

TESE

1146

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

**Desenvolvimento de um Terminal Ótico para  
Cabos OP-GW Energizados (OP-PW) para  
Classe de Tensão até 72,5 kV**

DALVA SOUZA DE ARAUJO

AGOSTO DE 2001

CLASS.	021.315 (043.2)
CUT. R.	A658d
TOMBO.	1246

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

DESENVOLVIMENTO DE UM TERMINAL ÓTICO PARA  
CABOS OP-GW ENERGIZADOS (OP-PW) PARA CLASSE  
DE TENSÃO ATÉ 72,5 kV

DALVA SOUZA DE ARAUJO



ORIENTADOR: Prof. Dr. MANUEL LUÍS BARREIRA MARTINEZ

DISSERTAÇÃO APRESENTADA À COORDENAÇÃO DO CURSO DE  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA  
FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA

AGOSTO DE 2001

## AGRADECIMENTOS

### DEDICATÓRIA

Aos meus pais Antenor e Jenny, meus irmãos Torquato, Marco  
Aparecido, Manoel, João, Carlos, Luiz, Paulo, Antenor e Francisco,  
amigos e colegas, considero e agradeço, pelo conhecimento,  
paciência, compreensão e amor.

Toda a minha gratidão e admiração

Aos meus, pais, amigos e mestres  
Antenor Mendes Araujo e Jenny de Souza Araujo

Cujas vidas são exemplos de fé, contínuo trabalho, solidariedade,  
busca constante da sabedoria, e acima de tudo honradez.

A parte mais difícil de qualquer tarefa é aquela relacionada aos  
compromissos da pessoa que contribuiu para sua realização. A  
motivação é tanto a maior-se de rendimento quanto a de evitar o  
desperdício de recursos humanos durante períodos que foram  
aproveitados para a realização deste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Carlos Márcio Vieira Tobias, Cristina Silva, Dário Tufanato, Edson Luiz  
Rosa, Eduardo Luis Ferraz, Fabiano A. de Melo, Paulo  
Ribeiro, Plácido Araújo, José Roberto Cardoso, Ulisses Cruz, Gilson  
Lopes, A. Gonçalves, Renato A. Mendes, Marcelo, Marcos Roberto

Aos meus pais Antenor e Jenny, meus irmãos Terezinha, Maria  
Aparecida, Lázara, José, Gorete, Luiza, Paulo, Antenor e Francisco,  
sobrinhos e sobrinhas, cunhadas e cunhados, pela generosidade,  
paciência, companheirismo e amor.

Um especial agradecimento ao meu amigo e orientador Manoel Luiz Corrêa  
Martins.

Toda a minha gratidão e admiração.

Minha gratidão

A parte mais difícil de qualquer tarefa é aquela relacionada aos agradecimentos às pessoas que contribuíram para sua realização. A memória é falha e deixa-se de mencionar alguém que o deveria ser. Mesmo assim, é necessário destacar algumas pessoas que foram imprescindíveis na realização deste trabalho:

Carlos Márcio Vieira Tahan, Cristina Silva, Dário Takahata, Edna Lopes Ramalho, Eduardo Luís Ferrari, Fabiana A. Toledo Silva, Fumitaka Nishimura, Héctor Arango, José Roberto Cardoso, Liliane Dias Cicarelli, Manoel R. Albuquerque, Marcos A. Mendes Carneiro, Marcos Roberto Gouvêa, Moacyr Trindade de Oliveira Andrade, Oswaldo Sidney Manalli Ronaldo Pedro Casolari, Samira Bevilaqua, Sílvio Nabeta, todos os amigos e companheiros da Comissão de Serviços Públicos de Energia.

De maneira especial ao meu amigo e orientador Manuel Luís Barreira Martinez.

Minha gratidão.

## RESUMO

Esta dissertação tem por objetivo descrever os passos necessários para o desenvolvimento de um terminal ótico para utilização em sistemas construídos com cabos OP-GW energizados – OP-PW, com tensão de até 72.5 kV.

Primeiramente, é abordado o estado da arte dos sistemas de comunicação óticos, discutida a possibilidade do compartilhamento da infra – estrutura dos sistemas de potência com os sistemas de comunicação e definido o nicho tecnológico no qual se insere o tipo de acessório – Terminal Ótico – objeto deste trabalho.

Em seqüência são apresentados os principais requisitos dos sistemas OP-GW e sua aplicação às estruturas de transmissão dos sistemas de potência. Deste modo, são apresentadas características construtivas e de instalação desses cabos.

