

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA - ÊNFASE EM ELETROTÉCNICA**

**FELIPE CORDEIRO BORDUCHI
JONNY DURÃO
ROBSON DIEGO VERBISKI DOS SANTOS**

**ESTUDO DO DESEMPENHO DE CABOS DO TIPO *OPTICAL
GROUND WIRE* (OPGW) QUANDO SUBMETIDOS AOS ENSAIOS
DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E CURTO-CIRCUITO.**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CURITIBA - PR
2013**

**FELIPE CORDEIRO BORDUCHI
JONNY DURÃO
ROBSON DIEGO VERBISKI DOS SANTOS**

**ESTUDO DO DESEMPENHO DE CABOS DO TIPO *OPTICAL
GROUND WIRE* (OPGW) QUANDO SUBMETIDOS AOS ENSAIOS
DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E CURTO-CIRCUITO.**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Industrial Elétrica - ênfase em Eletrotécnica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Professor Dr. Gilberto Manoel Alves.

**CURITIBA - PR
2013**

FELIPE CORDEIRO BORDUCHI
JONNY DURÃO
ROBSON DIEGO VERBISKI DOS SANTOS

ESTUDO DO DESEMPENHO DE CABOS DO TIPO *OPTICAL GROUND WIRE* (OPGW) QUANDO SUBMETIDOS AOS ENSAIOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E CURTO-CIRCUITO.

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 13 de Setembro de 2013.

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarle Gehrke Castagna, Ma.
Coordenadora dos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Prof. Gilberto Manoel Alves, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Eloi Rufatto Junior, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Gilberto Manoel Alves, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Romildo Alves dos Prazeres, Eng.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

Aos pais, por todo o apoio e incentivo prestado em todos os momentos da vida, essencial para a formação e educação de qualquer indivíduo.

Aos amigos e familiares, pela esperança e confiança que sempre nos transmitiram.

Aos amores, pelo intenso carinho e paciência, fundamental para o sucesso da formação acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus, por ter nos norteado para a escolha deste curso e ter nos acompanhado na passagem de cada semestre letivo, fazendo com que a desistência não tomasse conta da nossa mente.

Ao professor Dr. Gilberto Manoel Alves, por ter nos acolhido e nos direcionado na construção deste trabalho, através de correções, revisões e conselhos, mostrando disposição e paciência em ajudar para o sucesso do trabalho final.

Ao professor Me. Eloi Rufatto Junior e professor Romildo Alves dos Prazeres, pela oportunidade de participarem da banca de avaliação do trabalho final, fazendo com que suas devidas análises e opiniões, suportadas pela grande experiência profissional e acadêmica de ambos, contribuam para o desenvolvimento e melhoria contínua deste estudo.

À empresa Furukawa Industrial S.A. e aos companheiros de trabalho, em especial aos Srs. Luiz Siguenobu Obara, Mario Masuda e Leandro Yoshida Tanaka da Gerência Técnica de Energia (GTE), que nos auxiliaram e nos acompanharam desde o início deste trabalho de conclusão de curso, proporcionando-nos todas as ferramentas, conhecimentos técnicos e experiências que foram fundamentais para a construção do mesmo.

Aos amigos, familiares e especialmente aos pais, irmãs e namoradas, por terem nos fortalecido cotidianamente com gestos de amor, carinho, paciência e confiança.

Por fim, às pessoas que participaram direta ou indiretamente para a construção deste trabalho, e que não foram explicitamente citadas acima, mas que com toda a certeza tiveram suas contribuições e ficamos totalmente gratos pelos auxílios, incentivos, confiança e paciência que foram prestados.

“Não é preciso ter olhos abertos para ver o sol, nem é preciso ter ouvidos afiados para ouvir o trovão. Para ser vitorioso você precisa ver o que não está visível.”

Sun Tzu

RESUMO

BORDUCHI, Felipe C.; DURÃO, Jonny; SANTOS, Robson D. V. dos. Estudo do Desempenho de Cabos do Tipo *Optical Ground Wire* (OPGW) Quando Submetidos aos Ensaios de Descargas Atmosféricas e Curto-Circuito. 2013. 107 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Elétrica, Ênfase em Eletrotécnica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2013.

Este trabalho de conclusão de curso elabora uma análise sobre os cabos para-raios com fibra óptica utilizados em linhas aéreas de transmissão de energia elétrica. Também denominados de cabos do tipo *Optical Ground Wire* (OPGW), o escopo deste estudo contempla a abordagem geral da constituição deste tipo de cabo, as atuais aplicações, inclusive com planejamentos e incentivos governamentais, a teoria sobre fibras ópticas, a simulação com *softwares* para projetos de cabos OPGW em um Sistema Elétrico de Potência (SEP) e, especialmente, a análise dos testes de descarga atmosférica e curto-circuito que são aplicados aos cabos e que são parametrizados por normas regulamentadoras, as quais também serão apresentadas. A proteção do SEP em conjunto com a transmissão de dados de alta velocidade forma um par inovador e tecnológico que transforma, surpreendentemente, o que antes se pensava ser impossível: confiabilidade e qualidade na entrega da energia elétrica partindo das concessionárias até o consumidor final, através de um sistema estável, e também a alta velocidade na transferência de dados, com baixíssimas perdas de potência ao percorrer grandes distâncias. Cabos OPGW surgiram com o objetivo justamente de atender estes dilemas, de forma tecnológica, promissora e simplesmente gerenciável. Para a garantia do cumprimento destas atividades, ou seja, proteção do SEP e transmissão de dados com baixas perdas de sinal, torna-se fundamental a aplicação de testes normatizados nos cabos, simulando os efeitos reais. Por isto, o trabalho faz uma análise dos ensaios de descargas atmosféricas e curto-circuito, com objetivo de verificação do comportamento dos cabos OPGW numa situação real.

Palavras-chave: Cabos para-raios. Fibra óptica. *Optical Ground Wire* (OPGW). Descarga atmosférica. Curto-circuito.

ABSTRACT

BORDUCHI, Felipe C.; DURÃO, Jonny; SANTOS, Robson D. V. dos. *Study of Cable Performance Type Optical Ground Wire (OPGW) When Tested for Atmospheric Discharge and Short Circuit*. 2013. 107 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Elétrica, Ênfase em Eletrotécnica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2013.

This study of course conclusion makes an analysis about ground wires with optical fibers used in overhead transmission lines of electric power. Also called cables type Optical Ground Wire (OPGW), the scope of this study will be a general approach of construction this type of cable, current applications, including planning and government incentives, theory of optical fibers, simulation using software for OPGW cables projects in an Electric Power System (EPS), and especially the analysis of atmospheric discharge and short circuit tests that are applied to the cables, which are parameterized by regulatory standards, which will also be presented. The protection of the EPS together with the transmission of high speed data, forms a pair innovative and technological and changes, surprisingly, what was once thought impossible: reliability and quality in the delivery of electricity from the power utilities to reach the end consumer keeping the stability of the system, and also the high-speed data transfer with little loss of potency to travel long distances. OPGW cables emerged aiming precisely to address these dilemmas, with technological systems, promising and simply manageable. To guarantee compliance with these activities, the protection of EPS and data transmission with low signal loss, it is essential the application of standardized tests on cables, simulating the real effects. Therefore, the study makes a further approach in the analysis of trials of atmospheric discharge and short circuit, in order to check the behavior of OPGW cables in a real situation.

Keywords: *Ground wires. Optical fibers. Optical Ground Wire (OPGW). Atmospheric discharge. Short circuit.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Seção reta do cabo OPGW (Estrutura Genérica)	17
Figura 2 – Mapa de desligamentos do Sistema Integrado Nacional (SIN) entre 09/12 e 03/13	20
Figura 3 – Evolução dos números de perturbações e do impacto sobre o atendimento às cargas do SIN, 2007-2011.	21
Figura 4 - Indicador de Energia Não Suprida do SIN – MWh	22
Figura 5 – Mapa de densidade de descargas atmosféricas	23
Figura 6 – Linhas de transmissão no território brasileiro – Horizonte 2013.....	29
Figura 7 – Cabo OPGW formado por um tubo de proteção primário em um tubo de proteção secundário das fibras ópticas	31
Figura 8 – Cabo OPGW formado por fios condutores encordoados junto com uma ou mais unidades ópticas	31
Figura 9 - Representação do raio de luz sobre uma superfície	35
Figura 10 - Reflexão da luz em superfície regular.....	36
Figura 11 - Reflexão da luz em superfície irregular.....	36
Figura 12 - Representação da Lei da Reflexão da Física	37
Figura 13 - Refração da Luz.....	37
Figura 14 - Raios Refratado e Refletido	39
Figura 15 - Estrutura Genérica da Fibra Óptica.....	40
Figura 16 - Princípio de Funcionamento	41
Figura 17 - Sistema de Comunicação por Fibra Óptica.....	42
Figura 18 - Perfil de fibra SM.....	44
Figura 19 - Efeito de Espalhamento <i>Rayleigh</i> por variação de índice de refração	47
Figura 20 - Exemplo de fibra com perda por macrocurvatura	47
Figura 21 - Exemplo de fibra com perda por microcurvaturas.....	48
Figura 22 - Esquema de montagem para execução do ensaio de curto-circuito.....	58
Figura 23 - Fluxograma para realização do ensaio de curto-circuito.....	60
Figura 24 – Descarga Atmosférica	61

Figura 25 – Representação do Impulso Atmosférico.....	62
Figura 26 – Onda padronizada de Impulso Atmosférico	62
Figura 27 - Esquema de montagem para execução do ensaio de descarga atmosférica.....	64
Figura 28 - Esquema de montagem para execução do ensaio de descarga atmosférica – Posição do eletrodo.	64
Figura 29 - Fluxograma para realização do ensaio de descarga atmosférica.	66
Figura 30 – Identificação dos condutores.....	70
Figura 31 – Determinação dos tipos de fios utilizados no cabo.....	70
Figura 32 - Definição dos parâmetros para cada tipo de fio utilizado.....	71
Figura 33 - Definição dos parâmetros para cada tipo de fio utilizado.....	71
Figura 34 - Determinação da configuração de cada camada que constitui o cabo ...	72
Figura 35 - Definição da localização de cada sensor de temperatura.....	72
Figura 36 - Definição dos parâmetros do teste.....	73
Figura 37 - Escolha do tipo de simulação a ser executada	73
Figura 38 - Corrente suportada até que se fosse atingida a temperatura limite	74
Figura 39 – Gráfico de variação da temperatura de cada um dos sensores	74
Figura 40 – Variação da corrente ao longo da linha de transmissão.....	75
Figura 41 - Tipo de torre a ser utilizada em determinada linha de transmissão de 500 kV	76
Figura 42 – Configuração da torre de transmissão no <i>software</i> ATP	77
Figura 43 - Determinação de parâmetros da linha de transmissão no <i>software</i> ATP	77
Figura 44 - Determinação de parâmetros dos cabos utilizados na linha de transmissão	78
Figura 45 - Modelagem de uma linha de transmissão utilizando <i>software</i> ATP	79
Figura 46 - Corrente de curto-circuito na barra da subestação simulada no <i>software</i> ATP, para o valor especificado no edital nº 02/2013-ANEEL.....	79
Figura 47 - Arranjo de montagem para execução do ensaio de descarga atmosférica.	82

Figura 48 – Circuito para o ensaio de descarga atmosférica.	82
Figura 49 – Arranjo para o Ensaio de descarga atmosférica.....	85
Figura 50 – Detalhe do cabo após o ensaio nº 1.....	85
Figura 51 – Detalhe do cabo após o ensaio nº 2.....	86
Figura 52 – Detalhe do cabo após o ensaio nº 3.....	86
Figura 53 – Detalhe do cabo após o ensaio nº 4.....	87
Figura 54 – Detalhe do cabo após o ensaio nº 5.....	87
Figura 55 - Esquema de montagem para execução do ensaio de curto-circuito.....	89
Figura 56 – Circuito para o ensaio de curto-circuito.	91
Figura 57 – Arranjo para o ensaio de curto-circuito.....	92
Figura 58 - Esquema de montagem para execução do ensaio de curto-circuito.....	94
Figura 59 - Esquema de montagem para execução do ensaio de descarga atmosférica.....	97
Figura 60 – Detalhe do cabo após o ensaio nº 12.....	98
Figura 61 – Detalhe do cabo após o ensaio nº 13.....	98
Figura 62 – Detalhe do cabo após o ensaio nº 14.....	99
Figura 63 – Detalhe do cabo após o ensaio nº 15.....	99
Figura 64 – Detalhe do cabo após o ensaio nº 16.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – <i>Ranking</i> de densidade de descargas atmosféricas – Paraná.....	24
Tabela 2 – Multas aplicadas às concessionárias por interrupção de fornecimento de energia	24
Tabela 3 – Extensão das linhas de transmissão do SIN – km.....	28
Tabela 4 – Previsão de construção de novas linhas de transmissão até 2015	28
Tabela 5 - Índices de Refração Típicos.....	38
Tabela 6 - Acréscimo ou variação de atenuação	56
Tabela 7 - Classe de ensaio.....	65
Tabela 8 - Correntes de curto-circuito nas sub estações terminais para o dimensionamento dos cabos para-raios de nova linha de transmissão ou novo(s) trecho(s) em projeto.	68
Tabela 9 - Tabela de resultados do ensaio de descarga atmosférica.	83
Tabela 10 - Tabela de resultados do ensaio de curto-circuito.....	89
Tabela 11 - Tabela de resultados do ensaio de curto-circuito.....	94
Tabela 12 - Tabela de resultados do ensaio de descarga atmosférica.	97

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Janelas Ópticas para Transmissão de Fibras Ópticas.	48
Quadro 2 - Resumo dos principais requisitos do cabo OPGW.....	67
Quadro 3 - Características dos materiais que compõe o cabo OPGW.	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AF (Circuito amplificador-filtro)

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica)

ATP (*Alternative Transients Program*)

CEPEL (Centro de Pesquisa de Energia Elétrica)

CMSE (Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico)

COFINS (Contribuição para Financiamento de Seguridade Social)

DSF (*Dispersion Shifted Fiber*)

DWDM (*Densed Wavelength Division Multiplexing*)

ELAT (Grupo de Eletricidade Atmosférica)

FD (Semicondutor fotodetector)

FO (Fibra Óptica)

INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais)

IPI (Imposto Sobre Produtos Industrializados)

LED (*Light Emitting Diode*)

LT (Linha de Transmissão)

LWP (*Low Water Peak*)

MM (*Multi Mode*)

NZD SF (*Non-Zero Dispersion Shifted Fiber*)

OIT (Tempo de Indução Oxidativa)

ONS (Operador Nacional do Sistema)

OPGW (*Optical Ground Wire*)

PASEP (Programa de Formação do Patrimônio do Servidor Público)

PIS (Programa de Integração Social)

PNBL (Programa Nacional de Banda Larga)

PON (*Passive Optical Network*)

RAP (Relatório de Análise de Perturbação)

REPUBL (Regime Especial de Tributação do Programa Nacional de Banda Larga)

RMC (Resistência Mecânica Calculada)

SIN (Sistema Integrado Nacional)

SM (*Single Mode*)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 TEMA.....	17
1.2 HISTÓRICO.....	17
1.3 PROTEÇÃO CONTRA RAIOS.....	19
1.4 DEMANDA DE COMUNICAÇÃO DE ALTA CAPACIDADE.....	25
1.5 NOVAS LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	27
1.6 SUBSTITUIÇÃO DE CABOS CONVENCIONAIS EXISTENTES.....	29
1.7 INFRAESTRUTURA PARA REDES INTELIGENTES (<i>SMART GRID</i>).....	30
1.8 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	31
1.9 PROBLEMAS E PREMISSAS.....	32
1.10 OBJETIVOS.....	32
1.10.1 Objetivo geral.....	32
1.10.2 Objetivos específicos.....	32
1.11 JUSTIFICATIVA.....	33
1.12 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	33
1.13 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	33
2. FIBRA ÓPTICA	34
2.1 NOÇÕES BÁSICAS DE ÓPTICA.....	34
2.1.1 Meios de propagação.....	34
2.1.2 Reflexão e refração da luz.....	35
2.2 FUNCIONAMENTO DAS FIBRAS ÓPTICAS.....	40
2.2.1 Estrutura básica da fibra.....	40
2.2.2 Princípio de funcionamento.....	41
2.2.3 A comunicação pelo meio óptico.....	41
2.3 CLASSIFICAÇÃO DAS FIBRAS ÓPTICAS.....	42
2.3.1 Fibras Multimodo (MM).....	43
2.3.2 Fibras Monomodo (SM).....	43
2.4 DISPERSÃO E ATENUAÇÃO EM FIBRAS ÓPTICAS.....	44
2.4.1 Dispersão em fibras ópticas.....	44
2.4.2 Atenuação em fibras ópticas.....	45
2.5 FIBRAS ÓPTICAS ESPECIAIS.....	49
2.5.1 Fibras SM DSF (<i>Dispersion Shifted Fiber</i>) – Dispersão Deslocada.....	49
2.5.2 Fibras SM NZD SF (<i>Non-Zero Dispersion Shifted Fiber</i>).....	49
2.5.3 Fibras SM <i>Low Water Peak</i> (Baixo Pico D'água).....	49
2.6 VANTAGENS DAS FIBRAS ÓPTICAS.....	50
2.6.1 Imunidade a interferências eletromagnéticas.....	50
2.6.2 Dimensões otimizadas.....	50
2.6.3 Grandes distâncias nas transmissões.....	51
2.6.4 Alta capacidade de transmissão.....	51
2.6.5 Atual vantagem econômica.....	51
2.6.6 Comunicação segura.....	52
2.7 DESVANTAGENS DAS FIBRAS ÓPTICAS.....	52
2.7.1 Fragilidade.....	52
2.7.2 Instalação/manutenção e custo.....	52
2.7.3 Perdas altas em acopladores Tipo T.....	52
2.7.4 Falta de padronização dos componentes ópticos.....	53
3. TIPOS DE TESTES E PARÂMETROS A SEREM TESTADOS	53
3.1 PARÂMETROS PARA O ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO.....	54

3.2 PARÂMETROS PARA O ENSAIO DE DESCARGA ATMOSFÉRICA.....	55
4. EXECUÇÃO DOS TESTES	57
4.1 ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO	57
4.2 ENSAIO DE DESCARGA ATMOSFÉRICA	60
4.2.1 Sobretensões atmosféricas.....	60
4.2.2 Ensaio de descarga atmosférica em cabos OPGW	63
5. PROJETO DE CABO OPGW	67
5.1 DEFINIÇÃO DO CABO A SER UTILIZADO EM UMA LINHA DE TRANSMISSÃO.....	68
5.2 UTILIZAÇÃO DO <i>SOFTWARE</i> VEIKI PARA PROJETOS DE CABOS OPGW	69
5.3 DIMENSIONAMENTO DOS CABOS PARA-RAIOS DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO.....	75
5.4 MATERIAIS UTILIZADOS PARA FABRICAÇÃO DOS CABOS OPGW	80
6. RELATÓRIOS DE ENSAIO	80
6.1 RELATÓRIO DLA-9876/2013	80
6.2 RELATÓRIO DE ENSAIO DLA-16118/2013.....	88
6.3 RELATÓRIO DE ENSAIO DLA-27161/2012.....	93
6.3.1 Ensaio de curto-circuito.....	94
6.3.2 Ensaio de descarga atmosférica com corrente de continuidade:	96
7. CONCLUSÃO	101
8. BIBLIOGRAFIA	103

1. INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

Cabos *Optical Ground Wire* (OPGW), ou Cabos Guarda com fibra óptica, são cabos para-raios de cobertura, utilizados especialmente em linhas aéreas de transmissão de energia elétrica, construídos de modo a abrigar, em seu interior, fibras ópticas capazes de transmitir altas taxas de dados.

Estes cabos são usados para dois objetivos principais:

- Proteção das linhas aéreas de transmissão contra descargas elétricas atmosféricas;
- Conexão de alta velocidade e qualidade de transmissões de dados. Esta conexão é feita pelo meio óptico contido no núcleo do cabo.

O cabo OPGW é basicamente constituído 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. Esta armação normalmente é constituída por fios metálicos, do tipo aço aluminizado, liga de alumínio ou aço galvanizado.

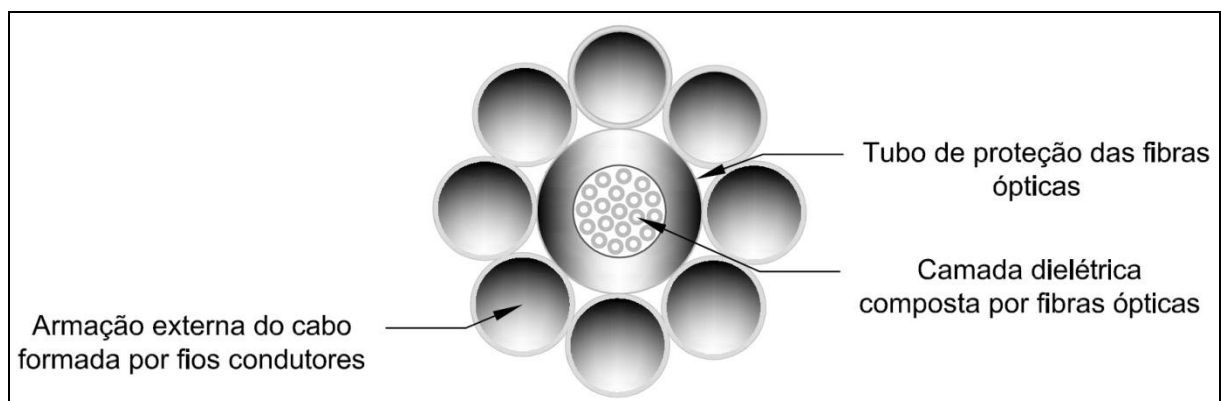


Figura 1 – Seção reta do cabo OPGW (Estrutura Genérica)

Fonte: Autoria Própria.

1.2 HISTÓRICO

No Brasil, as primeiras instalações de cabos OPGW ocorreram na década de 90. Inicialmente estes cabos eram importados de países como Estados Unidos, Canadá, Alemanha, Suíça, Japão, Portugal e Itália. Como estes países possuem

diferentes condições atmosféricas (nível ceráunico, por exemplo), o Brasil precisou se adequar a algumas normas internacionais existentes e criar outras normas técnicas para o cabo OPGW se adequar às condições climáticas existentes, no caso, projetos mais direcionados ao alto nível ceráunico no Brasil. O índice ceráunico indica o número de dias de trovoadas numa determinada região por ano.

Nas primeiras instalações e até hoje, observa-se que muitas empresas do ramo de eletricidade têm sofrido com vários danos nos cabos OPGW tais como:

- Rompimento parcial dos fios da armação ou total do cabo, causando ruptura das fibras ópticas;
- Rompimento dos fios devido ao cerol (linha cortante) das pipas;
- Problemas na instalação, tendo como consequência atenuação nas fibras (fator que restringe taxa de transmissão);
- Projetos de cabos com valores de curto-circuito atual que não foram previstos para as condições futuras;
- Corrosão nos fios da armação e tubo que protege as fibras;
- Deslocamento das fibras dentro das caixas de emenda, devido à falta ou excesso de fibras ópticas;
- Cabos OPGW em não conformidade com normas técnicas regulamentares.

No início do ano de 2013 foi inaugurada na cidade de Curitiba uma unidade de produção de cabos OPGW, a qual se pretende chegar a capacidade de produção de 2,3 milhões de quilômetros de fibra óptica por ano. O Ministro das Comunicações estima que este volume atenda de 45 a 50% da demanda nacional (FURUKAWA, 2013).

O orçamento de investimentos em infraestrutura de comunicação via internet é de 60 milhões de reais para atender 50 milhões de residências, totalizando 80 bilhões de reais em 10 anos.

Todas as concessionárias brasileiras, que constituem a rede básica, possuem pelo menos um circuito superior a 230 kV portador de cabo OPGW, constituindo mais de 15.000 km de cabos instalados até 2007 (DUARTE, 2007, p. 26).

1.3 PROTEÇÃO CONTRA RAIOS

As linhas de transmissão necessitam de uma proteção contra raios para que o sistema se mantenha estável, seguro e confiável. Com este objetivo, os cabos para-raios OPGW são projetados e instalados, atendendo as mesmas necessidades de linhas dos cabos convencionais, mas com algumas características diferentes (bitola dos cabos, por exemplo).

Desligamentos de grande porte no sistema, conhecidos como apagões, tem sido o pesadelo das concessionárias brasileiras de energia, pois o sistema, mesmo estando cada dia mais interligado, tem se mostrado muito vulnerável às condições climáticas, principalmente as descargas atmosféricas.

Descarga elétrica atmosférica é a causa mais citada nas ocorrências de maior porte nos Relatórios de Análise de Perturbação (RAP), elaborados pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), como por exemplo (Redação Folha de São Paulo, 2012):

- 2003 – Blecaute desligou 82% do sistema de Mato Grosso do Sul. A causa apontada foi um raio que atingiu duas linhas de transmissão da usina de Jupιά, na divisa de Mato Grosso do Sul com São Paulo.
- 2009 – Blecaute desligou 18 estados. A causa apontada é também descargas atmosféricas.
- 2011 e início de 2012 – Três apagões deixaram o Amazonas sem energia por cinco horas. Raios foram responsáveis pelo desligamento do sistema regional. Não afetou o Sistema Integrado Nacional (SIN), pois a concessionária ainda não é integrada a ele. A Agência Nacional de Energia Elétrica propôs a Eletrobrás Amazônia (RIZZO & DANTAS, 2012):

“realizar estudos a fim de analisar os benefícios advindos (...) da instalação de para-raios de linha, tendo em vista a grande incidência de descargas atmosféricas na região”.

- 2012 – Dia 15 de dezembro. Apagão atingiu 12 estados brasileiros. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) relatou que a subestação de Itumbiara-GO não resistiu a uma descarga elétrica em uma linha.

Na Figura 2 são mostradas as ocorrências de desligamentos de transmissão de energia entre setembro de 2012 e março de 2013 no Brasil, as escalas de cores diferem a intensidade de cada desligamento, sendo verde ou azul as menores e vermelho ou amarelo as de maiores porte:



Figura 2 – Mapa de desligamentos do Sistema Integrado Nacional (SIN) entre 09/12 e 03/13
Fonte: WARTH (2012).

Entre setembro e dezembro de 2012 foram registrados seis desligamentos de grande porte por causas diversas.

Estes foram alguns dos eventos mais significativos dos apagões, porém o Brasil tem vivido constantes oscilações de menor porte em todo seu território. Os chamados “apaguinhos”, pelo governo, têm perturbado o Sistema Integrado Nacional (SIN). A causa inicial, da maioria dos eventos, são descargas atmosféricas, seguidas de falta de investimento no setor elétrico, de modernização de equipamentos e sistemas, de treinamento suficiente, de mão de obra especializada e de manutenção frequente dos equipamentos.

Na 126ª Reunião (Extraordinária) do Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE), em 20 de fevereiro de 2013, o ONS apresentou estatísticas de desempenho do SIN desde 2009. No relatório consta (CMSE, 2013):

“O número de perturbações (cortes no nível de carga) no período oscilou, por ano, entre 2258 e 2670 ocorrências, sendo que desse total, em média 11,8% envolveram qualquer

patamar de corte de carga, cerca de 3,0% tiveram corte de carga superior a 100 MW, em aproximadamente 0,4% houve corte de carga superior a 500 MW e 0,2% envolveu corte de carga superior a 1000 MW”.

Além das estatísticas, também foi relatada a classificação das maiores causas de perturbações do período:

1. Condições climáticas adversas;
2. Queimadas;
3. Equipamentos/Acessórios;
4. Falha humana.

Na Figura 3 é mostrada a evolução dos números de perturbações no SIN, a ocorrência de cortes de carga e potências desligadas.

