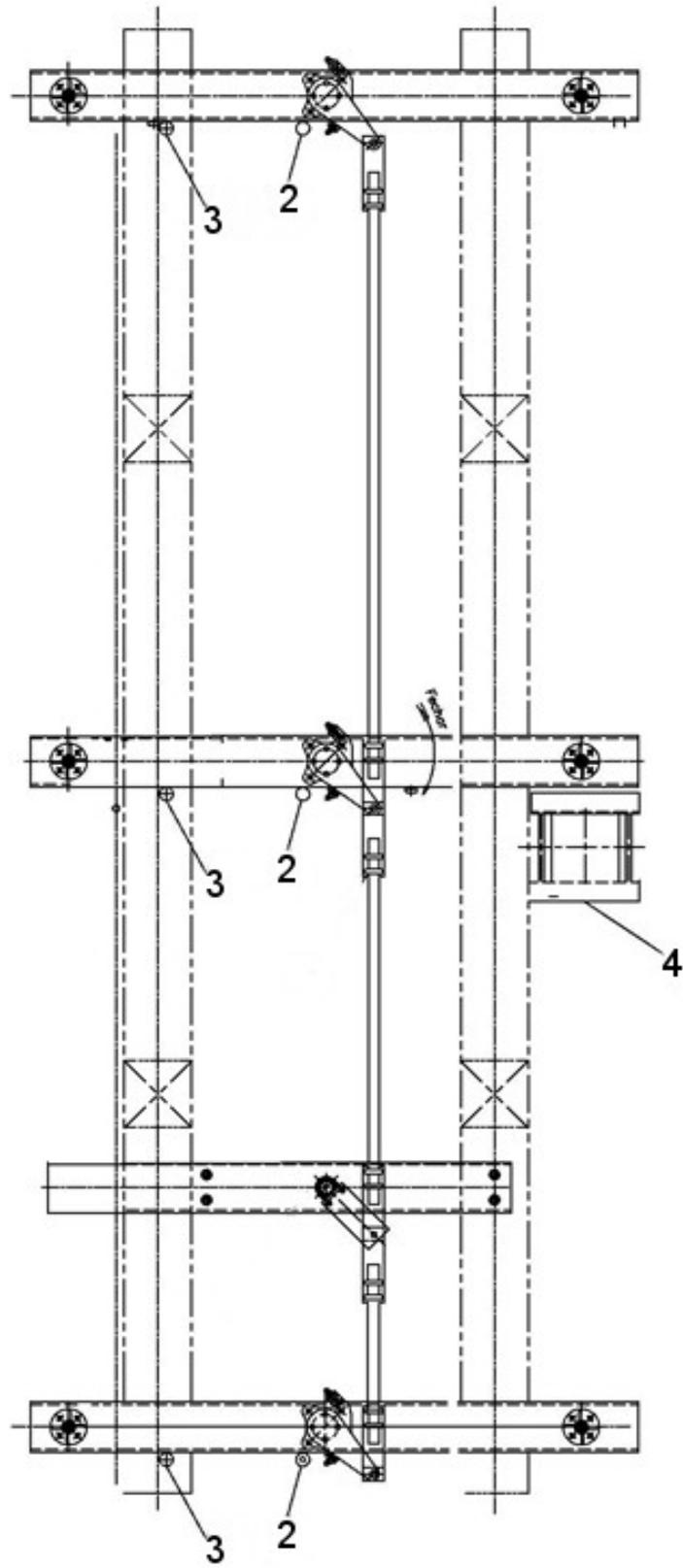


Fig. 1

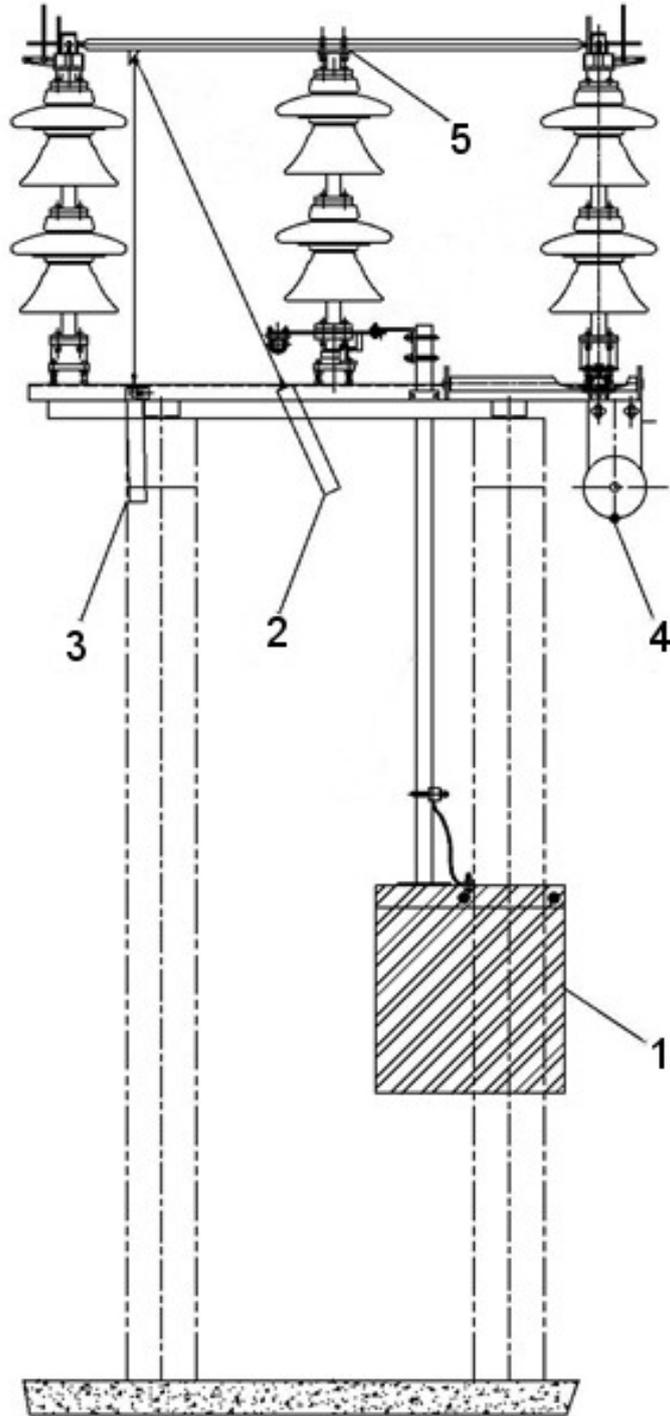


Fig. 2

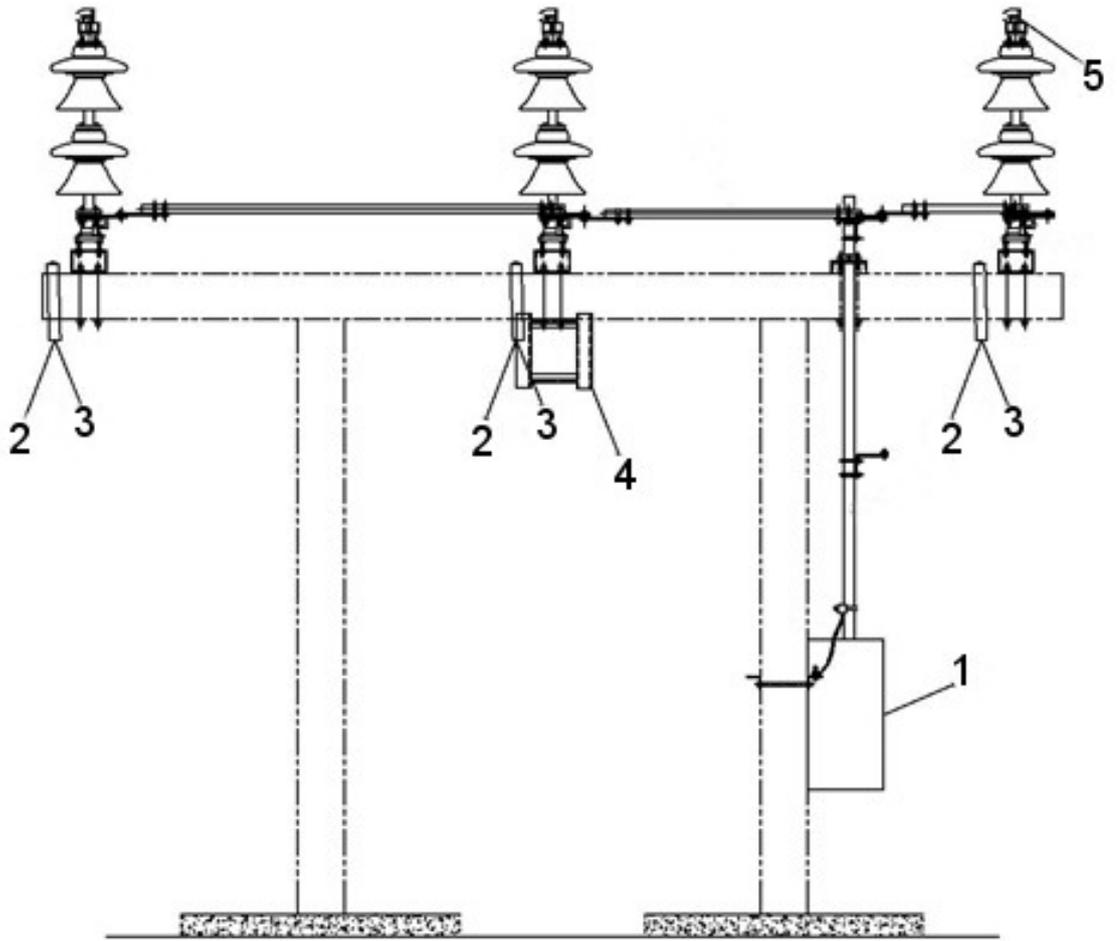


Fig. 3

## ANEXO B – PUBLICAÇÃO



COMPROMETIDA COM A PROMOÇÃO DO DESENVOLVIMENTO  
DA ENGENHARIA E DAS CIÊNCIAS MECÂNICAS

7º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO

7<sup>th</sup> BRAZILIAN CONGRESS ON MANUFACTURING ENGINEERING

20 a 24 de maio de 2013 – Penedo, Itatiaia – RJ - Brasil

May 20<sup>th</sup> to 24<sup>th</sup>, 2013 – Penedo, Itatiaia – RJ – Brazil

### ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA SUPERFÍCIE DE CONTATO ELÉTRICO SUBMETIDOS A DIFERENÇAS DE POTENCIAL ELEVADO

Luciano Favretto da Rocha, [lucianofr@ceee.com.br](mailto:lucianofr@ceee.com.br)<sup>1</sup>  
Charles Leonardo Israel, [israel@upf.br](mailto:israel@upf.br)<sup>1</sup>  
Telmo Roberto Strohaecker, [telmo@demet.ufrgs.br](mailto:telmo@demet.ufrgs.br)

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade de Passo Fundo - Campus I - BR 285, Bairro São José - CEP 99052-900, Passo Fundo - Rio Grande do Sul – Brasil.

<sup>2</sup>Laboratório de Metalurgia Física - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Av. Bento Gonçalves, 9500 Prédio 104-CEP 91509-900, Porto Alegre - Rio Grande do Sul – Brasil.