A aplicação dos sistemas OP-GW como cabos de fases em um sistema de potência é apresentada com base no Sistema PRE – Pára-Raios Energizados, desenvolvido pela ELETRONORTE. Deste modo, é apresentado um histórico e uma breve descrição do Sistema PRE. A seguir, são discutidas as alternativas e características para a instalação de sistemas óticos nas fases das linhas de transmissão ou de distribuição. De modo resumido são apresentadas as principais características dos sistemas dielétricos auto-sustentados, que não são objeto específico deste trabalho. Finalmente, os principais requisitos dos sistemas de interface potência – comunicação, ou seja, do terminal ótico são abordados.

A seguir, são apresentadas as principais diretrizes de projeto utilizadas – Normas Técnicas. Dentro deste contexto, a metodologia de verificação de desempenho por meio de ensaios elétricos é discutida e o projeto de equalização de potencial, via programa de elementos finitos é apresentado. Os resultados dos ensaios, realizados em 3 amostras, conforme solicitado, confirmam as hipóteses assumidas.

Finalmente, são apresentados os principais comentários e as conclusões deste trabalho.

## **ABSTRACT**

The objective of this work is to show the steps used to design an optical termination to be applied to power systems constructed with energized OP-GW cables up to the rated voltage of 72.5 kV.

Firstly, it is shown the state of the art of the optical communication systems. The possibility of sharing the power system transmission lines and the technologic space of this kind of interface – Optical Termination – is presented.

In sequence, are discussed the main requests of the OP-GW Systems and their application to the transmission lines. In this way, are presented the constructive characteristics and the installation of this kind of cables.

The use of the OP-GW concept as phase conductors of a power system is presented based on the PRE System – Energized Ground Wires, developed by ELETRONORTE. Therefore, it is presented a historical approach of the PRE System and it is discussed the alternatives to the installation of optical systems in the phase conductors of a transmission or distribution line. After this, to complement the set of alternatives, a short view of the main characteristics of the self-sustained dielectric optical cables, which are not object of this work, is presented. Finally, the main requests of interface of the systems (Power & Communication) – Optical Terminal – are presented.

The main key points of the design of the Optical Terminal – Technical Standards – are presented and discussed. The grading ring design, using a previously developed Finite Element Program is presented. The results of the tests, carried out in 3 representative samples, as agreed by the parts confirm the assumed design criteria.

Finally, are presented the main conclusions and comments of this work.

## ÍNDICE

Dedicatória .....	i
Agradecimentos .....	ii
Resumo .....	iv
Abstract .....	vi
Índice .....	vii
Nomenclatura e Simbologia .....	x
Lista de Figuras .....	xii
Lista de Tabelas .....	xiv
Capítulo 1	
1. Introdução .....	1
Capítulo 2	
2. Linha de Transmissão com Cabo OP-GW .....	4
2.1 Considerações Gerais .....	4
2.2 Requisitos Ambientais .....	4
2.2.1 Vento .....	4
2.2.2 Temperatura .....	5
2.2.3 Contaminação Salina e Contaminação Industrial .....	5
2.2.4 Descargas Atmosféricas .....	5
2.3 Influência no Desempenho das Linhas de Transmissão com Cabo OP-GW .....	6
2.4 Estudos de Curto-Circuito .....	8
2.5 Requisitos Mecânicos .....	10
2.5.1 Cálculo de Trações e Flechas .....	10
2.5.2 Grampeamento do Cabo .....	11
2.5.3 Relação entre Tração e Temperatura .....	12
2.5.4 Deformação nos Cabos .....	12
2.5.5 Esforço Devido ao Vento Longitudinal .....	13
2.5.6 Esforço Devido à Carga Longitudinal .....	13
2.5.7 Esforço Devido ao Ângulo da Linha .....	13
2.5.8 Vibrações Eólicas .....	13