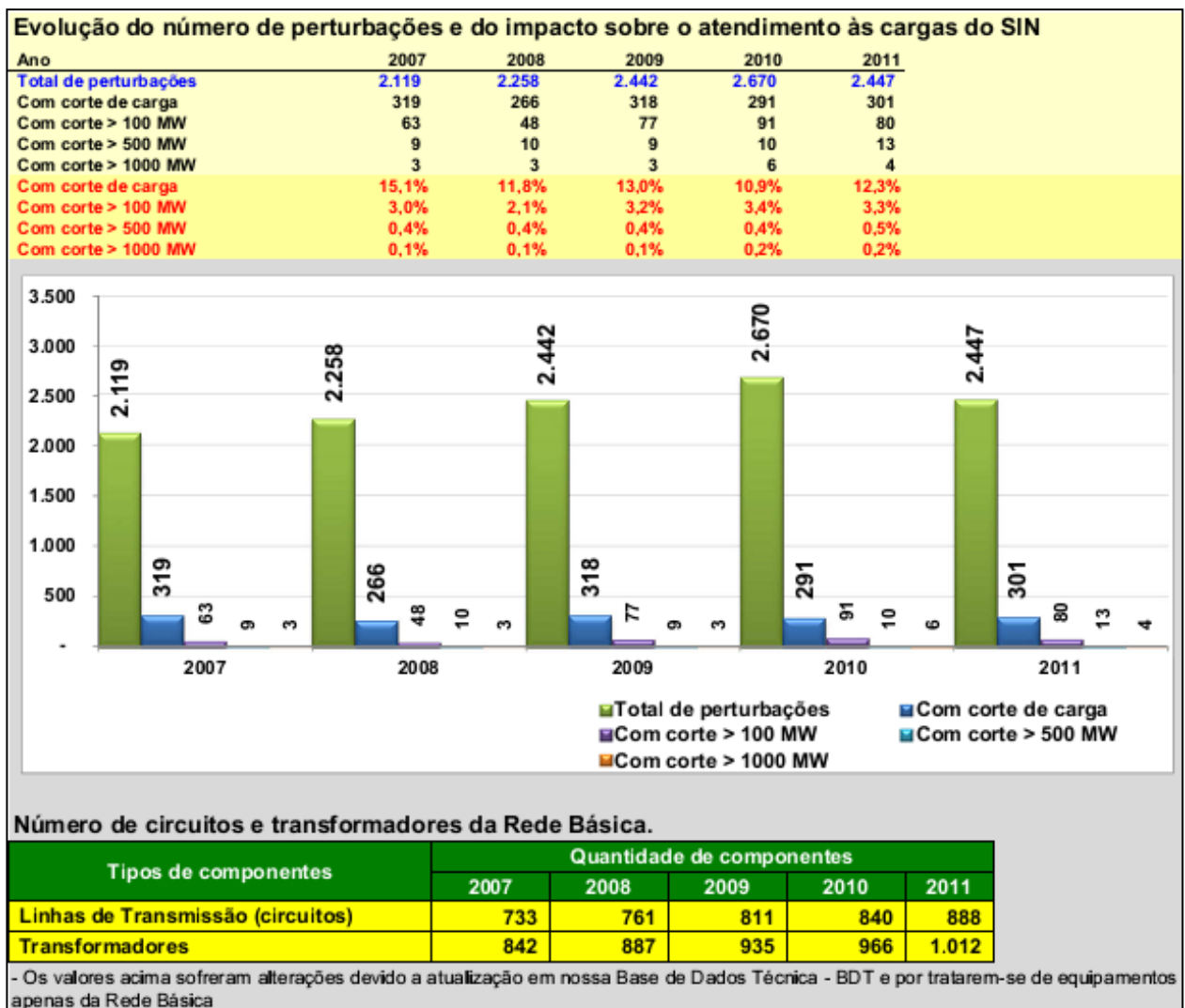


Figura 3 – Evolução dos números de perturbações e do impacto sobre o atendimento às cargas do SIN, 2007-2011.

Fonte: ONS (2011).

Os dados ligados diretamente ao corte de fornecimento de energia são explicitados em unidade de MWh na Figura 4, a qual mostra que apesar do SIN possuir uma continuidade de fornecimento superior a 99%, ele precisou desligar 104,187 MWh durante o ano de 2009.

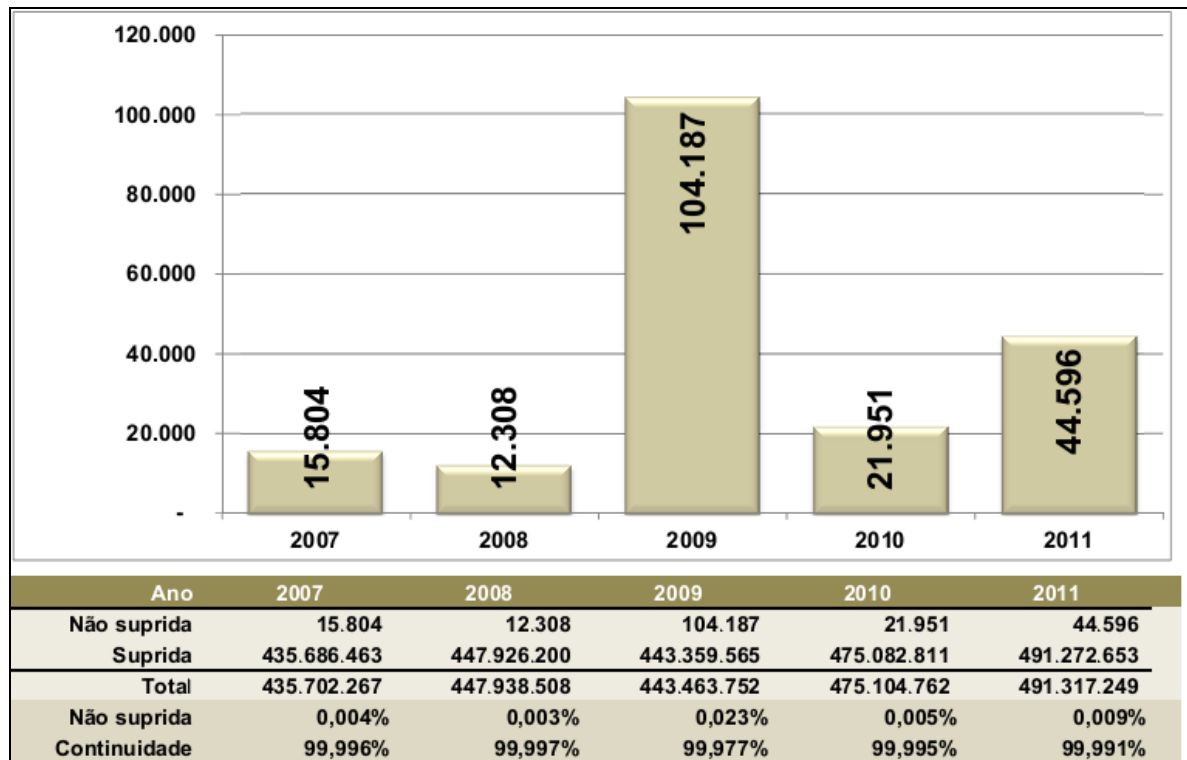


Figura 4 - Indicador de Energia Não Suprida do SIN – MWh
Fonte: ONS (2011).

Empresas como Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), no caso do Brasil, monitoram e registram ocorrências de raios. A partir destas ocorrências são elaboradas as estatísticas de densidade de descargas atmosféricas. Esta densidade é a razão de ocorrência de raios por metro quadrado, e assim é elaborado o mapa que indica a proporção de incidência dessas descargas por todo o território nacional, conforme mostra a Figura 5. Este mapa é utilizado pelo ONS para construir suas linhas de transmissão.

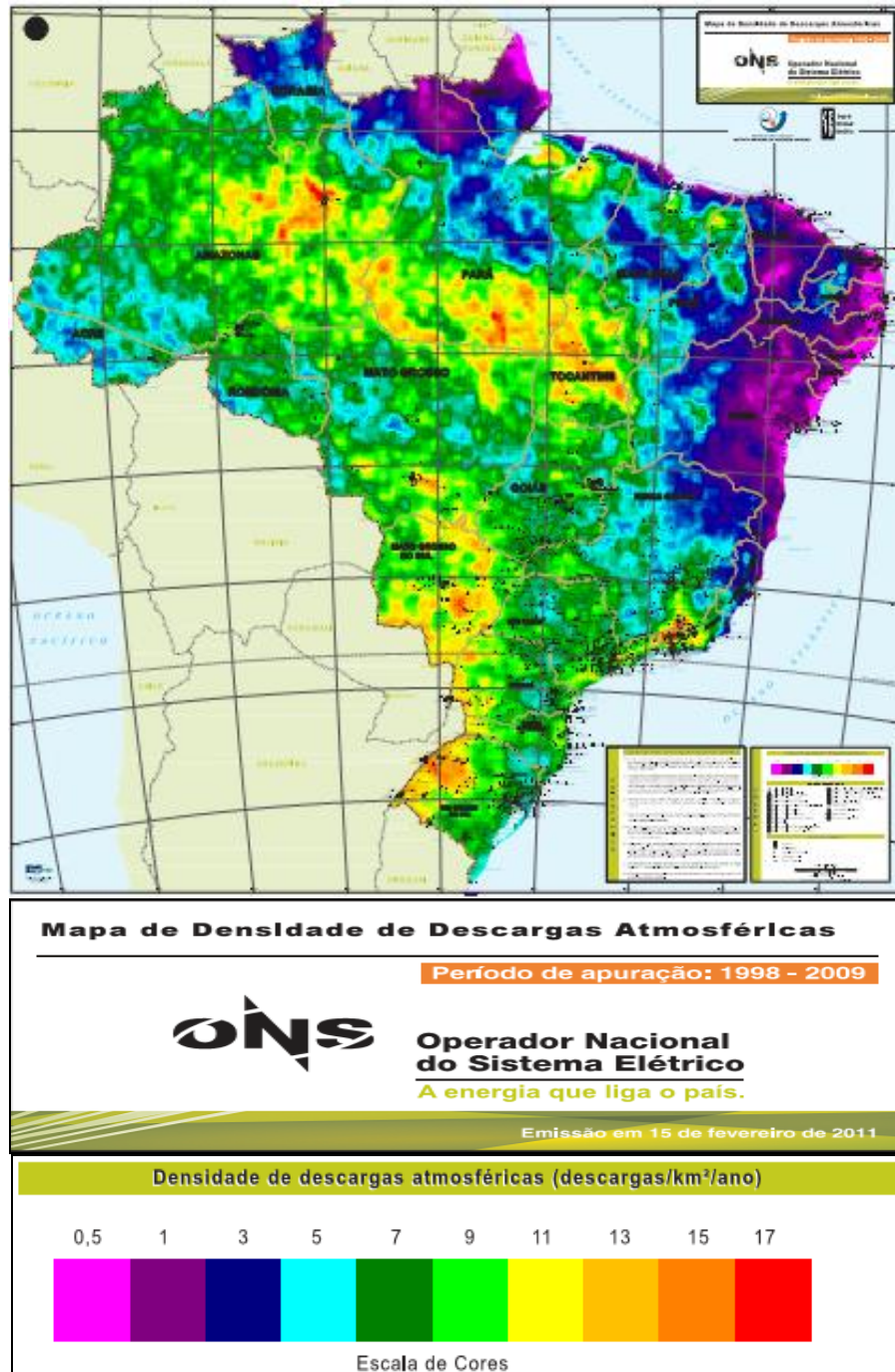


Figura 5 – Mapa de densidade de descargas atmosféricas
Fonte: ONS (2011).

O ELAT elabora uma listagem com a classificação de cidades ordenadas por sua densidade de descargas atmosféricas. A Tabela 1 mostra a classificação (*ranking*) paranaense com as treze primeiras cidades e a capital.

Tabela 1 – Ranking de densidade de descargas atmosféricas – Paraná

Municípios (Estado PR)	Área	Biênio 2005-2006			Biênio 2007-2008			Variação
		Ranking		Densidade raios/km ² .ano	Ranking		Densidade raios/km ² .ano	
		Geral	Estado		Geral	Estado		
Iporã	648	162	10	5,7890	6	1	11,4269	97,4%
Matinhos	117	188	19	5,6379	115	2	5,7119	1,3%
Guaratuba	1.326	923	252	3,9149	247	3	4,5643	16,6%
Iracema do Oeste	82	66	1	6,6063	251	4	4,5439	-31,2%
Ouro Verde do Oeste	293	363	61	5,1165	268	5	4,4431	-13,2%
Entre Rios do Oeste	122	211	21	5,5651	289	6	4,3689	-21,5%
São José das Palmeiras	182	275	33	5,3467	290	7	4,3603	-18,4%
Nova Aurora	474	213	22	5,5582	295	8	4,3403	-21,9%
Pontal do Paraná	201	415	79	4,9696	296	9	4,3386	-12,7%
Marechal Cândido Rondon	748	206	20	5,5748	300	10	4,3143	-22,6%
Paranaguá	827	633	147	4,4944	328	11	4,1979	-6,6%
Guaira	561	316	47	5,2119	331	12	4,1862	-19,7%
Mercedes	201	290	38	5,2838	354	13	4,1068	-22,3%
Curitiba	435	571	125	4,6149	1514	268	2,2857	-50,5%

Fonte: ELAT(2013).

Curitiba está na posição de 268 no estado do Paraná.

Além de incômodo para o cliente, o corte no fornecimento de energia causa multas para as concessionárias. A Tabela 2 identifica as multas que foram aplicadas às concessionárias por interrupção do fornecimento de energia.

Tabela 2 – Multas aplicadas às concessionárias por interrupção de fornecimento de energia

Multas Aplicadas - 1998 a 2011		
Ano	Quantidade Multas	Valor das Multas (R\$)
1998	4	1.075.222
1999	94	31.591.444
2000	51	25.179.292
2001	55	26.774.587
2002	179	54.180.020
2003	99	83.024.409
2004	73	45.484.216
2005	89	53.637.075
2006	88	71.806.377
2007	176	71.049.224
2008	384	106.712.100
2009	389	227.761.386
2010	322	342.578.247
2011	246	270.238.954
Total	2249	1.411.092.552

Fonte: ONS (2011).

1.4 DEMANDA DE COMUNICAÇÃO DE ALTA CAPACIDADE

Atualmente é grande a demanda por tecnologias de comunicação mais avançadas. Isto se deve ao fato de que o ambiente empresarial requer recursos cada vez mais ágeis, que diminuam o tempo de resposta entre empresário/clientes. Tais companhias estão investindo mais em suas redes de dados do que em redes analógicas convencionais, o que reflete uma tendência mundial de convergência da infraestrutura de dados, voz, imagem, e controle predial nos ambientes corporativos. Este propósito é o que leva à instalação de cabos OPGW, pois são eles os responsáveis pela chegada de sinal até este tipo de ambiente, com a menor perda possível (atenuação), proporcionando um aproveitamento eficiente e confiável do sistema de dados.

Com o Decreto nº 7.175, de 12 de maio de 2010, foi criado O Programa Nacional de Banda Larga (PNBL).

“O objetivo do Programa é expandir a infraestrutura e os serviços de telecomunicações, promovendo o acesso pela população e buscando as melhores condições de preço, cobertura e qualidade. A meta é proporcionar o acesso à banda larga a 40 milhões de domicílios brasileiros até 2014 à velocidade de no mínimo 1 Mbps.”

Este programa incentiva a melhora na infraestrutura com a desoneração tributária, como a redução de PIS/COFINS, para o estímulo ao investimento nesta área. A substituição e implantação de cabos OPGW entram nesta isenção (MINISTÉRIO DAS COMUNICAÇÕES, 2010).

A partir de 13 de maio de 2013, as empresas que desejarem investir no segmento de redes de telecomunicações contarão também com os benefícios do Regime Especial de Tributação do Programa Nacional de Banda Larga (REPNBL). Pretende-se alcançar com o REPNBL investimentos entre 16 e 18 bilhões de reais na implantação de redes de telecomunicações, com a redução de IPI, PIS/PASEP e COFINS. Rede de transporte óptico por meio de cabos OPGW é um dos 13 itens

citados pelo regime (MINISTÉRIO DAS COMUNICAÇÕES, 2013):

1. *Datacenter*;
2. Rede de acesso em sistemas *SMARTGRID* (Redes Inteligentes);
3. Rede de acesso fixo sem fio;
4. Rede de acesso metálico;
5. Rede de acesso móvel;
6. Rede de acesso óptico;
7. Rede de acesso sem fio na faixa de 450 MHz;
8. Rede de transporte óptico;
9. Rede de transporte óptico por meio de cabos OPGW;
10. Rede de transporte por meio de cabo óptico submarino;
11. Rede de transporte sem fio;
12. Rede local sem fio;
13. Sistema de comunicação por satélite.

A transmissão de dados via OPGW possui uma vantagem ímpar em relação aos outros meios que, devido à existência do SIN, não há necessidade de montagem da rede interligada que é o aspecto mais caro e o que causa mais transtornos de obras, ou seja, basta sobrepor o sistema interligado de energia elétrica com o sistema interligado de comunicação.

O aluguel das torres de transmissão praticado pelas concessionárias, para que empresas de telecomunicações usem cabos OPGW, pode variar entre R\$1,00 a R\$19,00 por ponto de suspensão. O Governo arbitrou o valor de R\$2,40 por poste (GROSSMANN, 2012).

Segundo o Ministro das Comunicações, o governo está "*incentivando a infraestrutura de rede porque achamos que esta é a saída para melhorar o atendimento ao consumidor de serviços de telefonia e internet no Brasil*". Também acrescentou que "*as redes de telecomunicações devem ser encaradas como infraestrutura tão importante para o país, quanto portos, aeroportos, rodovias e ferrovias*" (MINISTÉRIO DAS COMUNICAÇÕES, 2013).

1.5 NOVAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

A ANEEL comenta que:

“As linhas de transmissão no Brasil costumam ser extensas, porque as grandes usinas hidrelétricas geralmente estão situadas a distâncias consideráveis dos centros consumidores de energia. Hoje o País está quase que totalmente interligado, de norte a sul”.

Com o desenvolvimento tecnológico cada vez mais sofisticado e a grande demanda energética mundial, é de grande importância a utilização de linhas de transmissão, pois são elas que possibilitam a transmissão de energia através de longas distâncias, passando por grandes obstáculos (como rios, lagos e vales).

As linhas de transmissão, segundo a ANEEL, devem ser protegidas por cabos para-raios para que se mantenha o eficaz funcionamento do sistema elétrico.

Sabe-se também que a maioria das linhas de transmissão, por muitas vezes estarem localizadas em ambientes de difícil acesso (vales, montanhas, etc.), não possuem uma manutenção preventiva definida.

As empresas de energia, convencionalmente, fazem o monitoramento dos cabos para-raios por meio da inspeção visual, porém há algumas concessionárias que já utilizam o processo de análise de suas linhas de transmissão através de satélites, como com o auxílio do ELAT por exemplo, que pela identificação da ocorrência das descargas atmosféricas, aumentam o controle sobre o sistema elétrico de potência e viabilizam a manutenção e inspeção visual no local de ocorrência da sobretensão devido à descarga atmosférica.

Com o intuito de atualização do SIN (seguindo as especificações normativas da ANEEL) e para melhora do fluxo de carga, é essencial que se instale uma nova linha de transmissão, já com cabos OPGW substituindo os convencionais, e em conformidade com a agência regulamentadora que exige a instalação deste tipo de cabo em novas linhas ou em linhas já existentes com seccionamento para implantação de novas subestações.

As linhas de transmissão tendem a usar o OPGW em seu todo para atender a necessidade de comunicação do Brasil. Com as Tabelas 3 e 4, consegue-se ter uma base do quanto a malha de linhas de transmissão se expandiu e se expandirá.

Na Figura 6 está demonstrada a malha nacional.

Tabela 3 – Extensão das linhas de transmissão do SIN – km

Extensão das Linhas de Transmissão do SIN - km						
Tensão	2007	2008	2009	2010	2011	Var % 11/10
230kV	37.155,5	37.709,9	41.436,8	43.184,5	45.708,7	5,85
345kV	9.772,1	9.772,1	9.783,6	10.060,5	10.061,9	0,01
440kV	6.671,2	6.671,2	6.671,2	6.670,5	6.680,7	0,15
500kV	29.392,2	31.868,3	33.196,3	34.356,2	35.003,4	1,88
600kV CC(*)	3.224,0	3.224,0	3.224,0	3.224,0	3.224,0	-
750kV	2.683,0	2.683,0	2.683,0	2.683,0	2.683,0	-
SIN	88.897,9	91.928,4	96.994,8	100.178,7	103.361,7	3,18

Os valores acima referem-se à rede básica que são as instalações com tensão maior ou igual a 230kV, soma-se ainda os ativos de conexão de usinas e interligações internacionais ligados diretamente à rede básica. Houve um crescimento de 3,18% em relação a 2010, sendo adicionados aproximadamente 3.183 km de novas linhas de transmissão.

(*) A extensão dos circuitos 600kV CC correspondem à extensão de cada bipolo, sendo que pode haver operação independente por polo. Considerando-se esta possibilidade a extensão total é de 3.224,0 km.

Fonte: ONS (2011).

Tabela 4 – Previsão de construção de novas linhas de transmissão até 2015

Linhas de Transmissão	
Tensão	km
500 kV	6.567
440 kV	----
345 kV	----
230 kV	2.041
Total	8.608

Fonte: ONS (2012).

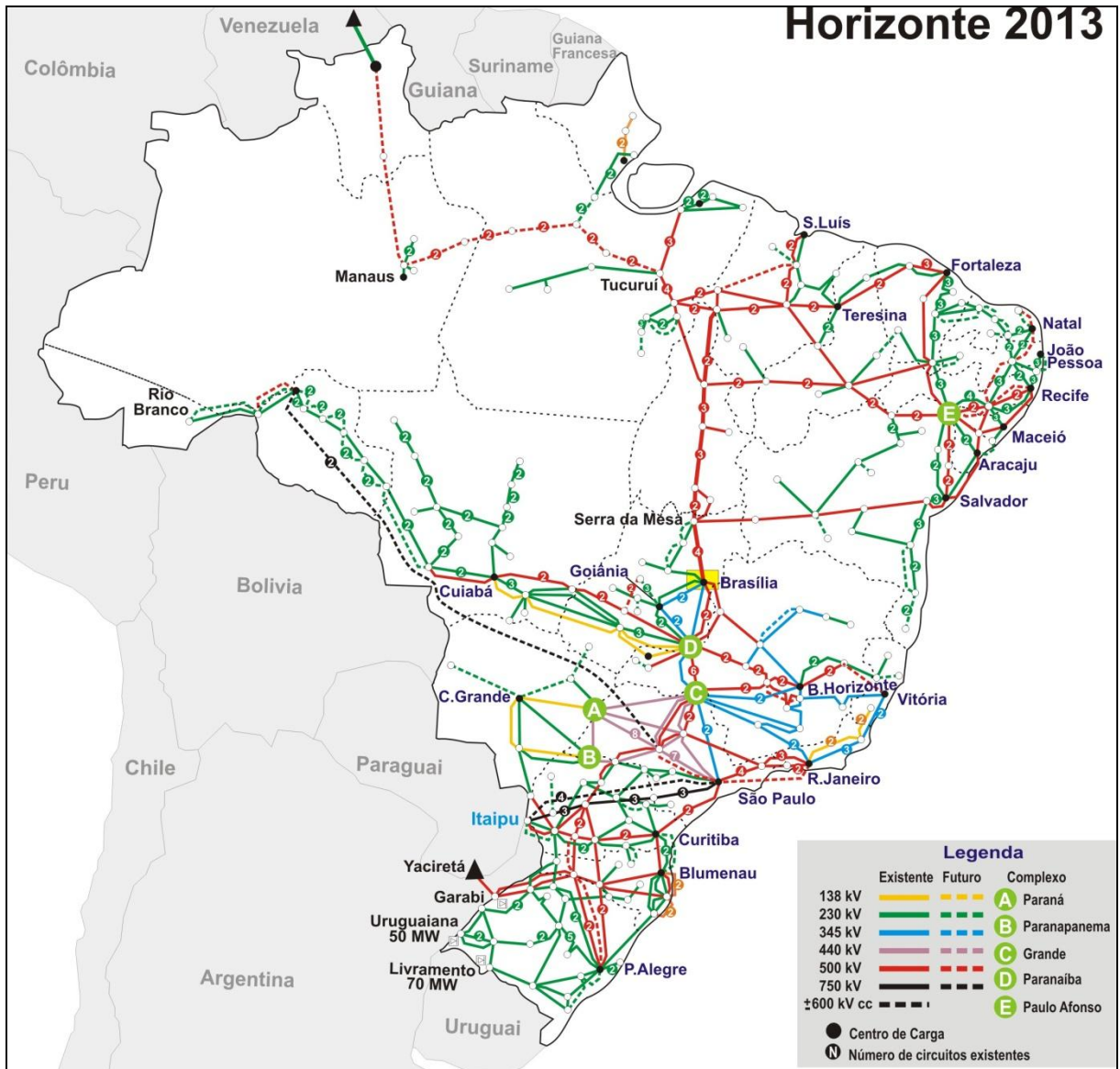


Figura 6 – Linhas de transmissão no território brasileiro – Horizonte 2013
 Fonte: ONS (2012).

1.6 SUBSTITUIÇÃO DE CABOS CONVENCIONAIS EXISTENTES

Os cabos OPGW são indicados para substituírem os cabos convencionais em linhas já existentes e tornar viável a implantação dos mesmos através de interesse de outras empresas (empresas de telecomunicações, por exemplo), pois além de preencher os requisitos relacionados às descargas atmosféricas, também possibilitam que o sistema transmita dados para solucionar canais de telecomunicações.

1.7 INFRAESTRUTURA PARA REDES INTELIGENTES (SMART GRID)

Com a (re) evolução na estrutura do negócio de energia, as empresas, seguindo o mesmo propósito do setor industrial, devem se atualizar com o uso de sensores, comunicação, e habilidades computacionais para ampliar e modernizar toda a funcionalidade de entrega de energia (desde geração até os consumidores) e controle, em regime contínuo de auto ajuste através de caminhos redundantes. Com isto, proporciona-se maior confiabilidade, otimização e minimização do uso de energia, impactando diretamente no controle ambiental e minimizando custos de energia com um melhor aproveitamento por parte dos consumidores. O entendimento de *Smart Grid* é compartilhado por Carlos Alberto Fróes Lima e Gilberto De Marino Jannuzzi (LIMA,2011, p.64) com a seguinte definição:

“a sobreposição de um sistema unificado de comunicações e controle sobre a infraestrutura existente de entrega de energia para fornecer as informações corretas à entidade correta (por exemplo, de equipamentos da rede (como medidores, transformadores), sistemas de controle da transmissão e distribuição, consumo, etc.) no momento certo para a tomada de decisões. É um sistema que otimiza as fontes de energia e entrega, minimiza as perdas, se auto recupera e permite aplicações de última geração para a eficiência energética e de resposta à demanda”.

Deve:

“Prover a transição da rede de um sistema radial para uma verdadeira rede, garantindo a conectividade desde a geração até os clientes finais;

Converter o sistema eletromecânico em um sistema totalmente digital, garantindo suporte ao controle e automatização informatizados de seus ativos;

Permitir uma comunicação bidirecional na rede, de modo que os clientes possam, se quiserem, passar de sua participação passiva a ativos (por exemplo, como cogeneradores).”

1.8 DELIMITAÇÃO DO TEMA

A abordagem deste trabalho se dará sobre os seguintes cabos para-raios com fibra óptica (OPGW):

- Formado por um tubo de proteção primário em um tubo de proteção secundário das fibras ópticas, conforme mostra a Figura 7;
- Formado por fios condutores encordoados junto com uma ou mais unidades ópticas, conforme a Figura 8.

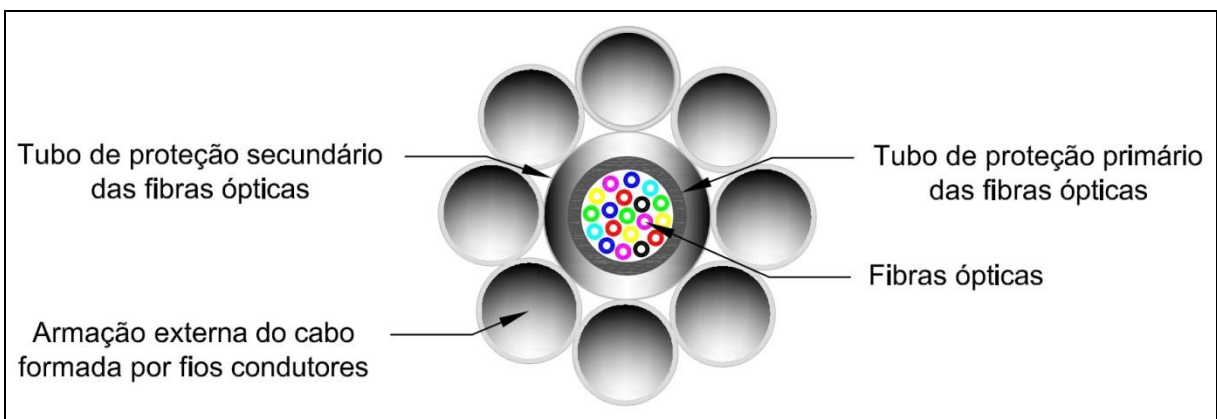


Figura 7 – Cabo OPGW formado por um tubo de proteção primário em um tubo de proteção secundário das fibras ópticas
 Fonte: Autoria Própria.