**Resumo:** O presente trabalho tem como objetivo, realizar análise na superfície do contato elétrico, submetido ao efeito corona que surge devido a grande diferença de potencial (DDP) em contatos elétricos. Busca-se encontrar mecanismos para redução dos efeitos que alteram a superfície do contato, quando comparado com um mesmo exemplar que não foi submetido a DDP. Com a modificação superficial do contato há um aumento na resistência elétrica, que por sua vez eleva a temperatura em um processo de avalanche até atingir o ponto de fusão do contato, esta alteração na superfície conseqüentemente leva a perda total da capacidade da condução elétrica do contato. O trabalho foi realizado utilizando os contatos elétricos de seccionadora instalada a céu aberto e que estão sobre o efeito corona devido a DDP. Esta análise ocorreu utilizando microscopia óptica, medição da rugosidade superficial e ensaio de dureza das amostras da superfície. Os resultados obtidos foram analisados de forma a identificar os prováveis causadores da degradação do contato elétrico.

**Palavras-chave:** Contatos elétricos, diferença de potencial elevado, corona

## 1. INTRODUÇÃO

Sempre que existe uma diferença de potencial elétrica originada por campos elétricos opostos, que pode ser gerada artificialmente ou por descargas atmosféricas, naturalmente ocorre a busca de um caminho para equilibrar ou neutralização a diferença destas cargas, este caminho deve ter alguma propriedade condutiva. O fluxo que percorre o caminho em busca da equalização é denominada corrente elétrica, já a interligação entre a fonte e o caminho e cargas é denominado contato elétrico ou terminal, mas nessas conexões aparecem obstáculo ao fluxo é conhecido por resistência elétrica.

Este trabalho investiga alguma possível solução para manter o caminho da corrente, com as propriedades condutora da conexão estável, ao longo da vida útil estimada, sem que haja aumento da resistência ao fluxo de corrente, muitas vezes ocorre o aumento da resistência, devido a associação de vários fatores do meio onde o contato é utilizado. Neste estudo foi utilizado para análise os terminais do contato de potência de um seccionador, que são feitos de cobre, este contato opera com diferença de potencial grandes, na ordem de milhares de *Volts* e intensidade de corrente na ordem de centenas de *Amper*. A associação inevitável dessas duas grandezas é necessária, pois são os dois principais fatores degradantes do contato elétrico sendo o primeiro o responsável pelo efeito corona (diferença de potencial elevado) e o segundo pelo aquecimento, que é o produto da corrente elétrica.