2.6 Considerações Sobre os Cabos OP-GW .....	14
2.6.1 Fibra Ótica .....	15
2.6.2 Núcleo Ótico .....	18
2.6.3 Proteção do Núcleo Ótico .....	21
2.6.4 Fios Metálicos .....	22
2.7 Instalação dos Cabos OP-GW .....	25
2.7.1 Generalidades .....	25
2.7.2 Execução de Emendas .....	25
2.7.3 Acessórios do Cabo OP-GW .....	26
Capítulo 3	
3.1 Histórico .....	28
3.2 Alternativas Tecnológicas .....	30
3.2.1 Cabo OP-PW (Optical Phase Wire) .....	30
3.2.2 Cabo Auto-Sustentado .....	30
3.2.3 Cabo Espinado .....	31
3.3 Particularidades dos Sistemas com Cabos Óticos sob Tensão .....	32
3.3.1 Cabos OP-PW & Espinados – Cláusulas Comuns .....	32
3.3.2 Cabos Espinados – Cláusulas Específicas .....	34
3.3.3 Escolha do Cabo .....	35
3.4 Comentários sobre a Utilização de Cabos Dielétricos Auto-Sustentados .....	35
3.5 Sistema OP-PW .....	36
3.5.1 Descrição .....	36
3.5.2 Requisitos do Terminal Ótico .....	40
3.5.3 Cláusulas Específicas para os Terminais Óticos para o Sistema OP-PW .....	44
3.5.4 Especificação do Invólucro do Terminal Ótico .....	45

Capítulo 4	
4. Desenvolvimento	48
4.1 Considerações Iniciais	48
4.2 Método dos Elementos Finitos	48
4.3 Formulação Matemática	50
4.4 Pacote Computacional	51
4.5 Definição do Invólucro	55
4.5.1 Simulações	56
4.5.2 Resultados	58
4.5.3 Comentários	64
4.6 Ensaaios em Protótipos	65
4.6.1 Definição das Normas Técnicas	65
4.6.2 Ensaaios	65
4.6.3 Normas e Requisitos	67
4.6.4 Abertura e Inspeção das Amostras	68
4.6.5 Execução e Resultados dos Ensaaios	68
Capítulo 5	
5. Comentários e Conclusões	75
Capítulo 6	
6. Referências Bibliográficas	80

## NOMENCLATURA E SIMBOLOGIA

a <sub>j</sub>	distância entre o cabo pára-raios ao eixo da linha [m]
a <sub>l</sub>	distância do cabo fase ao eixo da linha [m]
b	distância entre os cabos pára-raios na torre [m]
D	vetor deslocamento [C/cm <sup>3</sup> ]
E	vetor campo elétrico [V/m]
F	esforço devido ao ângulo [kgf]
f	flecha no cabo [m]
h	altura efetiva dos cabos [m]
h	altura efetiva do cabo pára-raios [m]
h	altura média do cabo pára-raios [m]
hg	altura do cabo pára-raios na torre [m]
hgw	distância entre o cabo pára-raios e o solo no meio do vão [m]
h <sub>i</sub>	altura do cabo fase na torre [m]
h <sub>i</sub>	altura do cabo pára-raios na torre [m]
i	fase "i" da linha
I	nível isoceráunico da região
I <sub>c</sub>	corrente crítica [A]
j	cabo pára-raios "j" na torre
k	coeficiente do acoplamento
kd	coeficiente de correção do período de integração
kr	coeficiente de rugosidade do terreno
n	fator para correção de velocidade do vento com a altura
NL	número de descargas atmosféricas na linha por 100 km por ano
P	peso do cabo [kgf/m]
R <sub>g</sub>	resistência de aterramento da torre [Ω]
r <sub>i</sub>	raio do cabo [mm]
T	tração no cabo com vento máximo [kgf]
T <sub>0</sub>	tração horizontal [kgf]
U <sub>s</sub>	suportabilidade crítica a impulso do isolamento [V]
V	vão [m]

$V_b$	vão básico [m]
$V_i$	vão i entre torres adjacentes [m]
$V_p$	vento de projeto [m/s]
$V_T$	vento transversal máximo [m/s]
$w$	largura da faixa de blindagem [m]
$Z_{ii}$	Impedância própria na torre [ $\Omega$ ]
$Z_{ij}$	Impedância mútua entre o cabo pára-raios e cabo fase [ $\Omega$ ]
$Z_{jk}$	Impedância mútua entre os cabos pára-raios [ $\Omega$ ]
$\alpha$	Ângulo da linha [grau]
$\epsilon$	permissividade elétrica do meio
$\rho$	densidade volumétrica de cargas

#### PRINCIPAIS SIGLAS

EDS	Every Day Stress
OP-GW	Optical Ground Wire
OP-PW	Optical Phase Wire
PRE	Pára-Raio Energizado