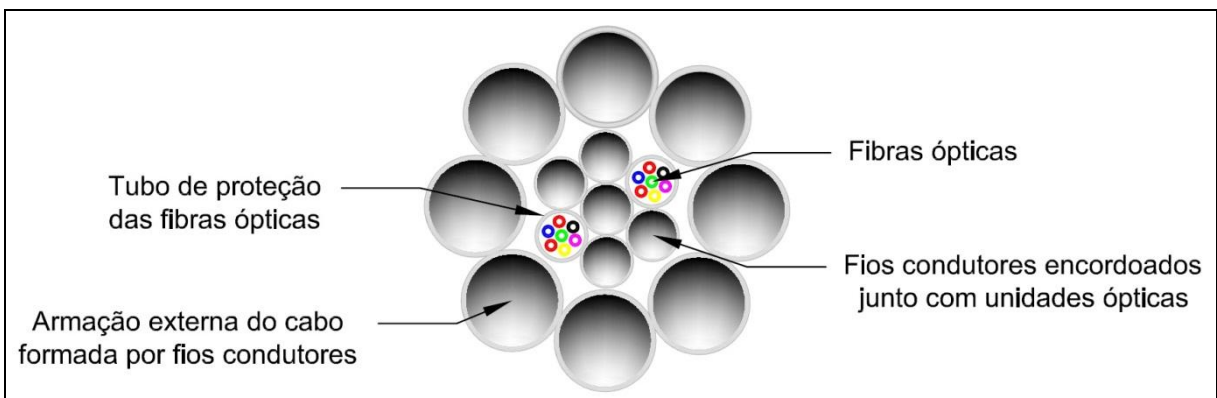


Figura 8 – Cabo OPGW formado por fios condutores encordoados junto com uma ou mais unidades ópticas
 Fonte: Autoria Própria.

Os ensaios foram realizados no Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL) testando-se os modelos de cabo OPGW das Figuras 7 e 8, com diferentes desempenhos às descargas atmosféricas, capacidade de corrente de curto-circuito e diâmetros, que variam conforme a composição dos materiais utilizados nos cabos que serão testados.

1.9 PROBLEMAS E PREMISSAS

O maior problema encontrado é a falta de literatura a respeito dos ensaios propriamente ditos. As maiores fontes de informações são provenientes de artigos publicados, normas regulamentares, levantamentos realizados por empresas do ramo de geração e transmissão e empresas fabricantes de cabos.

Partindo deste contexto, tem-se a intenção de analisar os resultados encontrados em ensaios realizados no laboratório, a fim de que, a partir dos resultados encontrados, seja possível desenvolver projetos que venham a atender de maneira mais eficaz as necessidades do mercado de cabos OPGW no Brasil, haja vista que as condições climáticas e geográficas encontradas são distintas das dos países fabricantes como Estados Unidos, Canadá, Alemanha, Suíça, Japão, Portugal e Itália.

1.10 OBJETIVOS

1.10.1 Objetivo geral

Analisar os resultados de desempenho elétrico dos ensaios de descarga atmosférica e curto-circuito realizados em cabos OPGW, a fim de registrar um documento técnico-científico que possa ser utilizado por profissionais do ramo, e também servir como base (histórico bibliográfico) para o início de um programa interno na empresa colaboradora, para incentivo e desenvolvimento de estudos destes tipos de cabos.

1.10.2 Objetivos específicos

- Comprovar a não interferência das descargas atmosféricas na transmissão de dados através das fibras ópticas;
- Simular, através do *software* VEIKI, um projeto de cabos OGPW;
- Analisar os ensaios realizados no CEPEL, verificar a suportabilidade quanto à corrente de curto-circuito, classe de corrente por descarga atmosférica determinada pelo projeto e apresentar conclusões para aplicação e viabilidade dos cabos testados;
- Registrar e ajustar o trabalho de conclusão de curso a ser utilizado pela empresa colaboradora como um documento técnico-científico, que

servirá de base para o início de um programa de incentivo e desenvolvimento de estudos para estes tipos de cabos.

1.11 JUSTIFICATIVA

- Maior confiabilidade do sistema elétrico por meio da proteção das linhas de transmissão;
- Necessidade de taxas de transmissão de dados cada vez mais elevadas, por isso a utilização de fibras ópticas;
- Fibras ópticas não são susceptíveis às interferências eletromagnéticas;
- Exigência de cabos para-raios do tipo OPGW nas linhas de transmissão, novas ou em expansão, segundo editais da ANEEL.

1.12 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O estudo o qual esta sendo proposto neste trabalho de conclusão de curso será realizado por meio de pesquisas às literaturas, artigos, entrevista com especialistas, pesquisas aplicadas e análise de resultados obtidos nos ensaios de descarga atmosférica e curto-circuito dos cabos OPGW.

Os objetivos específicos contidos neste trabalho e acima citados irão nortear o desenvolvimento do trabalho. Através da realização dos ensaios, os assuntos relacionados com o projeto do cabo tais como, materiais e valores da carga, tanto mecânica quanto elétrica, aplicados durante o ensaio, serão analisados indiretamente no decorrer do estudo.

1.13 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho será composto por 7 capítulos:

O capítulo 1 será uma apresentação sobre o tema a ser desenvolvido, explicando o tema central da pesquisa, fazendo uma apresentação histórica sobre proteção de linhas de transmissão e o uso de cabos para-raios em linhas de transmissão.

O capítulo 2 apresentará noções básicas, explicará e detalhará as fibras ópticas.

O capítulo 3 abordará os tipos de ensaios a serem executados, descarga atmosférica e curto-circuito, e os requisitos mínimos a serem demonstrados na avaliação da conformidade de cabos para-raios denominados OPGW.

O capítulo 4 detalhará como são executados os testes, apresentando cada rotina e processo necessário em cada.

O capítulo 5 apresentará como é elaborado e analisado o projeto de um cabo OPGW, indicando as definições, *softwares*, dimensionamentos e materiais necessários.

O capítulo 6 apresentará os relatórios dos ensaios realizados pelo CEPEL em cabos OPGW da empresa colaboradora.

O capítulo 7 apresentará as considerações finais.

2. FIBRA ÓPTICA

As redes compostas por fibras ópticas, hoje compõem os principais sistemas de comunicações digitais que interligam bairros, cidades e estados. Como exemplos, têm-se os cabos submarinos com fibras ópticas interligando continentes e cabos do tipo OPGW interligando subestações de usinas geradoras de energia entre cidades.

Estes sistemas por fibra óptica (FO) vêm crescendo continuamente no mundo das comunicações, pois possuem várias vantagens em relação ao meio físico metálico, dentre as que se destacam são as grandes distâncias que atingem, com elevada taxa de transmissão de dados e de forma bastante segura (MEDEIROS, 2007, p.24).

2.1 NOÇÕES BÁSICAS DE ÓPTICA

2.1.1 Meios de propagação

A luz se propaga em um meio uniforme de modo retilíneo, pois qualquer curvatura de um raio de luz que viaja pela atmosfera é tão suave que possibilita ser desprezado na maioria das medições baseadas em luz. Isto é comprovado, admitindo-se que a densidade do meio (n) é homogênea, apesar de variar com o tipo de meio, com isto a luz percorre o meio numa linha reta (ZILIO, 2009, p. 25-26).

Ao passar de um meio para outro, a luz sofre uma mudança de trajetória, mas sua propagação continua retilínea. Esta penetração da luz ocorre em dois tipos de materiais:

1) Transparentes: a luz penetra sem sofrer qualquer efeito. Esta categoria é representada pela água, ar, plásticos e vidro;

2) Translúcidos: a luz penetra parcialmente, ou seja, o material permite a passagem incompleta da luz;

Há também os materiais opacos, que são materiais que não permitem a passagem da luz.

Materiais transparentes podem se tornar opacos dependendo da quantidade de camadas ou espessura. Como exemplo, pode-se citar uma quantidade de camadas de vidro agrupadas, bloqueando a passagem da luz (FURUKAWA..., 2012, MF 104 p.8).

2.1.2 Reflexão e refração da luz

Para os conceitos sobre reflexão e refração, deve-se compreender o desenho esquemático da Figura 9:

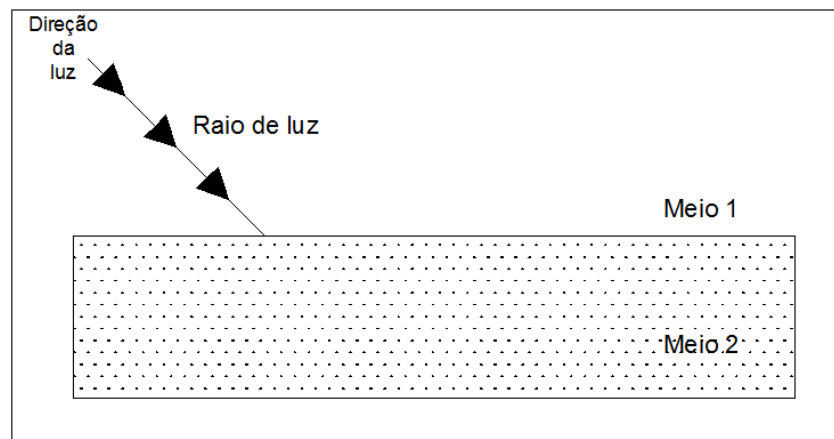


Figura 9 - Representação do raio de luz sobre uma superfície
 Fonte: adaptado de Furukawa Industrial S.A. Produtos Elétricos (2012).

A partir da figura acima, estudam-se os efeitos que a luz sofre ao passar de um meio para outro, os quais envolverão reflexão e refração da luz.

O fenômeno de reflexão é caracterizado quando um feixe de luz atinge uma superfície (raio de luz incidente) e sofre desvio para o mesmo meio (raio de luz refletido), podendo ocorrer em dois tipos de superfície:

1) Superfície Regular: superfície lisa, causando uma reflexão regular conforme mostra a Figura 10:

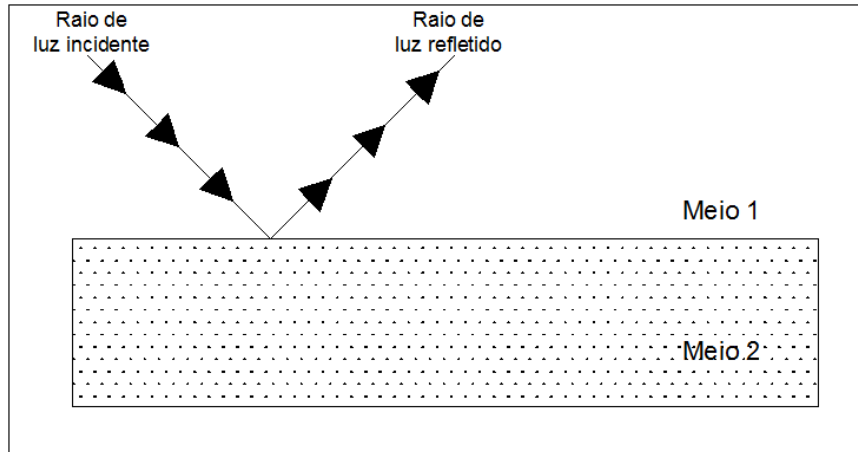


Figura 10 - Reflexão da luz em superfície regular
Fonte: adaptado de Furukawa Industrial S.A. Produtos Elétricos (2012).

2) Superfície Irregular: superfície não linear, causando uma reflexão irregular conforme mostra a Figura 11:

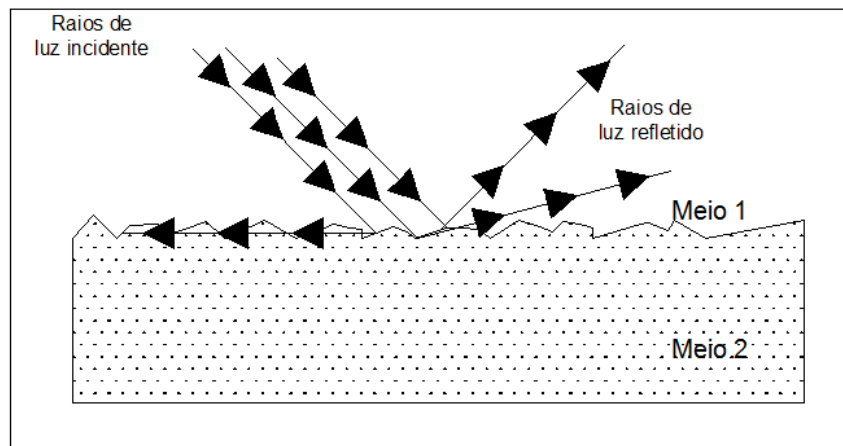


Figura 11 - Reflexão da luz em superfície irregular
Fonte: adaptado de Furukawa Industrial S.A. Produtos Elétricos (2012).

Pela Lei da reflexão da física, considera-se uma reta perpendicular à superfície (reta normal). Com isto, surgem-se dois ângulos:

- i) Ângulo de Incidência (i) que é formado entre o raio incidente e a reta normal;
- ii) Ângulo de Reflexão (r) que é formado entre o raio refletido e a reta normal.

A Figura 12 representa os dois ângulos utilizados pela lei da reflexão da física:

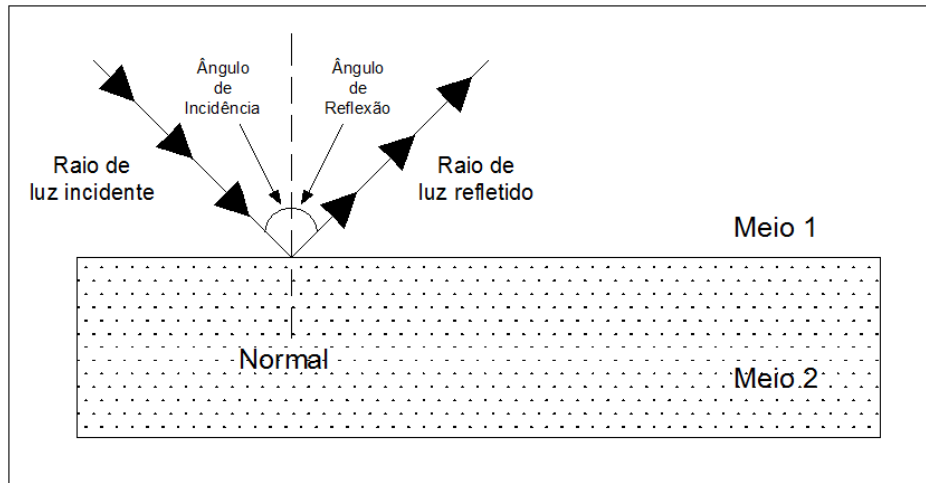


Figura 12 - Representação da Lei da Reflexão da Física

Fonte: adaptado de Furukawa Industrial S.A. Produtos Elétricos (2012).

Na reflexão, observa-se que $i = r$, ou seja, o raio incidente e o refletido estão localizados no mesmo plano.

A Refração é caracterizada pela passagem do raio de luz de um meio (Meio 1) para outro (Meio 2), conforme mostra a Figura 13:

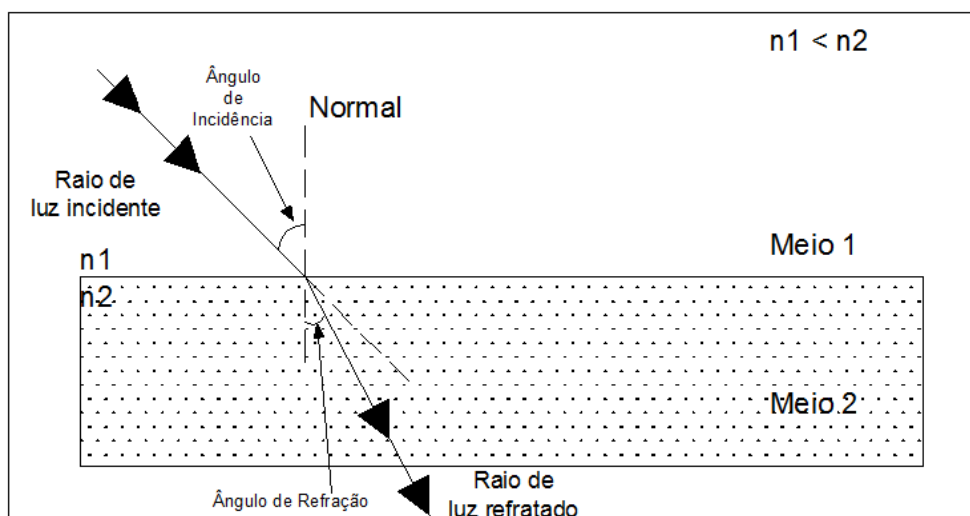


Figura 13 - Refração da Luz

Fonte: adaptado de Furukawa Industrial S.A. Produtos Elétricos (2012).

Quando este fenômeno ocorre, o material possibilita a transmissão da luz e sempre há também a reflexão, porém com uma intensidade desprezível para efeito prático. Sabe-se que a tendência do raio de luz ao ser inserido no meio é de seguir uma trajetória retilínea (propriedade de propagação da luz), porém se observa na Figura 13 que o raio refratado sofre mudança de direção ao penetrar no Meio 2. Isto ocorre devido à alteração de densidade do meio (n), ou seja, $n_1 < n_2$, tornando a velocidade no Meio 2 menor do que no Meio 1.

Com a passagem da luz de um meio para outro, surge o raio de luz refratado com seu ângulo de refração (r'), que é formado entre a normal e o raio refratado e ocorre quando (i) está entre 0° e 90° (FURUKAWA..., 2012, MF 104 p.9-10).

O índice de refração de algum meio pode ser calculado pela expressão (1) (FURUKAWA..., 2012, MF 104 p.10):

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

Onde:

n = índice de refração do meio;

c = velocidade da luz no vácuo;

v = velocidade da luz no meio.

A Tabela 5 mostra alguns índices de refração comumente utilizados:

Tabela 5 - Índices de Refração Típicos

Material	Índice de Refração (n)
Ar	1,00
Diamante	2,42
Álcool Etílico	1,36
Quartzo	1,46
Vidro	1,50 a 1,90
Fibra Óptica (1)	1,50
Água	1,33

Fonte: adaptado de Furukawa Industrial S.A. Produtos Elétricos (2012).

Notas:

(1) Sílica + dopante

Pela Tabela 5, nota-se que a fibra óptica pode possuir um índice de refração menor que o do próprio vidro, caracterizando um material mais puro para a passagem da luz. A Lei de Snell permite determinar o ângulo de refração (r') gerado por um raio de luz que trafega entre dois meios com “ n ” diferentes através da equação (2) (FURUKAWA..., 2012, MF 104 p.10):

$$n_1 \sin(i) = n_2 \sin(r') \quad (2)$$

Caso, o meio 1 seja o ar, tem-se a equação (3):

$$\sin(i) = n_2 \sin(r') \quad (3)$$

Para o estudo de fibras ópticas é interessante o estudo de dois fenômenos no que se refere à propagação da luz, que ainda não foi comentado:

1) Passagem da luz de um meio mais denso (alto índice de refração) para um meio menos denso (baixo índice de refração): neste caso não há refração se um raio de luz incidente atingir a superfície de interface com um ângulo maior ou igual ao ângulo crítico (i_c). Este ângulo aparece quando o ângulo de incidência é suficientemente elevado, fazendo com que o raio refratado, ao atingir a superfície entre os meios, se propaga paralelamente, conforme mostra a Figura 14:

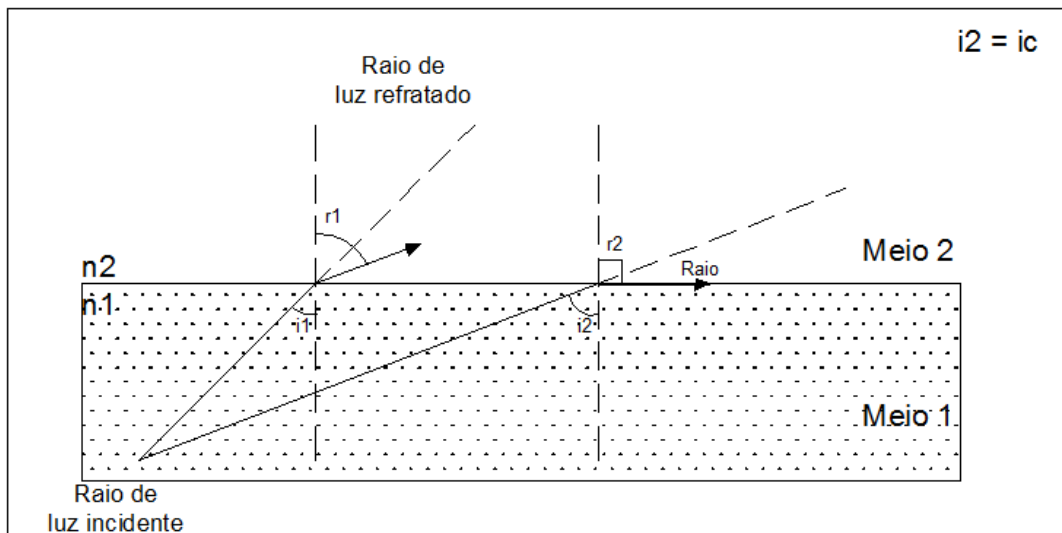


Figura 14 - Raios Refratado e Refletido
Fonte: adaptado de Furukawa Industrial S.A. Produtos Elétricos (2012).

Na Figura 14, tem-se que $n_1 > n_2$.

Para efeitos práticos, pode-se considerar neste caso que o meio 1 é a Água, enquanto que o meio 2 é representado pelo Ar.

Com a aplicação da equação 2 e sabendo que $r_2 = 90^\circ$, é possível deduzir a seguinte equação:

$$n_1 \sin(i_2) = n_2 \sin(90^\circ) \quad (4)$$

$$\sin(i_2) = \frac{n_2 \times 1}{n_1} \quad (5)$$

No desenho esquemático da Figura 14, á dado que $i_c = i_2$, então:

$$\sin(i_c) = \frac{n_2}{n_1} \quad (6)$$

Assim, conclui-se que um raio de luz ao se propagar de um meio mais denso para um menos denso, com ângulo de incidência maior que i_c , sofrerá o efeito de reflexão interna total sendo direcionado paralelamente à superfície entre os meios. Este é o conceito, ou seja, o modo de propagação do sinal luminoso no qual se baseiam as fibras ópticas do tipo monomodo ou *Single Mode* (SM).

2) Dispersão da luz: este fenômeno ocorre quando a luz policromática (maioria dos feixes de luz) passa pelo processo conhecido como dispersão cromática, ou seja, quando há um ensaio de decomposição da luz nos vários comprimentos de onda que a compõem, através de um prisma de vidro.

Um bom exemplo a ser citado é a própria luz branca que é composta por seis cores (vermelho, laranja, amarelo, verde, azul e violeta), sendo que cada cor se propaga em diferentes comprimentos de onda, nos quais percorrem em velocidades diferentes no mesmo meio, devido aos seus diferentes índices de refração (FURUKAWA..., 2012, MF 104 p.10-11).

2.2 FUNCIONAMENTO DAS FIBRAS ÓPTICAS

2.2.1 Estrutura básica da fibra

A fibra óptica é produzida basicamente de materiais dielétricos desenhada na forma de estrutura cilíndrica. A composição básica é representada na Figura 15 (FURUKAWA..., 2012, MF 104 p.13):

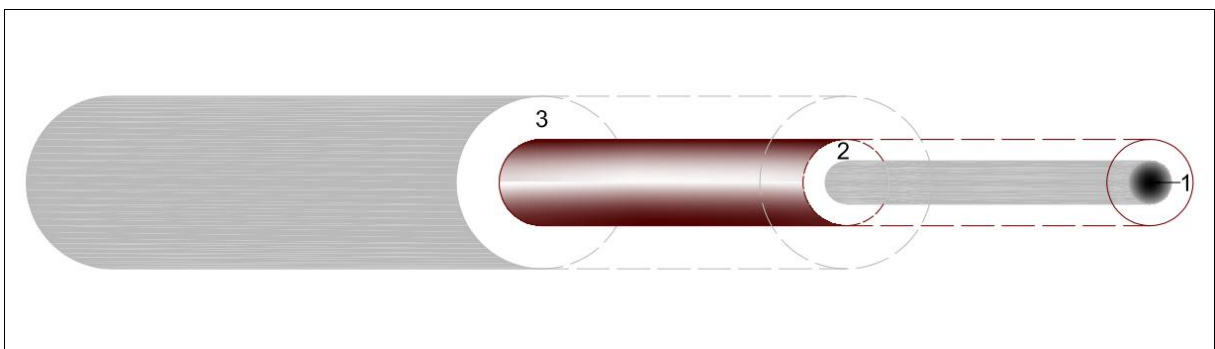


Figura 15 - Estrutura Genérica da Fibra Óptica

Fonte: Autoria Própria.

Onde:

1 = Núcleo: região central onde trafega a luz, podendo variar de 8 μm até 200 μm . Composto por Sílica Dopada ($\text{SiO}_2 + \text{GeO}_2$);

2 = Casca: região periférica que envolve o núcleo, variando de 125 μm até 240 μm . composta por sílica (SiO_2);

3 = Cobertura: proteção externa da fibra óptica (proteção do vidro), composta por acrilato (plástico) e identificada por diferentes cores.

2.2.2 Princípio de funcionamento

O raio de luz injetado na extremidade da fibra óptica, sob um cone de aceitação determinante do ângulo de incidência, trafega utilizando o princípio de reflexão total conforme apresentado anteriormente em “Noções Básicas de Óptica”.

A propagação da luz no interior de uma fibra óptica se dá dentro do núcleo quando um raio luminoso (meio 1 com n_1) com ângulo de incidência maior ou igual ao ângulo crítico atinge a superfície da casca (meio 2 com n_2), sendo $n_1 > n_2$, causando a reflexão e o conseqüente retorno do raio de luz para o núcleo (FURUKAWA..., 2012, MF 104 p.13).

Este processo pode ser observado na Figura 16.

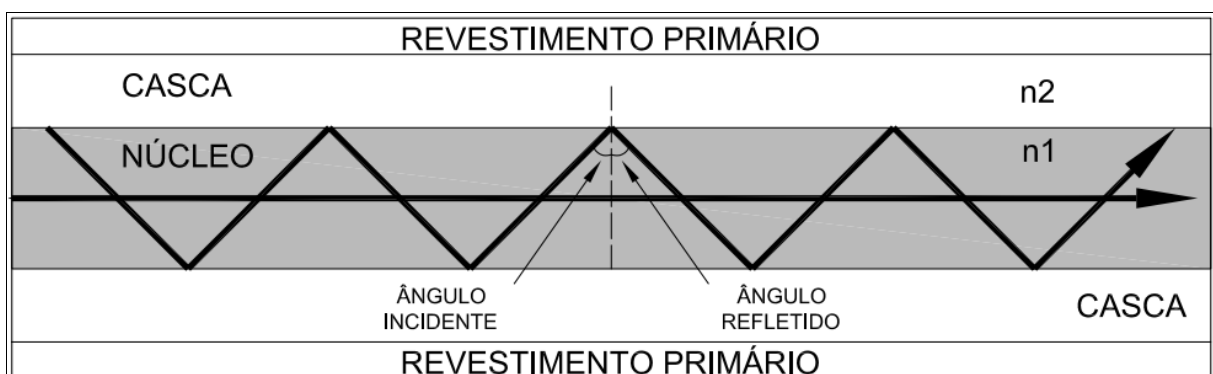


Figura 16 - Princípio de Funcionamento

Fonte: adaptado de Furukawa Industrial S.A. Produtos Elétricos (2012).

2.2.3 A comunicação pelo meio óptico

A comunicação óptica pode ser separada em um sistema composto por três fases (FURUKAWA..., 2012, MF 104 p.13):

1) Transmissão: nesta etapa o sinal elétrico é transformado em sinal óptico.

Constituído pelos elementos:

- Circuito de processamento elétrico (driver): controla a polarização elétrica e potencial de emissão óptico;

- Circuito emissor de luz (EL): desempenha a função da conversão e emissão do sinal óptico.

2) Meio físico em fibra (canal): meio pelo qual a luz é guiada. Encaminhamento da luz do equipamento transmissor até o receptor.

3) Recepção: possui a função inversa do transmissor, detectando o sinal óptico recebido e convertendo-o em sinal elétrico. Constituído pelos elementos:

- Semicondutor fotodetector (FD): realiza a conversão de sinal óptico para sinal elétrico;
- Circuito amplificador-filtro (AF): trata o sinal recebido para sua correta leitura.