## 2. MATERIAL DO ESTUDO

Contato elétrico pode ser definido como a região da união de dois materiais condutores que possibilita o fluxo da corrente elétrica. Os contatos elétricos podem ser feitos de vários materiais condutores, dependendo do projeto que deve atender, o mais utilizado para conduzir eletricidade conforme (INTERNATIONAL COPPER ASSOCIATION, LTD, 2011) é o Cobre com 99,99% de pureza, conhecido como cobre eletrolítico, exibe estrutura cristalina cúbica de face centrada, apresenta excelente condutividade elétrica e térmica, boa maleabilidade e boa resistência a corrosão a F mostra uma exemplo de cobre eletrolítico (METALS HANDBOOK, 1992).



**Figura 29** Amostra da estrutura dendrítica do cobre eletrolítico (METALS HANDBOOK, 1992)

As principais características físicas e mecânicas do cobre eletrolítico podem ser conferidas na Tabela 1.

**Tabela 13** Características do cobre eletrolítico (METALS HANDBOOK, 1992) e (INTERNATIONAL COPPER ASSOCIATION, LTD, 2011).

| Número | Composição nominal % | Resistência Tração MPa | Resistência Torção MPa | Resistividade Encruado $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ | Resistividade Recozido $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ | Dureza Rockwell F |
|--------|----------------------|------------------------|------------------------|--|--|-------------------|
| C10100 | 99,99 Cu             | 221-455                | 55                     | 1,78   | 1,7-1,72   | 54 – 97           |

Nesta investigação foi utilizado duas amostras do contato elétrico de um seccionador marca Galileu fabricada em 1960, isolada para 145.000 v e projetada para circular uma corrente permanente de 600A que pode ser vista na F.



Figura 30 Seccionador instalado na subestação Santa Marta da CEEE GT.

A resistência elétrica de contato de um metal pode ser dada conforme Eq. (1) contida na norma (IEC/TR 60943, 2009), esta norma é dedicada a demonstrar as características do contato elétrico bem como a sua elevação de temperatura.

$$R_c = \frac{\rho}{2.n.a} + \frac{\sigma_0}{2.n.a^2} \quad (23)$$

Onde:

$R_c$  = Resistência de contato ( $\Omega$ )

$\rho$  = Resistividade do material ( $\Omega\text{m}$ )

$\sigma_0$  = Resistividade Superficial ( $\text{Wm}^2$ )

$n$  = Numero de contatos elementares

$a$  = Raio do contato elementar (m)

A Eq. (24) demonstra os principais fatores envolvidos na resistência de contato, sendo que a resistividade ( $\rho$ ) é constante, dependente do material base do contato. Já a resistividade superficial ( $\sigma_0$ ) depende do acabamento e a quantidade de impurezas presentes na superfície do contato, os demais fatores, como o numero de contatos elementares ( $n$ ) e raio do contato elementar ( $a$ ) são diretamente os responsáveis pelo aumento da resistência de contato.

## 2.1. Seccionador

O contato elétrico que está sendo investigado é de um seccionador, que é um dos equipamentos essenciais em um circuito de potência de uma subestação de energia elétrica, a função desse equipamento é: interromper; isolar e também criar caminho alternativo para a corrente elétrica, conforme pode ser observado na. F.

O funcionamento de um seccionador é bastante simples. Quando este recebe o comando de abertura, por meio de um mecanismo eletromecânico afasta os contatos móveis dos fixos, no caso de 138000 V em aproximadamente 1500 mm para possibilitar a isolamento do circuito da fonte do circuito de carga, quando recebe o comando para fechar, o mecanismo eletromecânico movimenta os contatos móveis até que ocorra o acoplamento entre contato móvel e contato fixo. Porém, devido a esta distância, falta de robustez e folgas do mecanismo, dificulta o posicionamento ideal de conexão (este é um problema desta e da maioria das chaves seccionadoras de alta tensão). Com isso o ponto que anteriormente não fazia parte do contato elétrico na próxima manobra passou a ser o contato elétrico. Esta superfície que estava exposta ao efeito corona e teve suas características físicas e químicas alteradas tornou-se o ponto de contato.