#### PRINCIPAIS UNIDADES

$\mu\text{m}$	micrometro
nm	nanometro
dB	decibel

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO 2

Figura 2.1 – Roteiro para cálculo de corrente de curto-circuito .....	9
Figura 2.2 – Propagação da luz através da fibra ótica .....	16
Figura 2.3 – Detalhe do núcleo ótico .....	19
Figura 2.4 – Estrutura tipo <i>loose</i> .....	20
Figura 2.5 – Estrutura tipo <i>tight</i> .....	20
Figura 2.6 – Núcleo ótico com espaçador .....	22
Figura 2.7 – Projeto do cabo OP-GW .....	23
Figura 2.8 – Configurações do cabo OP-GW .....	24

### CAPÍTULO 3

Figura 3.1 – Esquema básico do Sistema PRE .....	28
Figura 3.2 – Terminal ótico .....	38
Figura 3.3 – Padrão de montagem do terminal ótico em um sistema de 69 kV .....	39
Figura 3.4 – Estrutura básica do isolador composto .....	42
Figura 3.5 – Dimensões do invólucro .....	46

### CAPÍTULO 4

Figura 4.1 – Geometria do terminal ótico .....	52
Figura 4.2 – Materiais .....	54
Figura 4.3 – Estrutura básica do FLUX2D .....	55
Figura 4.4 – Dimensões do terminal ótico .....	57
Figura 4.5 – Linhas equipotenciais – geometria completa .....	59
Figura 4.6 – Linhas equipotenciais – interior do invólucro .....	60
Figura 4.7 – Linhas equipotenciais – anel de equalização de potencial .....	61

Figura 4.8 – Gradientes ao longo do anel de equalização de potencial .....	62
Figura 4.9 – Gradiente elétrico no interior do invólucro junto ao núcleo ótico .....	63
Figura 4.10 – Intervalo considerado para o cálculo do gradiente .....	64
Figura 4.11 – Aplicação de tensão de polaridade positiva (amostra 1) .....	70
Figura 4.12 – Aplicação de tensão de polaridade negativa (amostra 1) .....	71
Figura 4.13 – Ensaio de névoa salina .....	73
Figura 4.14 – Terminal ótico após ensaio de névoa salina .....	74
Figura 4.15– Terminal ótico após ensaio de tensão suportável em frequência industrial a seco .....	74

## CAPÍTULO 5

### Figura 5.1 – Características técnicas do terminal ótico – 72,5 kV

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1 – Dimensões do invólucro do terminal ótico ..... 47

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 – Propriedades físicas ..... 54  
Tabela 4.2 – Resultados da medição de descargas parciais ..... 68  
Tabela 4.3 – Resultado do ensaio de tensão ..... 73

CAPÍTULO 5

Tabela 5.1 – Características técnicas do terminal ótico – 72.5 kV ..... 76

## 1. Introdução

A explosiva evolução das comunicações óticas, causada pela necessidade do aumento da capacidade de tráfego de voz, vídeo e dados em alta velocidade, tem levado a novos conceitos em tecnologia de telecomunicações fazendo com que empresas de telecomunicações e de energia elétrica busquem novas oportunidades de negócios, deixando de atuar apenas no seu mercado, através de parcerias e associações, visando a excelência em seus serviços e produtos e com isso obter mútuos benefícios.

Esta dissertação tem por objetivo descrever os passos necessários para o desenvolvimento de um terminal ótico para utilização em sistemas construídos com cabos OP-GW energizados – OP-PW, com tensão até 72,5 kV.

Desta forma, as empresas de telecomunicações e de energia elétrica vêm empregando, largamente, cabos com fibras óticas, tanto para longas interligações como em interligações urbanas, utilizando instalações aéreas ou subterrâneas multifuncionais ou integradas. Na instalação aérea são utilizadas as linhas de transmissão e de distribuição de energia elétrica e no caso de instalação subterrânea, as margens de ferrovias e rodovias para as longas interligações.

A implantação de cabos óticos em instalação subterrânea depara com dificuldades, nem sempre de soluções imediatas, como a existência de rochas, depressões, necessidades de travessias e afundamento do leito de ferrovias, que podem onerar pesadamente os custos da instalação e atrasar o início da entrada em operação dos sistemas. Nas cidades a implantação é lenta, onerosa e causa grandes transtornos à população, principalmente devido ao caos provocado no trânsito.

A instalação aérea, quando viável, apresenta-se mais atrativa que a subterrânea. Este fato, no Brasil, é facilmente justificado no processo de integração dos sistemas de telecomunicações e transmissão de energia elétrica, por haver centenas de quilômetros de linhas de transmissão, uma vez que as centrais geradoras, na maioria hidrelétricas, estão localizadas a grandes distâncias dos centros consumidores <sup>[1]</sup>.