As três fases podem ser representadas por meio de um diagrama de blocos da Figura 17:

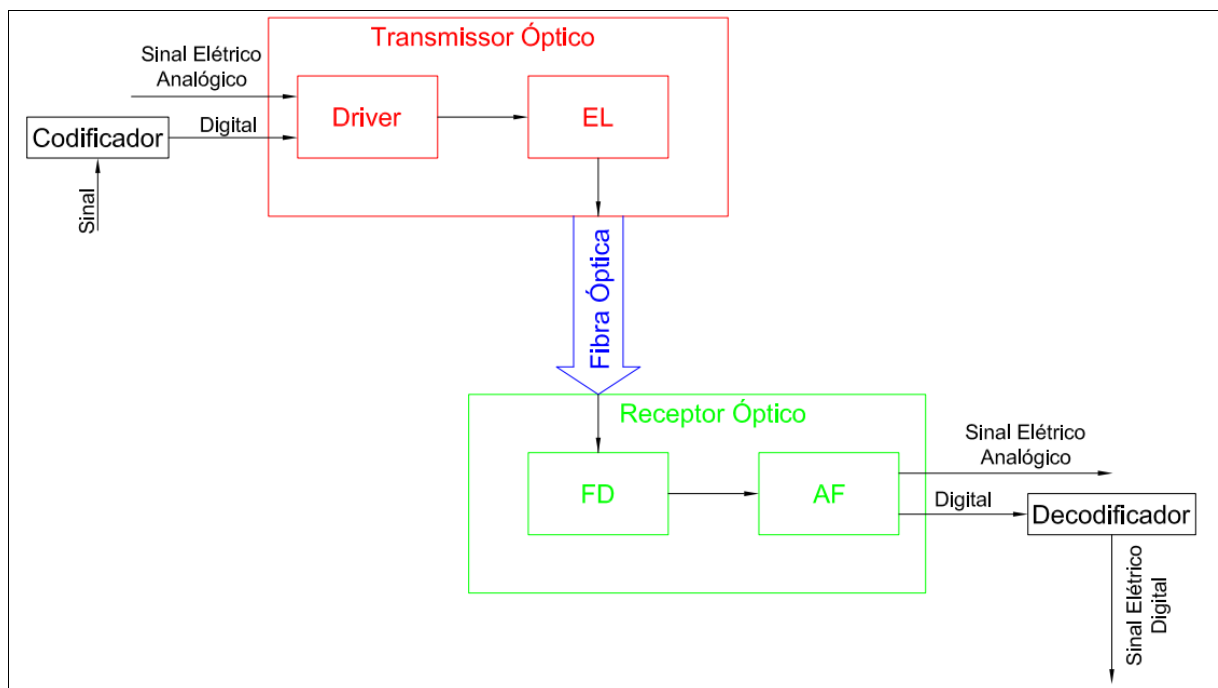


Figura 17 - Sistema de Comunicação por Fibra Óptica
 Fonte: adaptado de Furukawa Industrial S.A. Produtos Elétricos (2012).

2.3 CLASSIFICAÇÃO DAS FIBRAS ÓPTICAS

As fibras ópticas sofrem modificações de acordo com a aplicação em que são submetidas. Dentre estas mudanças, podem variar na composição, nas dimensões e nos processos de fabricação. O parâmetro classificatório mais utilizado

se baseia na característica de propagação do sinal luminoso, que consiste em dois modelos: *Multi Mode* (MM) e *Single Mode* (SM) (MEDEIROS, 2007, p.81).

2.3.1 Fibras Multimodo (MM)

Diferenciam-se das fibras SM por apresentarem um núcleo maior (62,5 μm e 50 μm) e permitem que os modos possíveis (quantidade limitada de raios luminosos por fibra) se propaguem simultaneamente em seu interior. Foram as primeiras a serem comercializadas e possuem preços mais acessíveis, devido aos seus acessórios e transmissores ópticos serem mais baratos. As fibras MM são classificadas em: MM de Índice Degrau (atualmente não é mais comercializada) e MM de Índice Gradual.

Este tipo de fibra não é aplicável nos cabos OPGW por apresentarem grandes perdas (alta atenuação) no sinal óptico ao percorrerem longas distâncias (FURUKAWA..., 2012, MF 104 p.14).

2.3.2 Fibras Monomodo (SM)

São fibras que apresentam núcleo tipicamente de 9 μm e apenas um modo de propagação, ou seja, os raios de luz percorrem no interior do núcleo da fibra por um único caminho. Assim como as fibras MM, se diferenciam pela diferença do índice de refração do núcleo em relação à casca e são classificadas em: SM Índice Degrau *Standard*, SM Dispersão Deslocada (*Dispersion Shifted*) ou *Non-Zero Dispersion*.

Este tipo de fibra apresenta características muito superiores às multimodos com banda passante mais larga, o que aumenta a capacidade de transmissão. Também possui baixas perdas e possibilita a transferência em maiores distâncias sem a necessidade da utilização de várias estações repetidoras de sinal ao longo do caminho (FURUKAWA..., 2012, MF 104 p.16).

Cabos OPGW utilizam fibras do tipo SM para transferência de dados, pois os enlaces com este tipo de fibra podem ultrapassar 200 km entre repetidoras.

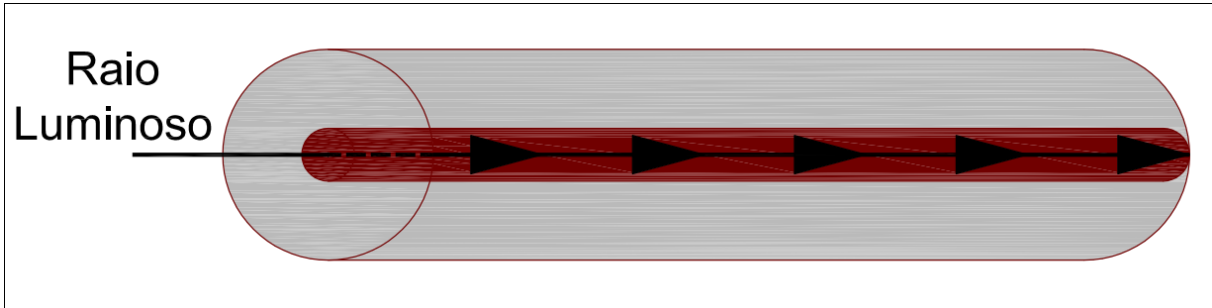


Figura 18 - Perfil de fibra SM

Fonte: adaptado de Furukawa Industrial S.A. Produtos Elétricos (2012).

2.4 DISPERSÃO E ATENUAÇÃO EM FIBRAS ÓPTICAS

O meio físico a ser empregado é definido pela atenuação e banda passante (ou largura de banda), isto ocorre em todos os sistemas de transmissão, e em fibras ópticas a banda passante está intimamente ligada com a dispersão do sinal (FURUKAWA..., 2012, MF 104 p.16).

Largura de banda ou banda passante é o número de frequências mínimas necessárias para representar o sinal, de tal forma que a transmissão da informação seja completa, ou seja, a informação que sai pelo transmissor deve possuir uma frequência mínima para que seja corretamente interpretada pelo receptor (FURUKAWA..., 2012, MF 101 p.8).

2.4.1 Dispersão em fibras ópticas

Este fenômeno limita a largura de banda do sinal transmitido, pois é um efeito em que os modos que geram uma frente de onda de luz, são separados quando estes percorrem ao longo da fibra, fazendo com que as chegadas deles à outra extremidade sejam espalhadas em relação ao tempo, ou seja, alguns modos chegam atrasados ou adiantados em relação aos outros. Este efeito numa transmissão digital, por exemplo, dificulta a recepção do sinal pelo circuito receptor e a posterior decodificação.

A diferença entre a largura do pulso de entrada para o pulso correspondente do sinal de saída na fibra é chamado de interferência intersimbólica ou dispersão de pulso (FURUKAWA..., 2012, MF 104 p.19).

A dispersão está diretamente relacionada com a distância percorrida pela luz óptica, por isto é especificada por unidade de comprimento em ns/km, e em fibras ópticas pode ser classificada em (FURUKAWA..., 2012, MF 104 p.20):

i) Dispersão Intermodal, multimodo ou modal: ocorre somente em fibras MM e resulta da geometria do guia de onda e das diferenças dos índices de refração, que permitem à fibra propagar vários modos ou raio de luz percorrendo caminhos diferentes e chegam a um determinado ponto em tempos distintos.

ii) Dispersão Intramodal, material ou cromática: se apresenta em todas as fibras e resulta do índice de refração do material da fibra com relação ao comprimento de onda. É neste caso que se comprova que uma fonte de luz *laser* é efetivamente melhor do que um LED (*Light Emitting Diode*) convencional, pois o laser emite uma luz mais “pura” e com menor largura espectral, ou seja, uma luz mais monocromática onde não existe dispersão cromática, se comparado ao LED.

Em fibras SM que possuem dispersão material reduzida, também ocorre a Dispersão de Guia de Onda que é provocada por variações nas dimensões do núcleo e variações no perfil de índice de refração ao longo da fibra óptica, e depende do comprimento de onda da luz (FURUKAWA..., 2012, MF 104 p.20).

2.4.2 Atenuação em fibras ópticas

Atenuação óptica significa a diminuição progressiva da potência do sinal ao percorrer a fibra variando de acordo com o comprimento de onda da luz utilizada. É medida em dB/km e resulta da soma de várias perdas ligadas à estrutura do guia de onda e ao material que é empregado na fabricação das fibras (FURUKAWA..., 2012, MF 104 p.17).

Para canais de comunicação, define-se a atenuação como sendo a relação entre as potências luminosas na entrada e na saída da fibra, por quilometro de fibra, conforme a equação (7) (FURUKAWA..., 2012, MF 101):

$$\alpha_{fibra} = \frac{10 \times \log\left(\frac{P_{saída}}{P_{ent}}\right)}{L} \left[\frac{db}{km} \right] \quad (7)$$

Onde:

α_{fibra} = atenuação da fibra;

$P_{saída}$ = potência luminosa na saída da fibra;

P_{ent} = potência luminosa na entrada da fibra;

L = comprimento da fibra.

Este efeito é decisivo para os testes aplicados nos cabos OPGW, caso o cabo apresente uma atenuação maior que valor limitante considerado pela norma, é considerado reprovado no teste.

Existem 3 mecanismos que provocam a atenuação:

1) Absorção: ocorre quando a casca absorve a luz que passa pelo núcleo, fazendo com que haja perda de potência à medida em que o sinal é transmitido pela fibra óptica. Pode ocorrer de 2 maneiras:

- Absorção Intrínseca que é causada pela absorção da luz na faixa ultravioleta e infravermelho pelas moléculas da sílica e de seus dopantes;
- Absorção Extrínseca que é causada por impurezas impossíveis de serem isoladas durante o processo de fabricação das fibras. A pior impureza existente é um íon chamado água que é incorporado ao núcleo durante o processo de produção e muito difícil de ser eliminado. Este íon, classificado como OH⁻ (hidroxila), provoca atenuação no comprimento de onda de 2700 nm e sobre seus harmônicos, em torno de 950 nm, 1240 nm e 1380 nm, que são conhecidos como picos de água (*water peaks*), na faixa de baixa atenuação da fibra (FURUKAWA..., 2012, MF 104 p.17).

2) Espalhamento: este efeito atenuador acontece quando parte da energia luminosa sofre desvio, sendo guiada pelos muitos modos de propagação e direcionada em vários sentidos. Há vários tipos de espalhamento:

- *Rayleigh*;
- *Mie*;
- *Raman* estimulado;
- *Brillouin* estimulado.

O mais importante a ser considerado num sistema de transmissão óptico é o primeiro tipo de espalhamento (*Rayleigh*) que é caracterizado pela não homogeneidade microscópica de flutuações térmicas, flutuações de composição, variação de pressão, pequenas bolhas, variação no perfil de índice de refração (conforme mostra a Figura 19), entre outros.

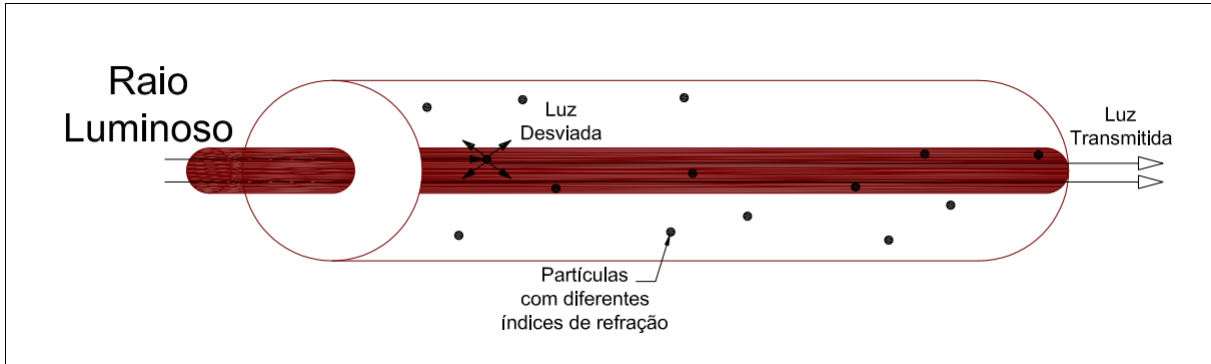


Figura 19 - Efeito de Espalhamento *Rayleigh* por variação de índice de refração
 Fonte: adaptado de Furukawa Industrial S.A. Produtos Elétricos (2012).

3) Deformações Mecânicas: ocorrem ao longo da fibra óptica, sendo suas principais causas a aplicação de esforços sobre a mesma durante a confecção e devido à instalação do cabo. Podem ocorrer de 2 maneiras:

- Deformações Mecânicas por Macrocurvaturas: ocorre quando o raio de curvatura é significativamente maior que o diâmetro da fibra, fazendo com que os modos de alta ordem, ou seja, aqueles com ângulo de incidência próximo ao ângulo crítico não apresentam condições de reflexão interna total devido às curvaturas de raio finito da fibra óptica. Pode-se simplificar como perdas pontuais ou localizadas de luz por irradiação e este efeito ocorre normalmente nos processos de empacotamento das fibras nos cabos, manobras das fibras nas caixas de emenda e nos painéis de distribuição e, instalação e acomodação final do cabo.

A Figura 20 representa a perda por macrocurvatura

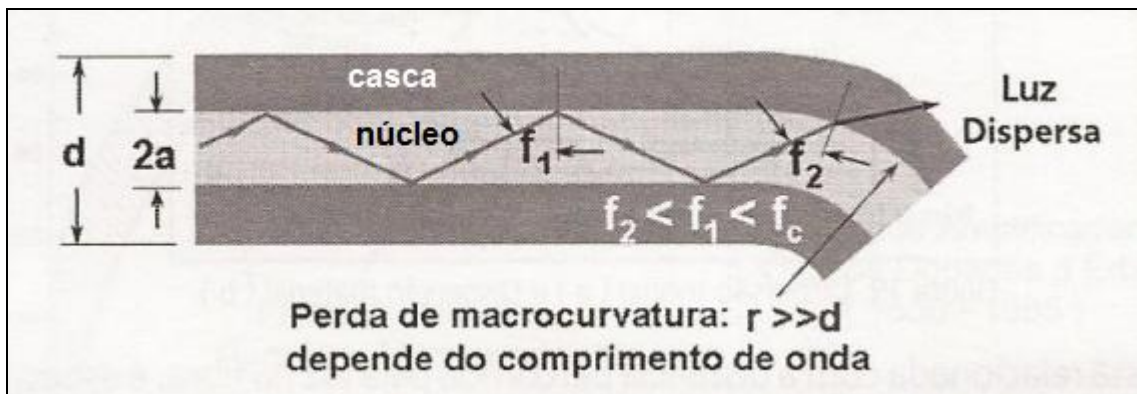


Figura 20 - Exemplo de fibra com perda por macrocurvatura
 Fonte: adaptado de Furukawa Industrial S.A. Produtos Elétricos (2012).

- Deformações mecânicas por microcurvaturas: neste caso parte da energia luminosa do núcleo são extraídas pelas microcurvaturas, pois os modos de alta ordem se tornam não guiados. Esta deformação é perceptível no momento de tensão induzida pelo revestimento durante a manufatura, empacotamento das fibras no cabo, expansão e contração durante o ciclo de temperatura e nos processos de conectorização. É causado por pressão transversal na fibra, fazendo com que a mesma fique comprimida contra uma superfície levemente rugosa, conforme mostra a Figura 21.

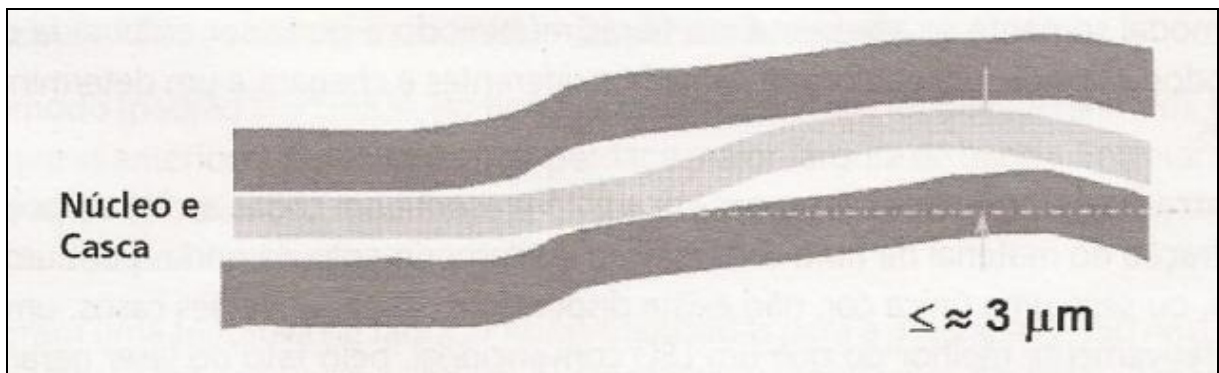


Figura 21 - Exemplo de fibra com perda por microcurvaturas

Fonte: adaptado de Furukawa Industrial S.A. Produtos Elétricos (2012).

Existem três regiões de baixa atenuação em que os sistemas de transmissão de dados com fibras ópticas são projetados: 850nm, 1310nm e 1550 nm. Estas regiões são chamadas de janelas ópticas e os equipamentos transmissores (*lasers*) e detectores são facilmente fabricados para atenderem a esta faixa.

JANELA	FAIXAS DE COMPRIMENTOS DE ONDA	ATENUAÇÃO	APLICAÇÃO
1ª	800 - 900 nm	Alta	Pequenas Distâncias (< 2 km)
2ª	1260 - 1360 nm	Média	Longas Distâncias
3ª	1430 - 1580 nm	Baixa	Longas Distâncias

Quadro 1 - Janelas Ópticas para Transmissão de Fibras Ópticas.

Fonte: adaptado de Furukawa Industrial S.A. Produtos Elétricos (2012).

2.5 FIBRAS ÓPTICAS ESPECIAIS

2.5.1 Fibras SM DSF (*Dispersion Shifted Fiber*) – Dispersão Deslocada

Padronizadas como fibras SM padrão ITU G653, apresentam dispersão deslocada para possibilitar baixíssimas perdas e maior largura de banda. Porém não é economicamente vantajosa, pois sua fabricação exige técnicas avançadas e de difícil manuseio, tornando-as com alto custo para produção.

As fibras SM DSF foram uma equívoca tentativa de fabricar fibras otimizadas para a 3ª janela (1550 nm), com dispersão cromática zero em 1550 nm, para suprir a necessidade dos sistemas DWDM (*Densed Wavelength Division Multiplexing*) – multiplexação por comprimento de onda utilizado em sistemas de comunicação óptica, multiplexando comprimentos de onda (cores) em uma única fibra óptica. Utilizados no processo em que as fontes ópticas de alta precisão fornecem o tráfego de dados, em comprimentos de onda pré-determinados, que será multiplexado e transmitido pela fibra (FURUKAWA..., 2012, MF 104 p.21).

2.5.2 Fibras SM NZD SF (*Non-Zero Dispersion Shifted Fiber*)

Seguem o padrão ITU G655 e são otimizadas para sistemas DWDM.

Este tipo de fibra possui baixa dispersão, porém não é nula em 1550 nm e é bastante utilizada em cabos do tipo OPGW (FURUKAWA..., 2012, MF 104 p.21).

2.5.3 Fibras SM *Low Water Peak* (Baixo Pico D'água)

As fibras SM, padrão *Low Water Peak* (LWP) – G.652D ITU-T, são produzidas com a característica da diminuição ou eliminação do efeito “*water peak*”, ou seja, são fabricadas com baixa concentração de íons hidroxila, permitindo que a faixa de 1400 nm seja utilizada para tráfegos de sistemas ópticos.

Na tecnologia DWDM, estas fibras operam sobre toda a faixa de comprimentos de onda entre 1280 nm e 1625 nm aumentando a faixa operacional em mais de 50% e também permitem mais canais do que as fibras ópticas SM convencionais, chegando a 400 canais. Geralmente são utilizadas em cabos OPGW nas linhas de transmissões, pois são aplicáveis em distâncias de até 70 km (para velocidade de 1 Gbps na janela de 1550 nm) (FURUKAWA..., 2012, MF 104 p.21).

2.6 VANTAGENS DAS FIBRAS ÓPTICAS

O avanço da tecnologia demandou transformações avançadas nos sistemas de telecomunicações, fazendo com que as soluções metálicas (cabos coaxiais e cabos de par trançado) e por microondas já não fossem suficientes para atenderem aos novos requisitos atuais. A partir disto que vieram as fibras ópticas, com características superiores e muitas vantagens em relação aos meios físicos metálicos (FURUKAWA..., 2012, MF 104 p.11).

2.6.1 Imunidade a interferências eletromagnéticas

Os materiais constituintes das fibras ópticas possuem características dielétricas, ou seja, são imunes a quaisquer interferências eletromagnéticas, garantindo o sinal em ambientes ruidosos (ambientes com interferência de ondas eletromagnéticas), como fábricas e centros de radiocomunicação.

O sinal de comunicação em cabos OPGW é bastante seguro e apresenta poucas perdas (baixa atenuação), pois não há circulação de corrente nas fibras ópticas, diminuindo problemas com relação a curto-circuito e descargas atmosféricas.

Existem cabos ópticos com materiais totalmente dielétricos (sem fita de aço corrugado ou condutores metálicos para sustentação do cabo) que proporcionam ótimo isolamento elétrico e evitam problemas com aterramento do cabo e dos equipamentos. Este tipo de cabo é indicado para ambientes onde existe risco de explosão pela presença de gases inflamáveis, pois como não há condução de corrente, evitam-se problemas como curto-circuito, centelhamento e choques elétricos (FURUKAWA..., 2012, MF 104 p.11).

2.6.2 Dimensões otimizadas

As fibras ópticas, inclusive com seus revestimentos de proteção, possuem dimensões e pesos consideravelmente menores. Por comparação, na mesma capacidade de transmissão, um cabo óptico pode ser até vinte vezes menor em tamanho e peso do que um cabo metálico (FURUKAWA..., 2012, MF 104 p.12).

2.6.3 Grandes distâncias nas transmissões

A atenuação em fibras ópticas é bastante baixa, o que viabiliza links de transmissões em grandes distâncias sem a necessidade de muitas repetidoras e regeneradoras de sinais ao longo do caminho. Há fibras com capacidade de alcançar até cinco vezes mais do que um enlace de microondas, chegando a percorrer 250 km de *link* óptico.

Estas distâncias só foram possíveis devido ao desenvolvimento de novas tecnologias, que atualmente estão sendo inovadas e avançadas com o estudo de novas fibras e equipamentos capazes de atingirem distâncias e velocidades de transmissão ainda maiores sem a necessidade de equipamentos de regeneração de sinal (FURUKAWA..., 2012, MF 104 p.12).

2.6.4 Alta capacidade de transmissão

As fibras ópticas possuem alta capacidade de transmissão (aproximadamente dez mil vezes a mais do que sistemas convencionais de microondas) e com possibilidade de expansão do número de canais de voz, vídeo e dados no mesmo meio de comunicação, abrindo as portas às aplicações que antes eram inconcebíveis, tornando-as possíveis na prática (FURUKAWA..., 2012, MF 104 p.12).

2.6.5 Atual vantagem econômica

Os cabos ópticos para grandes distâncias apresentam vantagem na relação custo-benefício, se comparado aos outros meios físicos. Por exemplo, quando aplicados em longas distâncias, o cabo óptico possui maior capacidade de transmissão sem a necessidade de muitas repetidoras. Já para sistemas convencionais de transmissão por microondas, que são limitados à distância de 50 km entre as repetidoras, haverá mais equipamentos repetidores ou regeneradores de sinal e a capacidade de transmissão será mais limitada.

Em distâncias curtas, os cabos ópticos ainda são relativamente caros para algumas aplicações, porém este quadro será revertido devido aos futuros planos de expansão que deverão ocorrer nas instalações, tornando-se um custo competitivo para as próximas tecnologias que demandarão este meio físico (FURUKAWA..., 2012, MF 104 p.12).

2.6.6 Comunicação segura

Os cabos ópticos operam na faixa do infravermelho (770 até 106 nm) para o sinal de comunicação, dificultando a interferência de intrusos nos sinais (conhecidos como “grampos”), pois exigem equipamentos bastante sofisticados capazes de captá-los e decifrá-los (FURUKAWA..., 2012, MF 104 p.12).

2.7 DESVANTAGENS DAS FIBRAS ÓPTICAS

2.7.1 Fragilidade

O manuseio de uma fibra óptica sem encapsulamento (fibra óptica nua) deve ser muito delicado. É preciso ter muito cuidado com as fibras ópticas, pois por serem feitas de vidro, são bastante susceptíveis à quebra.

2.7.2 Instalação/manutenção e custo

Cabos de fibra óptica possuem tecnologia relativamente nova se comparado aos cabos metálicos. Conseqüentemente, se faz necessário a instalação e/ou manutenção com maior custo, devido a necessidade de mão de obra especializada e que ainda não se encontra presente em todos os lugares. Além disto, as pequenas dimensões das fibras ópticas exigem procedimentos e dispositivos de alta precisão na realização das conexões e junções, necessitando-se de equipamentos altamente tecnológicos.

O próprio cabo, assim como as interfaces ópticas, é relativamente mais caro se comparado com os demais meios de transmissão. Só será justificável a aplicação de fibras ópticas nos casos em que há demanda por velocidade de banda ou para grandes enlaces de comunicação, conforme comentado anteriormente em “Atual vantagem econômica” (FOROUZAN, 2006).

2.7.3 Perdas altas em acopladores Tipo T

É muito difícil se obter acopladores de derivação tipo T para fibras ópticas com baixo nível de perdas, o que dificulta a utilização de fibras ópticas em sistemas multiponto. Porém, já são utilizados sistemas ponto – multiponto em fibras ópticas, através de divisores de sinal óptico (conhecido como *splitters*) que constituem a

tecnologia de rede óptica passiva ou *Passive Optical Network* (PON), caracterizada por não haver necessidade de equipamento ativo (equipamento alimentado por energia elétrica) ao longo da infraestrutura óptica, ou seja, os equipamentos ativos ficam instalados somente na central de transmissão e central de recepção, tornando o canal óptico totalmente passivo.

2.7.4 Falta de padronização dos componentes ópticos

A relativa imaturidade e o contínuo avanço tecnológico não têm facilitado o estabelecimento de padrões para os componentes de sistemas de transmissão por fibras ópticas.

3. TIPOS DE TESTES E PARÂMETROS A SEREM TESTADOS

Todos os cabos para-raios que contenham fibras ópticas, também denominados como cabos OPGW, para serem comercializados devem estar em conformidade com a norma ABNT NBR 14074:2009 “Cabos para-raios com fibras ópticas (OPGW) para linhas aéreas de transmissão - Requisitos e métodos de ensaio”.

Deste modo, cabos fabricados, comercializados e utilizados em território nacional devem seguir esta norma que determina os métodos de ensaios e os requisitos técnicos mínimos para a fabricação dos cabos OPGW, podendo estes cabos serem constituídos por uma ou mais fibras, protegidas e envolvidas por uma ou mais camadas de fios metálicos (ABNT NBR 14074, 2009, p. 1).

A norma enfatiza dois requisitos fundamentais 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.

Até a publicação da norma ABNT NBR 14074:2009, existiam normas específicas para tratar os ensaios de curto-circuito e descarga atmosférica. Estas normas eram respectivamente:

- ABNT NBR 13981:1997 “Cabos para-raios com fibras ópticas para linhas aéreas de transmissão (OPGW) – Curto-circuito – Método de ensaio”;

- ABNT NBR 14586:2000 “Cabos para-raios com fibras ópticas para linhas aéreas de transmissão (OPGW) – Determinação dos efeitos da descarga atmosférica – Método de ensaio”.

Porém, após revisão, estas duas normas foram incluídas na ABNT NBR 14074:2009.

Os parâmetros a serem avaliados estão diretamente ligados às correntes aplicadas, pois são estas características que interessam aos cabos OPGW, ou seja, a tensão é uma componente indiretamente envolvida, visto que o que realmente impacta na configuração dos cabos para-raios é a corrente.

3.1 PARÂMETROS PARA O ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO

Na ABNT NBR 14074:2009 encontram-se os requisitos que o cabo deve atender, os procedimentos do ensaio, materiais utilizados e preparação da amostra a ser ensaiada.