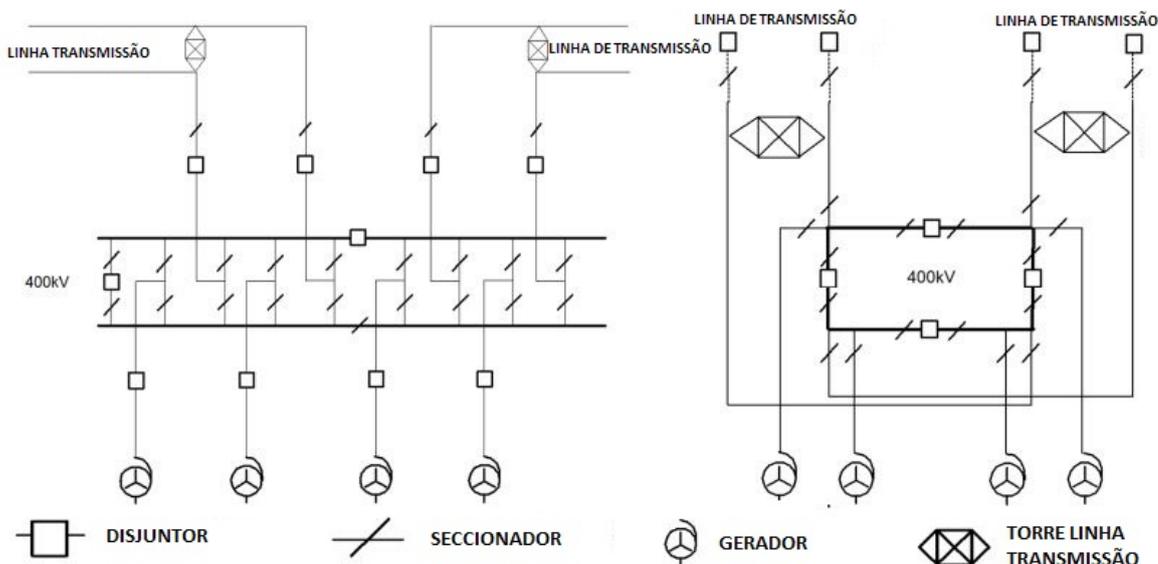


Figura 31- Diagrama de um circuito unifilar de uma subestação de energia elétrica (Carvalho, A. C. C., 2012).

### 1.1. Efeito Corona

Esse efeito possibilita ser observado pelos três sentidos, pois é visível a olho nu, causa um ruído característico e transforma o oxigênio  $O_2$  presente no ar em ozônio  $O_3$  e esse gás tem o cheiro característico. Os objetos submetidos ao gás ozônio tem a oxidação acelerada conforme relata a norma (ABNT NBR 7304, 2010).

Sempre que há diferenças de potencial a partir de 2000 V e o campo elétrico encontra um gradiente da variação da superfície, ou seja de uma superfície plana para uma pontuda, com raio de curvatura pequenos ou irregularidades acentuadas, todos esses na ordem de aproximadamente 5 mm, ocorre a concentração de campo elétrico nesta região. Quando este campo fica grande o suficiente, na região imediatamente próxima à ponta ocorrerá a ionização do ar, tornando-o condutivo, se a região ionizada continua a crescer, esta irá romper o dielétrico do ar, tornando este condutivo formando uma fagulha momentânea, ou até um arco, a F, mostra esse efeito em uma vela de ignição para motor, a região de cor lilás é o gás ozônio. É comum observar ao redor de condutores que operam com alta tensão o efeito corona do conector.

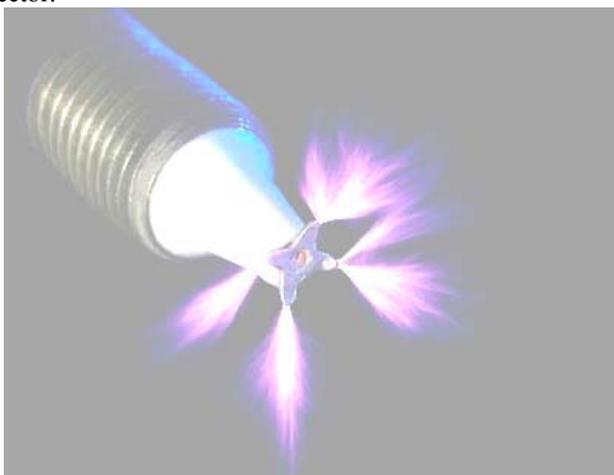


Figura 32 Efeito corona na vela ignição

## 2. METODO E ENSAIOS

Foi procurado um método de ensaio, para dar início a pesquisa baseado na literatura de (PAHL, 2005) foi pesquisada maneira de chegar ao resultado final, a partir da união de fatores que não estão concentrados apenas em uma técnica, pois envolve a análise mecânica, química, física e elétrica do material. Sendo assim focamos nos ensaios para a análise mecânica, foi retirado amostras dos contatos elétricos fixos e móvel do seccionador, feito corpos de prova para execução do ensaio de dureza rugosidade e metalográfico.

## 2.1. Ensaio de dureza

Com objetivo de verifica se houve alteração de dureza na superfície do contato antes e após as amostra ficarem expostas ao gás ozônio.

Os resultados encontrados ficaram entre 88 e 84 *Rockwell F*, foram valores com desvio padrão pequeno, indicando que não apresentou alteração.

Dessa forma foi verificado que não é um ensaio pertinente para constatar alteração da superfície de contato, porem foi valido para verificar que as amostras, estão dentro do intervalo de dureza que esta na Tabela 1.

