

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

GABRIELA CAMPANATE FERREIRA

**ANÁLISE COMPORTAMENTAL EM UM CABO OPGW
QUANDO SUBMETIDO AO ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO**

VOLTA REDONDA

2018

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**ANÁLISE COMPORTAMENTAL EM UM CABO OPGW
QUANDO SUBMETIDO AO ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica UniFOA como requisito à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aluna:

Gabriela Campanate Ferreira

Orientador:

Prof. Dr. Hélio Amorim de Paiva Júnior

VOLTA REDONDA

2018

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluna:

Gabriela Campanate Ferreira

Título da Monografia:

ANÁLISE COMPORTAMENTAL EM UM CABO OPGW
QUANDO SUBMETIDO AO ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO.

Orientador:

Prof. Dr. Hélio de Paiva Amorim Júnior

Banca Examinadora:

Professor Orientador

Hélio de Paiva Amorim Júnior, Doutor, UniFOA

Professor Avaliador

Bruno Moreira da Silva, Especialista, UniFOA

Professor Avaliador

Orlando Moreira Guedes Junior, Mestre, UniFOA

DEDICATÓRIA

Dedico primeiramente a Deus por ter me sustentado até aqui. A minha mãe, aos meus familiares, por todo carinho e apoio durante toda a caminhada. E a todos os professores do curso, ao orientador do trabalho, amigos e a todos aqueles que de certa forma contribuíram para a realização deste projeto.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela saúde e perseverança para terminar esse trabalho.

A minha mãe, pelo apoio e incentivo em todos os momentos da minha vida, essencialmente para a minha educação e formação.

Aos meus amigos e familiares, que me fortaleceram diariamente com gestos de amor, paciência, carinho e confiança.

Ao CEPEL, que permitiu que eu pudesse acompanhar os ensaios e me deu apoio durante todo o trabalho, e principalmente, a toda equipe do laboratório de Alta Corrente.

Por fim, às pessoas que participaram direta ou indiretamente para a elaboração deste trabalho, fico totalmente grata por todo incentivo dado.

RESUMO

Esse trabalho elabora uma análise sobre os cabos para-raios tipo OPGW (Optical Ground Wire) utilizados em linhas aéreas de transmissão de energia elétrica. Diferente do cabo para-raios convencional, este apresenta em seu interior fibras ópticas, permitindo o transporte de dados. Encontra-se neste trabalho o conceito de fibra óptica, a estrutura deste tipo de cabo, as vigentes aplicações e, principalmente, o estudo dos ensaios de descarga atmosférica e curto-circuito que são aplicados aos cabos e são parametrizados por normas regulamentadoras, as quais também serão mostradas. Os ensaios citados são estabelecidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), realizados no laboratório de alta corrente do Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL). Esses ensaios têm por finalidade comprovar a satisfação dos requisitos mínimos para comercialização do mesmo.

O trabalho consiste em uma análise do desempenho de um cabo OPGW, cuja necessidade da fabricação do mesmo foi através de uma demanda com determinadas especificações técnicas. Através dessa solicitação, foram realizados ensaios no laboratório que serão descritos no decorrer do estudo de caso.

Palavras chaves: Fibra Óptica, Cabos para-raios, OPGW.

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 10 |
| 1.1. MOTIVAÇÕES..... | 10 |
| 1.2. OBJETIVOS | 11 |
| 1.3. CONTRIBUIÇÃO | 11 |
| 1.4. DESCRIÇÃO | 11 |
| 2. SISTEMA DE ELÉTRICO | 13 |
| 2.1. TRANSMISSÃO DE ENERGIA..... | 13 |
| 2.2. LINHAS DE TRANSMISSÃO..... | 14 |
| 2.3. PRINCIPAIS PROBLEMAS NAS LINHAS DE TRANSMISSÃO | 16 |
| 2.3.1. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS..... | 16 |
| 2.3.2. CURTO CIRCUITO | 18 |
| 3. CABOS PARA-RAIOS | 19 |
| 3.1. CABO OPGW | 19 |
| 3.2. COMPOSIÇÃO DOS CABOS OPGW | 20 |
| 3.3. FIBRA ÓPTICA..... | 22 |
| 3.3.1. FIBRAS MULTIMODO (MM) | 24 |
| 3.3.2. FIBRAS MONOMODO (SM) | 25 |
| 3.4. PRINCIPAIS CABOS OPGW | 26 |
| 4. ENSAIOS EM CABOS OPGW NO LABORATÓRIO | 27 |
| 4.1. ENSAIOS DE CURTO-CIRCUITO..... | 29 |
| 4.1.1. ARRANJO | 29 |
| 4.1.2. PROCEDIMENTO | 32 |
| 4.2. ENSAIOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS | 36 |
| 4.2.1. ARRANJO | 36 |
| 4.2.2. PROCEDIMENTO | 39 |
| 5. ESTUDO DE CASO..... | 44 |
| 5.1. CARACTERÍSTICAS NOMINAIS DO CABO..... | 44 |
| 5.2. ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO | 45 |
| 5.2.1. ENSAIO 1..... | 45 |
| 5.2.2. ENSAIO 2..... | 47 |

| | |
|--|----|
| 5.2.2.1. PROTÓTIPO 1: ALUMÍNIO LIGA 1120 | 47 |
| 5.2.2.2. PROTÓTIPO 2: ALUMÍNIO LIGA 6201 | 47 |
| 5.2.3. ENSAIO 3..... | 48 |
| 5.2.4. ENSAIO 4..... | 49 |
| 5.2.5. ENSAIO 5..... | 50 |
| 5.3. RESULTADOS FINAIS..... | 52 |
| 6. CONCLUSÃO | 53 |
| 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS | 54 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Linhas de transmissão de energia elétrica instaladas no SEB..... | 15 |
| Figura 2 - Mapa de densidade de descargas atmosféricas (1998-2013). | 17 |
| Figura 3 - Sistema de potência para-raios. | 19 |
| Figura 4 - Armação do cabo OPGW..... | 20 |
| Figura 5 - Estrutura de um cabo OPGW. | 21 |
| Figura 6 - Estrutura da Fibra Óptica. | 23 |
| Figura 7 - Fibra Óptica Multimodo..... | 24 |
| Figura 8 - Fibra Óptica Monomodo..... | 25 |
| Figura 9 - Fonte emissora de luz. | 28 |
| Figura 10 - Medidor de potência óptica. | 28 |
| Figura 11 - Diagrama trifilar do arranjo para ensaios de curto-circuito..... | 30 |
| Figura 12 - Arranjo unifilar de curto-circuito..... | 31 |
| Figura 13 - Arranjo para o ensaio de curto-circuito. | 32 |
| Figura 14 - Fluxograma para realização de ensaio de curto- circuito..... | 34 |
| Figura 15 - Forma de onda do ensaio de curto-circuito, com assimetria negativa. ... | 35 |
| Figura 16 - Forma de onda do ensaio de curto-circuito, com assimetria positiva..... | 35 |
| Figura 17 - Diagrama trifilar do arranjo para ensaios de descarga atmosférica. | 37 |
| Figura 18 - Arranjo unifilar de descarga atmosférica..... | 38 |
| Figura 19 - Arranjo para o ensaio de descarga atmosférica..... | 38 |
| Figura 20 - Eletrodo com ângulo de 45°..... | 39 |
| Figura 21 - Fluxograma para ensaio de descarga atmosférica | 42 |
| Figura 22 - Forma de onda do ensaio de descarga atmosférica. | 43 |
| Figura 23 - Gráfico de temperatura do primeiro ensaio..... | 46 |
| Figura 24 - Rompimento do tubo durante o primeiro ensaio. | 46 |
| Figura 25 - Rompimento do tubo durante o terceiro ensaio. | 48 |
| Figura 26 - Rompimento do tubo durante o quarto ensaio. | 50 |
| Figura 27 - Gráfico de temperatura durante o quinto ensaio. | 51 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Classe de ensaio..... | 40 |
| Tabela 2 - Acréscimo ou variação de atenuação | 41 |
| Tabela 3 - Características do cabo OPGW. | 45 |
| Tabela 4 - Resultados obtidos através dos ensaios. | 52 |

LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CA - Corrente Alternada

CC - Corrente Contínua

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

dB - Decibéis

ELAT - Grupo de Eletricidade Atmosférica

Kgf - Quilograma Força

Km - Quilômetros

LED - Diodo Emissor de Luz

LT - Linha de Transmissão

OPGW - Optical Ground Wire

1. INTRODUÇÃO

Os cabos para-raios foram criados com a finalidade de proteger as linhas de transmissão contra descargas atmosféricas, porém, com o avanço da tecnologia, observou-se que esses cabos poderiam possuir uma função adicional e que seria de grande importância, sendo assim, foi implementado nesses cabos a função de transmissão de dados através de fibra óptica e ficaram conhecidos como cabos OPGW (Optical Ground Wire).

Com a instalação dos cabos OPGW em linhas de transmissão, foram observados vários danos causados a eles por curtos-circuitos e por descargas atmosféricas. Este fato gerou uma grande preocupação em torno da utilização dos cabos OPGW em substituição aos cabos para-raios convencionais.

Para assegurar a instalação mantendo a confiabilidade dos cabos OPGW convencionais já instalados em linhas de transmissão, foi estabelecido ensaios de curto-circuito e descargas atmosféricas.

Neste trabalho será realizado uma análise comportamental em um cabo OPGW de 100 mm² com capacidade de curto circuito de 5,5 kA e um I^2t (capacidade de dissipação de energia em um determinado tempo) de 30 kA²s obtida através do ensaio de curto-circuito.

1.1. MOTIVAÇÕES

Uma das razões que me motivou a construir esta monografia com o tema referido foi poder ter participado de cada ensaio realizado no laboratório, ter acompanhado toda a evolução deste cabo, desde a primeira reprovação até a última modificação para sua aprovação.

1.2. OBJETIVOS

O trabalho tem como objetivo analisar os possíveis erros no projeto e na construção do cabo OPGW de 100 mm², que serão expostos no decorrer de cada ensaio realizado em laboratório.

1.3. CONTRIBUIÇÃO

O projeto contribuiu para a segurança da instalação do cabo OPGW nas linhas de transmissão, pois os ensaios asseguram a confiabilidade do mesmo, comprovando que o cabo suporta a carga aplicada durante os ensaios.

1.4. DESCRIÇÃO

O trabalho está dividido em seis capítulos. Neste primeiro capítulo se encontra a introdução, seguido dos objetivos, abordando tudo o que será mostrado no decorrer do trabalho.

O capítulo 2 trata do sistema elétrico, que é composto por três importantes segmentos: geração, transmissão e distribuição, com destaque para o setor de transmissão de energia, que é o foco do trabalho.

No capítulo 3 é desenvolvido um estudo dos cabos para-raios convencionais e OPGW, onde é detalhado seu princípio de funcionamento, sua estrutura, seus componentes, facilitando o entendimento sobre o seu funcionamento, e o da fibra óptica, que é a responsável por transportar os dados.

Para compreensão de como são realizados os ensaios segundo a ABNT, o capítulo 4 apresenta todos os requisitos que os cabos para-raios tipo OPGW devem atender.

No capítulo 5 é realizado o estudo de caso, o qual contém todos os ensaios e os procedimentos que foram realizados no cabo OPGW, mostrando que este está apto para uso.

Finalmente no capítulo 6, apresenta toda análise feita perante os resultados obtidos nos estudo de caso e das pesquisas realizadas, além de todo aprendizado no desenvolvimento deste projeto.

2. SISTEMA DE ELÉTRICO

Um sistema elétrico de potência é formado basicamente por quatro setores: geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica. O objeto de estudo deste trabalho encontra-se no setor de transmissão de energia, especificamente nas linhas de transmissão.

2.1. TRANSMISÃO DE ENERGIA

A transmissão da energia elétrica pelo território brasileiro é feita por linhas de transmissão de vários níveis de tensão. Estas linhas são determinadas pela quantidade de potência a ser transmitida, atendendo a parâmetros físicos e econômicos de construção para esse transporte de energia elétrica. [9]

A integração dos sistemas regionais e nacionais é essencial para um sistema elétrico de potência, pois possibilita uma troca de energia entre diversos sistemas de acordo com a necessidade de cada um. Isto viabiliza a construção de centrais mais eficientes, aumento da reserva global de energia e maior confiabilidade do sistema diante de situações de distúrbios. [13]

A geração de energia elétrica pode ser realizada por distintos tipos de usinas: hidrelétricas, termoelétricas, eólicas, entre outras. A partir da usina, a energia é transformada em uma subestação elétrica. Nesta etapa a tensão deve ser elevada, dependendo da distância e da potência a ser transmitida, para que a corrente seja reduzida e, conseqüentemente, reduzida as perdas. Em seguida, a energia é transportada em corrente alternada através de cabos elétricos até as subestações rebaixadoras, delimitando a fase de transmissão.

2.2. LINHAS DE TRANSMISSÃO

As linhas de transmissão são compostas, na maioria das vezes, por cabos de alumínio com alma de aço instalados em torres. Ao projetar as Linhas de Transmissão devem ser levados em conta aspectos mecânicos e elétricos. As torres devem ser resistentes para suportar o peso dos condutores e resistirem à tensão mecânica, preservando uma distância de segurança entre cabos, entre estes cabos e entre as torres e o solo. [11]

A transmissão de energia pode ser feita através de linhas aéreas, subterrâneas ou subaquáticas. O meio convencional é por meio de linhas aéreas, que utilizam condutores nus em sua extensão, conectadas nas estruturas por isoladores. As linhas subterrâneas geralmente utilizam cabos isolados e instalados em rede de dutos, tornando-se uma boa solução para grandes centros urbanos, ainda que seu custo seja alto. As linhas subaquáticas possuem grandes limitações técnicas e econômicas, mas são úteis em projetos especiais de travessias de rios e canais com vãos muito grandes, que dificultam a escolha de outro tipo de linha.