Após a realização dos ensaios, determinados limites e requisitos devem ser atendidos para aprovação dos cabos testados. Assim sendo, para o ensaio de curto-circuito, o cabo não deve apresentar:

- Variação do coeficiente de atenuação superior a 0,2 dB/km da fibra ensaiada;
- 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 a montagem ou aos acessórios utilizados e que possa provocar alteração do bom desempenho do produto;
- Temperatura, em qualquer ponto monitorado, superior a informada pelo fornecedor, calculada em função do nível de curto-circuito e do sistema de proteção da linha, fornecidos pelo comprador;

Os componentes poliméricos do cabo ensaiado não devem apresentar, segundo a ABNT NBR 14074:2009:

- tempo de indução oxidativa (OIT) inferior a 10 minutos para o composto de enchimento;

- temperatura de início de decomposição, após a 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;
- Alterações em suas dimensões superiores a 10%.

3.2 PARÂMETROS PARA O ENSAIO DE DESCARGA ATMOSFÉRICA

Os requisitos, assim como a metodologia de ensaio do cabo encontram-se na norma ABNT NBR 14074:2009. Quando o cabo é submetido ao ensaio de descarga atmosférica, após a sua realização, devem ser verificados os efeitos causados pelo ensaio, devendo ser acordado entre fornecedor e comprador as seguintes condições:

- Coeficiente de segurança para o cálculo da carga limite de ensaio;
- Classe de ensaio;
- Necessidade de monitoração óptica;

Durante o ensaio, aplicar cinco descargas em cinco corpos de prova distintos:

- Caso não ocorra falha em nenhum dos corpos de prova, o cabo deve ser considerado aprovado;
- Caso ocorra falha em mais de um corpo de prova, o cabo deve ser considerado rejeitado;
- Caso ocorra falha em um corpo de prova, devem ser realizadas mais duas aplicações em dois novos corpos de prova. Havendo qualquer falha nesses dois novos corpos de prova, o cabo deve ser considerado rejeitado;
- Caso não ocorra falha em nenhum desses novos corpos de prova, o cabo deve ser considerado aprovado.

Entende-se como falha do corpo de prova durante o ensaio:

- 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 6 - Acréscimo ou variação de atenuação (ABNT NBR 14074:2009), abaixo representada, na carga máxima de projeto.

Tabela 6 - Acréscimo ou variação de atenuação

Tipo de fibra óptica	Comprimento de onda		Acréscimo ou variação (máx.)	
	De operação nm	De medida nm	Do coeficiente de atenuação dB/km	De atenuação dB
Multimodo	850	850 ± 20	0,2	0,2
Multimodo	850/1300	1300 ± 20	0,2	0,2
Monomodo	1310	1310 ± 20	0,1	0,1
Monomodo	1310/1550	1550 ± 20	0,05	0,1

Fonte: ABNT NBR 14074 (2009).

É válido fazer neste momento uma ressalva quanto ao primeiro item apontado como falha durante o ensaio de descarga atmosférica.

Mesmo não estando normatizado, adota-se que poderá ocorrer até 40% de rompimentos dos fios do cabo OPGW. Com rompimentos acima deste valor, poderiam ocorrer variações de atenuação acima do determinado por norma, conforme tabela 6, acarretando em reprovação do cabo no ensaio.

Quanto à exposição da unidade óptica, deve-se levar em conta a configuração dos cabos OPGW, uma vez que determinados cabos possuem mais de uma camada de fios encordoados. Assim sendo, havendo o rompimento de fios da camada externa e não havendo exposição da unidade óptica e as demais características requisitadas não forem alteradas o cabo será considerado aprovado no ensaio.

4. EXECUÇÃO DOS TESTES

4.1 ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO

O ensaio de curto-circuito tem como objetivo realizar a verificação do comportamento óptico e mecânico do cabo OPGW quando submetido à passagem da corrente de curto-circuito, determinada pelo projeto, e ao conseqüente aumento de temperatura sofrido.

Para a execução do ensaio foram utilizados 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 campo de corrente, que é definido como qualquer parte do cabo, ferragens, dispositivos de medida ou quaisquer outros equipamentos associados nos quais a corrente aplicada irá circular, 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, caracterizado pelo cabo, ferragens, dispositivos de medida, e outros equipamentos associados e que estejam sujeitos a corrente de curto-circuito, aumento de temperatura ou tensão mecânica direta ou indiretamente causadas pela corrente de curto-circuito, estará fixado com seus dispositivos e suportes isolantes, de tal forma a evitar que haja transferência da corrente de curto-circuito para fora do campo de corrente;
- O cabo estará 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 para execução do ensaio de curto-circuito é ilustrado na Figura 22:

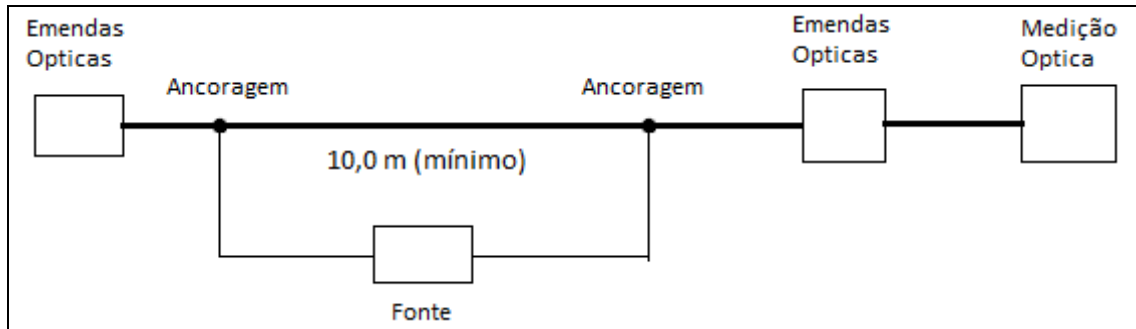


Figura 22 - Esquema de montagem para execução do ensaio de curto-circuito
 Fonte: adaptado de DLA-27161/2012.

Toda a sequência do ensaio pode ser descrita em nove passos que abaixo estão indicados:

- Monitorar a potência óptica de saída, desde 1 hora antes de iniciar o ensaio até 2 horas após a aplicação do último pulso de corrente;
- 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;
- Para que a temperatura inicial na superfície externa do cabo no começo do ensaio esteja entre 50 °C e 55 °C é aplicado um pulso de corrente, com valor e tempo inferior ao determinado pelo projeto, ou então outro método adequado;
- Se não houver especificação no projeto, aplicar 10 pulsos de corrente, de forma assimétrica, deixando entre as aplicações do pulso um tempo para que a temperatura externa do cabo retorne para a faixa entre 50 °C e 55 °C;
- Quando as aplicações dos pulsos de corrente estão simulando o sistema de religamento da linha, o tempo entre a aplicação de um pulso e outro deve estar vinculado ao próprio sistema de religamento da linha e não à faixa de temperatura (50 °C e 55 °C);
- Efetuar a medição da atenuação óptica das fibras, que deverão ser medidas conforme a ABNT NBR 13520 “Fibras ópticas – Determinação da variação da atenuação óptica – Método de ensaio”, registrando os valores obtidos 2 minutos antes e até 5 minutos depois da aplicação de cada pulso de corrente;

- A intensidade da corrente aplicada ao cabo e o tempo de aplicação desta corrente serão de acordo com o projeto do cabo;
- Fazer os registros referentes à intensidade de corrente, tempo de aplicação da corrente e temperatura do cabo;
- Após a aplicação do último pulso de corrente, aguardar até que o cabo esfrie naturalmente e em seguida retirar três amostras do cabo. Cada amostra deverá possuir 1,2 metros e será retirada uma de cada extremidade e a outra do meio do cabo pelo qual a corrente foi aplicada. Estas amostras serão inspecionadas visualmente, a fim de que seja verificada a ocorrência de danos.

Na Figura 23 está representado o fluxograma que exemplifica a descrição do ensaio acima.

Ao ser concluído o ensaio de curto-circuito, será emitido um relatório com informações como: data de realização do ensaio, características do cabo, comprimento do corpo de prova, a carga de tração aplicada ao cabo, os equipamentos utilizados com seus respectivos números de série ou patrimonial, modelo, validade de calibração, a atenuação óptica verificada, as pessoas responsáveis pela execução e acompanhamento do ensaio, desenho esquemático demonstrando equipamentos utilizados e localização dos sensores térmicos, tabelas e gráficos contendo os valores obtidos durante a realização do ensaio e as incertezas das medições.

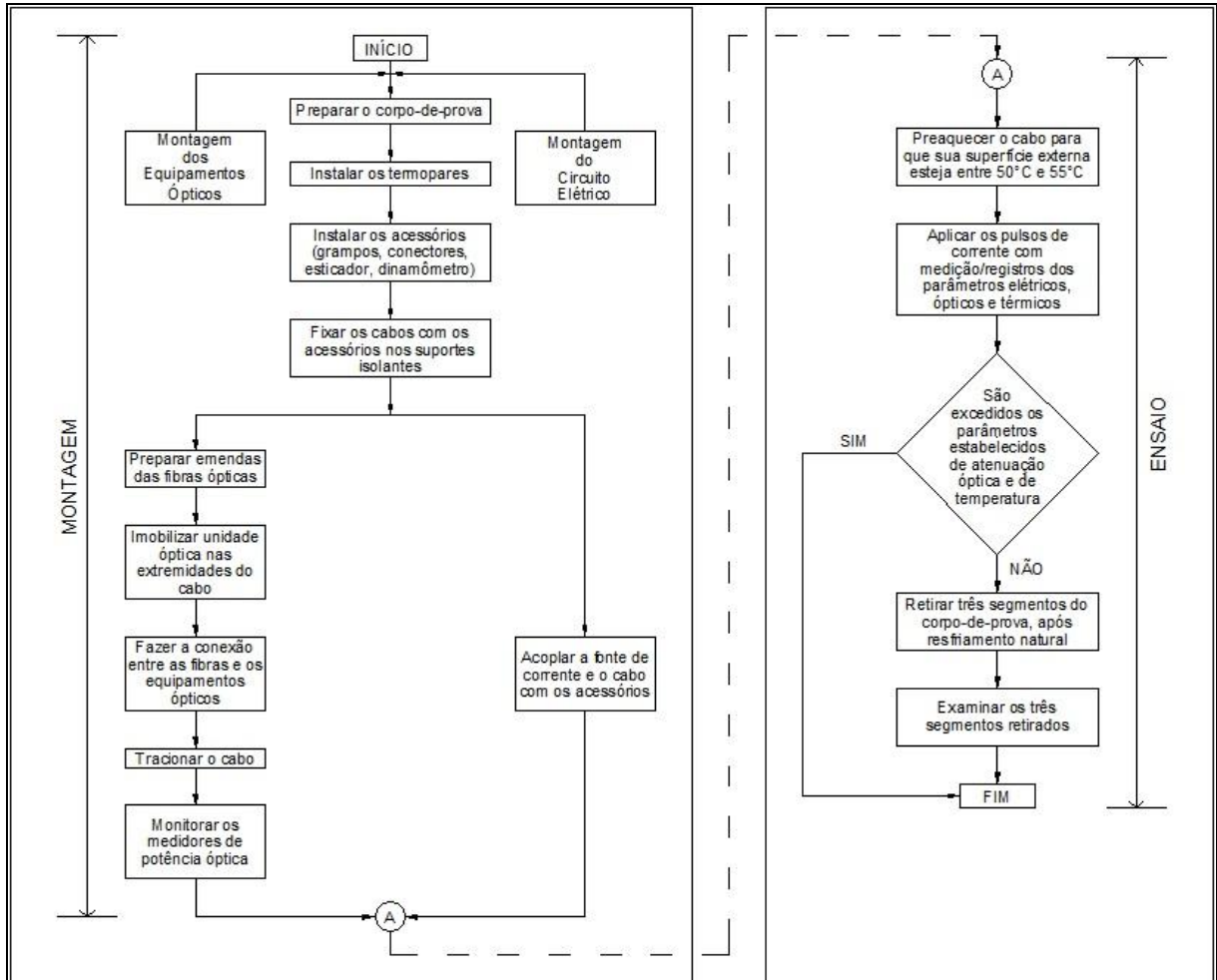


Figura 23 - Fluxograma para realização do ensaio de curto-circuito
 Fonte: adaptado de ABNT-NBR 14074 (2009).

4.2 ENSAIO DE DESCARGA ATMOSFÉRICA

4.2.1 Sobretensões atmosféricas

As sobretensões atmosféricas, comumente chamadas de descargas atmosféricas, são fenômenos estudados cuidadosamente 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 da rede.

As sobretensões classificadas de origem externa, ocorrem devido aos resultados de uma interação elétrica da nuvem com o sistema de potência. Por isto que, no que se refere aos estudos de surtos atmosféricos em redes elétricas, os estudos são específicos às descargas com passagem de corrente entre a nuvem e a terra, não sendo importantes as descargas entre nuvens.

Resumidamente, a ocorrência de uma descarga atmosférica da nuvem para o solo se dá quando a separação de cargas na nuvem cria campos elétricos internos e externos, que ao quebrarem a rigidez dielétrica do ar, podem resultar na ocorrência do raio para o solo. Durante este fenômeno, há distinção de duas fases (JÚNIOR, 2003):

1) *Leader*: corresponde à formação de um canal ionizado, através da camada de ar entre a nuvem e a terra;

2) *Return Stroke*: também chamada de corrente de retorno, está relacionada com a efetiva passagem de corrente pelo canal ionizado.

Há diversas configurações de distribuições de cargas nas nuvens. Para exemplificar, a Figura 24 mostra o caso caracterizado por uma nuvem com cargas negativas na região inferior.

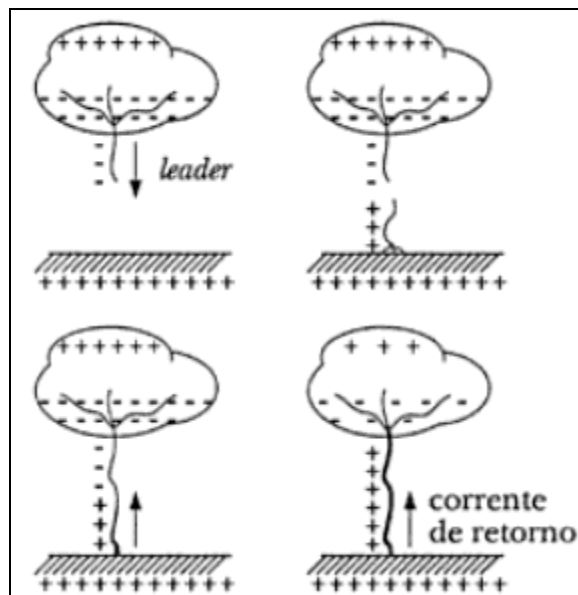


Figura 24 – Descarga Atmosférica
Fonte: Júnior (2003).

Neste modelo, inicialmente a descarga ocorre com a formação de um canal *leader* descendente, que se aproxima da terra progressivamente com o campo elétrico aumentando e propiciando a movimentação ascendente de cargas com polaridade oposta. Observa-se que o *Return Stroke* ocorre com o contato das formações de cargas ascendentes e descendentes.

Existe uma extensa literatura referencial sobre a interpretação das descargas atmosféricas que possibilitam uma compreensão mais detalhada da natureza física destes fenômenos, não sendo essencial para o propósito deste

trabalho. Considera-se que grande parte dos fenômenos pode ser razoavelmente explicada, convencionando-se que a descarga atmosférica é representada pela aplicação de um gerador de corrente no ponto de queda do raio. Com isto, chega-se a representação do impulso atmosférico numa linha de transmissão através do seguinte esquema (JÚNIOR, 2003):

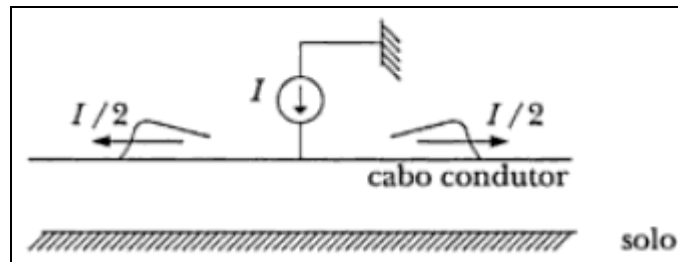


Figura 25 – Representação do Impulso Atmosférico
Fonte: Júnior (2003).

As descargas atmosféricas possuem curta duração, caracterizadas com frentes de onda relativamente rápidas (ordem de μs) e tempos de decaimento que variam de 100 a 300 μs (JÚNIOR, 2003).

Através da Figura 26, tem-se uma ideia dos tempos envolvidos para uma onda padronizada, referente ao teste de isolamento a impulso atmosférico:

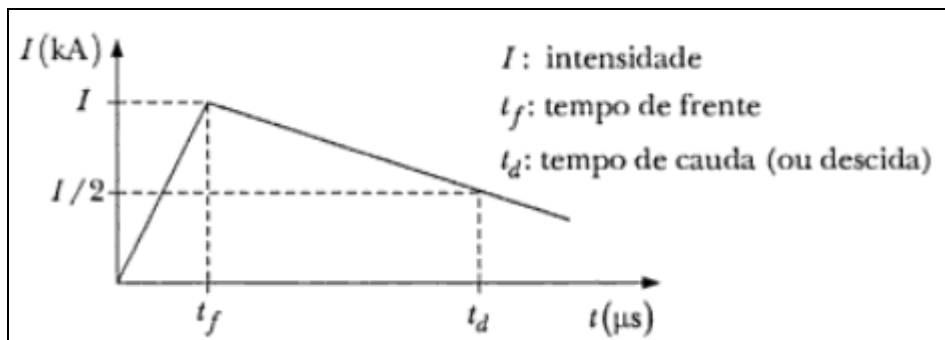


Figura 26 – Onda padronizada de Impulso Atmosférico
Fonte: Júnior (2003).

Nos ensaios de descarga atmosférica em cabos OPGW, a corrente aplicada é relativamente baixa, da ordem de Ampères, comparando-se com o pico de uma descarga atmosférica natural, que é da ordem de dezenas de mil Ampères (kA). Esta divergência ocorre devido ao fato de que nos testes em cabos OPGW se tem a preocupação com a energia gerada por uma descarga atmosférica, esta fase é observada durante o tempo de cauda ou descida, período em que se devem analisar os danos causados nos cabos. A energia está diretamente relacionada com o tempo

de atuação, por isto nos ensaios são aplicadas descargas atmosféricas com duração de 0,5 segundos.

Uma sobretensão devido à descarga atmosférica possui duração da ordem de micro segundos e com elevada corrente, porém não são interessantes os estudos de ensaios com esta característica, visto que a análise em cabos OPGW se foca no período de cauda ou descida de uma descarga atmosférica, não sendo interessante o período de frente de onda devido a sua curta duração.

Resumidamente, para efeitos de isolamento, a corrente elevada é considerada em curta duração, ou seja, a análise se fará no período de frente de onda e, para efeitos de cabos OPGW, a corrente elevada não é considerada, mas o que impacta é a energia gerada durante um maior período de atuação.

4.2.2 Ensaio de descarga atmosférica em cabos OPGW

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.

Quanto aos materiais da parte elétrica, serão necessários:

- Uma fonte de corrente contínua que deverá fornecer a corrente de continuidade com a intensidade e duração especificadas pelo projeto;
- Equipamentos para efetuar as medições e registrá-las;
- Um fio de cobre nu, com diâmetro máximo de 0,25 mm irá realizar a conexão do eletrodo ao corpo de prova que será submetido ao ensaio. O eletrodo utilizado é formado por um vergalhão de aço-carbono SAE 1020, com diâmetro nominal de 12,7 mm e a superfície deverá ser plana e perpendicular ao eixo longitudinal do mesmo.

Para a parte mecânica, além do dinamômetro que efetuará a medição da tração realizada sobre o cabo, serão necessários os materiais para tracionar o cabo assim como os materiais para a ancoragem do cabo.

Assim como para o ensaio de curto-circuito, para um melhor entendimento e visualização, na Figura 27 tem-se o esquema da montagem para a realização do ensaio de descarga atmosférica:

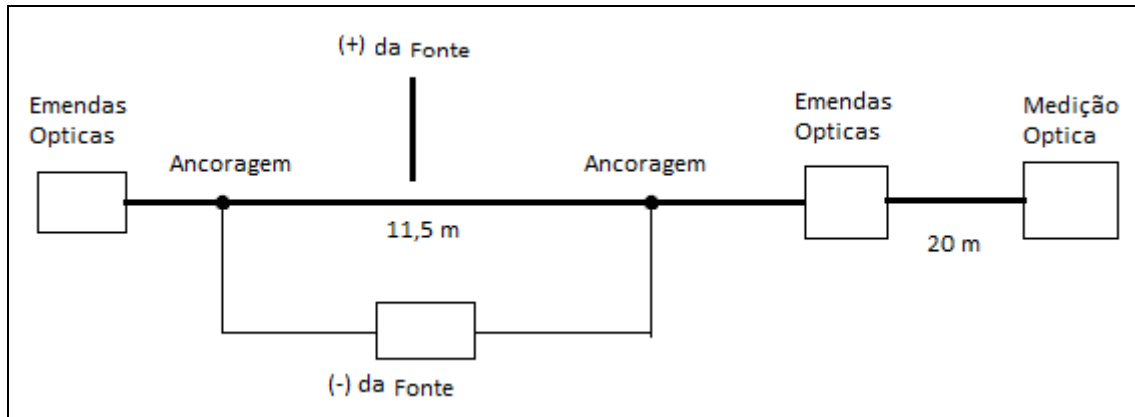


Figura 27 - Esquema de montagem para execução do ensaio de descarga atmosférica.
Fonte: adaptado de DLA-27161/2012.

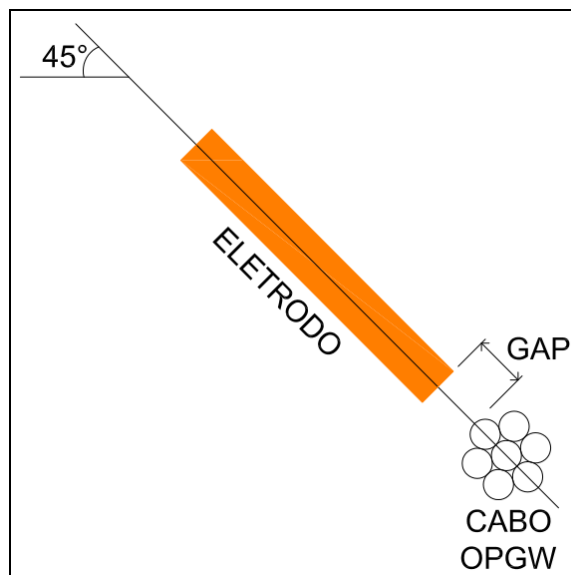


Figura 28 - Esquema de montagem para execução do ensaio de descarga atmosférica – Posição do eletrodo.
Fonte: adaptado de ABNT-NBR 14074 (2009).

No esquema acima demonstrado (Figura 28), o detalhe ilustra como deverá ser instalado o eletrodo de descarga. O mesmo estará localizado no meio do vão a ser ensaiado, formando um ângulo de 45° com a horizontal e com um espaçamento, *gap*, de $6,0 \text{ cm} \pm 0,5 \text{ cm}$.

O ensaio de descarga atmosférica ocorrerá com a aplicação inicial de uma corrente com a classe de ensaio (A, B, C ou D) que foi previamente definida entre fabricante e comprador. A Tabela 7 ilustra as classes de ensaio anteriormente citadas.

Tabela 7 - Classe de ensaio

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

Fonte: ABNT NBR 14074 (2009).

A onda da corrente aplicada no cabo durante o ensaio de descarga atmosférica deve ter característica plana, retangular e variação de até 20% nos valores instantâneos de corrente, *ripple*, em relação ao valor médio encontrado. Após a aplicação da descarga deverá ser feita a medição da carga de tração remanescente, realizar uma verificação visual dos elementos constituintes do cabo a fim de encontrar algum dano causado. Em seguida, submeter o cabo ensaiado à tração, a uma taxa de 2500 Newton por minuto, até que seja atingido o valor de carga limite especificado pelo projeto, permanecendo nesta carga limite por período de 3 minutos. Quando especificada a monitoração óptica, registrar os valores da atenuação óptica das fibras desde 2 minutos antes da descarga de corrente até que a carga limite do ensaio seja atingida. Realiza-se novamente a inspeção visual no corpo de prova buscando possíveis danos causados ao cabo ensaiado. Após inspeção do cabo, no mínimo mais quatro descargas deverão ser aplicadas ao corpo de prova seguindo sempre os passos acima relatados e instalando sempre um novo corpo de prova para cada descarga aplicada.

Assim como ao final do ensaio de curto-circuito, deverá ser elaborado um relatório final contendo todas as informações do ensaio desde materiais utilizados até os resultados obtidos.

Na Figura 29 está representado o fluxograma que exemplifica a descrição do ensaio acima.

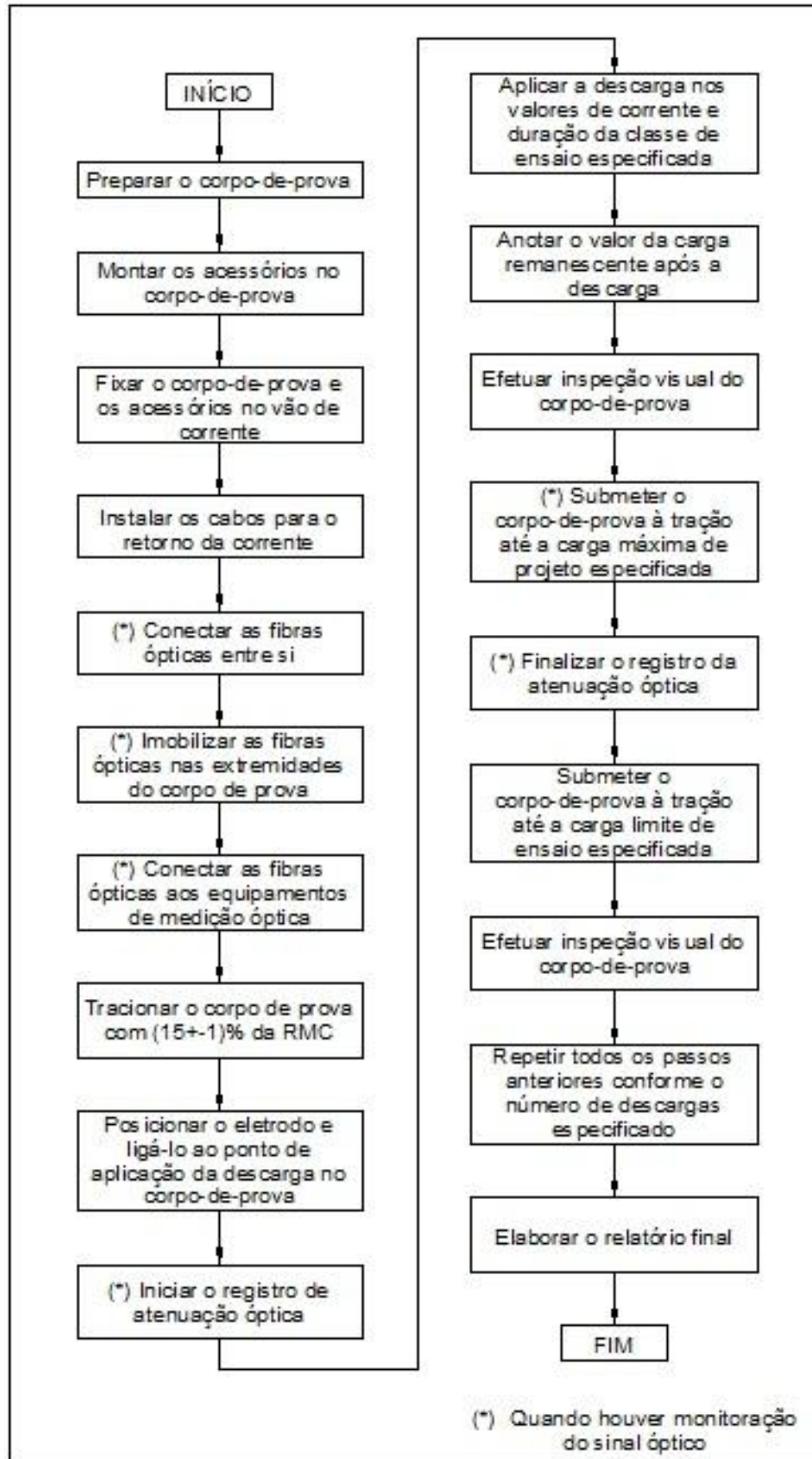


Figura 29 - Fluxograma para realização do ensaio de descarga atmosférica. Fonte: adaptado de ABNT-NBR 14074 (2009).

5. PROJETO DE CABO OPGW

Com o passar dos anos e a evolução dos materiais que formam o cabo OPGW, alguns requisitos se tornaram essenciais para o dimensionamento e projeto.