## 2.2. Ensaio de rugosidade

Para analisar a superfície foi realizada a rugosidade média  $R_a$ . Esta é definida como sendo a média aritmética dos valores absolutos dos afastamentos  $h_i$  do perfil médio, demonstrado na Figura 33

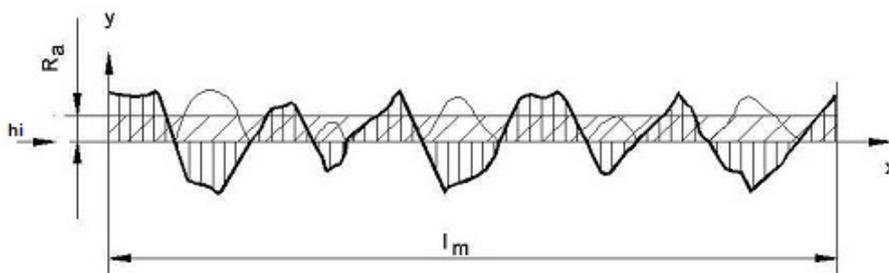


Figura 33 Rugosidade  $R_a$  (NBR ISO 4287, 2002).

Aplicando os parâmetros da amplitude (media das ordenadas)  $R_a$  definidos na (NBR ISO 4287, 2002) foi ensaiado dois corpos de prova um com acabamento superficial preparado com lixa 220 e outro com polimento.

O ensaio de ambos ocorreu em dois momentos sendo o primeiro logo após o tratamento superficial e o segundo, após os corpos de prova ficarem submetidos a um ambiente com alta concentração de ozônio por 24 horas.

Após foi realizado novamente o ensaio de rugosidade na mesma área do corpo de prova onde foi realizado o primeiro. Os resultados podem ser observados nos gráficos das Figura 34 e Figura 35.

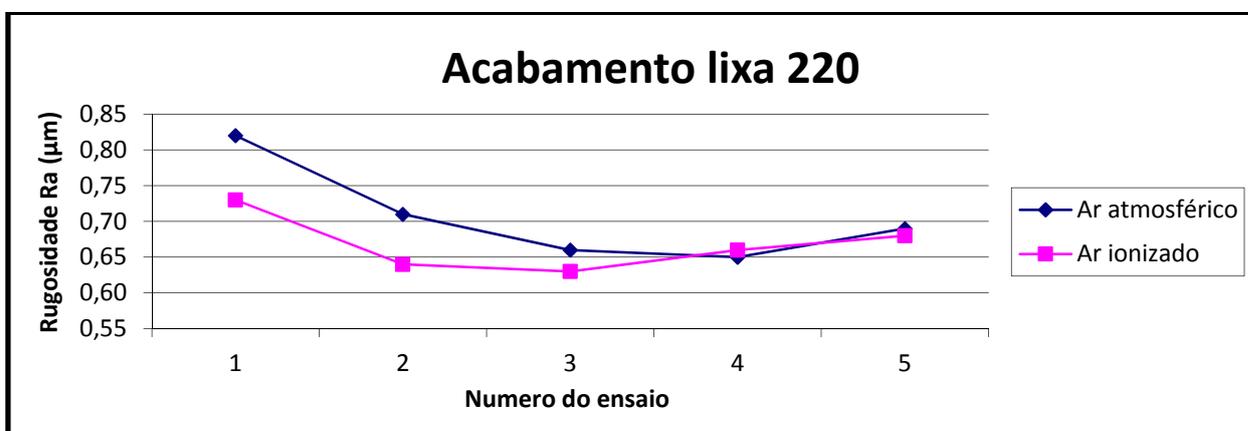


Figura 34 Comparativo entre os ensaios da rugosidade  $R_a$  acabamento lixa 220 antes e após a exposição ao gás ozônio, em cinco posições aleatórias da amostra.

Pode ser visto que a rugosidade do corpo de prova com acabamento feito com lixa 220 onde havia maiores desvios perfil Ra, a oxidação gerada pelo O<sub>3</sub> corroeu diminuindo assim a rugosidade.