As linhas de transmissão passaram a ser, então, compartilhadas pelas empresas de energia elétrica e de telecomunicações para a instalação de cabos óticos. O cabo pára-raios foi definido como o componente da linha de transmissão mais apropriado para alojar a fibra ótica em seu interior, dando origem ao cabo OP-GW (Optical Ground Wire), fazendo com que várias empresas substituíssem o cabo pára-raios convencional pelo cabo OP-GW.

Entretanto, existem alguns sistemas elétricos nos quais, como originalmente concebidos, é impossível a instalação dos cabos OP-GW. É o caso de sistemas que não possuem cabos pára-raios (sistemas de subtransmissão em 69 kV e de distribuição em 34,5 kV), aqueles que utilizam cabos pára-raios energizados (Sistemas PRE), bem como nas linhas em 765 kV <sup>[6]</sup>.

A utilização do cabo OP-GW como um dos condutores fase poderia ser uma solução para atender os requisitos de fornecimento de energia elétrica e de telecomunicações para os sistemas em alta tensão – até 145 kV, uma vez que para os aspectos relacionados à confecção de condutores, é válido o mesmo conceito para os cabos pára-raios com fibra ótica, pois a configuração, por princípio é a mesma para cabos pára-raios e cabos fase.

No entanto, a aplicabilidade dessa alternativa está fortemente condicionada às características do sistema de isolamento entre os sistemas elétrico e de telecomunicações, garantindo a integridade das fibras óticas, condições para execução de emendas óticas e ainda uma correta operação dos sistemas.

Assim, surge a necessidade de um dispositivo que promova a interface entre os sistemas.

### 2.1 Características gerais

Este trabalho apresenta as principais linhas adotadas para a especificação deste dispositivo, bem como dos resultados obtidos nos ensaios realizados em protótipos.

Este trabalho apresenta as principais linhas adotadas para a especificação deste dispositivo, bem como dos resultados obtidos nos ensaios realizados em protótipos.

O projeto de uma linha de transmissão envolve o estudo de diversas variáveis que podem influenciar diretamente a performance da linha quanto aos custos envolvidos para sua implementação, requisitos relacionados às substâncias empregadas, condições de instalação, dimensões e topografias, no caso de linhas de transmissão não subterrâneas, pela definição do tipo de cabo, do número de circuitos por fase, do tipo e localização das torres, entre outros.

A instalação do cabo OP-GW, em substituição ao cabo para-tensão convencional, em linhas de transmissão já existentes, deve levar em consideração, em seu projeto, todos os aspectos técnicos para que sua instalação não cause grandes alterações estruturais.

Alguns dos parâmetros mais significativos são descritos a seguir:

## 2.2 Requisitos Ambientais

### 2.2.1 Vento

Este capítulo tem grande importância no caso da análise mecânica dos componentes de uma linha de transmissão, e por isso é utilizado no cálculo de esforços.

O vento de projeto não deve ser superior em um determinado período. Para isso, a direção e para de um determinado vento são estabelecidas em

## 2. Linha de Transmissão com Cabo OP-GW

### 2.1 Considerações gerais

Não se pretende, neste trabalho, abordar com detalhes o projeto de linhas de transmissão nem a manufatura dos cabos OP-GW, e sim apresentar, em linhas gerais, os requisitos que devem ser obedecidos na construção da linha de transmissão que contará com o cabo OP-GW e elementos que o compõem.

O projeto de uma linha de transmissão envolve o estudo de diversas variáveis que podem influir tanto no desempenho da linha quanto nos custos envolvidos para sua implantação. Requisitos relacionados às solicitações elétricas e mecânicas, às condições climáticas e topográficas, ao trajeto da linha de transmissão são responsáveis pela definição do tipo de cabo, do número de circuitos por fase, do tipo e locação das torres, entre outros.

A instalação do cabo OP-GW, em substituição ao cabo pára-raios convencional, em linhas de transmissão já existentes, deve levar em consideração, em seu projeto, todos estes requisitos para que sua implantação não cause grandes alterações estruturais.

Alguns dos parâmetros mais significativos são descritos a seguir.

### 2.2 Requisitos Ambientais

#### 2.2.1 Vento

Este parâmetro tem grande influência no risco de falha mecânica dos componentes de uma linha de transmissão, e por isso é utilizado no cálculo de esforços.

O vento de projeto não deve ser superado em um determinado período. Este valor é obtido a partir de um histórico dos ventos máximos anuais de um

período mínimo de 10 anos, com um desvio padrão obtido para um período de vinte anos. O período mínimo de retorno é de cinquenta anos.