As linhas de transmissão podem transportar a energia elétrica em corrente alternada (CA) ou corrente contínua (CC). O sistema em CA utiliza linhas trifásicas com um ou mais condutores por fase, sendo o mais utilizado por ser flexível, pois possibilita gerar, transmitir, distribuir e utilizar energia elétrica em um nível de tensão mais econômico e seguro. Já a transmissão em CC é usada, geralmente, para transportar grandes blocos de energia a distâncias elevadas. A transmissão em CC apresenta menores custos e perdas do que a transmissão em CA para uma mesma potência transmitida.

As linhas de transmissão podem ser classificadas de acordo com o nível de tensão que elas transportam. Podem ser: linhas de distribuição (13,8 kV e 34,5 kV), linhas de alta tensão (69 kV, 138 kV e 230 kV), linhas de extra alta tensão (345 kV, 500 kV e 765 kV) e linhas de ultra alta tensão (acima de 765 kV). [5]

Em junho de 2018 o Sistema Interligado Nacional atingiu 144.323,8 km de linhas de transmissão, das quais a participação do sistema de 230 kV representa a maior parte, em termos de extensão, com 39,9% do total, como ilustra a figura 1. [18]

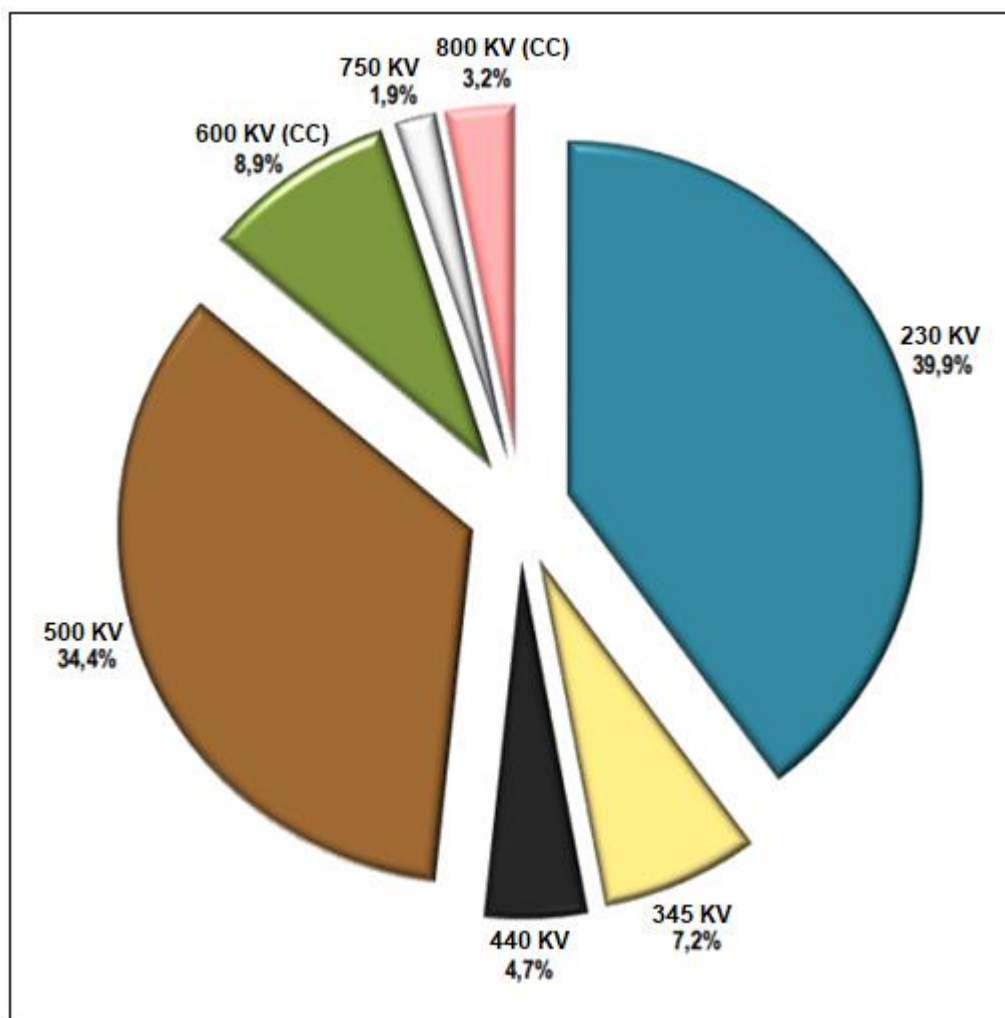


Figura 1 - Linhas de transmissão de energia elétrica instaladas no SEB.
Fonte: [18]

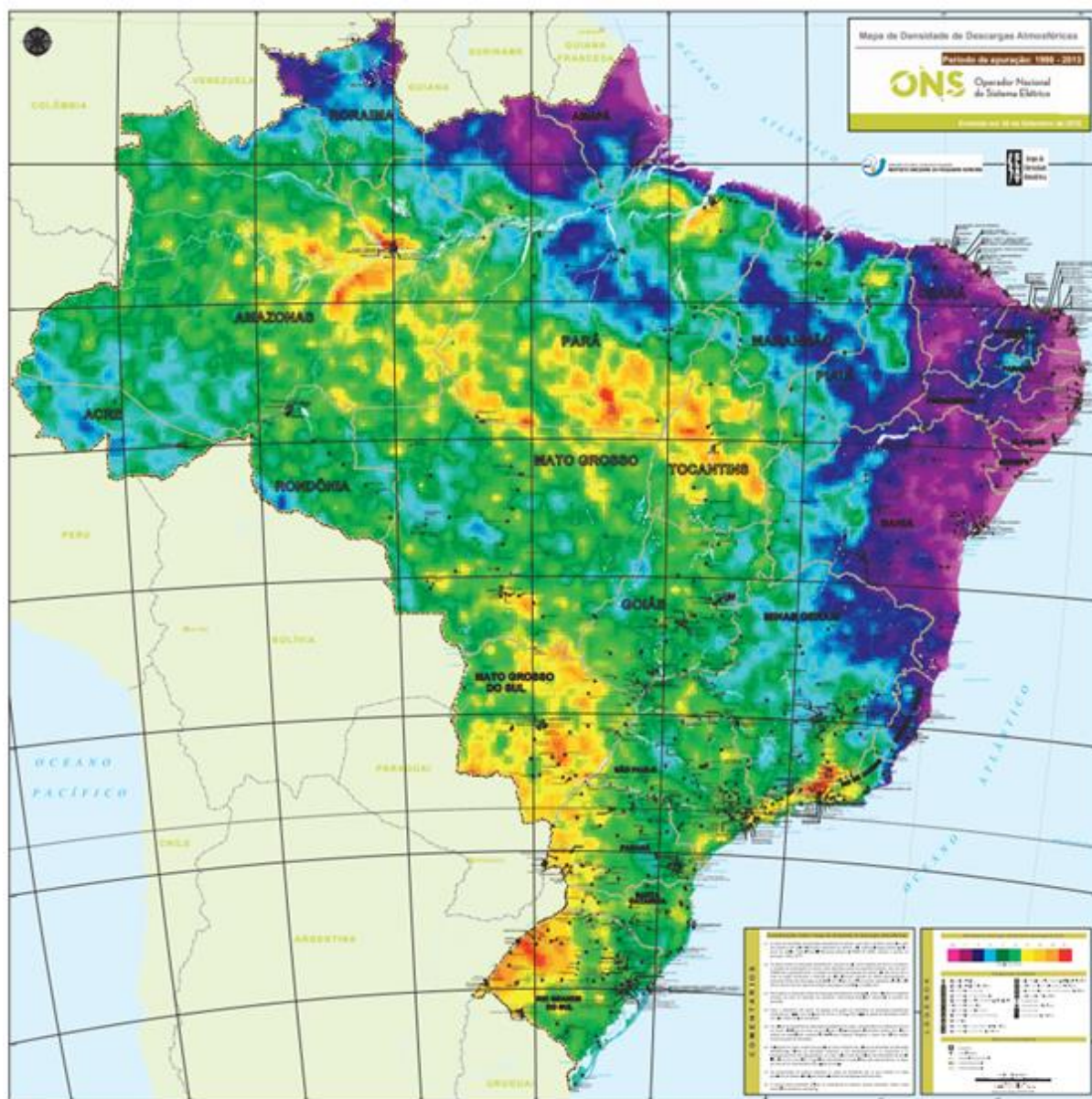
2.3. PRINCIPAIS PROBLEMAS NAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

2.3.1. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

As descargas atmosféricas são responsáveis por um grande número de interrupções nas linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica, além da queima de um número significativo de transformadores de distribuição. No Brasil, aproximadamente 70% dos desligamentos na transmissão e 40% na distribuição são provocados por raios. Dos transformadores que são queimados, cerca de 40% são danificados por raios. Uma descarga atmosférica é causada quando uma corrente elétrica muito elevada parte para atmosfera com uma duração aproximada de meio segundo e uma trajetória de 5 a 10 km. Os desligamentos podem ocorrer através da descarga direta sobre uma fase da linha, causando um rompimento no isolamento e um curto-circuito na forma de um arco visível entre o cabo terra e a fase. Também pode ocorrer pelo impacto direto da descarga sobre a torre ou o cabo terra, produzindo então um arco entre ele e a fase. Este caso ocorre normalmente quando o cabo guarda ou a torre não estão aterrados devidamente. [10]

De acordo com a resolução 007/2012 da ANEEL, o número de desligamentos das linhas de transmissão por 100 km por ano deve ser menor ou igual a 1 para linhas com tensões superiores a 345 kV e menor ou igual a 2 para linhas de 230 kV.

O mapa da figura 2 mostra o índice de descargas atmosféricas no Brasil em cada região.



Densidade de descargas atmosféricas (descargas/km²/ano)

0,5 1 3 5 7 9 11 13 15 17



Escala de Cores

Figura 2 - Mapa de densidade de descargas atmosféricas (1998-2013).

Fonte: [19]

2.3.2. CURTO CIRCUITO

Um curto-circuito ocorre quando uma corrente muito alta, acima do normal, percorre um circuito em consequência de uma redução inesperada da impedância. Ele pode causar incêndios, explosões, faíscas, entre outros problemas.

Os curtos-circuitos podem ser trifásicos, bifásicos, bifásicos à terra ou monofásicos à terra. Este último é o mais comum, com cerca de 63% de ocorrência. [16]

Os curtos-circuitos são classificados em permanentes ou temporários. Como o próprio nome diz, o curto-circuito permanente é irreversível espontaneamente, ou seja, necessita de um conserto na rede para que esta volte a operar. Já o curto-circuito temporário é aquele que ocorre sem haver defeito na rede. Neste último caso, o sistema de proteção atua e logo após o sistema elétrico poderá ser reestabelecido normalmente. Vários fatores causam este tipo de curto, tais como pássaros, vento, galhos de árvore, salinidade, umidade, entre outros. [16]

3. CABOS PARA-RAIOS

O cabo para-raios é um condutor instalado no topo da linha de transmissão e conectado à terra, como mostra a figura 3. Esses cabos possuem como função principal a proteção das fases de uma linha de transmissão contra descargas atmosféricas, visto que na ausência dos mesmos, as descargas atingiram diretamente os condutores fase, ocasionando sobretensões não suportadas pelas linhas. Infelizmente existem situações em que uma descarga pode atingir os condutores fase mesmo havendo cabo para-raios, o que caracteriza uma falha de blindagem.

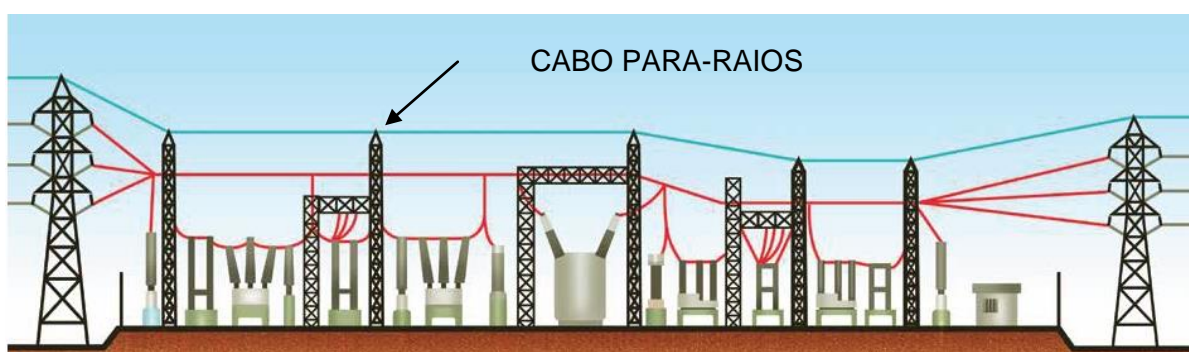


Figura 3 - Sistema de potência para-raios.
Fonte: ADAPTADO. [1]

3.1. CABO OPGW

Os cabos OPGW (Optical Ground Wire), ou cabos guarda como também são conhecidos, são cabos para-raios de cobertura, usados em linhas aéreas de transmissão de energia elétrica, contendo fibras ópticas em seu interior, capazes de transmitir altas taxas de dados.

Esses cabos são utilizados para duas finalidades principais:

- Proteção das linhas aéreas de transmissão contra descargas elétricas atmosféricas;

- Conexão de alta velocidade e qualidade de transmissão de dados.

O cabo OPGW é composto por um núcleo dielétrico (onde estão inseridas as fibras ópticas imersas numa geleia, para proteção contra umidade), um tubo (de alumínio, aço inox ou plástico) para proteção mecânica do conjunto de fibras e uma armação do cabo formada por fios condutores, como ilustra a figura 4. Esta armação geralmente é formada por fios metálicos, do tipo aço galvanizado, aço aluminizado ou liga de alumínio.