Assim sendo, os principais requisitos de um projeto de cabo OPGW são: peso, diâmetro, capacidade de curto-circuito e resistência à descarga atmosférica. Verifica-se que, quanto menor for o peso e o diâmetro do cabo, menores serão os esforços causados nas estruturas da linha de transmissão e conseqüentemente mais barato o projeto. Para os requisitos elétricos, quanto maiores a capacidade de curto-circuito e a resistência à descarga atmosférica, maior será o grau de confiabilidade.

RESUMO DOS PRINCIPAIS REQUISITOS DO CABO OPGW	
DESCRIÇÃO	REQUISITO
Peso e Diâmetro	Diminuir
Capacidade de curto-circuito	Aumentar
Resistencia a descarga atmosférica	Aumentar

Quadro 2 - Resumo dos principais requisitos do cabo OPGW.
Fonte: Autoria Própria.

Abaixo, têm-se algumas fórmulas que são utilizadas para projetar um cabo OPGW.

$$\text{Área dos fios: } A = n_{\text{numero de fios}} \times \left(\frac{\pi \times d^2}{4} \right) \quad (8)$$

$$\text{Área do tubo: } A = \frac{\pi \times (d_{\text{externo}}^2 - d_{\text{interno}}^2)}{4} \quad (9)$$

$$\text{Área do cabo: } A = A_{\text{fios}} + A_{\text{tubo}} \quad (10)$$

$$\text{Capacidade Térmica: } C = \rho_{\text{peso especifico}} \times A \times c_{\text{calor especifico}} \quad (11)$$

$$\text{Capacidade térmica do cabo OPGW: } C_{\text{cabo}} = C_{\text{fios}} + C_{\text{tubo}} \quad (12)$$

Resistência elétrica do cabo OPGW:

$$R_{\text{OPGW}} = \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{fios}}} + \frac{1}{R_{\text{tubo}}}} \quad (\Omega) \quad (13)$$

5.1 DEFINIÇÃO DO CABO A SER UTILIZADO EM UMA LINHA DE TRANSMISSÃO

Quando a ANEEL lança um edital de leilão para uma nova linha de transmissão ou uma resolução autorizando a ampliação/reforço de uma linha já existente, é neste edital que se encontram as informações necessárias para dimensionamento e escolha dos cabos a serem utilizados na construção ou ampliação da linha de transmissão.

Como exemplo será utilizado o edital nº 02/2013-ANEEL. Neste edital, o item onde se determina a capacidade de corrente dos cabos para-raios mostra que depois de estabelecidas as condições climáticas, os cabos para-raios deverão ser capazes de suportar, sem dano, durante o período da concessão da linha de transmissão, a circulação da corrente associada à ocorrência de curto-circuito monofásico franco em qualquer estrutura por duração correspondente ao tempo de atuação da proteção de retaguarda.

O dimensionamento dos cabos para-raios deve adotar os valores de corrente de curto-circuito fase-terra indicados na Tabela 8. Estes valores de corrente são referidos ao nível de tensão dos barramentos das subestações terminais.

Tabela 8 - Correntes de curto-circuito nas sub estações terminais para o dimensionamento dos cabos para-raios de nova linha de transmissão ou novo(s) trecho(s) em projeto.

Linha ou trechos de linha de transmissão	Subestações terminais	Nível de tensão do barramento de referência	Valor de corrente de curto-circuito fase terra (kA)
LTA 500 kV Luziânia - Brasília Leste C1 e C2	Luziânia	500 kV	50
LTA 500 kV Luziânia - Brasília Leste C1 e C2	Brasília Leste	500 kV	50
LTA 345 kV Brasília Sul - Samambaia, C3	Brasília Sul	345 kV	50
LTA 345 kV Brasília Sul - Samambaia, C3	Samambaia	345 kV	50

Fonte: ANEEL - Edital nº 02/2013.

A aplicação de cabos para-raios com fibra ótica em linhas de transmissão deve ser feita com base nas seguintes regras:

(a) No caso de nova linha de transmissão:

As novas linhas de transmissão devem ser projetadas com pelo menos um cabo para-raios do tipo *Optical Ground Wire – OPGW*.

(b) No caso de linha de transmissão existente, a ser seccionada, que já possuir OPGW:

Se a linha de transmissão a ser seccionada já possuir OPGW, o(s) novo(s) trecho(s) de linha de transmissão, originado(s) a partir do seccionamento da linha existente, deve(m) ter, também, cabo para-raios com fibra óptica com confiabilidade e capacidade de transmissão de dados iguais ou superiores a do cabo existente.

É devido a informações como estas, que se pode constatar a importância da realização de ensaios de suportabilidade nos cabos OPGW, pois em novas linhas de transmissão é exigida a existência de pelo menos um cabo *Optical Ground Wire*.

5.2 UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE VEIKI PARA PROJETOS DE CABOS OPGW

A partir do valor de curto-circuito desejado, utiliza-se o *software* VEIKI-VNL para projetar o cabo a ser utilizado na linha de transmissão. O VEIKI-VNL é um programa de computador que foi desenvolvido para a simulação do cálculo da capacidade de corrente de curto-circuito dos cabos OPGW. O programa é capaz de calcular a temperatura de cada componente do condutor.

O programa é de fácil utilização, abaixo tem-se um passo a passo para o dimensionamento de um cabo a ser utilizado em uma linha onde o valor de corrente de curto-circuito fase-terra é de 50 kA.

1º Passo: Determinação do nome e tipo do cabo

O nome e o tipo de cada cabo variam de acordo com o fabricante, sendo determinado, neste caso, devido a sua configuração e área da seção transversal nominal.

The image shows a software dialog box titled "Conductor identifiers". It has a standard Windows-style title bar with a close button (X) in the top right corner. The main area contains five labeled input fields: "Name" with the text "159mm²", "Manufacturer" (empty), "Type" with the text "Centrum", "Identifier" (empty), and "Note" (empty). At the bottom of the dialog, there are two buttons: "OK" with a green checkmark icon and "Cancel" with a red X icon.

Figura 30 – Identificação dos condutores
 Fonte: adaptado do *software* Veiki.

2º Passo: Determinação dos tipos de fios que constituem o cabo

Neste momento serão determinadas importantes características do cabo, pois o tipo do material a ser utilizado determinará características como capacidade para suportar a corrente de curto-circuito e suportabilidade à ocorrência de descargas atmosféricas.

The image shows a software dialog box titled "Wire types". It has a standard Windows-style title bar with a close button (X) in the top right corner. The main area contains a list box with two entries: "sus" and "wire acs". To the right of the list box are three buttons: "Modify", "New", and "OK" (with a green checkmark icon).

Figura 31 – Determinação dos tipos de fios utilizados no cabo
 Fonte: adaptado do *software* Veiki.

3º Passo: Definição dos parâmetros para cada tipo de fio utilizado

Após determinação do material do fio a ser utilizado, especificam-se as características de cada material. Estas características são: área, densidade, calor específico, resistividade, coeficiente de temperatura e temperatura limite.

The screenshot shows a 'Wire parameters' dialog box with the following fields and values:

Name:	sus	
Cross-section:	1.94770	mm ²
Density:	7.86000	kg/dm ³
Specific heat:	468.00000	J/kg*K
Resistivity:	0.15000	Ohm*mm ² /m
Temp. coefficient:	4.50000	E-3
Temperature limit:	200	°C

Buttons: Save wire material parameters, OK, Cancel.

File list (d → A): 14SA.mtf, 20SA.mtf, 23SA.mtf, 27SA.mtf, 3 gr spacer.mtf, 30SA.mtf, 35SA.mtf, 40SA.mtf, AAL.mtf, ALT.mtf, Fiber.mtf, GSW.mtf, Steel.mtf, sus.mtf.

Figura 32 - Definição dos parâmetros para cada tipo de fio utilizado
 Fonte: adaptado do *software* Veiki.

The screenshot shows a 'Wire parameters' dialog box with the following fields and values:

Name:	wire acs	
Cross-section:	8.81000	mm ²
Density:	4.64000	kg/dm ³
Specific heat:	609.00000	J/kg*K
Resistivity:	0.04310	Ohm*mm ² /m
Temp. coefficient:	4.00000	E-3
Temperature limit:	300	°C

Buttons: Save wire material parameters, OK, Cancel.

File list (d → A): 14SA.mtf, 20SA.mtf, 23SA.mtf, 27SA.mtf, 3 gr spacer.mtf, 30SA.mtf, 35SA.mtf, 40SA.mtf, AAL.mtf, ALT.mtf, Fiber.mtf, GSW.mtf, Steel.mtf, sus.mtf.

Figura 33 - Definição dos parâmetros para cada tipo de fio utilizado
 Fonte: adaptado do *software* Veiki.

4º Passo: Determinação da configuração de cada camada que constitui o cabo

Nesta etapa, a quantidade de fios em cada camada é definida.

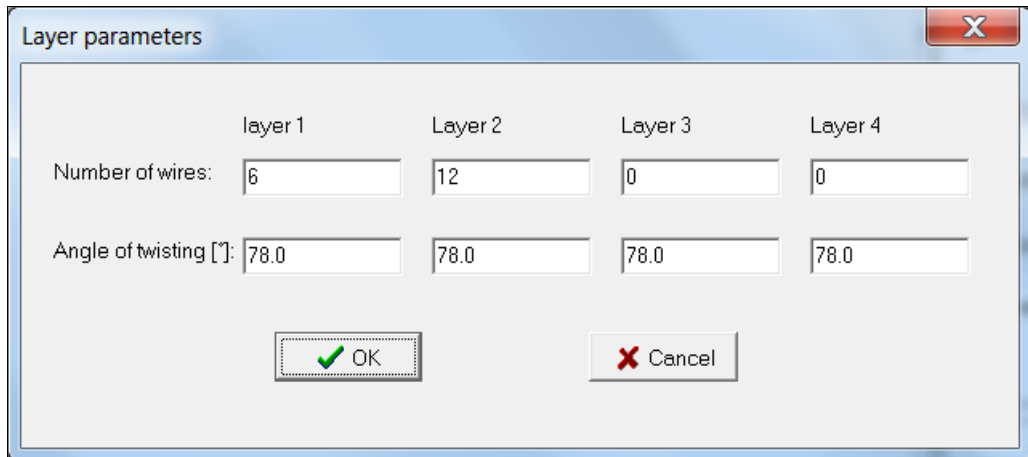


Figura 34 - Determinação da configuração de cada camada que constitui o cabo
Fonte: adaptado do software Veiki.

5º Passo: Definição da localização de cada sensor de temperatura.

Durante a simulação, consegue-se monitorar a temperatura em cada elemento e limitá-los para que os valores especificados por norma sejam atendidos.

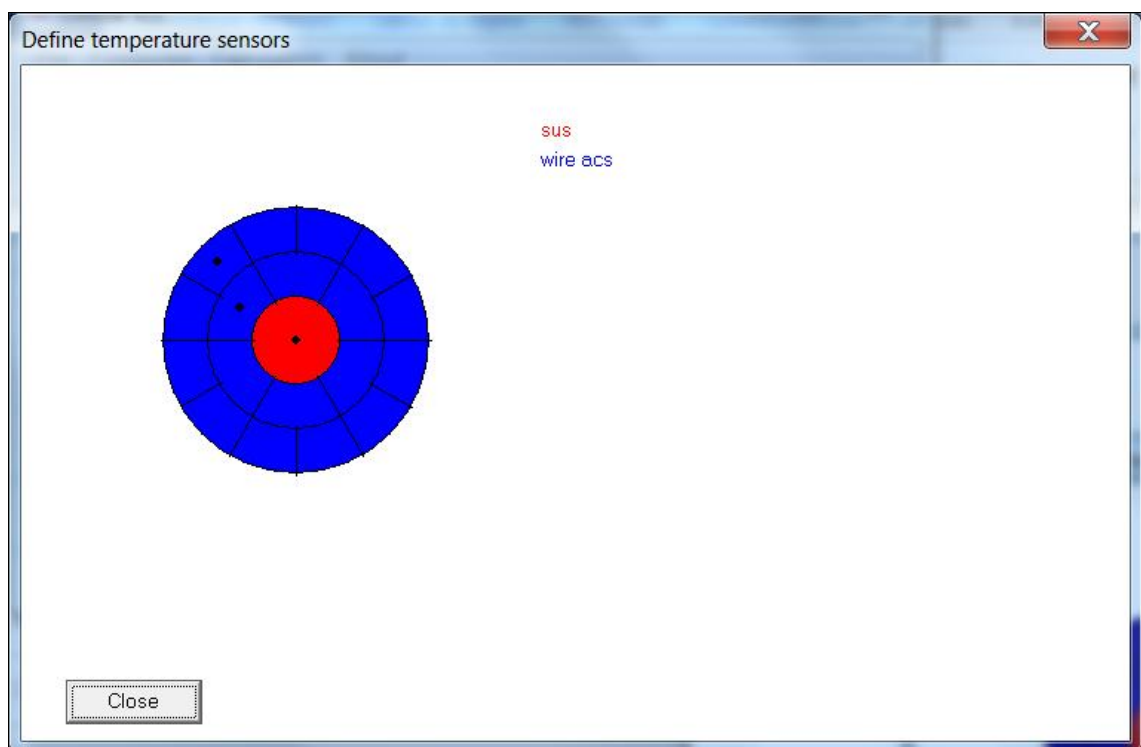


Figura 35 - Definição da localização de cada sensor de temperatura
Fonte: adaptado do software Veiki.

6º Passo: Definição dos parâmetros do teste.

Nos ensaios de curto-circuito do cabo OPGW, a temperatura inicial do teste é de 50 °C. Assim sendo, nos parâmetros do teste, a temperatura definida para início da simulação é 50 °C e o tempo de teste é o tempo de atuação da proteção de retaguarda, que no caso é de 0,3 segundos.

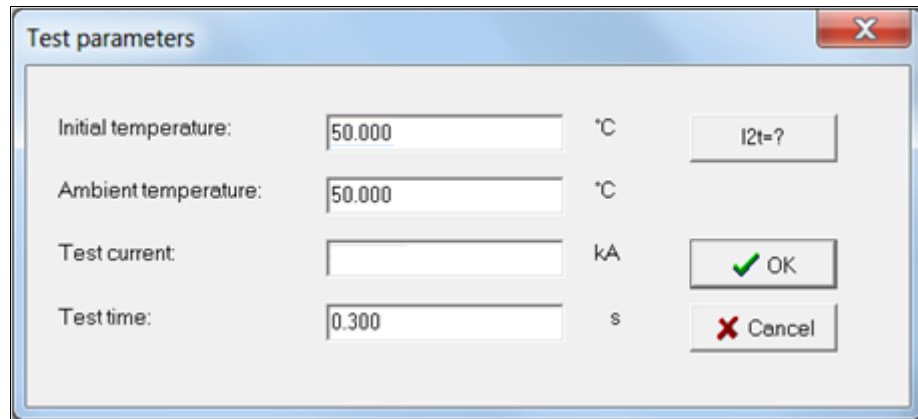


Figura 36 - Definição dos parâmetros do teste
 Fonte: adaptado do *software* Veiki.

7º Passo: Escolha do tipo de simulação a ser executada

O *software* pode simular duas situações de teste:

- No primeiro modo de cálculo, define-se inicialmente uma corrente a ser atingida;

- No segundo, a temperatura será o limite da simulação.

Na simulação executada, o cálculo será realizado até que seja atingida a temperatura limite especificada.

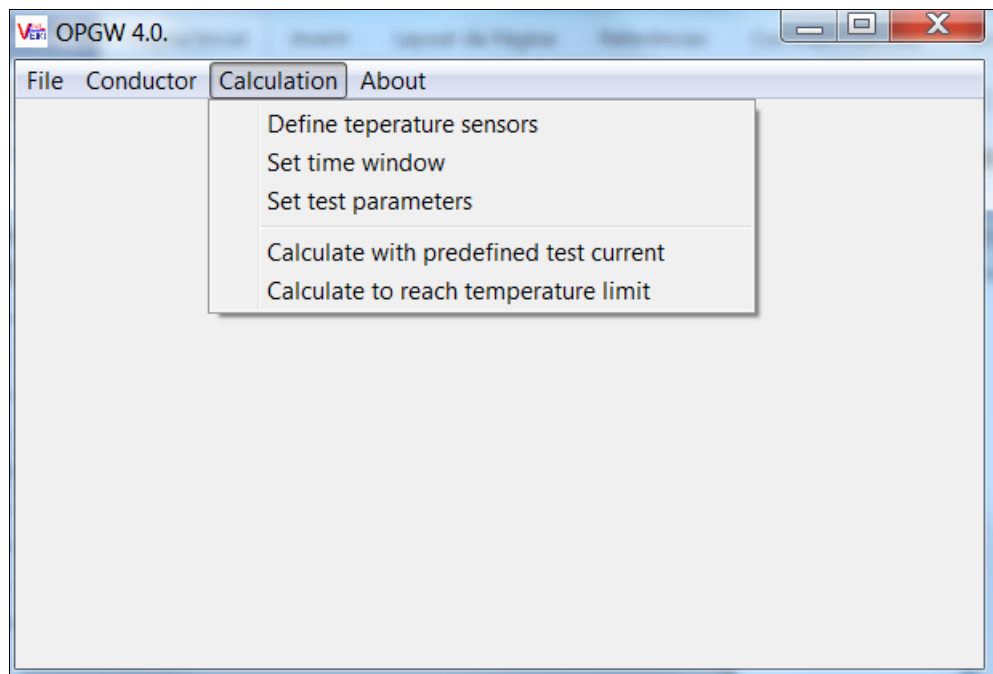


Figura 37 - Escolha do tipo de simulação a ser executada
 Fonte: adaptado do *software* Veiki.

8º Passo: Corrente suportada até que se fosse atingida a temperatura limite

É nesta etapa do desenvolvimento/simulação que se pôde constatar a suportabilidade do cabo para determinada corrente. Neste caso que está sendo

retratado, seguindo a corrente de curto-circuito especificada no edital nº 02/2013-ANEEL (50 kA) e a configuração da linha (2 cabos para-raios), cada cabo para-raios terá então que suportar 25 kA. Desta forma, na figura 38, tem-se o valor da corrente que o cabo simulado é capaz de atender (25.316 kA).

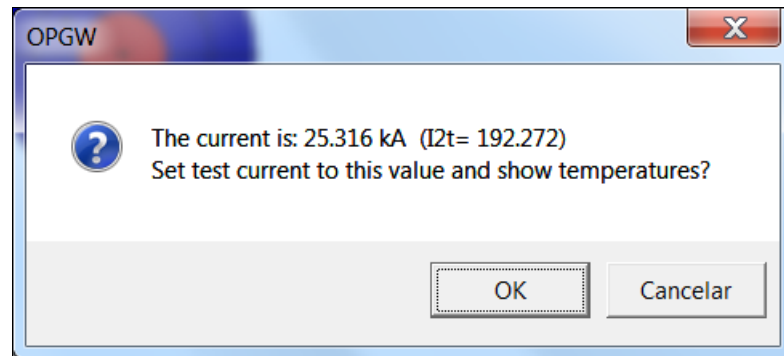


Figura 38 - Corrente suportada até que se fosse atingida a temperatura limite
 Fonte: adaptado do *software* Veiki.

9º Passo: Gráfico demonstrando a variação da temperatura de cada um dos sensores ao decorrer do tempo, conforme inicialmente estipulado.

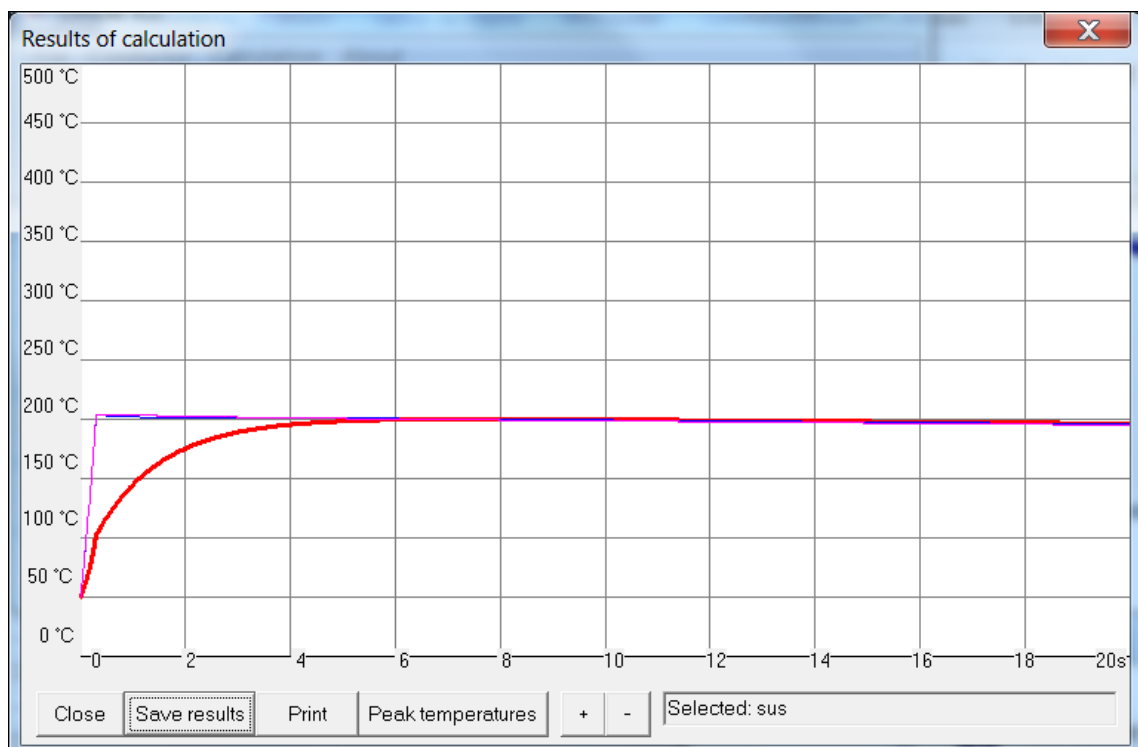


Figura 39 – Gráfico de variação da temperatura de cada um dos sensores
 Fonte: adaptado do *software* Veiki.

5.3 DIMENSIONAMENTO DOS CABOS PARA-RAIOS DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO

O dimensionamento dos cabos para-raios de uma linha de transmissão, incluindo os cabos OPGW, leva em conta a corrente de curto-circuito durante a ocorrência de uma falta fase-terra junto às proximidades da subestação. Os pontos próximos às subestações são os locais de uma linha de transmissão onde as correntes de curto-circuito são maiores, conforme é ilustrado na figura 40.

Um ponto importante para o dimensionamento dos cabos para-raios são as resistências de aterramento de cada torre da linha de transmissão.

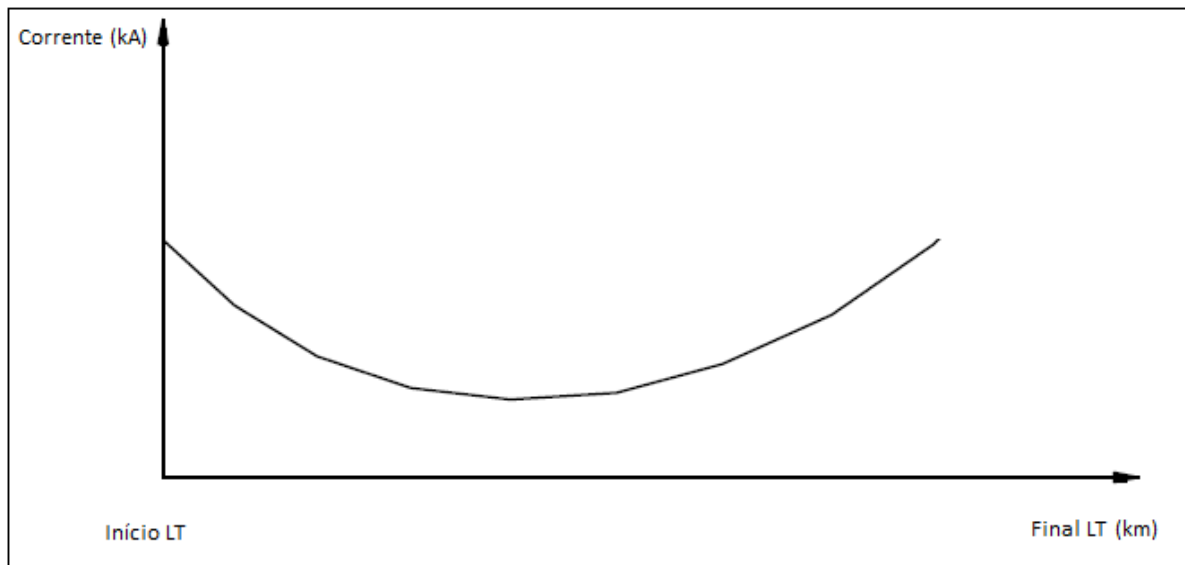


Figura 40 – Variação da corrente ao longo da linha de transmissão
Fonte: Autoria própria.

O cálculo da distribuição de correntes ao longo de uma linha de transmissão é feito utilizando o programa ATP (*Alternative Transients Program*) que permite a representação de todas as componentes de uma linha de transmissão e qualquer configuração. Dentro do programa ATP existem rotinas que podem ser utilizadas para o cálculo dos parâmetros quilométricos da linha.

Será a partir da simulação no *software* ATP que se conseguirá determinar os pontos onde poderão ocorrer as trocas dos cabos para-raios por outros mais adequados às correntes encontradas em determinado ponto.

Em seguida, alguns pontos onde pode ser verificada a utilização do *software* para o dimensionamento do para-raios de uma determinada linha de transmissão.

Abaixo tem-se o desenho de uma torre de transmissão e suas medidas, figura 41, que em seguida será comparada com a sua representação no *software* ATP, figura 42.

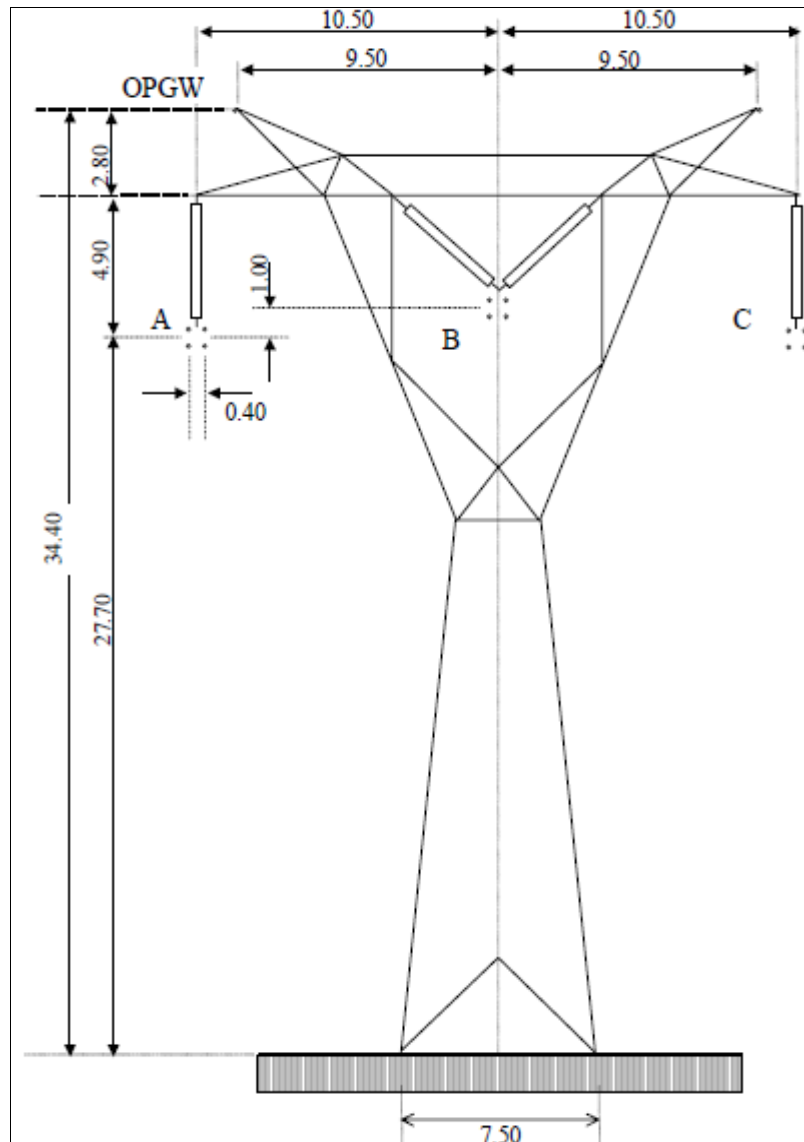


Figura 41 - Tipo de torre a ser utilizada em determinada linha de transmissão de 500 kV
Fonte: Autoria própria.