### 2.2.2 Temperatura

A variação da temperatura provoca uma alteração no esforço de tração do cabo, que é função de seu coeficiente de dilatação linear. Portanto é de fundamental importância a análise do histórico de temperaturas por todo o traçado da linha de transmissão, sendo os valores de projeto normalmente utilizados: a média das temperaturas mínimas diárias (a temperatura coincidente com o vento máximo); média das temperaturas mínimas anuais; temperatura média anual ou a de maior duração; temperatura anual máxima.

### 2.2.3 Contaminação salina e contaminação industrial

Estes parâmetros podem provocar corrosão nos tentos que compõem os cabos, fazendo com que ocorram perdas consideráveis em suas propriedades. Este efeito pode ser minimizado utilizando tentos de diâmetro superior a 2,54 mm.

### 2.2.4 Descargas atmosféricas

As descargas atmosféricas causam a maior parte de desligamentos de linhas de transmissão, provocando distúrbios na qualidade do fornecimento de energia, perdas de faturamento, em vários casos, e, ainda, sobrecarregam os serviços de manutenção, principalmente, em períodos chuvosos.

A ocorrência de uma descarga atmosférica pode atingir o cabo pára-raios ou um cabo fase. O desligamento da linha de transmissão depende do valor da sobretensão causada pelo pulso de tensão originado pela descarga atmosférica. É de fundamental importância, portanto, o conhecimento dos níveis isocerânicos do traçado da linha de transmissão, bem como do

histórico de ocorrência em linhas existentes, dados estes que fornecem subsídios para a avaliação do desempenho da linha de transmissão.

### 2.3 Influência no Desempenho de Linhas de Transmissão com Cabos OP-GW

A substituição do cabo pára-raios convencional pelo cabo OP-GW provoca alterações quase insignificantes no desempenho da linha, de acordo com os parâmetros relacionados a seguir:

- Altura efetiva dos cabos (h)

$$h = hg - \frac{2}{3} \cdot (hg - hgw) \quad (2.1)$$

onde:

hg: altura do cabo pára-raios na torre;

hgw: distância entre o cabo pára-raios e o solo no meio do vão

Se for mantida a igualdade de flechas, este parâmetro independe da substituição.

- Largura da faixa de blindagem (w)

$$w = 4h + b \quad (2.2)$$

onde:

h: altura efetiva dos cabos;

b: distância entre os cabos pára-raios na torre

Se for mantida a igualdade de flechas, este parâmetro independe da substituição.

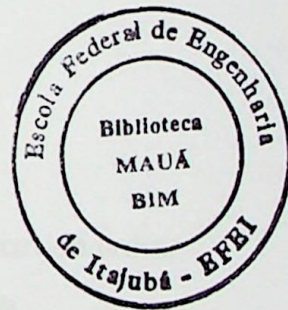
- Número de descargas atmosféricas na linha por 100 km por ano (NL)

$$NL = \frac{l \cdot w}{103,6} \quad (2.3)$$

onde:

l: nível isoceráunico da região;

w: largura da faixa de blindagem



Se for mantida a igualdade de flechas, este parâmetro independe da substituição.

- Impedância própria na torre ( $Z_{ii}$ )

$$Z_{ii} = 60 \cdot \text{Ln} \frac{2 \cdot h_i}{r_i} \quad (2.4)$$

onde:

$h_i$  : altura do cabo pára-raios na torre;

$r_i$  : raio do cabo

Este parâmetro é influenciado pela substituição. O valor da impedância é inversamente proporcional ao valor do raio do cabo.

- Impedância mútua entre o cabo pára-raios e cabo fase ( $Z_{ij}$ )

$$Z_{ij} = 60 \cdot \text{Ln} \frac{\sqrt{(h_j + h_i)^2 + (a_i - a_j)^2}}{\sqrt{(h_j - h_i)^2 + (a_i - a_j)^2}} \quad (2.5)$$

onde:

$h_i$  : altura do cabo fase na torre;

$h_j$  : altura do cabo pára-raios na torre;

$i$  : fase "i" da linha;

$j$  : cabo pára-raios "j" na torre;

$a_j$  : distância entre o cabo pára-raios ao eixo da linha;

$a_i$  : distância do cabo fase ao eixo da linha.

Este parâmetro independe da substituição.