Figura 4 - Armação do cabo OPGW.
Fonte: [14]

3.2. COMPOSIÇÃO DOS CABOS OPGW

Os materiais que compõem os cabos OPGW devem satisfazer às devidas especificações elétricas e mecânicas, além de proteger as fibras ópticas contidas no interior destes cabos, impedindo a alteração do seu desempenho no momento em que o OPGW for submetido a diversas ações mecânicas e elétricas. Esses materiais devem ser resistentes ou protegidos durante a vida útil do cabo contra ações de agentes ambientais, como corrosão. [2]

Um cabo OPGW pode ser representado de forma ainda mais completa, como mostra a figura 5. As fibras ópticas constituídas no núcleo do cabo são revestidas em acrilato e posicionadas em tubos termoplásticos preenchidas com um gel não condutor que protege contra ação de umidade. [15]

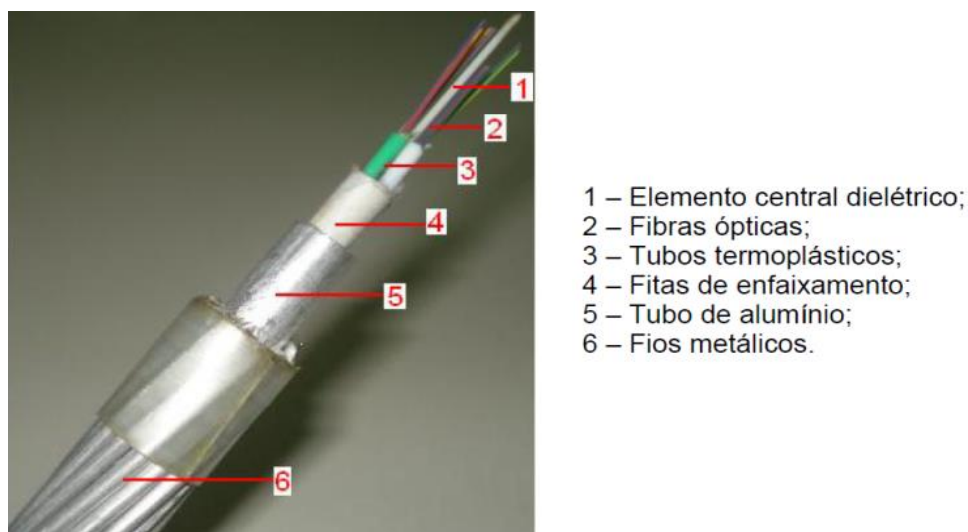


Figura 5 - Estrutura de um cabo OPGW.

Fonte: [15]

Estes tubos termoplásticos posicionam-se em volta de um elemento central dielétrico que oferece condições para a conformação geométrica do cabo. Este elemento possui um enfaixamento que protege as fibras de ações térmicas. O cabo OPGW ainda é formado por um tubo de alumínio que protege as fibras ópticas e pela armação do cabo. Esta armação pode ser de aço aluminizado, alumínio-liga ou aço galvanizado. Muita das vezes a armação do cabo pode ser constituída por mais de um tipo de material.

O grau de flexibilidade do cabo varia conforme o número de fios condutores. A flexibilidade depende da secção total do condutor e do diâmetro do fio. Ela será maior quanto maior for a quantidade de fios condutores. [22]

As fibras contidas no interior dos cabos OPGW podem possuir emendas. Para isto é utilizada uma caixa de emenda. Essa caixa é um dispositivo que abriga as fibras ópticas de cabos OPGW após a emenda ou fusão das mesmas. Esta caixa normalmente é fixada nas torres, nos pórticos de subestações ou postes da linha de transmissão ou subtransmissão.

Os cabos OPGW podem ser classificados quanto ao número de fibras ópticas em seu interior. Podem ser monofibras ou multifibras.

- Monofibras: são aqueles constituídos por uma única fibra óptica em seu núcleo. Os cabos monofibras são muito utilizados principalmente em sistemas de comunicação unidirecional e são responsáveis por conectar o componente transmissor ou receptor aos cabos multifibras; [20]
- Multifibras: são constituídos por várias fibras ópticas em seu núcleo. Esses cabos são utilizados como suporte de comunicação efetivo nas redes de telecomunicações. [20]

3.3.FIBRA ÓPTICA

A fibra óptica é um dos canais de comunicação mais eficientes atualmente, pois trafegam dados livres de interferências eletromagnéticas. A infraestrutura onde se encontram as fibras ópticas instaladas pode ser subterrânea, através de dutos enterrados; aérea, como em postes; ou até mesmo subaquática, no fundo de rios e de oceanos. [23]

Antigamente, eram utilizados cabos com 6 ou 8 fibras, mas, devido à necessidade do transporte em massa de informações, são utilizados atualmente 36 ou mais fibras, que transmitem dados em todo país. Em abril de 1977, a primeira fibra óptica brasileira foi instalada em uma torre de dois metros de altura do Instituto de Física Gleb Wataghin (IFGW), da Universidade Estadual de Campinas. [7]

A introdução da fibra óptica no interior dos cabos para-raios contribuiu de forma significativa para a redução dos custos da comunicação. Por isso é crescente e notória a utilização dos cabos para-raios com fibra óptica (OPGW) nas linhas de transmissão. [8]

As fibras ópticas são constituídas de fios de vidro de pureza e transparência altíssimas, ao qual em seu interior, trafegam ondas luminosas para transmissão de dados. São utilizados para tal, conversores ópticos-elétricos e elétrico-ópticos para fazer a leitura dos dados transmitidos pelas fibras ópticas.

A figura 6 ilustra a estrutura de uma fibra óptica contendo revestimento primário, casca e núcleo. O revestimento primário é uma camada plástica que protege a fibra contra danos e umidade, enquanto a casca é um material óptico em torno do núcleo, cuja função é provocar a reflexão total da luz. Por fim, tem-se também um centro de vidro fino da fibra onde a luz trafega chamado de núcleo.

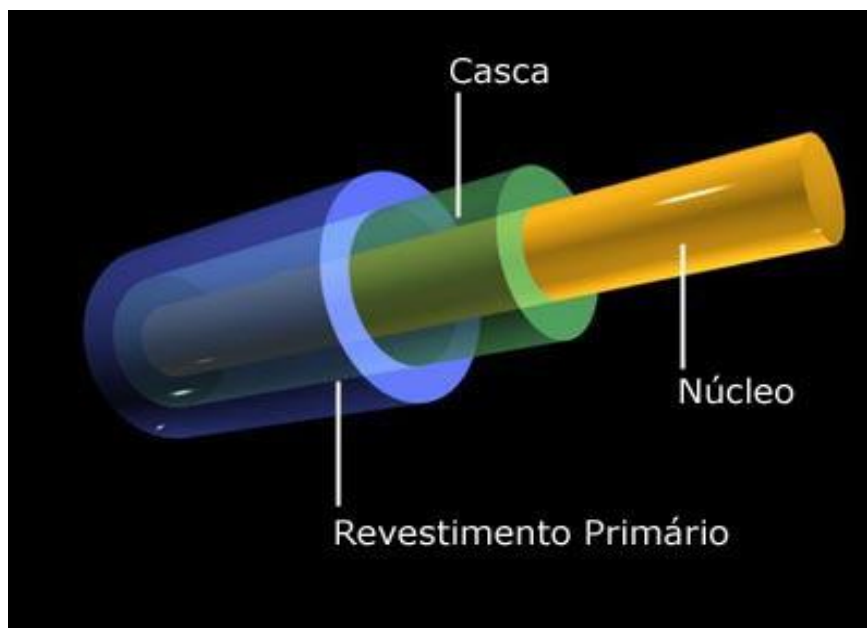


Figura 6 - Estrutura da Fibra Óptica.

Fonte: [17]

As fibras ópticas não sofrem interferência eletromagnética externa e, por isso, são muito bem utilizadas em ambientes com alta exposição a campos elétricos e magnéticos, tais como em subestações e linhas de transmissão.

Algumas propriedades são essenciais no contexto da utilização das fibras ópticas como via de transporte em comunicações, tais como:

- Atenuação, definida como a perda de potência do sinal ao longo da distância percorrida. Pode ser provocada pela absorção do material, irradiação devido a curvaturas ou até mesmo micro curvaturas da fibra, espalhamento pelo material, acoplamento errado no início ou no final da fibra, e atenuação nas emendas ou conexões; [12]

- Ampla capacidade de transmissão de dados;
- Menor peso e dimensão dos cabos utilizados como canal de transmissão (exceto em linhas de transmissão devido ao maior peso atribuído da camada externa do cabo);
- Condutividade elétrica nula, devido a elevadíssima resistência elétrica do vidro;
- Imunidade às interferências eletromagnéticas.

As fibras ópticas são classificadas em multimodo ou monomodo de acordo com o diâmetro do núcleo. As fibras do tipo monomodo possuem o diâmetro bem menor que nas fibras multimodo.

3.3.1. FIBRAS MULTIMODO (MM)

As fibras multimodo asseguram a emissão de vários comprimentos de onda simultaneamente, como ilustra a figura 7. Este tipo de fibra normalmente é utilizada para transmissões de curtas distâncias. As fibras multimodo são mais baratas e normalmente utilizam LED para sua emissão. [21]

O diâmetro deste tipo de fibra óptica varia de 50 μm a 100 μm . Nas fibras multimodo podem trafegar vários feixes de luz simultaneamente e sua faixa de transmissão é de, aproximadamente, 2 km.

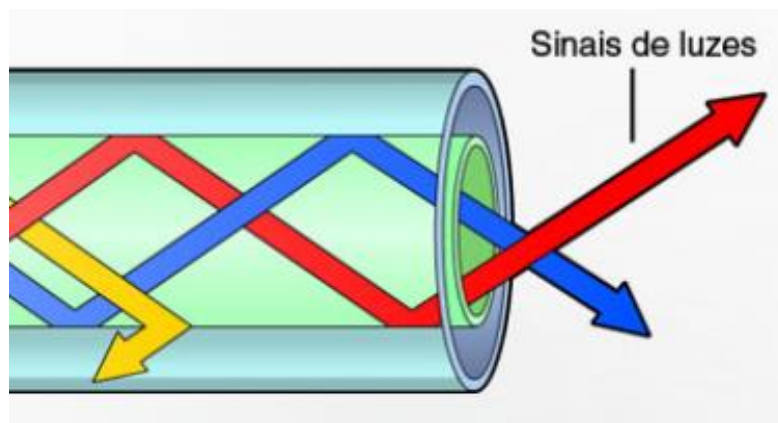


Figura 7 - Fibra Óptica Multimodo.
Fonte: [21]

3.3.2. FIBRAS MONOMODO (SM)

As fibras monomodo só trabalham com um único modo, faixa estreita de comprimento de onda, ou seja, uma única fonte de luz é responsável por enviar as informações por longas distâncias, como ilustra a figura 8. Este tipo apresenta menos dispersões por isso transmitem dados em maiores distâncias. As fibras monomodo possuem uma largura de banda que garante maiores velocidades nas trocas de informação. Para este tipo a emissão da luz é feita normalmente por *laser*. [21]

Este tipo de fibra tem um diâmetro muito pequeno, em torno de 8 μm e 9 μm . Nas fibras monomodo um único feixe de luz é transmitido, e sua vantagem é a possibilidade de transmissão de sinais (sem regeneração) de até 120 km.

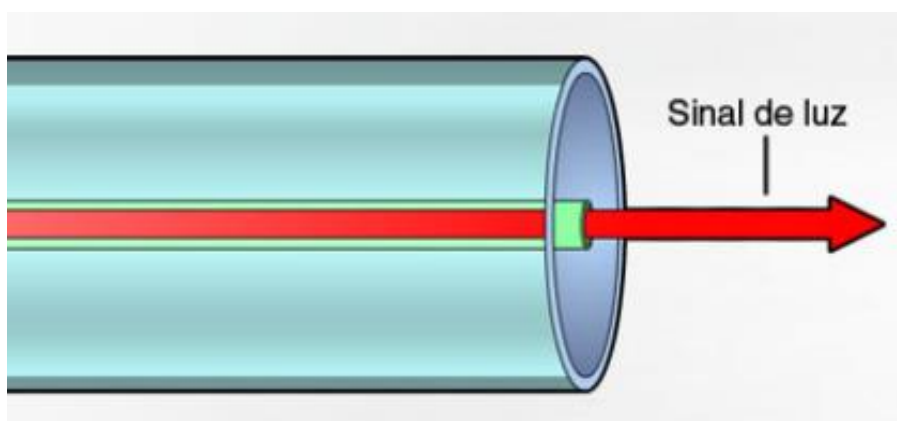


Figura 8 - Fibra Óptica Monomodo.
Fonte: [21]

É importante ressaltar que os cabos para-raios do tipo OPGW operam com fibras ópticas do tipo monomodo para transmissão de dados, pois as fibras multimodo apresentam elevadas perdas (alta atenuação) no sinal óptico ao percorrerem longas distâncias.

3.4. PRINCIPAIS CABOS OPGW

Os cabos para-raios mais utilizados em linhas de transmissão aéreas são divididos em aço Galvanizado e aço revestido de Alumínio (*Alumoweld*).

- Aço Galvanizado: o aço tem por finalidade dar suporte mecânico. Cabos com somente este tipo de material não são muito resistentes a ambientes corrosivos. Possuem baixa capacidade de curto-circuito e alta resistência a descargas atmosféricas; [5]
- Liga de Alumínio: os cabos de liga de alumínio possuem alta capacidade de corrente de curto-circuito, porém não suportam descargas atmosféricas. Por isso, no Brasil, cabos com apenas ligas de alumínio não são muito utilizados. O alumínio tem objetivo de aumentar a condutividade do cabo; [14]
- Aço-Alumínio: este tipo de cabo é constituído por um tubo de aço inoxidável contendo em seu interior um tubo de alumínio. Conveniente para ambientes altamente corrosivos, como por exemplo, no litoral onde há grande ação de maresia. São altamente resistentes quanto a descargas atmosféricas. [14]

4. ENSAIOS EM CABOS OPGW NO LABORATÓRIO

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é uma instituição privada, fundada em 1940 e é responsável pela publicação das Normas Brasileiras. A ABNT também avalia conformidades e possui programas para certificação de produtos.