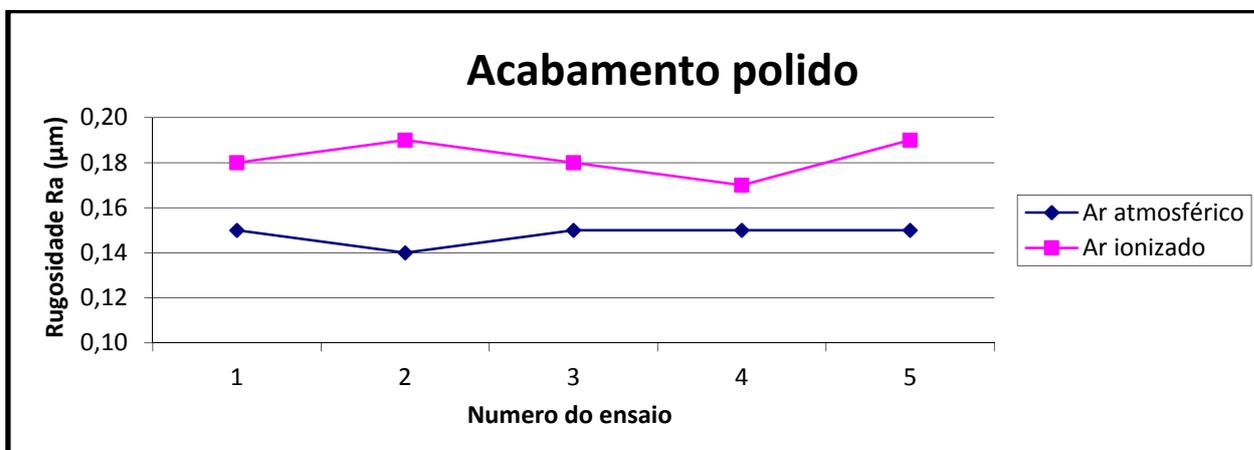


Figura 35 Comparativo entre os ensaios da rugosidade Ra acabamento polido antes e após a exposição ao gás ozônio em cinco posições aleatórias da amostra.

Já onde a preparação do material polido, o desvio de rugosidade Ra, é menor para aquela que antes de ser submetida ao Ozônio. A oxidação elevou a rugosidade, provavelmente em função da camada oxidada criada.

Este ensaio apresentou alteração no resultado da análise da superfície antes e depois de ser submetida ao ambiente com alta concentração de ozônio.

### 2.3. Metalografia

Os dois corpos de prova foram preparados conforme o indicado para metalografia de cobre (METALS HANDBOOK, 1992), sendo que um foi dado o acabamento polido e outro com lixa 220, e realizado o ensaio metalográfico, logo após foi deixado em um ambiente com alta concentração de ozônio O<sub>3</sub> por 24 horas após novamente foi realizado o ensaio metalográfico.

As Figura 36 e Figura 37 apresentam acabamento com lixa 220 e as Figuras Figura 38 e Figura 39 com acabamento de polimento.

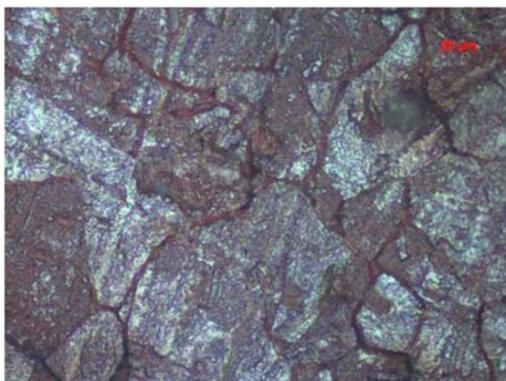
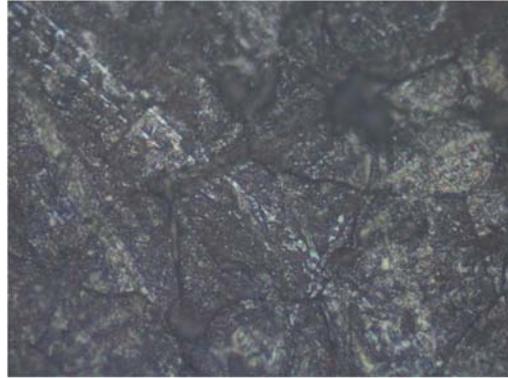


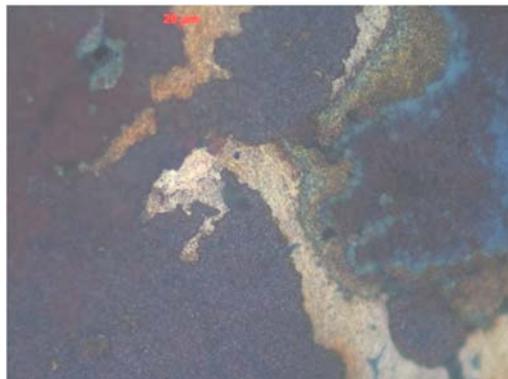
Figura 36 Amostra preparada com lixa 220 apliada 500x.



**Figura 37** Amostra preparada com lixa 220 após 24h em ambiente com alta concentração de ozônio ampliada 500x



**Figura 38** Amostra preparada com polimento ampliada 500x.



**Figura 39** Amostra preparada com polimento após 24 horas em ambiente com O<sub>3</sub> ampliada 500x .

Como pode ser verificados nas equações anteriores a resistência de contato está diretamente ligada a superfície do material ou seja se tiver uma superfície com boa condutividade tem-se um bom contato e pouca elevação de temperatura. Porém, se a superfície estiver oxidada (normalmente provocada pela formação de O<sub>3</sub> resultante do efeito corona) tem-se um contato ruim e elevação de temperatura, o que pode chegar ao ponto de fusão do material.