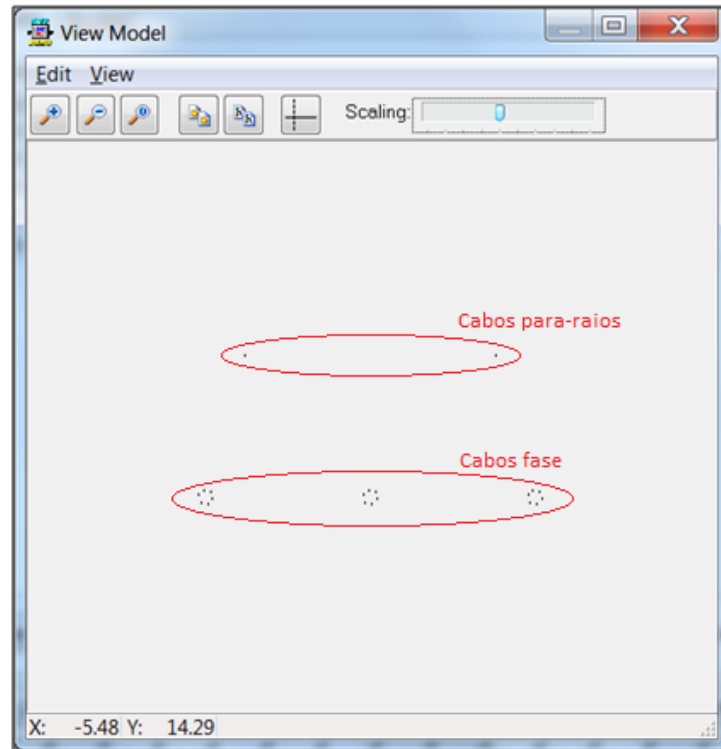


Figura 42 – Configuração da torre de transmissão no software ATP
Fonte: adaptado software ATP.

Na figura 43 e figura 44 determinam-se parâmetros do trecho que está sendo simulado. São determinados o comprimento do vão, frequência de operação, raio do cabo, resistência.

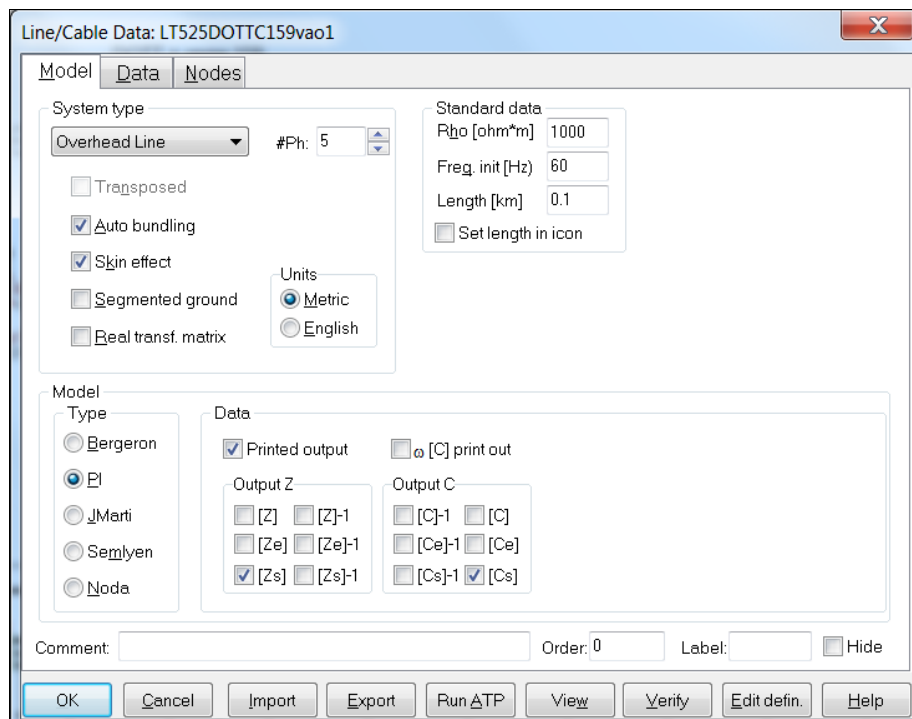


Figura 43 - Determinação de parâmetros da linha de transmissão no software ATP
Fonte: adaptado software ATP.

Line/Cable Data: LT525DOTTC159vao1

Model Data Nodes

#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ [cm]	Alpha [deg]	NB
1	1	0.3375	1.3485	0.07439	-10.5	33.38	10.64	45.7	45	6
2	2	0.3375	1.3485	0.07439	0	33.38	10.64	45.7	45	6
3	3	0.3375	1.3485	0.07439	10.5	33.38	10.64	45.7	45	6
4	4	0	0.8375	0.3047	-8	40.88	20.4	0	0	0
5	5	0.462	0.77	0.4145	8	40.88	20.4	0	0	0

Add row Delete last row Insert row copy Move

OK Cancel Import Export Run ATP View Verify Edit defin. Help

Figura 44 - Determinação de parâmetros dos cabos utilizados na linha de transmissão
 Fonte: adaptado software ATP.

Na figura 45 e figura 46, respectivamente, são ilustradas todas as torres da linha de transmissão e a simulação de curto circuito na primeira torre após a subestação, que representa a situação mais crítica.

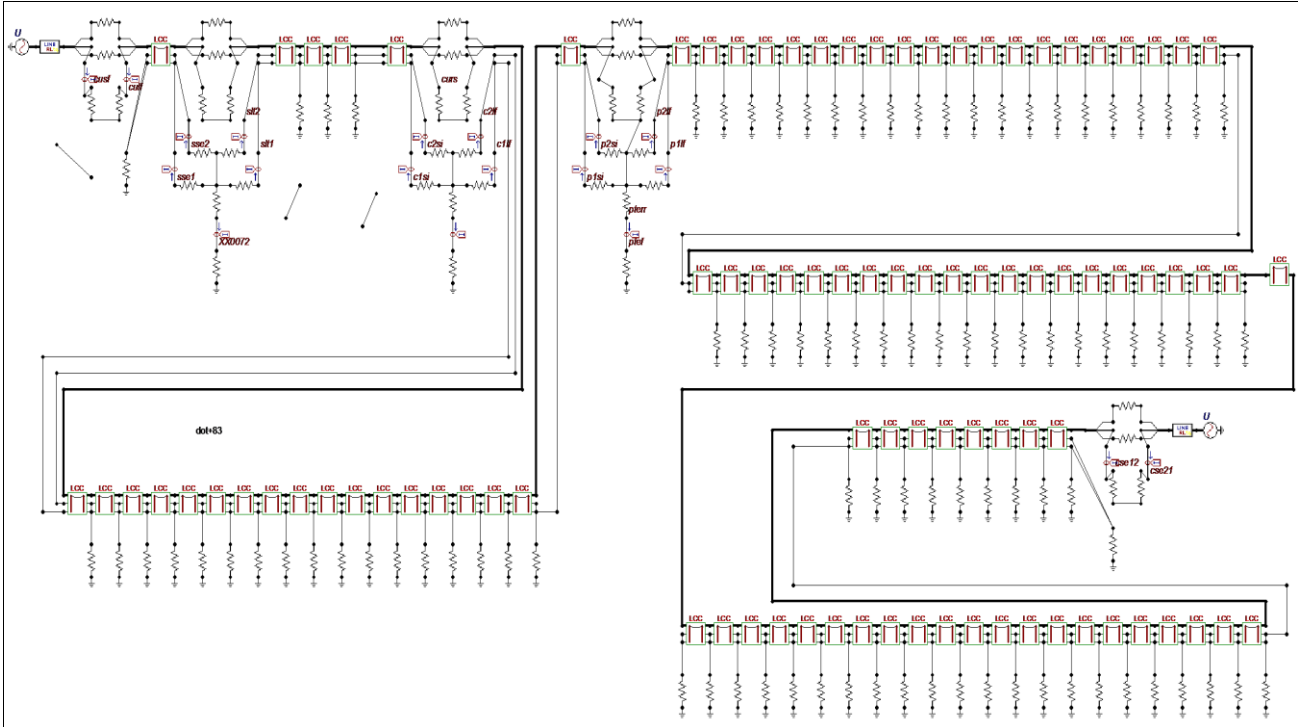


Figura 45 - Modelagem de uma linha de transmissão utilizando software ATP
Fonte: adaptado software ATP.

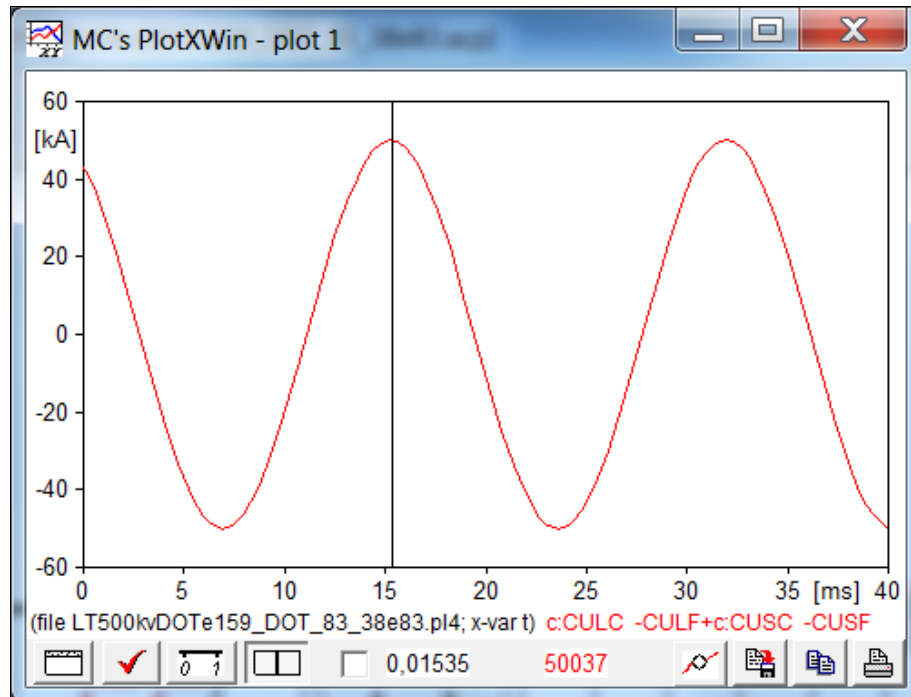


Figura 46 - Corrente de curto-circuito na barra da subestação simulada no software ATP, para o valor especificado no edital nº 02/2013-ANEEL
Fonte: adaptado software ATP.

5.4 MATERIAIS UTILIZADOS PARA FABRICAÇÃO DOS CABOS OPGW

Para cada material que é utilizado na confecção do cabo OPGW, há sempre uma justificativa na escolha de um ou de outro material. Esta escolha ocorre com base nas características elétricas e/ou mecânicas do material utilizado. Por exemplo, o aço no cabo OPGW tem por objetivo dar suporte mecânico. Já o alumínio tem como objetivo aumentar a condutividade do cabo.

CARACERÍSTICA	MATERIAL DOS FIOS		
	AÇO-ALUMÍNIO	AÇO GALVANIZADO	LIGA DE ALUMÍNIO
Resistência à corrosão	ÓTIMA	BAIXA	ÓTIMA
Resistência à descarga atmosférica	ELEVADA	ELEVADA	BAIXA
Capacidade de curto-circuito	BOA	BAIXA	ELEVADA

Quadro 3 - Características dos materiais que compõe o cabo OPGW.

Fonte: Autoria Própria.

Deste modo, visualizando o Quadro 3 e com base em testes realizados em laboratório e em campo, pode-se concluir que para a elaboração do projeto e fabricação de um cabo OPGW, não deve ser utilizado, na camada externa dos cabos, fios de liga de alumínio, tendo em vista a baixa resistência às descargas atmosféricas.

6. RELATÓRIOS DE ENSAIO

Foram ensaiados dois tipos de cabos OPGW pelo CEPEL, os cabos tipo OPGW CENTRUM e tipo OPGW DUAL, estes ensaios foram descritos nos relatórios DLA-9876/2013, DLA-16118/2013 e DLA-27161/2012.

Todos os ensaios realizados são ensaios de tipo baseados na norma NBR-14074, solicitados pela Furukawa Industrial S.A. Produtos Elétricos, fabricante dos cabos ensaiados.

6.1 RELATÓRIO DLA-9876/2013

O ensaio realizado neste relatório é o de descarga atmosférica com corrente de continuidade no cabo tipo OPGW CENTRUM – CS2.190.167.D36.

Neste ensaio foram usados os acessórios de ancoragem fabricados pela PLP Produtos para Linhas Preformados Ltda.

Características do item sob ensaio:

- Tipo: OPGW CENTRUM – CS2.190.167.D36
- Carga limite de ensaio: 3560 kgf
- Classe para descargas atmosféricas (coulomb): 150 C
- Resistência do cabo a 20 °C: 0,272 ohms/km

Foi ensaiada uma amostra do cabo com 150 metros de comprimento, com as seguintes características declaradas pelo fabricante:

- | | | |
|---|------------------------------|----------------|
| • Número de fibras ópticas: | 36 (SM e NZD) | |
| • Diâmetro total: | 16,75 mm | |
| • Diâmetro externo do tubo de aço inox: | 3,3 mm | |
| • Diâmetro interno do tubo de aço inox: | 2,9 mm | |
| • Armação dos fios: | camada externa | camada interna |
| ○ Material: | aço-alumínio | aço-alumínio |
| ○ Quantidade de fios: | 12 | 6 |
| ○ Diâmetro de fios: | 3,35 mm | 3,35 mm |
| • Comprimento do passo da camada externa: | 175 mm | |
| • Peso: | 768 kgf/km | |
| • Resistência mecânica calculada RMC: | 8900 kgf | |
| • Coeficiente de dilatação térmica | 15,5 x 10 ⁻⁶ 1/°C | |

Foi ensaiado a amostra, material novo com 150 metros, estando as 36 fibras ópticas emendadas (18 SM e 18 NZD), sendo os ensaios nº 1 a 5 realizados com corrente de polaridade positiva sendo cada ensaio realizado em um novo vão de corrente.

Circuito de ensaio conforme figura 47:

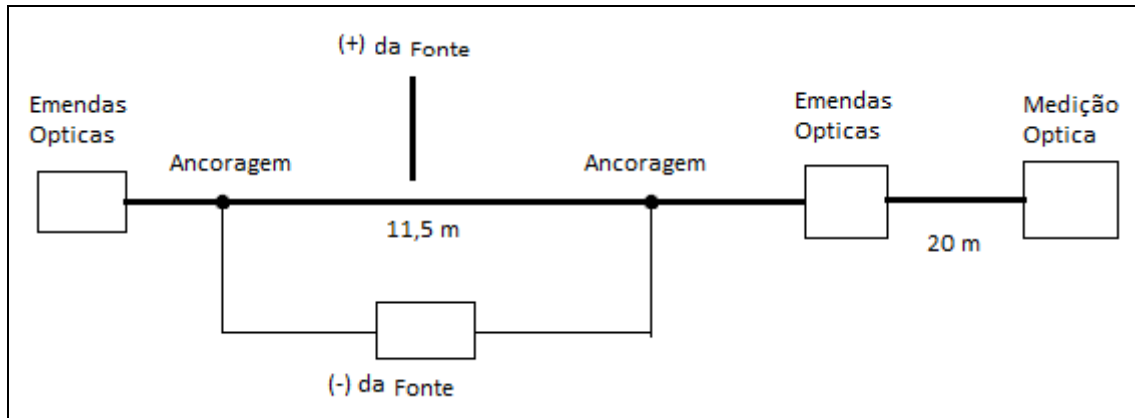


Figura 47 - Arranjo de montagem para execução do ensaio de descarga atmosférica.
Fonte: adaptado de DLA-9876/2013

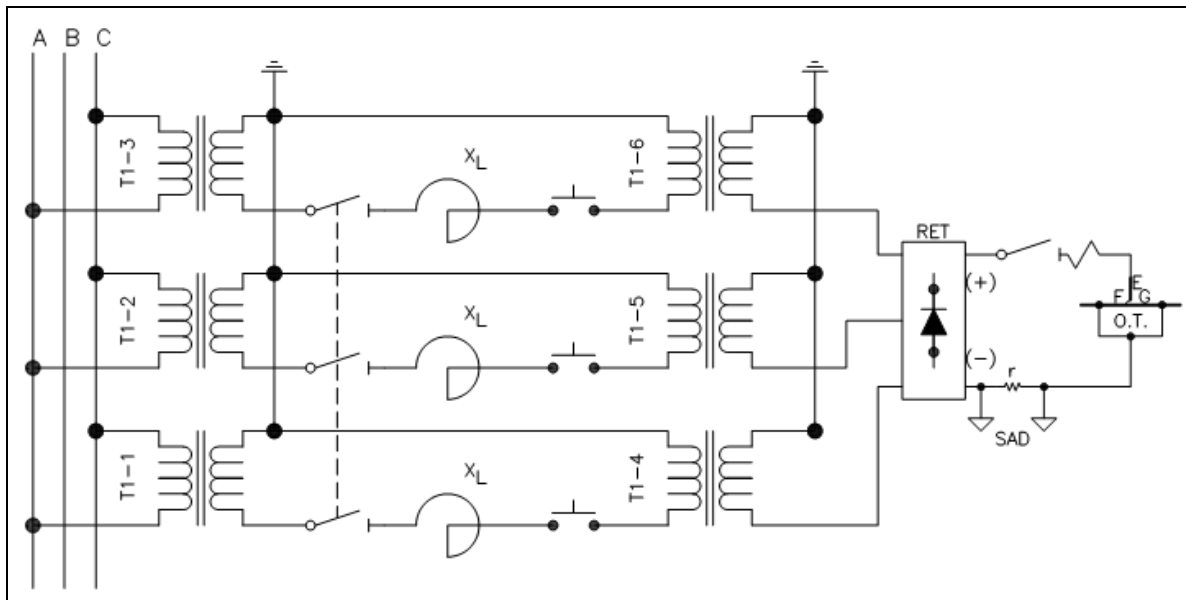


Figura 48 – Circuito para o ensaio de descarga atmosférica.
Fonte: Adaptado DLA-9876/2013.

Legenda:

T1-1/T1-2/T1-3 – Transformadores 138/4,16 kV +- 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 mΩ (nº 05, sem nº patrimonial, certificado de calibração nº CEPEL CA1-38/13 válido até MARÇO/2014)
- 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 (nº patrimonial 06-11485, certificados de calibração nº CEPEL CA1-38/13 válido até MARÇO/2014, CA1-74 e CA1-76/13 válidos até ABRIL/15).

Tabela 9 - Tabela de resultados do ensaio de descarga atmosférica.

Amostra	Ensaio	Oscilograma	Duração	Corrente de ensaio		Tração no cabo	
				Valor médio	Carga elétrica	Antes	Após
nº	nº	nº	s	A	C	kgf	kgf
1	1	001/13	0,500	281,3	141,2	1340	1270
1	2	002/13	0,500	298,2	149,7	1340	1150
1	3	003/13	0,500	291,6	146,4	1340	1240
1	4	004/13	0,500	295,8	148,5	1340	1260
1	5	005/13	0,500	298,2	149,7	1340	1230

Fonte: DLA-9876/2013.

Os equipamentos de fabricação ANRITSU usados para medição de atenuação das fibras ópticas:

- Uma fonte de luz estabilizada com comprimento de onda 1550 nm, modelo MG9001A (nº patrimonial 06-8405, certificados de calibração ANRITSU nº CA10976.01 e CA10976.02 válidos até MARÇO/2014);
- Um medidor de potência óptica, modelo ML910B com sensor MA9305B (nº patrimonial 06-6694, certificados de calibração ANRITSU nº CA10977.01 e CA10977.02 válidos até MARÇO/2014);
- Um divisor óptico, modelo MA9307A (sem nº patrimonial, certificado de calibração ANRITSU nº CA10977.03 válido até MARÇO/2014).

Não houve variação da atenuação das fibras ópticas durante as descargas nesses ensaios. Os valores das durações, dos valores médios das correntes e das cargas elétricas ficaram dentro das tolerâncias previstas na norma.

Para medição da tração no cabo utilizou-se um dinamômetro com capacidade de 30000 kgf (sem nº patrimonial, certificado de calibração nº DMTT 1050/2012 válido até OUTUBRO/2013).

A temperatura ambiente durante o ensaio foi de 23,4 °C.

Os ensaios foram realizados com corrente de polaridade positiva, no primeiro ensaio não houve rompimento de fios da camada externa, mas obteve perda de material em dois fios. Os ensaios 2 a 5 obtiveram 3, 1, 1 e 2 fios rompidos respectivamente.

Os ensaios 1 a 5 obtiveram depósito de material fundido em 5, 1, 6, 2 e 3 fios respectivamente.

Ao término de cada ensaio elevou-se a tração no cabo a uma taxa de 250 kgf/min, não se observando mais nenhuma anomalia até a tração de 3560 kgf mantida por 3 minutos.

As variações máximas de atenuação das fibras ópticas durante a fase de tracionamento posterior aos ensaios números 1 a 5 até o valor de 3560 kgf foram, respectivamente, de 0,02 0,03, 0,02, 0,01 e 0,01 dB.

Na figura 49 observa-se o arranjo do ensaio para a execução do ensaio de descarga atmosférica.



Figura 49 – Arranjo para o Ensaio de descarga atmosférica..
Fonte: DLA-9876/2013.

Na figura 50, foto do cabo após a aplicação da primeira descarga atmosférica, ensaio nº 1, onde não houve rompimento de fios, ocorrendo apenas perda de material em dois fios e depósito de material fundido.



Figura 50 – Detalhe do cabo após o ensaio nº 1.
Fonte: DLA-9876/2013.

Na figura 51, tem-se o estado que o cabo ficou após a aplicação da segunda descarga atmosférica, ensaio nº 2.



Figura 51 – Detalhe do cabo após o ensaio nº 2.
Fonte: DLA-9876/2013.

Após o ensaio nº 3, houve o rompimento de um fio e depósito de material em seis fios, conforme figura 52.



Figura 52 – Detalhe do cabo após o ensaio nº 3.
Fonte: DLA-9876/2013.

Na figura 53 é possível observar o estado do cabo após o ensaio nº 4, onde verificou-se o rompimento de um fio e depósito de material fundido em dois fios.



Figura 53 – Detalhe do cabo após o ensaio nº 4.
Fonte: DLA-9876/2013.

Detalhe do cabo após a realização do último ensaio, ensaio nº 5, ilustrado na figura 54, onde verificou-se o rompimento de dois fios e depósito de material fundido em três fios.



Figura 54 – Detalhe do cabo após o ensaio nº 5.
Fonte: DLA-9876/2013.

6.2 RELATÓRIO DE ENSAIO DLA-16118/2013

Este relatório é referente ao ensaio de curto-circuito no cabo tipo OPGW CENTRUM – CS2.190.167.D36.

Neste ensaio foram usados os acessórios de ancoragem fabricados pela PLP Produtos para Linhas Preformados Ltda.

Características do item sob ensaio:

- Tipo: OPGW CENTRUM – CS2.190.167.D36
- Capacidade de curto-circuito: 190 kA².s
- Classe para descargas atmosféricas: 150 C
- Resistência do cabo a 20 °C: 0,272 ohms/km

Foi ensaiada uma amostra com 150 m de comprimento com as seguintes características declaradas pelo fabricante:

- | | | |
|---|------------------------------|----------------|
| • Número de fibras ópticas: | 36 (SM e NZD) | |
| • Diâmetro total: | 16,75 mm | |
| • Diâmetro externo do tubo de aço inox: | 3,3 mm | |
| • Diâmetro interno do tubo de aço inox: | 2,9 mm | |
| • Armação dos fios: | camada externa | camada interna |
| ○ Material: | aço-alumínio | aço-alumínio |
| ○ Quantidade de fios: 12 | 6 | |
| ○ Diâmetro de fios: | 3,35 mm | 3,35 mm |
| • Comprimento do passo da camada externa: | 175 mm | |
| • Peso: | 768 kgf/km | |
| • Resistência mecânica calculada RMC: | 8900 kgf | |
| • Coeficiente de dilatação térmica | 15,5 x 10 ⁻⁶ 1/°C | |

Circuito de ensaio conforme figura 55:

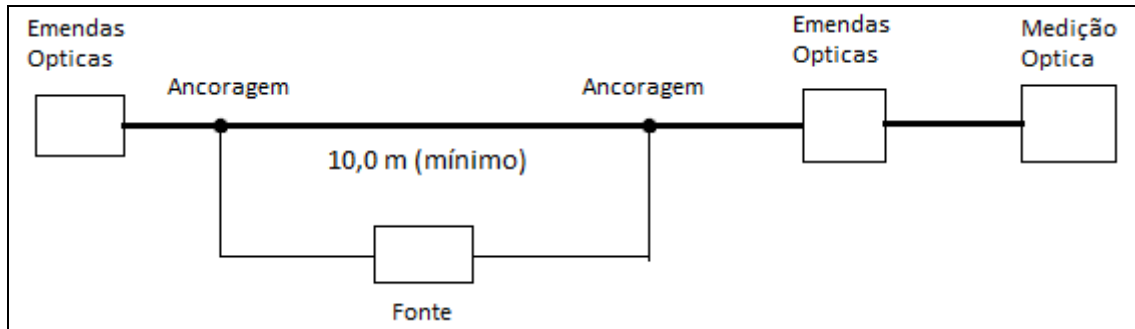


Figura 55 - Esquema de montagem para execução do ensaio de curto-circuito.
Fonte: adaptado de DLA-16118/2013.

Foi ensaiado a amostra, nova, estando as 36 fibras ópticas emendadas (18 SM e 18 NZD), sendo a tração inicial de 1780 kgf (20% da RMC do cabo).

Tabela 10 - Tabela de resultados do ensaio de curto-circuito.

Ensaio	Oscilograma	Duração	Corrente de ensaio		I ² t	Notas
			Valor de crista	Valor eficaz simétrico		
nº	nº	s	kA	kA	kA ² s	
1	060/13	0,320	40,8	19,0	119,7	Ti = 24,4/24,4/24,4 °C ; Tf = 89,4/113,5/118,4 °C
2	061/13	0,504	41,7	18,9	188,9	Ti = 52,8/56,7/57,0 °C ; Tf = 139,1/172,9/183,5 °C
3	062/13	0,504	41,7	19,3	192,2	Ti = 52,8/56,3/56,4 °C ; Tf = 139,3/188,6/197,6 °C
4	063/13	0,504	42,3	19,2	192,1	Ti = 53,2/57,0/57,3 °C ; Tf = 139,9/186,7/200,0 °C
5	064/13	0,504	41,2	19,0	190,0	Ti = 53,6/57,2/57,3 °C ; Tf = 141,1/182,7/196,6 °C
6	065/13	0,504	42,0	19,1	190,1	Ti = 52,9/56,7/56,3 °C ; Tf = 141,4/185,8/198,4 °C
7	066/13	0,504	41,3	19,1	190,2	Ti = 52,7/56,5/56,7 °C ; Tf = 141,5/183,9/186,2 °C
8	067/13	0,504	42,2	19,1	191,9	Ti = 53,1/56,0/56,1 °C ; Tf = 141,9/187,1/195,1 °C
9	068/13	0,504	41,0	19,2	191,4	Ti = 53,5/56,6/57,2 °C ; Tf = 142,1/189,3/197,1 °C
10	069/13	0,504	42,3	19,1	191,6	Ti = 53,1/56,5/57,0 °C ; Tf = 140,8/182,5/194,0 °C
11	070/13	0,504	41,3	19,1	191,9	Ti = 53,5/57,2/57,5 °C ; Tf = 141,2/190,5/198,0 °C

Fonte: DLA-16118/2013.

Ti = temperaturas imediatamente antes de cada ensaio, respectivamente, na superfície externa de um fio de aço-alumínio da camada externa, na superfície externa de um fio de aço-alumínio da camada interna e na superfície externa do tubo de aço inox, no meio do vão, medidas por meio de termopar tipo J (ferro-constantan).

Tf= temperaturas máximas alcançadas nos mesmos pontos e medidas da mesma maneira citada anteriormente, após cada ensaio.

Temperatura ambiente durante o ensaio foi de 23,2 °C.

O ensaio nº 1 foi feito com a finalidade de pré-aquecimento da amostra.

Os intervalos entre ensaios nº 1 a 11 foram, respectivamente, de 14, 23, 22,5, 22,5, 24, 23, 23,5, 23,5, 23,5, 23,5 min.