Os cabos OPGW para serem comercializados devem estar em conformidade com a norma ABNT NBR 14074:2015 sob o título “Cabos para-raios com fibras ópticas (OPGW) para linhas aéreas de transmissão – Requisitos e métodos de ensaio”.

Assim sendo, os cabos fabricados, comercializados e utilizados em território nacional precisam seguir esta norma que define os métodos de ensaios e os requisitos técnicos mínimos para a produção dos cabos OPGW.

A norma ressalta dois requisitos essenciais dos cabos OPGW que são os ensaios de curto-circuito e descarga atmosférica, junto com os respectivos requisitos mínimos necessários dos cabos, as formas de preparo e execução dos testes e as metodologias de ensaios.

Serão apresentados os ensaios de descargas atmosféricas e curto-circuito, porém deve-se deixar claro que existem outros ensaios exigidos pela ABNT. Esses ensaios podem ser de requisitos ópticos, mecânicos, ambientais, elétricos e dimensionais.

A norma utilizada determina que devem ser ensaiados 100 metros de fibra, porém, a área de ensaio do laboratório onde são realizados os ensaios não possui comprimento suficiente, logo são feitas emendas nas fibras para que se atinja os 100 metros exigidos. Esta técnica é permitida pela norma.

Para a realização de ambos ensaios, utiliza-se o SAD (sistema de aquisição de dados) que permite a monitoração visual dos gráficos de temperatura e leitura de corrente, tensão, etc. Há também a fonte emissora de luz (*Stabilized Light source*) e o medidor de potência óptica (*Optical Power Meter*) que mede a variação de atenuação na fibra (em dB/km), conforme as figuras 9 e 10 respectivamente.

Ao serem concluídos ambos os ensaios, é elaborado um relatório descrevendo todo procedimento e resultados obtidos.



Figura 9 - Fonte emissora de luz.
Fonte: Autora (2018).



Figura 10 - Medidor de potência óptica.
Fonte: Autora (2018).

4.1. ENSAIOS DE CURTO-CIRCUITO

O ensaio de curto-circuito tem como objetivo analisar o comportamento óptico e mecânico do cabo OPGW quando submetido á passagem de corrente de curto-circuito, e ao conseqüente aumento de temperatura sofrido.

Muita das vezes o fabricante fornece a capacidade de curto-circuito do cabo através da equação 4.1.a.

$$\text{Capacidade de curto-circuito} = I_{cc}^2 \cdot t \quad (4.1.a)$$

Onde:

I_{cc} = corrente de curto-circuito em quilo ampér (kA);

t = Tempo de ensaio em segundos (s).

4.1.1. ARRANJO

Para a realização do ensaio de curto-circuito, o laboratório de alta corrente utiliza na entrada três transformadores monofásicos rebaixadores, com relação de transformação de 138 kV para 4,16 kV, e também na saída utilizam três transformadores monofásico rebaixadores, que através dos "TAPS" conseguem obter uma relação de transformação de 100 V a 2kV, como ilustra a figura 11. Geralmente, a tensão usada para a realização do ensaio é 412,5 V.

A saída dos transformadores é ligada em paralelo para que possa atingir níveis altos de corrente, mas caso a corrente do ensaio seja baixa, é usado apenas um transformador na saída. O objeto sob teste, fica conectado na saída dos transformadores ligados em paralelo.

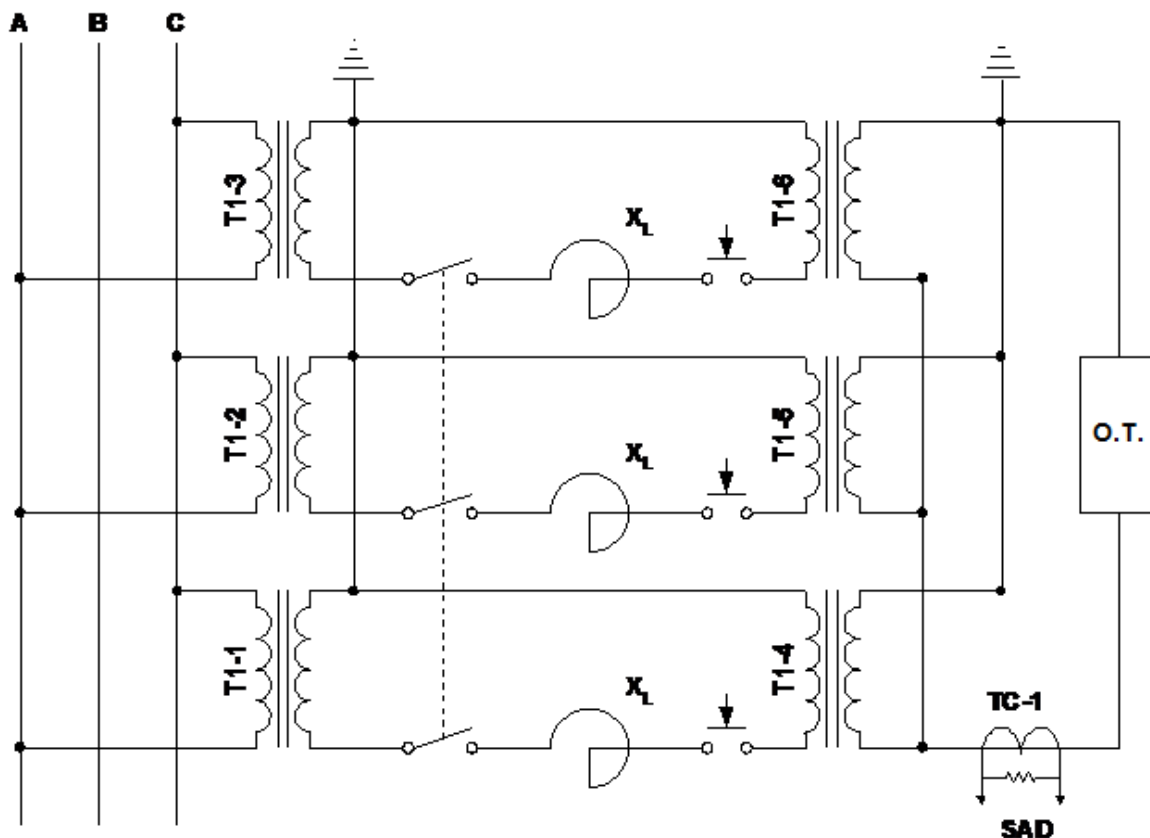


Figura 11 - Diagrama trifilar do arranjo para ensaios de curto-circuito.
Fonte: CEPEL.

LEGENDA:

T1-1/T1-2/T1-3 - Transformadores 138/4,16 kV \pm 20%
6,93 MVA permanente
39,6 MVA curto-circuito

T1-4/T1-5/T1-6 - Transformadores 4,16/0,412 kV
6,93 MVA permanente

- X_L - Reatores limitadores de corrente ajustáveis a cada ensaio;
- TC-1 - Transformador de corrente de relação 50000-5 A, com derivador de 0,5 Ω ;
- O.T. - Objeto sob ensaio;
- SAD - Sistema de aquisição de dados.

Para a execução do ensaio utilizam-se materiais de fixação iguais aos utilizados na linha de transmissão, a fim de se obter uma situação mais próxima ao real possível:

- O comprimento mínimo do vão de ensaio deverá ser de 10 m;
- Os equipamentos de medição óptica não poderão estar expostos às variações de temperatura superiores a ± 2 °C;
- Termopares que serão utilizados para o monitoramento da temperatura estarão afastados 0,5 m, localizados em pontos próximos ao centro do vão o qual será ensaiado;
- O corpo de prova estará fixado com seus dispositivos e suportes isolantes, de tal forma a evitar que haja transferência da corrente de curto-circuito para fora do vão de ensaio;
- Através do dinamômetro, o cabo deverá ser submetido a uma tração conforme especificação do projeto do cabo e havendo ausência desta informação, a carga adotada deverá ser de 2% da Resistência Mecânica Calculada (RMC).

O esquema de montagem é ilustrado na figura 12.

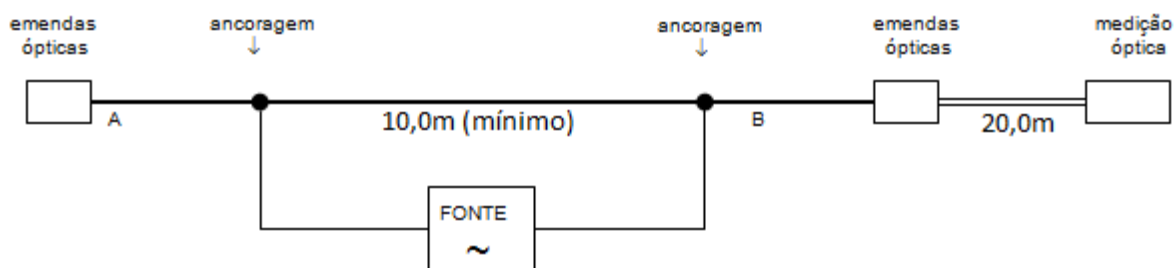


Figura 12 - Arranjo unifilar de curto-circuito.

Fonte: ADAPTADO. [4]

A figura 13 mostra o arranjo de ensaio já montado no laboratório AP1 (Alta Corrente) para a realização do ensaio de curto-circuito.

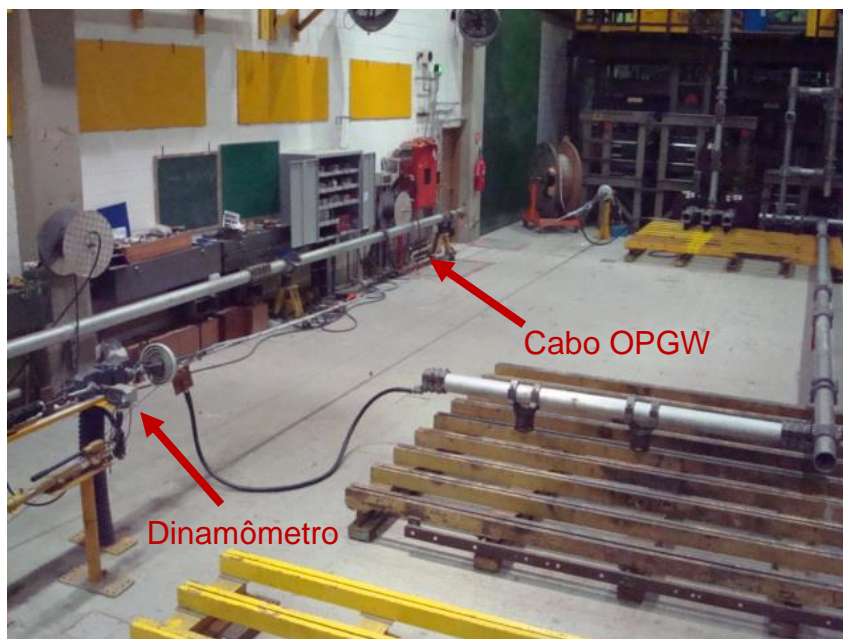


Figura 13 - Arranjo para o ensaio de curto-circuito.
Fonte: Autora (2018).

4.1.2. PROCEDIMENTO

O ensaio é iniciado aplicando-se um pulso de corrente (a mesma fornecida pelo fabricante) com uma duração menor de tempo para que a temperatura na superfície externa do cabo aqueça até aproximadamente 50 °C, conforme exigido pela norma.

Esta é uma pré-aplicação para que o ensaio comece a ser realmente realizado. A temperatura do cabo excede 50 °C, portanto aguarda-se até a temperatura atingir o exigido e inicia-se a primeira aplicação. Após iniciar a primeira aplicação o cabo atinge uma temperatura elevada

Monitora-se então a temperatura máxima que o cabo atingiu, não podendo exceder a temperatura máxima especificada para o mesmo, e também a atenuação da fibra conforme a Norma ABNT NBR 14074:2015. No decorrer do ensaio, qualquer variação que ocorra no sinal óptico, em relação ao nível de referência adotado no início do teste, será encarada como variação da atenuação da fibra.

Cada camada do cabo contém um termopar que irá verificar as temperaturas atingidas. Deve-se esperar o cabo atingir novamente os 50 °C para fazer a próxima aplicação. São aplicados 10 pulsos de corrente, com intervalo entre eles necessário para que a temperatura na superfície externa do cabo retorne à faixa de 50 °C a 55 °C. Se o cabo atender aos critérios de aprovação da norma durante as 10 aplicações consecutivas então ele está aprovado neste ensaio.

Conforme a norma citada anteriormente, após o ensaio, alguns requisitos devem ser atendidos para que haja a aprovação do cabo OPGW, não podendo apresentar:

- Variação do coeficiente de atenuação superior a 0,2 dB/km de fibra ensaiada, verificada através do medidor óptico;
- Engaiolamento ou quebra de qualquer fio externo, ou, ainda, após a desmontagem do cabo ensaiado, distorção de qualquer de seus elementos componentes que possa ser atribuída ao ensaio em si e não somente à montagem ou aos acessórios utilizados e que possa provocar alteração do bom desempenho do produto, verificada por inspeção visual;
- Temperatura, em qualquer ponto monitorado, superior à informada pelo fornecedor, calculada em função do nível de curto-circuito e do sistema de proteção da linha, fornecidos pelo comprador, verificada com a utilização de termopares;
- Seus componentes poliméricos devem apresentar tempo de indução oxidativa inferior a 10 minutos para o composto de enchimento; temperatura de início de decomposição, após fusão, inferior a 210 °C, para compostos de enchimento, tubetes e elementos de proteção; temperatura de fusão inferior a 180 °C, para tubetes e elementos de proteção; trincas, fissuras, bolhas, rugas ou alteração visual significativa da cor e alterações em suas dimensões superiores a 10%. Este último item é verificado em laboratórios químicos especializados.

O fluxograma da figura 14 ilustra o passo a passo do ensaio de curto-circuito em cabos OPGW.