### 3. CONCLUSÃO

Analisando o conjunto de resultados obtidos pelos ensaios em laboratório a que foram submetidos os contatos pode-se concluir que:

- A diferença de potencial a qual os contatos estão constantemente submetidos, gera o gás ozônio O<sub>3</sub>, que causa a alteração da superfície pela aceleração da oxidação do contato;
- A superfície do contato de cobre, que apresenta excelente condutividade, é reduzida pela reação do ozônio O<sub>3</sub> com o cobre resultando assim no óxido de cobre, que tem baixa condutividade elétrica, fazendo com que aumente a densidade de corrente nos pontos restantes;
- Como consequência tem-se o aquecimento onde a superfície fica mais propensa a oxidação e a situação evolui para um efeito em avalanche que acaba pela perda total da condutividade do contato;
- As amostras submetidas em ambiente rico em ozônio, não apresentaram diferença significativa de dureza com aquelas que foram expostas ao ar atmosférico;
- O ensaio de rugosidade demonstrou que as amostras com acabamento de lixa 220, para aquelas submetidas ao ozônio apresentaram valores similares aquelas submetidas ao ar atmosférico. Já para o acabamento polido, aquelas submetidas ao ozônio apresentaram rugosidade superior daquelas submetidas ao ar atmosférico, tal diferença provavelmente é resultante da oxidação acentuada na superfície após a amostra ser submetida ao ambiente com elevada concentração de O<sub>3</sub>.
- As análises metalográficas não indicaram diferença entre as amostras com ou sem a sujeição ao ozônio.

#### 4. REFERÊNCIAS

- ASM HANDBOOK, 1992, “Metallography and Microstructures”, Vol. 9, pp. 823-866.
- Ashby, M. E. and Jones D.R.H., 1996, “Engineering Materials”, Introduction to Their Properties and Applications, Ed. Butterworth Heinemann Vol. 1, pp. 186-300
- Ashby, M. E. and Jones D.R.H., 1999, “Engineering Materials”, An Introduction to Microstructures Processing and Design, Ed. Butterworth Heinemann Vol. 2, pp. 3-35.
- Callister, W.D.Jr., 2007, “Materials Science and Engineering”, Ed. John Wiley & Sons, New York, EUA, pp. 30-870.
- Padilha A. F., 2000, “Materiais de Engenharia Micro Estrutura e Propriedades”, Ed. Hemus, Curitiba, Brasil, pp. 13-325
- Procobre, 2011, “A Vantagem do Cobre”, Guia para Trabalhar com o cobre e suas ligas [www.procobre.org/pt/cobre/tecnologia/](http://www.procobre.org/pt/cobre/tecnologia/)
- ABRATE, 2004, “RELATÓRIO TÉCNICO”, GTM/SGME Nº 004
- Carvalho, A. C. C., 2012, “Reliability of High Voltage Equipment”, Resultados do questionário de falhas em equipamentos de AT Janeiro
- CIGRE WG A3.06: HV Equipment Reliability
- Pahl G. and Beitz W., 2005, “Produção na Engenharia Mecânica”, Fundamentos do Desenvolvimento Eficaz de Produtos, Ed. Edgard Blücher, São Paulo, Brasil, pp. 100-180.
- Shigley J.E. 2005, “Projeto de Engenharia Mecânica”, Bookman, Porto Alegre, Brasil, pp. 95-540.
- ABNT NBR 7304, 2010, “Condutores Elétricos de Alumínio Corona em Cabos de Alumínio”.
- Souza, S.A, 1982, “Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos”, Fundamentos Teóricos e Práticos, Ed. Edgard Blücher, São Paulo, Brasil, pp. 103-136.

**Abstract:** *This paper aims, perform analysis on the surface of electrical contact, subjected to corona effect that arises due to large potential difference (DDP) in electrical contact. We seek to find ways to reduce the effects that alter the surface contact, even when compared with a specimen which was not subjected to DDP. With the modification of surface contact there is an increase in electrical resistance, which in turn raises the temperature in an avalanche process until it reaches the melting point of contact, this change in surface consequently leads to total loss of the ability of electrical conduction of the contact. The work was performed using the electrical contacts of the disconnecter installed and that are open on the corona effect due to DDP. This analysis occurred using optical microscopy, measuring the surface roughness and hardness testing of samples of the surface. The results were analyzed to identify the probable cause of the degradation of electrical contact.*

**Keywords:** *Electrical contacts, high potential difference, corona*