Para medição da atenuação das fibras ópticas utilizou-se:

- Uma fonte de luz estabilizada com comprimento de onda 1550 nm, modelo MG9001A (nº patrimonial 06-8405, certificados de calibração ANRITSU nº CA10976.01 e CA10976.02 válidos até MARÇO/2014);
- Um medidor de potência óptica, modelo ML910B com sensor MA9305B (nº patrimonial 06-6694, certificados de calibração ANRITSU nº CA10977.01 e CA10977.02 válidos até MARÇO/2014);
- Um divisor óptico, modelo MA9307A (sem nº patrimonial, certificado de calibração ANRITSU nº CA10977.03 válido até MARÇO/2014).
- Para medição da tração no cabo utilizou-se um dinamômetro com capacidade de 30000 kgf (sem nº patrimonial, certificado de calibração nº DMTT 1050/2012 válido até OUTUBRO/2013).
- Para medição das temperaturas utilizou-se um sistema digital de aquisição de dados (nº patrimonial 06-17740, certificado de calibração nº CEPEL CA1-307/12 válido até AGOSTO/2013).

A variação máxima da atenuação das fibras ópticas nas aplicações de curto-circuito realizadas até 2 horas após a última aplicação de corrente foi de 0,06 dB, o que, para o comprimento acumulado de fibras ópticas dentro do vão de corrente de $36 \times 11,5 \text{ m} = 414 \text{ m}$, representa uma variação de $0,06 \times 1000/414 = 0,14 \text{ dB/km}$.

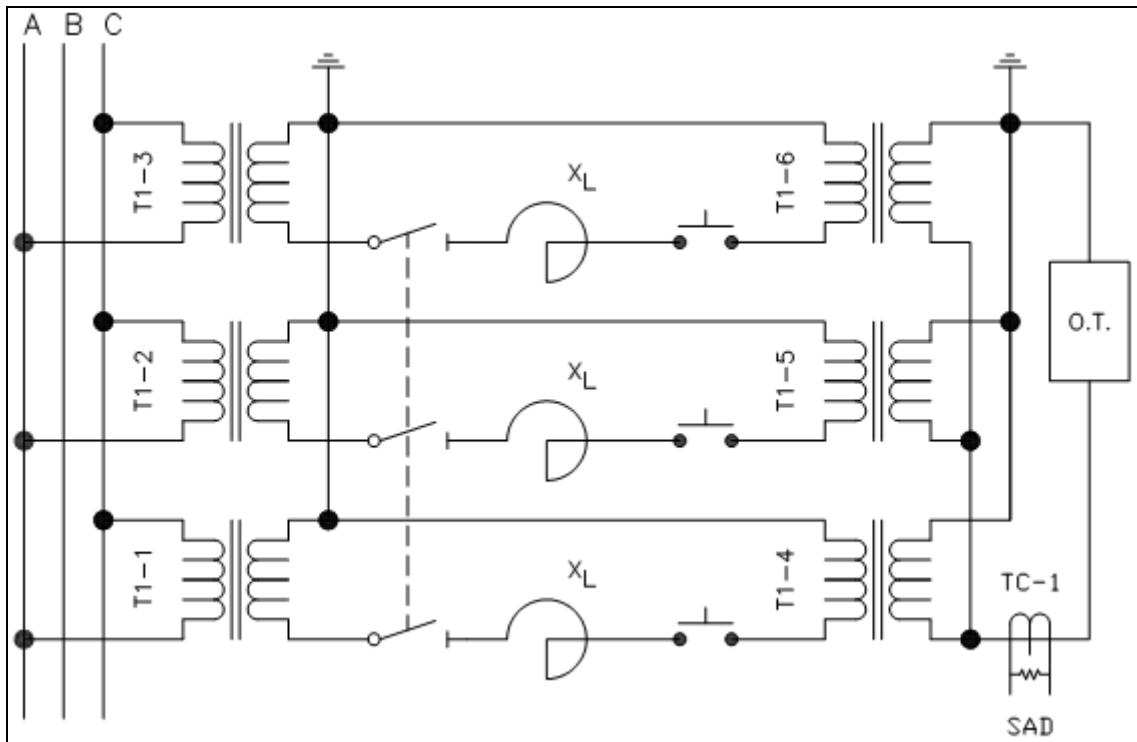


Figura 56 – Circuito para o ensaio de curto-circuito.
Fonte: DLA-16118/2013.

Legenda:

T1-1/T1-2/T1-3 – Transformadores 138/4,16 kV +- 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 (nº patrimonial 06-2233, certificado de calibração nº CEPEL CA2-203/12 válido até MAIO/14) com derivador de 0,5 Ω (nº 29, sem nº patrimonial, certificado de calibração nº CEPEL CA2-203/12 válido até MAIO/14).

O.T. - Objeto sob ensaio

SAD - Sistema de aquisição de dados (nº patrimonial 06-11485, certificado de calibração nº CEPEL CA2-203/12 válido até MAIO/14)

O cabo foi inspecionado visualmente após cada aplicação de corrente e ao retornar à temperatura ambiente depois da última aplicação foi feita uma dissecação

de 3 trechos de 1,20 m de comprimento (2 trechos correspondentes às extremidades do cabo no vão de corrente e 1 trecho correspondente ao meio do vão), não sendo observados danos por efeitos eletromecânicos para as aplicações de corrente realizadas (I^2t de 119,7, 188,9, 192,2, 192,1, 190,0, 190,1, 190,2, 191,9, 191,4, 191,6, e 191,9 kA².s).

Para as aplicações de corrente realizadas as temperaturas máximas alcançadas foram de 118,4, 183,5, 197,6, 200,0, 196,6, 198,4, 186,2, 195,1, 197,1, 194,0 e 198,0 °C na superfície externa do tubo de aço inox. O primeiro ensaio foi feito com a finalidade de pré-aquecimento da amostra. Foi instalado um terceiro termopar no ponto de injeção de corrente, como solicitado na norma, e a máxima temperatura atingida nesse ponto foi de 47,2 °C.

A variação máxima da atenuação das fibras ópticas nas aplicações de curto-circuito realizadas foi de 0,14 dB/km.

As verificações após o ensaio de curto-circuito solicitadas na norma nos componentes poliméricos do cabo (tempo de indução oxidativa inferior a 10 minutos para o composto de enchimento; temperatura de início de decomposição, após a 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%) não são realizadas no CEPEL e a realização dessas verificações será de responsabilidade do cliente.



Figura 57 – Arranjo para o ensaio de curto-circuito
Fonte: DLA-27161/2012.

6.3 RELATÓRIO DE ENSAIO DLA-27161/2012

Os ensaios realizados neste relatório são os de curto-circuito e descarga atmosférica com corrente de continuidade no cabo tipo OPGW DUAL-DG1.016.122.D48.

Nestes ensaios foram usados os acessórios de ancoragem fabricados pela PLP Produtos para Linhas Preformados Ltda.

Características do item sob ensaio:

- Tipo: OPGW DUAL-DG1.016.122.D48.
- Carga limite de ensaio: 3100 kgf.
- Classe para descargas atmosféricas: 150 C
- Resistência do cabo a 20 °C: 0,995 ohms/km
- Capacidade de curto-circuito: 16 kA².s

Foi ensaiado uma amostra do cabo com 150 metros de comprimento, com as seguintes características declaradas pelo fabricante:

- Número de fibras ópticas: 48 (SM e NZD)
- Diâmetro total: 12,2 mm
- Diâmetro externo do tubo de alumínio: 6,0 mm
- Diâmetro interno do tubo de alumínio: 4,0 mm
- Diâmetro externo do tubo de aço inox: 3,5 mm
- Diâmetro interno do tubo de aço inox: 3,1 mm
- Armação dos fios:
 - Material: aço galvanizado
 - Quantidade de fios: 9
 - Diâmetro dos fios: 3,09 mm
 - Comprimento do passo: 165 mm
- Peso: 593 kgf/km
- Resistência mecânica calculada RMC: 7651 kgf
- Coeficiente de dilatação térmica: $12,3 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$

6.3.1 Ensaio de curto-circuito

Foi ensaiado a amostra, nova, estando as 48 fibras ópticas emendadas (24 SM e 24 NZD), sendo a tração inicial de 800 kgf.

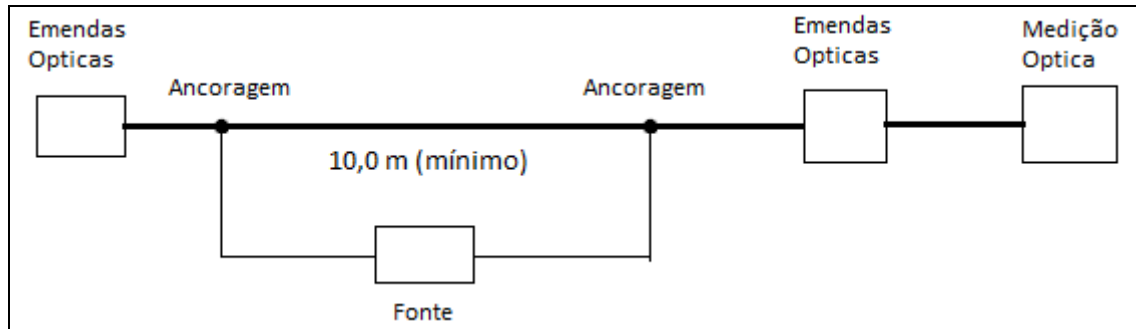


Figura 58 - Esquema de montagem para execução do ensaio de curto-circuito.
Fonte: adaptado de DLA-27161/2012.

Tabela 11 - Tabela de resultados do ensaio de curto-circuito.

Ensaio	Oscilograma	Duração	Corrente de ensaio		I^2t	Notas
			Valor de crista	Valor eficaz simétrico		
nº	nº	S	kA	kA	kA ² s	
1	168/12	0,370	5,6	12,4	11,9	Ti = 29,4 / 29,4 °C; Tf = 60,9 / 71,6 °C.
2	169/12	0,504	5,6	12,7	16,0	Ti = 50,2 / 62,1 °C; Tf = 96,8 / 116,3 °C.
3	170/12	0,504	5,7	12,7	16,8	Ti = 52,9 / 61,2 °C; Tf = 97,5 / 123,6 °C.
4	171/12	0,504	5,3	12,6	16,3	Ti = 52,9 / 62,2 °C; Tf = 96,7 / 121,5 °C.
5	172/12	0,504	5,6	12,2	16,0	Ti = 52,9 / 62,6 °C; Tf = 92,4 / 121,2 °C.
6	173/12	0,504	5,6	12,6	16,1	Ti = 53,7 / 64,2 °C; Tf = 92,6 / 122,8 °C.
7	174/12	0,504	5,7	12,5	16,7	Ti = 53,8 / 64,0 °C; Tf = 95,8 / 125,8 °C.
8	175/12	0,504	5,6	12,6	16,2	Ti = 54,2 / 64,4 °C; Tf = 91,9 / 123,5 °C.
9	176/12	0,504	5,6	12,4	16,3	Ti = 53,3 / 65,1 °C; Tf = 92,5 / 125,3 °C.

10	177/12	0,504	5,6	12,6	16,1	Ti = 53,2 / 64,3 °C; Tf = 91,3 / 123,8 °C.
11	178/12	0,504	5,6	12,4	16,5	Ti = 52,3 / 64,3 °C; Tf = 93,3 / 126,3 °C.

Fonte: DLA-27161/2012.

Ti = temperaturas imediatamente antes de cada ensaio, respectivamente, na superfície externa de um fio de aço galvanizado da camada externa e na superfície externa do tubo de alumínio, no meio do vão, medidas por meio de termopar tipo J (ferro-constantan).

Tf= temperaturas máximas alcançadas nos mesmos pontos e medidas da mesma maneira citada anteriormente, após cada ensaio.

Temperatura ambiente durante o ensaio de 23,7 a 24,1 °C.

O ensaio nº 1 foi feito com a finalidade de pré-aquecimento da amostra.

Os intervalos entre ensaios nº 1 a 11 foram, respectivamente, de 5, 12,5, 13, 12,5, 12,5, 12, 12, 12 e 12 min.

Para medição da atenuação da das fibras ópticas utilizou-se:

- Uma fonte de luz estabilizada com comprimento de onda 1550 nm, modelo MG9001A (nº patrimonial 06-8405, certificados de calibração ANRITSU nº ACBR00004557.01 e ACBR00004557.02 válidos até FEVEREIRO/2013);
- Um medidor de potência óptica, modelo ML910B com sensor MA9305B (nº patrimonial 06-6694, certificados de calibração ANRITSU nº ACBR00004558.01 e ACBR00004558.02 válidos até FEVEREIRO/2013);
- Um divisor óptico, modelo MA9307A (sem nº patrimonial, certificado de calibração ANRITSU nº ACBR00004558.03 válido até FEVEREIRO/2013).

Para medição da tração no cabo utilizou-se um dinamômetro analógico com capacidade de 10000 kgf (nº patrimonial 06-8095, certificado de calibração nº ITUC 0040/2012 válido até FEVEREIRO/2013).

Para medição das temperaturas utilizou-se um sistema digital de aquisição de dados (nº patrimonial 06-10246, certificado de calibração nº CEPEL CA1-161/12 válido até MAIO/2013).

A variação máxima de atenuação das fibras ópticas nas aplicações de curto-circuito realizada foi de 0,04 dB, o que, para o comprimento acumulado de fibras

ópticas dentro do vão de corrente de $48 \times 11,5 \text{ m} = 552 \text{ m}$. representa uma variação de $0,04 \times 1000/552 = 0,07 \text{ dB/km}$.

O cabo foi inspecionado visualmente após cada aplicação de corrente e ao retornar à temperatura ambiente depois da última aplicação foi feita uma dissecação de 3 trechos de 1,20 m de comprimento (2 trechos correspondentes às extremidades do cabo no vão de corrente e 1 trecho correspondente ao meio do vão), não se observando danos por efeitos eletromecânicos para as aplicações de corrente realizadas (I^2t de 11,9, 16,0, 16,8, 16,3, 16,0, 16,1, 16,7, 16,2, 16,3, 16,1 e 16,5 $\text{kA}^2.\text{s}$).

Para as aplicações de corrente realizadas, as temperaturas máximas alcançadas foram de 71,6, 116,3, 123,6, 121,5, 121,2, 122,8, 125,8, 123,5, 125,3, 123,8 e 126,3 °C na superfície externa do tubo de alumínio, lembrando que a 1ª aplicação (ensaio nº 1) foi feito com a finalidade de pré-aquecimento da amostra. Foi instalado um terceiro termopar no ponto de injeção de corrente, como solicitado na norma, e a máxima temperatura atingida nesse ponto foi de 41,6 °C.

A variação máxima da atenuação das fibras ópticas nas aplicações de curto-circuito realizadas foi de 0,07 dB/km.

As verificações após o ensaio de curto-circuito, solicitadas na norma, nos componentes poliméricos do cabo (tempo de indução oxidativa inferior a 10 minutos para o composto de enchimento; temperatura de início de decomposição, após a 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%) não são realizadas no CEPEL e a realização dessas verificações será de responsabilidade do cliente.

As figuras mostradas no tópico 6.2 demonstram o circuito de ensaio e foto da área de teste.

6.3.2 Ensaio de descarga atmosférica com corrente de continuidade:

Os ensaios nº 12 a 16 realizados com corrente de polaridade positiva, estando as 48 fibras ópticas emendadas (24 SM e 24 NZD) e sendo cada ensaio realizado em um novo vão de corrente.

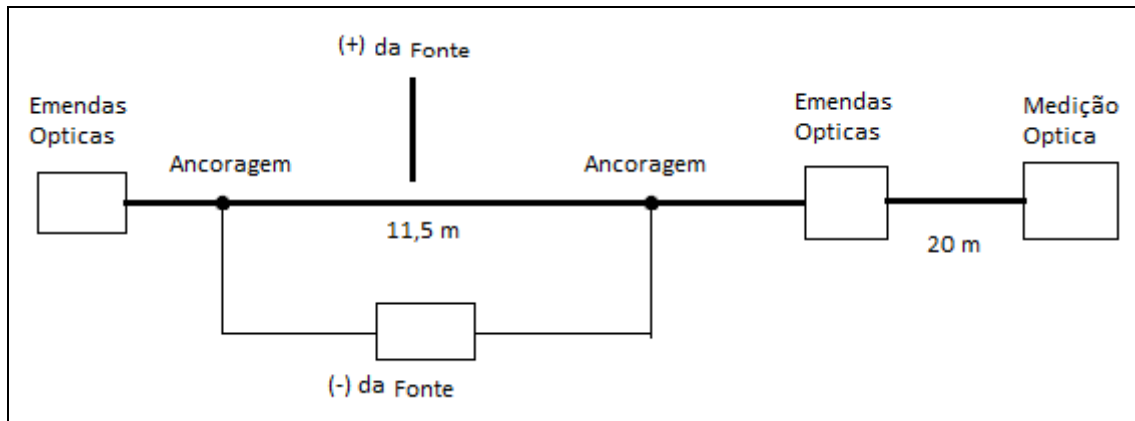


Figura 59 - Esquema de montagem para execução do ensaio de descarga atmosférica.
Fonte: adaptado de DLA-27161/2012.

Tabela 12 - Tabela de resultados do ensaio de descarga atmosférica.

Amostra	Ensaio	Oscilograma	Duração	Corrente de ensaio		Tração no cabo	
				Valor médio	Carga elétrica	Antes	Após
nº	nº	nº	s	A	C	kgf	kgf
1	12	179/12	0,500	295,0	147,5	1150	1150
1	13	180/12	0,500	297,2	148,6	1150	1150
1	14	181/12	0,500	297,0	148,8	1150	1150
1	15	182/12	0,500	294,2	147,1	1150	1150
1	16	183/12	0,500	292,4	146,2	1150	1150

Fonte: DLA-27161/2012.

Os equipamentos usados para a medição da atenuação das fibras ópticas e para medição da tração no cabo foram os mesmos do ensaio de curto-circuito.

Não houve variação da atenuação das fibras ópticas durante as descargas nesses ensaios.

Os valores das durações, dos valores médios das correntes e das cargas elétricas ficaram dentro das tolerâncias previstas na norma citada.

Temperatura ambiente de 24,1 °C (ensaios nº 12 a 14) e de 21,3 °C (ensaios nº 15 a 16).

Os ensaios foram realizados com corrente de polaridade positiva, em nenhum ensaio houve rompimento de fios da camada externa, mas obtiveram perda de material respectivamente em 2, 3, 4, 3, 4 fios. Todos ensaios obtiveram depósito de material fundido em um fio.

Após esse ensaio elevou-se a tração no cabo a uma taxa de 250 kgf/min, não se observando mais nenhuma anomalia até a tração de 3100 kgf mantida por 3 min.

As variações máximas da atenuação das fibras ópticas durante a fase de tracionamento posterior aos ensaios nº 12 a 16 até o valor de 3100 kgf foram, respectivamente, de 0,02, 0,01, 0,02, 0,01 e 0,01 dB.

As fotos abaixo, figura 60 até a figura 64, mostram detalhes do cabo após os tracionamentos nos cinco ensaios sem a ocorrência de rompimento dos fios.



Figura 60 – Detalhe do cabo após o ensaio nº 12.
Fonte: DLA-27161/2012.



Figura 61 – Detalhe do cabo após o ensaio nº 13.
Fonte: DLA-27161/2012.



Figura 62 – Detalhe do cabo após o ensaio nº 14.
Fonte: DLA-27161/2012.



Figura 63 – Detalhe do cabo após o ensaio nº 15.
Fonte: DLA-27161/2012.



**Figura 64 – Detalhe do cabo após o ensaio nº 16.
Fonte: DLA-27161/2012.**

7. CONCLUSÃO

Este trabalho mostrou a importância da normatização dos ensaios em cabos para-raios constituídos com fibras ópticas, *Optical Ground Wire (OPGW)*, assim como a necessidade dos cabos fabricados estarem de acordo com as exigências da norma ABNT NBR 14074:2009. A importância desta normatização se reafirma a partir do momento em que temos como exigência do órgão regulador do setor elétrico no Brasil, Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL, a utilização de cabos OPGW nas linhas de transmissão, incentivos governamentais para utilização dos cabos para-raios compostos com fibras ópticas para expansão do programa nacional de banda larga, o aumento da confiabilidade do sistema elétrico de potência (SEP).

A utilização de cabos para-raios para proteção das linhas de transmissão é essencial para que se tenha confiabilidade no sistema elétrico brasileiro. O Brasil é o país que recebe a maior incidência de descargas atmosféricas no mundo. Dos 3,15 bilhões de raios que atingem a Terra, 100 milhões são em solos nacionais, segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE. De acordo com o operador nacional do sistema (ONS), o prejuízo gerado para as concessionárias por apagões decorrentes de descargas incidentes sobre as linhas de transmissão é muito alto. No ano de 2011 o valor das multas atingiu o valor de R\$ 270.238.954,00 (duzentos e setenta milhões, duzentos e trinta e oito mil, novecentos e cinquenta e quatro reais). Com a realização dos ensaios pode-se comprovar a eficácia dos ensaios realizados, visto que os resultados dos testes apresentados neste trabalho se fizeram coerente com os parâmetros estabelecidos pela norma (ABNT NBR 14074:2009) e com isto torna-se viável a instalação em campo dos cabos analisados.

Nos ensaios realizados, uma característica observada tanto para os ensaios de curto-circuito como para os ensaios de descarga atmosférica, que é uma exigência da norma, foi a não variação da atenuação, acima do limite, durante a execução dos ensaios. Com o avanço das redes inteligentes de energia elétrica, *smart grids*, é fundamental que não ocorram perdas durante a transmissão de dados. A AES Eletropaulo, maior concessionária de energia elétrica do Brasil, irá investir R\$ 71.000.000,00 (setenta e um milhões de reais) num período de três anos em seu projeto de redes inteligentes. As redes inteligentes auxiliam na rápida detecção de falhas no sistema, além de um acompanhamento e monitoramento mais

eficaz, tanto por parte do consumidor quanto concessionária, do consumo de energia.

Quanto às simulações com o *software* Veiki, conclui-se que, com as realizações dos ensaios laboratoriais as características (temperatura, corrente) previamente estabelecidas na simulação foram atendidas.

Portanto, a realização de ensaios de certificação e homologação, ensaios de curto-circuito e descarga atmosférica, assim como vários outros ensaios (mecânicos, por exemplo), previstos em norma, são fundamentais para garantir que seja atingido o objetivo esperado com a utilização dos cabos OPGW, possibilitando a proteção da linha de transmissão contra descargas atmosféricas e comunicação com a utilização das fibras ópticas.

8. BIBLIOGRAFIA

ABNT NBR 14074:2009, **Cabos pára-raios com fibras ópticas (OPGW) para linhas aéreas de transmissão - Requisitos e métodos de ensaio**. 3ª edição, 2009.

ABNT NBR 13981:1997, **Cabos para-raios com fibras ópticas para linhas aéreas de transmissão (OPGW) – Curto-circuito – Método de ensaio**. Cancelada.

ABNT NBR 14586:2000, **Cabos para-raios com fibras ópticas para linhas aéreas de transmissão (OPGW) – Determinação dos efeitos da descarga atmosférica – Método de ensaio**. Cancelada.

ABNT NBR 13520, **Fibras ópticas – Determinação da variação da atenuação óptica – Método de ensaio**.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL), **LINHAS DE TRANSMISSÃO**. Disponível em: <<http://www.ANEEL.gov.br/area.cfm?idArea=67>>
Acesso em: 02 mai. 2012.

- ANEEL - Edital nº 02/2013, **LT 500 kV Brasília – Luiziânia C1 e C2, LT 345 kV Samambaia – Brasília Sul, LT 230 kV Brasília Sul – Brasília Geral e SE Brasília Leste 500/138/13,8 kV – 1260 MVA. Características e requisitos técnicos básicos das instalações de transmissão**. 103f. 2013.

- **RELATÓRIO ANEEL 2011**. Disponível em <http://www.ANEEL.gov.br/biblioteca/downloads/livros/Relatorio_ANEEL_2011.pdf>. Acesso em 15 jan. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Disponível em: <<http://www.abnt.org.br/>> Acesso em: 02 mai. 2012.

CMSE. **ATA DA 126ª REUNIÃO (Extraordinária)**. Distrito Federal, DF, Brasil: 2013;

DUARTE, Fabio. T. P. **REDUÇÃO DE PERDAS POR INDUÇÃO EM CABOS PÁRA-RAIOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DOTADAS DE UM CABO PÁRA-RAIO OPGW E OUTROS EHS**. 2007. 88 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia) – Engenharia elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007. Disponível em:
<<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10000445.pdf>>. Acesso em 10 dez. 2012.

ELAT. **Ranking de incidência de descargas por município no Brasil**. 2013. Disponível: em <<http://www.inpe.br/ranking/>>. Acesso em 5 fev. 2013.

FOROUZAN, Behrouz A. **Comunicação de Dados e Redes de Computadores**. Traduzido por Glayson Eduardo de Figueiredo. 3ª edição. Editora Bookman. Porto Alegre, 2006.

FURUKAWA INDUSTRIAL S.A. PRODUTOS ELÉTRICOS. **DLA-9876/2013: Ensaio de descarga atmosférica com corrente de continuidade e medição de resistência elétrica**. Relatório de Ensaio. Curitiba-PR, 2013.

- **DLA-16118/2013: Ensaio de curto-circuito**. Relatório de Ensaio. Curitiba-PR, 2013.

- **DLA-27161/2012: Ensaio de curto-circuito, descarga atmosférica com corrente de continuidade e medição de resistência elétrica**. Relatório de Ensaio. Curitiba-PR, 2012.

- **MF 101 - Introdução à Tecnologia de redes**. Apostila. Edição 5. Curitiba-PR, 2012.

- **MF 104 – Cabeamento Estruturado Óptico**. Apostila. Edição 5. Curitiba-PR, 2012.

- **Furukawa inaugura unidade brasileira de OPGW e aumenta capacidade produtiva de cabos ópticos no País.** Curitiba, 5 mar. 2013. Disponível em: <http://www.furukawa.com.br/br/rede-furukawa/noticias/furukawa_inaugura_unidade_brasileira_de_opgw_e_aumenta_capacidade_produtiva_de_cabos_opticos_no_pais-947.html>. Acesso em 15 mar. 2013.

GROSSMANN, Luís O. **A internet banda larga na mira do setor elétrico. Brasil.** 26 ago. 2012. Disponível em: <<http://brasilsobranoelivre.blogspot.com.br/2012/08/a-internet-banda-larga-na-mira-do-setor.html>>. Acesso em 15 mar. 2013.

JÚNIOR, Luiz Cera Zanetta. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência.** Vol. 52. Editora da Universidade de São Paulo (EdUSP). São Paulo, 2003.

LIMA, Carlos Alberto F.; JANNUZZI, Gilberto M. **Smart grid será realidade em seu potencial com o envolvimento do órgão regulador e com compromissos com o consumidor.** O SETOR ELÉTRICO. São Paulo, v. 6, n. 70, Nov. 2011. Disponível em: <http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed70_fasciculo_smart_grids_cap6.pdf>. Acesso em: 04 abr. 2012.

MEDEIROS, Júlio Cesar de Oliveira. **PRÍNCIPIOS DE TELECOMUNICAÇÕES: Teoria e Prática.** Editora Érica Ltda, 2ª edição, 2007;

MINISTÉRIO DAS COMUNICAÇÕES. **Desoneração da construção de rede de fibra ótica já é realidade.** Brasília, 12 mai. 2013. Disponível em: <<http://www.mc.gov.br/sala-de-imprensa/todas-as-noticias/institucionais/26528-desoneracao-da-construcao-de-rede-de-fibra-otica-ja-e-realidade>>. Acesso em 15 mai. 2013.

- **Programa Nacional de Banda Larga (PNBL).** Brasília, 12 mai. 2010.

ONS, **Biblioteca virtual**. 2011. Disponível em <http://www.ons.org.br/download/biblioteca_virtual/publicacoes/dados_relevantes_2011/> Acesso em 20 jan. 2013.

Redação Folha de São Paulo. **Raio é justificativa comum para explicar apagões; relembre episódios**. Folha de S.Paulo, São Paulo, 27 dez. 2012. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/mercado/1207100-raio-e-justificativa-comum-para-explicar-apagoes-relembre-episodios.shtml>>. Acesso em 15 mai. 2013.

RIZZO, Alana; DANTAS, Iuri. (18 de Dezembro de 2012). **Relatórios da ANEEL e ONS apontam falhas 'graves' e 'primárias' em apagões**. O ESTADÃO, Brasília, 18 dez. 2012. Disponível em: <<http://www.advivo.com.br/blog/luisnassif/relatorios-apontam-falhas-graves-em-apagoes>>. Acesso em 15 mai. 2013.

WARTH, A. (17 de Dezembro de 2012). **Raios podem ter causado apagão de sábado, diz Ministério**. ESTADÃO. O ESTADÃO, Brasília, 17 dez. 2012. Disponível em: <<http://economia.estadao.com.br/noticias/economia,raios-podem-ter-causado-apagao-de-sabado-diz-ministerio,138335,0.htm>>. Acesso em 15 mai. 2013.

ZILIO, Sérgio Carlos. **ÓPTICA MODERNA: FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES**. Editora do Instituto de Física de São Carlos, 2009. 307 f.