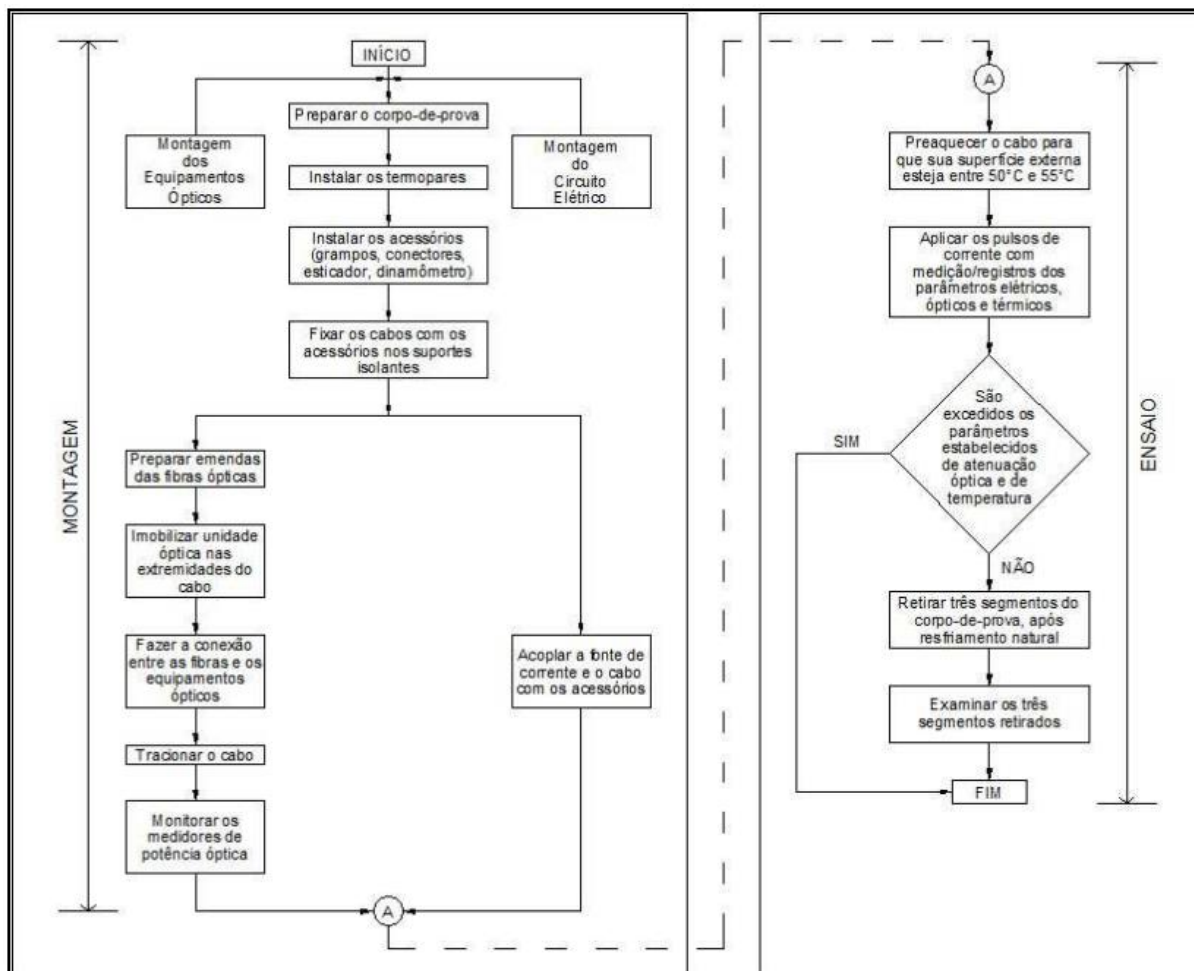


Figura 14 - Fluxograma para realização de ensaio de curto-circuito.

Fonte: [4]

As figuras 15 e 16 mostram as formas de ondas para o ensaio de curto-circuito com assimetria negativa e positiva, respectivamente.

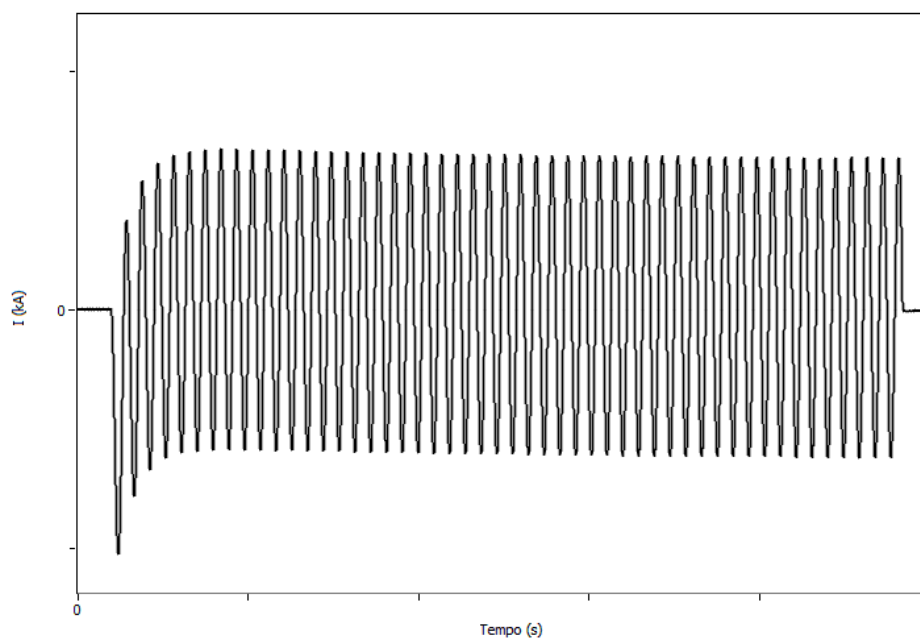


Figura 15 - Forma de onda do ensaio de curto-circuito, com assimetria negativa.
Fonte: CEPEL (2017).

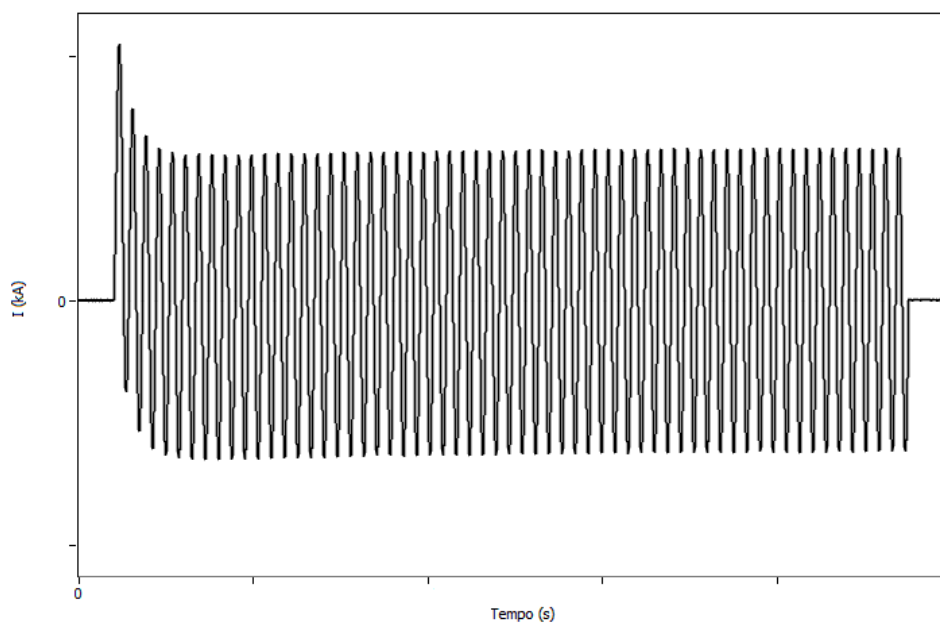


Figura 16 - Forma de onda do ensaio de curto-circuito, com assimetria positiva.
Fonte: CEPEL (2017).

4.2. ENSAIOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

As sobretensões atmosféricas, chamadas de descargas atmosféricas, são fenômenos estudados para o desempenho de linhas e subestações, pois também se responsabilizam pelas interrupções de energia elétrica e implicam prejuízos para as concessionárias e consumidores, causando redução nos níveis de confiabilidade de rede.

A simulação da descarga atmosférica durante o ensaio no cabo OPGW será representada por apenas umas de suas componentes, que é denominada corrente de continuidade, sendo esta a componente responsável pelos danos ocasionados nos cabos.

Assim como no ensaio de curto-circuito, para a fixação dos cabos durante o ensaio, também são utilizados os mesmos materiais encontrados nas linhas de transmissão, a fim de que seja simulada uma situação mais próxima do real possível além dos equipamentos para efetuar e registrar a atenuação óptica durante o ensaio.

4.2.1. ARRANJO

Para a realização do ensaio de descarga atmosférica, o laboratório de alta corrente utiliza na entrada três transformadores monofásicos rebaixadores, com relação de transformação de 138 kV para 4,16 kV, e também na saída utilizam três transformadores monofásico rebaixadores, que através dos “TAPS” conseguem obter uma relação de transformação de 100 V a 2 kV, como ilustra a figura 17.

Os transformadores na saída são ligados em delta para que possam ser conectados no retificador de corrente contínua trifásico, cuja tensão de entrada é 400 V. Por tanto, a tensão de saída dos transformadores é 400 V para que possam ser conectados na entrada do retificador. O objeto sob teste fica conectado na saída do retificador.

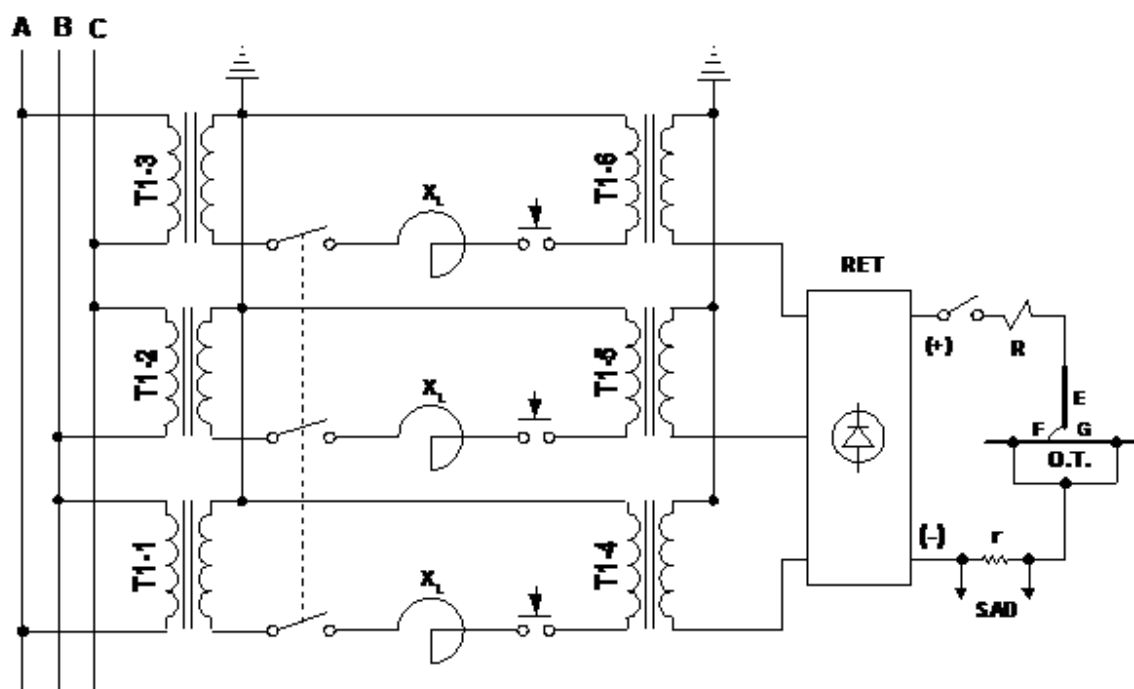


Figura 17 - Diagrama trifilar do arranjo para ensaios de descarga atmosférica.
Fonte: CEPEL (2017).

LEGENDA:

T1-1/T1-2/T1-3 - Transformadores 138/4,16 kV \pm 20%

6,93 MVA permanente

39,6 MVA curto-circuito

T1-4/T1-5/T1-6 - Transformadores 4,16/0,412 kV

6,93 MVA permanente

- X_L - Reatores com núcleo de ar ajustáveis a cada ensaio;
- RET - Ponte retificadora trifásica de onda completa;
(6 pulsos – $V_{cc} = 1,35 \times V_{ca}$ entre fases)
- R - Resistores ajustáveis a cada ensaio;
- r - Derivador (“shunt”) de 17,5 m Ω ;
- E - Eletrodo (vergalhão de aço-carbono 1020 com diâmetro de 12,7 mm);
- F - Fio-fusível de cobre nu com diâmetro de 0,17 mm;

- G - Espaçamento (“gap”) de 6 cm;
- O.T. - Objeto sob ensaio;
- SAD - Sistema de aquisição de dados.

O esquema de montagem para o ensaio de descarga atmosférica está representado nas figuras 18 e 19, e pode ser encontrado melhor detalhado na norma ABNT NBR 14074:2015. Os materiais que são utilizados para a montagem do ensaio são os mesmos utilizados nas linhas de transmissão, sendo assim obtém-se uma situação mais próxima possível do real.

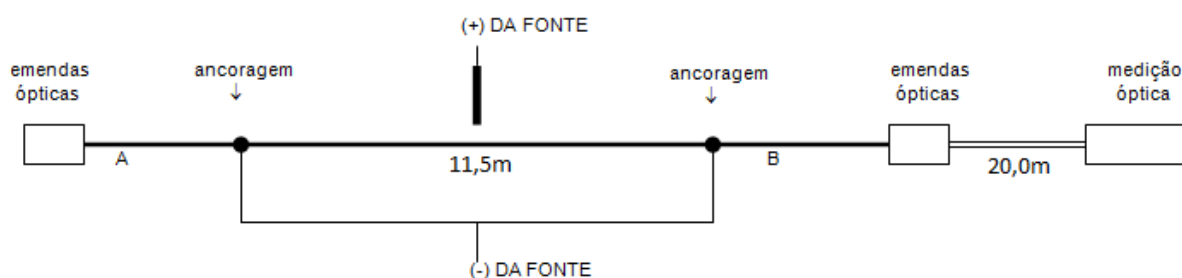


Figura 18 - Arranjo unifilar de descarga atmosférica.
Fonte: ADAPTADO. [4]

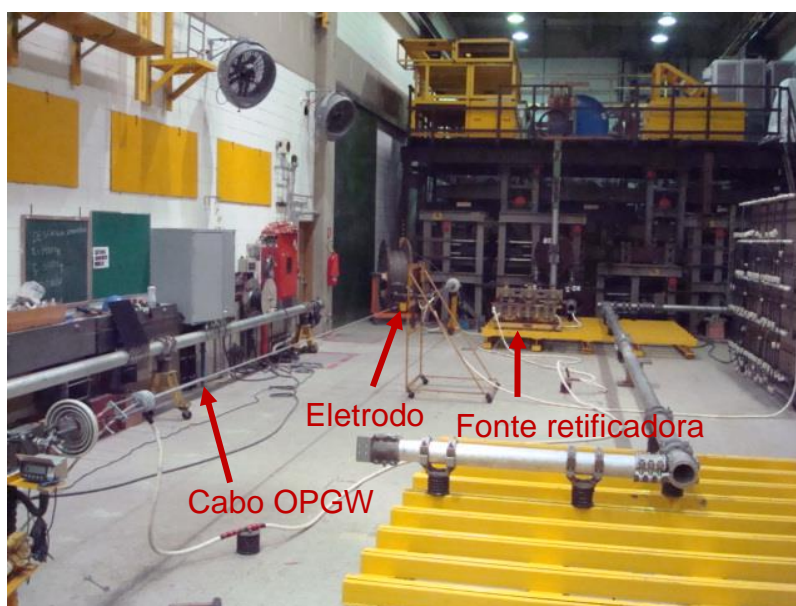


Figura 19 - Arranjo para o ensaio de descarga atmosférica.
Fonte: Autora (2018).

4.2.2. PROCEDIMENTO

O ensaio de descarga atmosférica ocorre basicamente com a aplicação de uma descarga em um ponto de impacto. Esta descarga será realizada por um eletrodo que será instalado no meio do vão sob ensaio, segundo a NBR 14074:2015, posicionando-o em um plano perpendicular ao eixo longitudinal do cabo, formando um ângulo de 45°, como mostra a figura 20, com a horizontal e com um espaçamento (*gap*) de 6 cm com uma variação de +/- 0,5 cm.

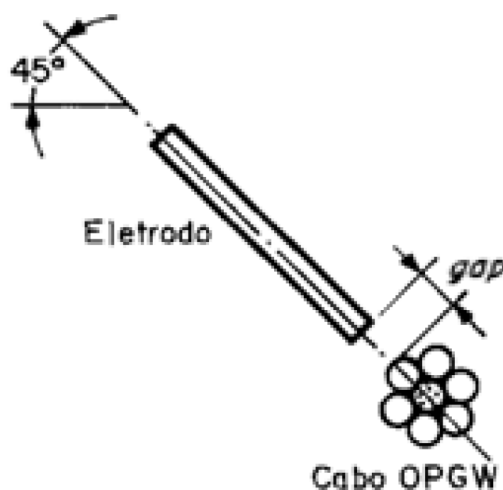


Figura 20 - Eletrodo com ângulo de 45°.

Fonte: [4]

Para conectar o eletrodo ao local onde será o ponto de impacto da descarga, utiliza-se um fio de cobre nu, com diâmetro máximo de 0,25 mm. A fonte de corrente contínua deverá fornecer a corrente de continuidade, com intensidade e duração especificadas no projeto do cabo OPGW. A tração submetida ao cabo através do dinamômetro deverá ser especificada pelo projeto do mesmo, porém caso isso não ocorra a carga empregada será 15% da Resistência Mecânica Calculada (RMC) podendo ter uma variação de 1% para mais ou para menos. A corrente de ensaio será de acordo com a classe de ensaio pré-definida. Essas classes estão representadas na tabela 1.

Tabela 1 - Classe de ensaio.

| Classe | A | B | C | D |
|---|----------|----------|----------|----------|
| Corrente elétrica - Valor médio (A) | 100 | 200 | 300 | 400 |
| Tempo de aplicação (μ s) | 500 | 500 | 500 | 500 |
| Carga elétrica (Coulomb) | 50 | 100 | 150 | 200 |
| Os valores acima têm tolerância de $\pm 10\%$. | | | | |
| O sentido da corrente deve ser do eletrodo para o corpo de prova. | | | | |

Fonte: [4]

Durante o ensaio, devem-se aplicar cinco descargas em cinco corpos de prova distintos. Após a aplicação da descarga, deve-se registrar a carga de tração remanescente através do dinamômetro, efetuar inspeção visual nos elementos constituintes do corpo de prova e registrar se houve ocorrência de danos. Deve-se também submeter o corpo de prova à tração, com uma taxa de 2500 N/min, até o valor da carga limite de ensaio especificado e permanecendo assim por 3 minutos. A carga final que o cabo deverá ser submetido equivale a 40% da RMC do cabo. Caso haja atenuação óptica das fibras deve-se registrar no relatório final do ensaio.

Após o término do ensaio, o cabo será reprovado caso:

- Apresentar danos nos elementos estruturais ou elementos de proteção, tais que exponham a unidade óptica ou as fibras ópticas aos agentes ambientais (como umidade) ou que possam comprometer o desempenho das fibras ópticas;
- Não atingir a carga limite de ensaio;
- Apresentar variação de atenuação óptica superior aos valores estabelecidos na tabela 2, conforme ABNT NBR 14074:2015, representada abaixo, na carga máxima de projeto.

Tabela 2 - Acréscimo ou variação de atenuação

| Tipo de fibra óptica | Comprimento de onda | | Acréscimo ou variação (máx.) |
|----------------------|---------------------|--------------|------------------------------|
| | de operação nm | de medida nm | de atenuação dB |
| Multimodo | 850/1300 | 1300 ± 20 | 0,2 |
| Monomodo | 1300/1550 | 1550 ± 20 | 0,1 |
| Monomodo | 1550 | 1550 ± 20 | 0,1 |

Fonte: Adaptado [3]

A norma ainda relata que caso ocorra falha em somente um corpo de prova, devem ser realizadas mais duas aplicações em dois novos corpos de prova. Se houver qualquer falha em algum desses dois novos corpos de prova, o cabo deverá então ser reprovado.

Sobre o rompimento dos tentos, a norma não cita nada a respeito. Frequentemente o fabricante estipula o número máximo de tentos que poderá sofrer rompimento para que o cabo seja aprovado. Em alguns casos, o próprio laboratório adota que poderá romper até 40% dos tentos para que o cabo seja aprovado.

O fluxograma da figura 21 ilustra o passo a passo do ensaio de curto-circuito em cabos OPGW.

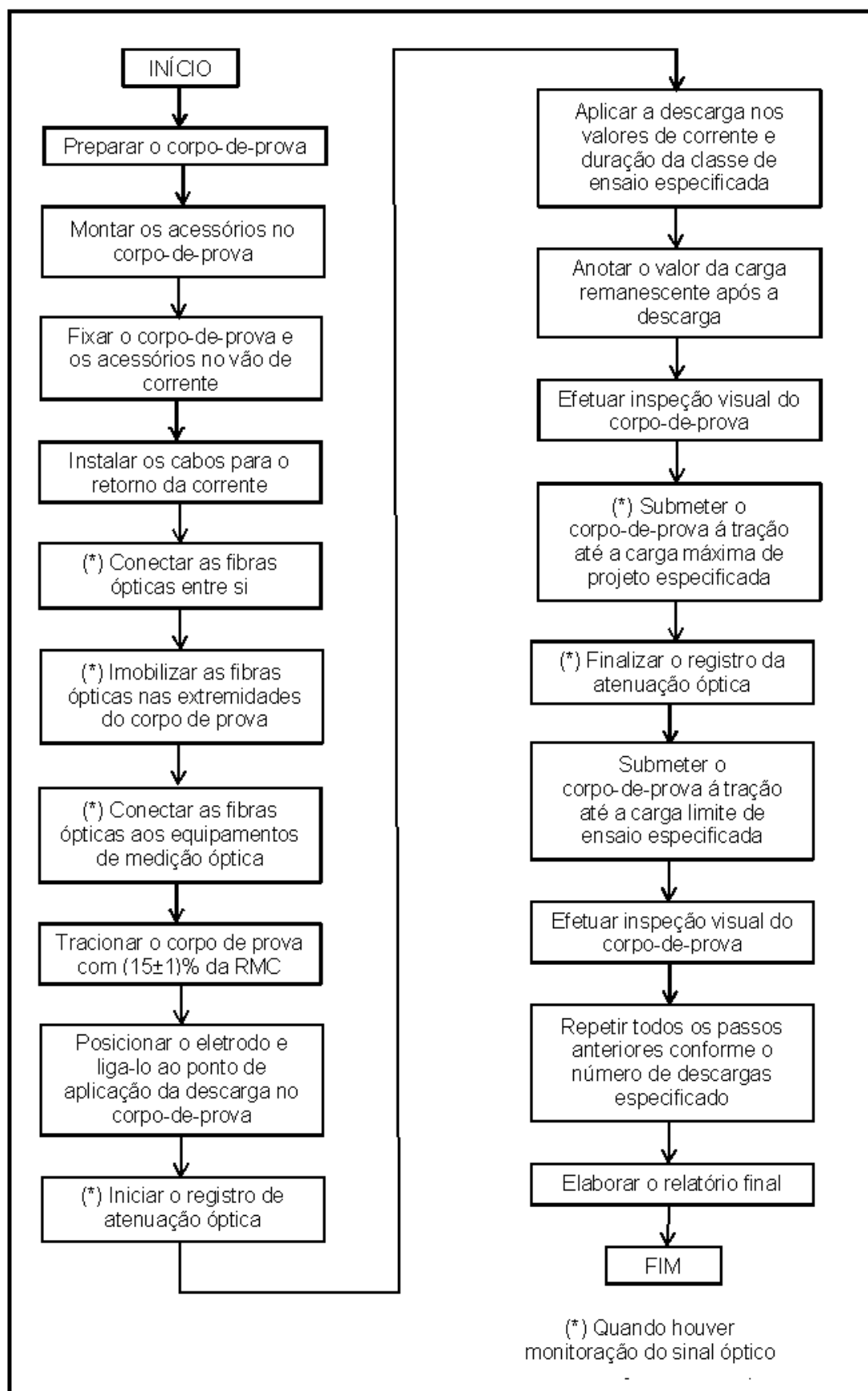


Figura 21 - Fluxograma para ensaio de descarga atmosférica
Fonte: Adaptado. [4]

A figura 22 mostra a forma de onda para o ensaio de descarga atmosférica.

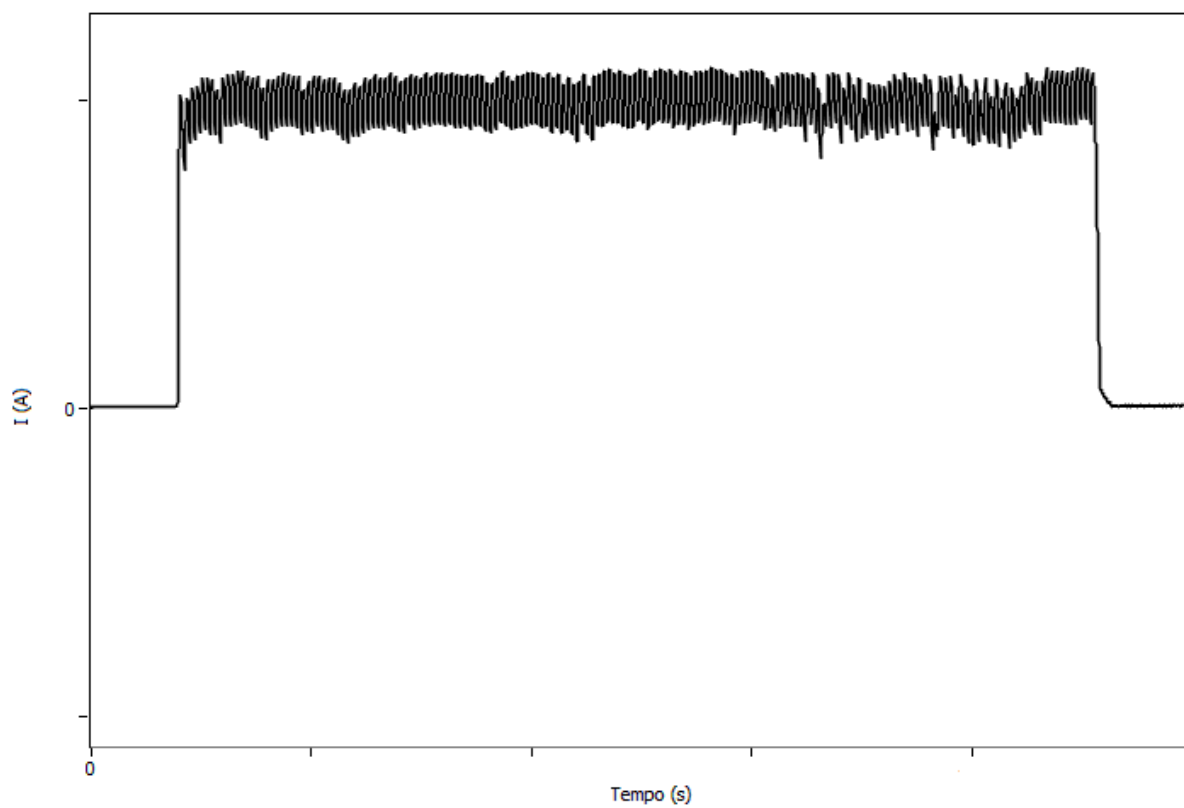


Figura 22 - Forma de onda do ensaio de descarga atmosférica.
Fonte: CEPEL (2017).

5. ESTUDO DE CASO

Um fabricante do cabo tinha uma demanda do desenvolvimento de um cabo OPGW que possuísse uma capacidade de curto circuito de 5,5 kA e um I^2t (capacidade de dissipação de energia em um determinado tempo) de 30 kA²s. Diante disto, foram alocadas horas de pesquisa para o desenvolvimento deste produto.

A capacidade de curto circuito citada já foi objeto de outros projetos da empresa. Entretanto, jamais foi obtida a capacidade desejada, pois a unidade óptica (tubo de aço inox revestido com alumínio) se rompia durante o ensaio curto circuito. Sendo assim, a empresa montou um grupo multidisciplinar, incluindo operadores, técnicos e engenheiros, que elencaram as possíveis ações que seriam passíveis para o aumento da capacidade de curto circuito mantendo as características de estrutura já citadas.

Os ensaios descritos a seguir foram realizados no laboratório de alta corrente do Centro de Pesquisa em Energia Elétrica (CEPEL). Foram necessários realizar 5 ensaios de curto-circuito no mesmo tipo de cabo, e de um mesmo fabricante.

5.1. CARACTERÍSTICAS NOMINAIS DO CABO

Para cada material que é usado na fabricação do cabo OPGW, existe sempre uma justificativa para sua seleção. Esta seleção ocorre com base nas características elétricas ou mecânicas do material usado. Como por exemplo, o aço e o alumínio usado na confecção do cabo OPGW, tendo como objetivo dar suporte mecânico e aumentar a condutividade do cabo, respectivamente.

Foi ensaiado uma amostra do cabo com 200 metros de comprimento, com as seguintes características declaradas pelo fabricante, representadas na tabela 3.

Tabela 3 - Características do cabo OPGW.

| | |
|--|---------|
| Número de fibras do núcleo óptico | 48 (SN) |
| Capacidade de curto-circuito (kA ² s) | 30 |
| Duração da corrente de curto-circuito (s) | 1 |
| Diâmetro total (mm) | 13,26 |
| Diâmetro externo do tubo de alumínio (mm) | 7,10 |
| Diâmetro interno do tubo de alumínio (mm) | 4,78 |
| Diâmetro externo do tubo de aço inox (mm) | 4,40 |
| Diâmetro interno do tubo de aço inox (mm) | 3,90 |
| Peso (kgf/km) | 690 |
| Variação da atenuação máxima (dB/km) | 0,13 |
| Resistência mecânica calculada RMC (kgF) | 9450 |
| Carga limite de ensaio (kgF) | 190 |
| Temperatura máxima especificada pelo fornecedor (°C) | 200 |

Fonte: Autora (2018).

5.2. ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO

Os ensaios de curto-circuito foram realizados segundo a norma ABNT NBR 17047:2015 e o arranjo para tal ensaio estão representados na figura 12 e 13. Os arranjos de ensaio, independente do cabo a ser ensaiado e do fabricante, são sempre iguais e de acordo com a norma ABNT NBR 14074:2015.

5.2.1. ENSAIO 1

Dentre as quatro primeiras aplicações de corrente de curto-circuito a temperatura máxima atingida pelo cabo foi de 130,9 °C, porém, na quinta aplicação o cabo se rompeu ultrapassando o valor de temperatura máxima determinada pelo fabricante, chegando a atingir 326,9 °C, conforme mostra a figura 23 e 24. Este cabo, portanto, foi reprovado no ensaio de curto-circuito.

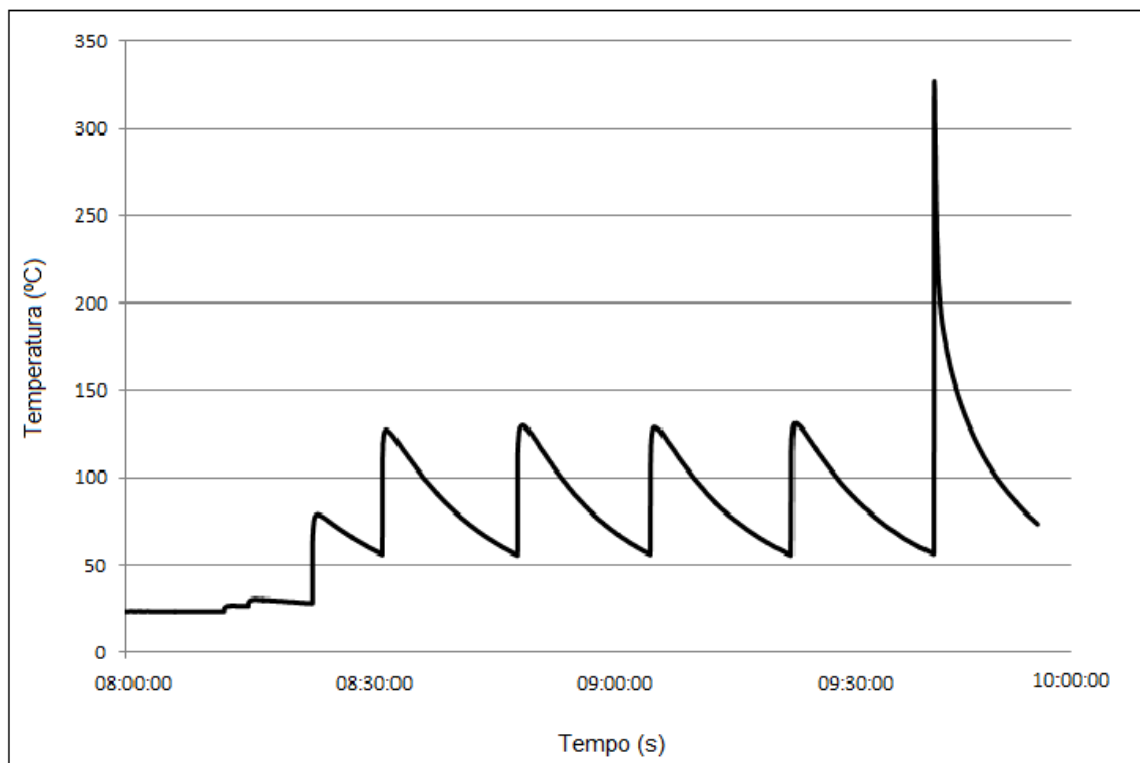


Figura 23 - Gráfico de temperatura do primeiro ensaio.
Fonte: CEPEL (2017).

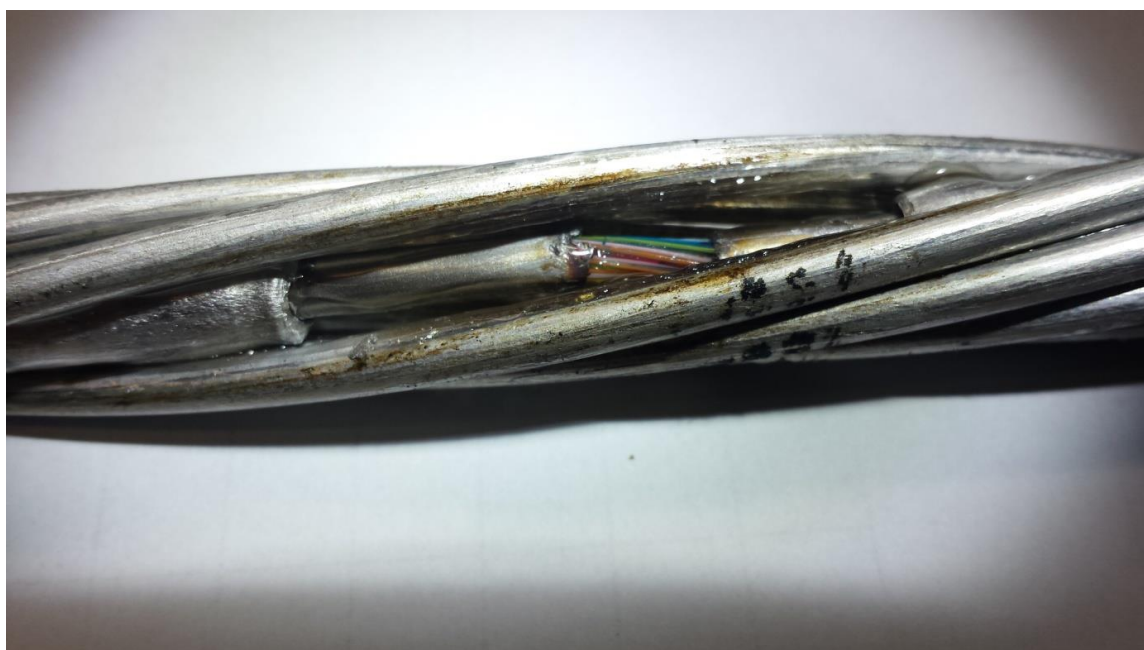


Figura 24 - Rompimento do tubo durante o primeiro ensaio.
Fonte: Autora (2018).

5.2.2. ENSAIO 2

Com o rompimento do tubo no ensaio anterior, imaginou-se que utilizando uma liga de alumínio com uma resistência à tração maior no tubo, podia-se evitar o rompimento durante o ensaio de curto circuito. A liga 1350 é a utilizada atualmente, e possui uma resistência à tração de 160 MPa.

Após esse estudo, projetou-se e fabricou-se dois protótipos do cabo OPGW de 100 mm² compostos com as seguintes ligas de alumínio em seu tubo:

- Alumínio liga 1120: Resistência à tração de 240 MPa;
- Alumínio liga 6201: Resistência à tração de 340 MPa.

Depois de fabricados, os protótipos foram submetidos aos ensaios de curto circuito no laboratório. Os resultados encontrados estão descritos abaixo:

5.2.2.1. PROTÓTIPO 1: ALUMÍNIO LIGA 1120

Durante o ensaio, a temperatura máxima atingida pelo cabo foi de 192 °C, inferior a máxima permitida pelo fabricante do cabo, porém, com o esforço mecânico exercido durante as aplicações, houve rompimento da unidade óptica e do tubo de alumínio. Este cabo, portanto, foi reprovado no ensaio de curto-circuito.

5.2.2.2. PROTÓTIPO 2: ALUMÍNIO LIGA 6201

Durante o ensaio de curto-circuito, a temperatura do cabo chegou a 215 °C, excedendo a máxima permitida pelo fabricante. Não houve danos na unidade óptica, no entanto o cabo foi reprovado pela elevada temperatura encontrada.

Como foi possível evidenciar, os dois protótipos foram reprovados no ensaio de curto circuito. Sendo assim, entendeu-se que a troca da liga de alumínio do tubo não iria sanar a barreira de quebra do tubo ou da capacidade de curto circuito sem extrapolar 200 °C de temperatura máxima.

5.2.3. ENSAIO 3

Diante da resposta negativa obtida com a troca da liga de alumínio no tubo, a pesquisa avançou com a ideia de incremento na área de alumínio do tubo, podendo melhorar o desempenho do cabo durante o ensaio de curto circuito. Porém, há uma limitação na possibilidade do aumento da área para que não haja uma descaracterização do modelo sob desenvolvimento. A tolerância do diâmetro do tubo de alumínio é $7,1 \pm 0,1$ mm, sendo assim, o aumento de diâmetro permitido é de até 7,20 mm e isso representa um aumento de área de aproximadamente 5%. A construção adotada foi a seguinte: diâmetro externo: 7,20 mm, diâmetro interno: 4,3 mm, área: 26 mm².

Durante as aplicações de corrente de curto-circuito, a temperatura encontrada foi de 160 °C, menor que a máxima permitida pelo fabricante, porém houve rompimento da unidade óptica e do tubo de alumínio, conforme mostra a figura 25. Portanto, foi reprovado no ensaio de curto-circuito.

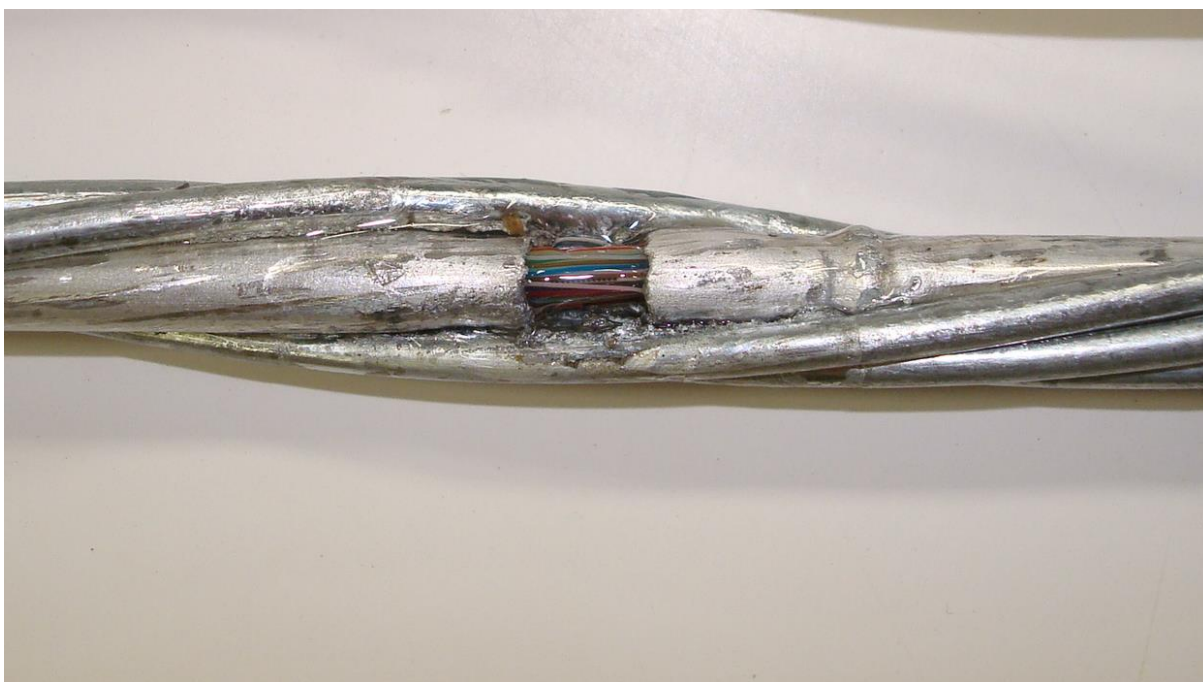


Figura 25 - Rompimento do tubo durante o terceiro ensaio.

Fonte: Autora (2018).

Apesar da mudança realizada, o resultado não foi satisfatório, como foi possível verificar no ensaio realizado. Com isso, a pesquisa prosseguiu e houve uma tentativa de se adaptar os grampos de ancoragem utilizados durante o ensaio de curto circuito.

5.2.4. ENSAIO 4

Após análise das reprovações anteriores, ou seja, rompimento do tubo de alumínio durante o ensaio de curto circuito, foi levantada a hipótese de que o tubo poderia estar sendo tracionado visto que a dilatação térmica do tubo de alumínio é o dobro da coroa de externa de aço galvanizado. Para se tentar diminuir esse efeito, foram confeccionados grampos de ancoragem que possuíssem varetas preformadas de 200 cm. Normalmente, o tamanho padrão dessas varetas é de 80 cm.

Um protótipo do cabo foi enviado ao laboratório juntamente com os novos grampos desenvolvidos para a realização do ensaio de curto circuito.

Durante as aplicações de corrente de curto-circuito, a temperatura encontrada foi de 160 °C, menor que a máxima permitida pelo fabricante, porém houve rompimento da unidade óptica e do tubo de alumínio, conforme mostra a figura 26. Portanto, foi reprovado no ensaio de curto-circuito.

A alteração dos grampos de ancoragem utilizados na instalação do cabo não apresentou o resultado esperado, pois houve o rompimento do tubo de alumínio. Desta forma, outra linha de pesquisa foi iniciada.



Figura 26 - Rompimento do tubo durante o quarto ensaio.
Fonte: Autora (2018).

5.2.5. ENSAIO 5

Analizando os experimentos anteriores, verificou-se que durante o ensaio de curto circuito o tubo estava se rompendo devido a tração exercida sobre ele no momento do aquecimento e esfriamento da liga de alumínio. Sendo assim, levantou-se a hipótese de se diminuir a folga existente entre o tubo de alumínio e a coroa de aço exterior. Normalmente, a folga é de 0,31 mm e após experimentos internos verificou-se que se a folga fosse diminuída para 0 mm haveria redução da tração exercida sobre o tubo pois não haveria espaço para a dilatação térmica.

Para se testar essa hipótese, produziu-se uma amostra com novos parâmetros de processo que permitiram a diminuição da altura do passo de torção dos fios de aço da coroa externa do cabo. Essa diminuição proporcionou uma folga entre o tubo de alumínio e a coroa externa de 0 mm.

Depois da alteração feita, encaminhou-se ao laboratório a amostra para o ensaio de curto circuito.

Após as dez aplicações de curto-circuito, o cabo obteve os seguintes resultados:

- Variação máxima de atenuação das fibras ópticas foi de 0,04 dB/km durante as aplicações de curto-circuito;
- A temperatura máxima atingida pelo cabo foi de 112,8 °C, e a temperatura ambiente foi de 23,4 °C, conforme mostra a figura 27.

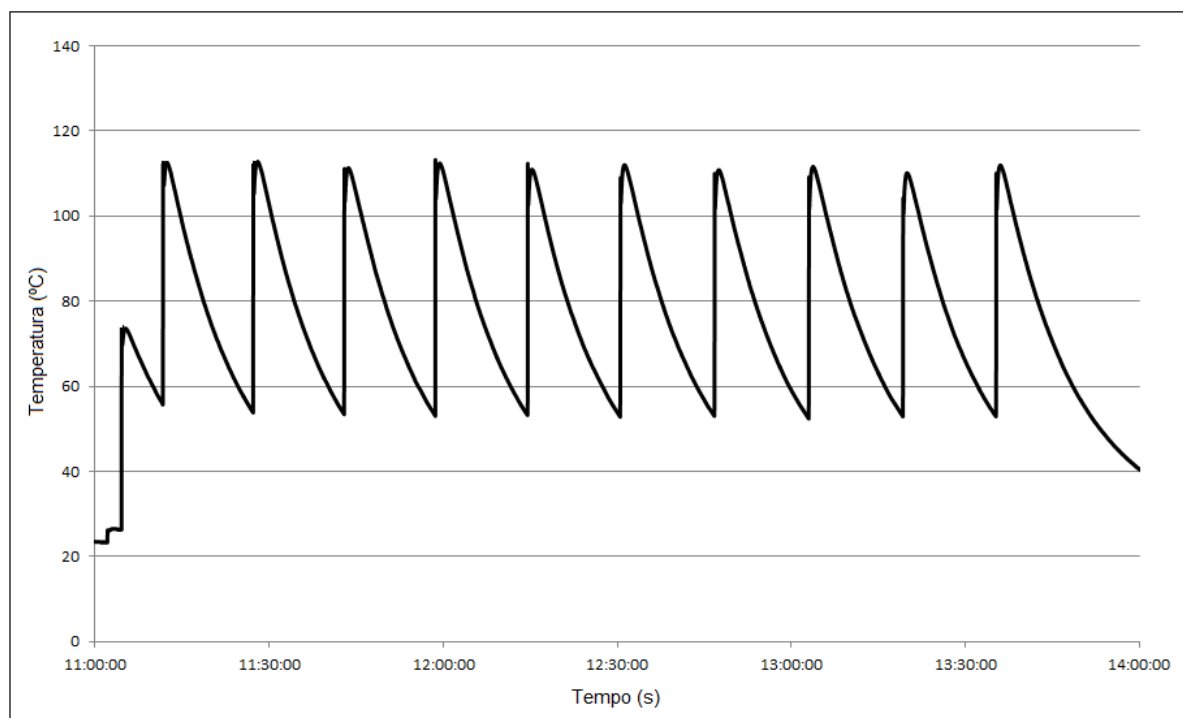


Figura 27 - Gráfico de temperatura durante o quinto ensaio.
Fonte: CEPEL (2017).

Ao finalizar o ensaio de curto-circuito o cabo foi inspecionado visualmente, logo depois de cada aplicação e ao retornar à temperatura ambiente após a última aplicação, foi feita uma dissecação de 3 trechos de 1,20 m de comprimento (2 trechos correspondentes às extremidades do cabo e 1 trecho correspondente ao meio do vão), não foi constatado danos por efeitos eletromecânicos para as aplicações de corrente realizadas.

As verificações após o ensaio de curto-circuito solicitadas na norma NBR 14074:2015 nos componentes poliméricos do cabo não são realizadas no CEPEL e a realização dessas verificações será de responsabilidade do cliente.

5.3. RESULTADOS FINAIS

Os dados encontrados em cada ensaio acompanhados das datas encontram-se na tabela 4.

Tabela 4 - Resultados obtidos através dos ensaios.

| DATA | ENSAIOS | | TEMPERATURA | UNIDADE ÓPTICA | RESULTADO |
|-------------|----------------|-------------|--------------------|-----------------------|------------------|
| 13/04/2017 | ENSAIO 1 | | 326,9 °C | DANIFICADA | REPROVADO |
| 25/05/2017 | ENSAIO 2 | PROTÓTIPO 1 | 192 °C | DANIFICADA | REPROVADO |
| 26/05/2017 | | PROTÓTIPO 2 | 215 °C | SEM DANO | REPROVADO |
| 15/06/2017 | ENSAIO 3 | | 160 °C | DANIFICADA | REPROVADO |
| 13/07/2017 | ENSAIO 4 | | 160 °C | DANIFICADA | REPROVADO |
| 27/07/2017 | ENSAIO 5 | | 112,8 °C | SEM DANO | APROVADO |

Fonte: Autora.

6. CONCLUSÃO

A principal barreira enfrentada pela empresa fabricante foi desenvolver um cabo com as especificações técnicas determinadas pela norma, pois em vários ensaios preliminares o cabo foi reprovado pelo rompimento do tubo.

Após a realização de quatro ensaios, onde o cabo foi reprovado em todos eles, verificou-se que com a diminuição da folga existente entre o tubo de alumínio e a coroa de aço exterior, de 0,31 mm para 0 mm, ocorreria redução da tração exercida sobre o tubo, pois não haveria espaço para a dilatação térmica. Com a realização deste estudo foi feito um protótipo com as devidas mudanças e efetuado um quinto ensaio, onde o cabo foi aprovado, seguindo todas as normas citadas, de acordo com ABNT.

Com os resultados obtidos no último ensaio, a empresa obteve sucesso e desenvolveu o cabo com as especificações desejadas.

Em um aspecto geral, ensaios realizados em cabos OPGW são de grande importância e, dentre os principais fatores resultantes desses ensaios, podemos considerar a redução dos riscos nas instalações, das falhas do equipamento, do custo de produção e da perda de tempo por falhas no equipamento.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABRADEE. Associação Brasileira de Distribuidores de Energia. **Entenda a indústria de energia elétrica: Transmissão**, módulo IV, 2015.
- [2] AMPLA. Diretoria de Planejamento e Engenharia. **Especificação Técnica Ampla – ETA: Cabo Para-raios de Fibra Óptica OPGW**. Rio de Janeiro, RJ, 2015.
- [3] ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=77>> Acesso em: 11 mai. 2018
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cabos pára-raios com fibras ópticas (OPGW) para linhas aéreas de transmissão - Requisitos e métodos de ensaio- Apresentação**: ABNT NBR 14074:2015. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- [5] BEZERRA, Flavius Vinicius Caetano. **Projeto eletromecânico de linhas aéreas de transmissão de extra alta tensão**. Rio de Janeiro. Novembro de 2010. Monografia (Graduação). Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO.
- [6] BORDUCHI, Felipe Cordeiro; DURÃO, Jonny; SANTOS, Robson Diego Verbiski dos. **Estudo do desempenho de cabos do tipo *optical ground wire (opgw)* quando submetidos aos ensaios de descargas atmosféricas e curto-circuito**. Curitiba: UTFPR, 2013. Monografia (Graduação)- Curso de Engenharia Industrial Elétrica - ênfase em Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- [7] CONDUMEX CABLES. Manual técnico. Instalación de cables de guarda con fibras ópticas (OPGW). Disponível em <<http://pt.slideshare.net/vvillatoro/manual-instalacin-opgw?related=1>>. Acesso: em 29 ago. 2018.
- [8] DUARTE, Fabio Terra Passos. **Redução de Perdas por indução em cabos para-raios de linhas de transmissão dotadas de um cabo pára-raios OPGW e outro EHS**. Monografia (Graduação). Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, setembro de 2007.

[9] E. J. Robba, C. C. B. d. Oliveira, H. P. Schmidt e N. Kagan, **Introdução a Sistemas Elétricos de Potência**, São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 1972.

[10] ELAT. Disponível em < <http://www.inpe.br/webelat/homepage/> >. Acesso em 28 mai. 2018.

[11] EXPÓSITO, Antonio Gómes; CONEJO, Antonio; CAÑIZARES, Claudio. **Sistemas de Energia Elétrico**: Análise e Operação. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda , 2011.

[12] FARIZELE PINTO, R. “Análise de Métodos Convencionais na Avaliação do Desempenho de Cabos OPGW em Linhas de Transmissão”. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (COPPE), UFRJ, Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado 2006.

[13] FUCHS, Rubens Dario. **Transmissão de Energia Elétrica**: Linhas Aéreas. Rio de Janeiro: Livros Técnicos Editora. Escola Federal de Engenharia de Itajubá.1977

[14] FUJIKURA. Disponível em < <http://fujikuracabos.com.br>> Acesso em 12 abril 2018.

[15] GONZALES, Luciana Pereira. **Análise Eletromagnética de cabos OPGW utilizando métodos numérico e analítico**. 2008. Dissertação (mestrado)-Universidade Federal do Pará. Belém. Pará. Brasil.

[16] KINDERMANN, Geraldo. **Curto Circuito**. 2ª edição, Porto Alegre: Editora Sagra Luzzatto, 1997.

- [17] MATA, Amanda. **Fibra Óptica**. Oficina da Net 2017. Disponível em:
< <https://www.oficinadanet.com.br/artigo/redes/o-que-e-fibra-otica-e-como-funciona>>.
- [18] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro – Junho/2018**. Disponível em:
<<http://www.mme.gov.br/documents/1138781/0/Boletim+de+Monitoramento+do+Sistema+El%C3%A9trico+-+Junho+-+2018.pdf/aa4afc13-033d-4540-8e3b-c33b1c5af95a>> Acesso em 5 setembro. 2018.
- [19] **ONS**. 2017. Disponível em <<http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>>. Acesso em 1 mar. 2018.
- [20] SILVA; Rosemberg Lobato. **Rede convergente ip com tecnologia wdm e sdh utilizando cabos opgw em linhas de transmissão de energia**. 2010. Dissertação (mestrado). Universidade de Brasília. Faculdade de tecnologia. Brasília, 2010.
- [21] TECMUNDO. **Como funciona a fibra óptica**. 2011. Disponível em <<http://www.tecmundo.com.br/infografico/9862-como-funciona-a-fibra-otica-infografico-.htm>> Acesso em: 18 ago. 2015.
- [22] TEIXEIRA JÚNIOR, Mario Daniel Rocha. **Cabos elétricos**. 2ª edição. São Paulo: Editora Artliber.. 2004.
- [23] TELECO. Inteligência em Telecomunicações. **Conceitos Básicos de Fibra óptica (módulo IV)**. 2003. Disponível em <<http://www.teleco.com.br/pdfs/tutorialfoiv.pdf>> Acesso em: 29 ago. 2018.
- [24] XVI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. 2001. Disponível em:
<http://www.linhadetransmissao.com.br/artigos/cabo_opgw_desempenho_descarg_a_tmosf.pdf>. Acesso 20 abril 2018.