- Impedância mútua entre os cabos pára-raios ( $Z_{jk}$ )

$$Z_{jk} = 60 \cdot \text{Ln} \frac{\sqrt{(h_j + h_k)^2 + (h)^2}}{h} \quad (2.6)$$

onde:

$h_j = h_k$  : altura do cabo pára-raios na torre;

$h$  : altura efetiva do cabo pára-raios;

Este parâmetro independe da substituição.

- Coeficiente do acoplamento (k)

$$k = \frac{(Z_{ij} + Z_{ik})}{(Z_{jk} + Z_{kk})} \quad (2.7)$$

onde:

$Z_{ij}$ ,  $Z_{ik}$ : impedância mútua entre o cabo fase e o cabo pára-raio;

$Z_{jk}$ : impedância mútua entre os cabos pára-raios;

$Z_{kk}$ : impedância própria na torre.

Este parâmetro é influenciado pela substituição, uma vez que  $Z_{kk}$  é influenciado pelo valor do raio do cabo.

- Corrente crítica ( $I_c$ )

$$I_c = \frac{U_s \cdot (Z_{jj} + Z_{jk} + 4R_g)}{(1-k) \cdot (Z_{jj} + Z_{jk}) \cdot R_g} \quad (2.8)$$

onde:

$U_s$ : suportabilidade crítica a impulso do isolamento;

$R_g$ : resistência de aterramento da torre;

Este parâmetro independe da substituição, devido aos parâmetros k e  $Z_{jj}$ .

As equações (2.1) a (2.8) mostram que o fator que influi no desempenho da linha é o raio do cabo OP-GW, substituto do cabo pára-raios convencional.

## 2.4 Estudos de Curto-Circuito

Os estudos de curto-circuito definem o ajuste dos equipamentos de proteção pois, enquanto a proteção não atua, há a circulação de corrente de curto-circuito pelo cabo pára-raios, que pode, inclusive, ser danificado, se a temperatura atingir valores inadmissíveis.

O cálculo da corrente de curto-circuito é feito segundo o roteiro:

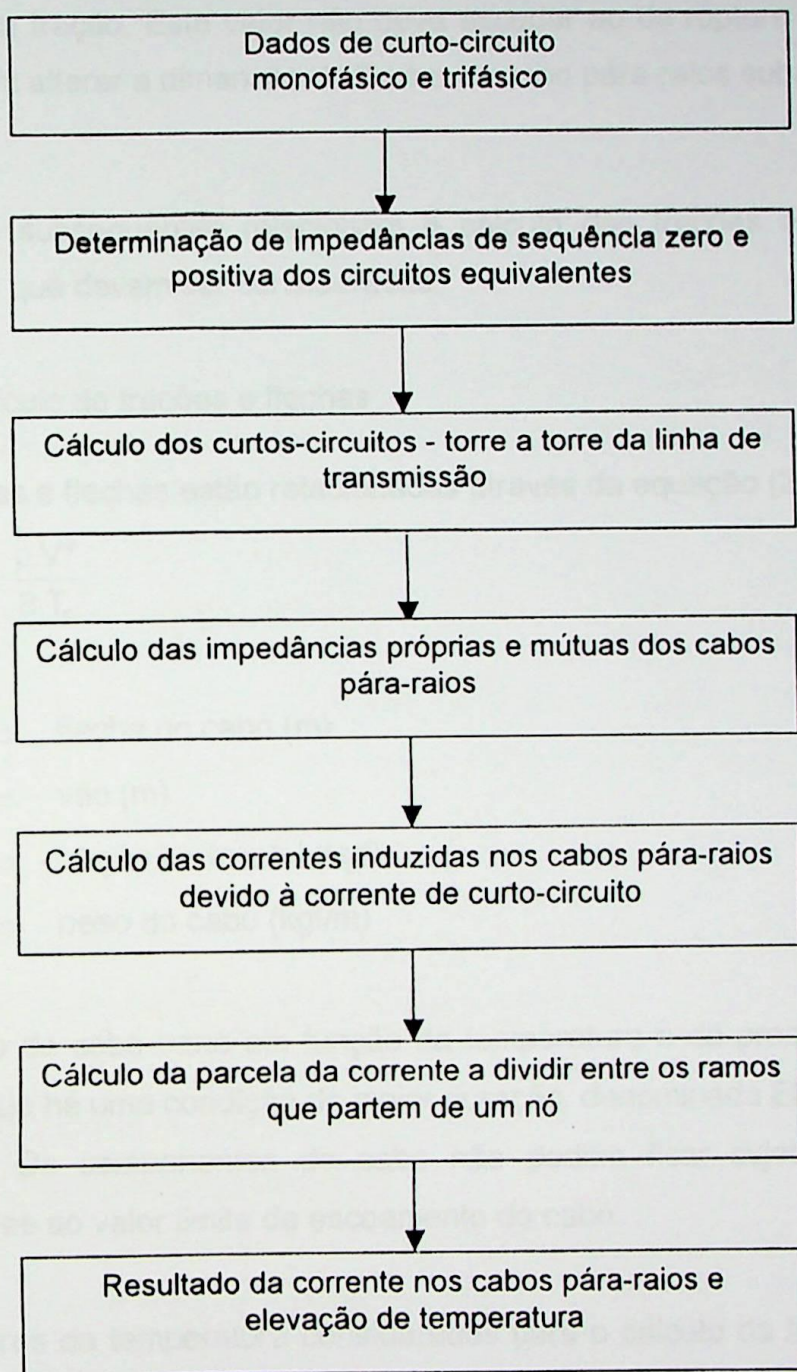


Figura 2.1 – Roteiro para o cálculo de corrente de curto-circuito

## 2.5 Requisitos mecânicos

O principal fator a ser considerado, durante o lançamento do cabo OP-GW, é o valor da tração. Este valor não deve exceder ao de ruptura mecânica do cabo, nem alterar a dimensão da flecha do cabo pára-raios substituído.

Os itens subsequentes relacionam o cálculo das trações e as diversas variáveis que devem ser consideradas.

### 2.5.1 Cálculo de trações e flechas

As trações e flechas estão relacionadas através da equação (2.9):

$$f = \frac{p.V^2}{8.T_0} \quad (2.9)$$

sendo

- f ⇒ flecha no cabo (m)
- V ⇒ vão (m)
- T<sub>0</sub> ⇒ tração horizontal (kgf)
- P ⇒ peso do cabo (kgf/m)

A tração do cabo varia em função da temperatura e da pressão do vento, sendo que há uma condição de maior duração, denominada EDS (Every Day Stress). Os componentes do cabo não podem ficar sujeitos a trações superiores ao valor limite de escoamento do cabo.

Os valores de temperatura considerados para o cálculo da tração do cabo são:

- temperatura mínima, sem vento;
- temperatura média, sem vento;
- temperatura média das mínimas diárias com vento máximo

A tração horizontal ( $T_0$ ) também é função de um valor denominado “vão básico”,  $V_b$ , que é dado pela equação (2.10):

$$V_b = \left( \frac{\sum_{i=1}^n V_i^3}{\sum_{i=1}^n V_i} \right)^{1/2} \quad (2.10)$$

onde:

$V_i \Rightarrow$  Vão “i” entre torres adjacentes (m)

O valor de  $V_b$ , também, é usado para a obtenção da catenária, que, por sua vez, é função de dados característicos do cabo e da tração, sob uma determinada temperatura.

### 2.5.2 Grampeamento do cabo

Os cabos são lançados nas torres por roldanas presas nas cadeias de suspensão e tensionados através de máquinas. Em seguida, o cabo é grampeado na cadeia.

Deve ser observado que são diferentes as condições de equilíbrio quando o cabo está sendo lançado e quando é grampeado:

- no lançamento do cabo as tensões tangentes devem ser iguais, para que a roldana fique em equilíbrio,
- neste caso as tensões horizontais devem ser iguais para que a cadeia de isoladores fique na posição vertical.

O cabo deve ser grampeado a uma certa distância da roldana, de forma que quando as roldanas são retiradas a condição final de equilíbrio seja atingida. Esta distância deve ser calculada em cada vão, para o grampeamento do cabo.

### 2.5.3 Relação entre tração e temperatura

Os valores de tração são definidos em função das variações previstas de temperatura durante o dia. As principais correlações são apresentadas a seguir:

- tração EDS (Every Day Stress): é a mais importante, por ser a de maior incidência anual. Está intimamente relacionada às vibrações mecânicas nos cabos, que são provocadas por ventos constantes de baixa intensidade em temperaturas normais. O valor da tração EDS é da ordem de 20 a 25% da tração de ruptura do cabo. É a primeira a ser fixada nos projetos;
- tração máxima: esta tração influencia a locação das torres e é determinada em função do valor limite da deformação plástica (creep), geralmente, da ordem de 28 a 30% da tração de ruptura do cabo.

### 2.5.4 Deformação nos cabos

Existem dois tipos de deformações que os cabos podem sofrer:

- deformação inicial: é aquela causada pela diferença de temperatura que pode ocorrer quando do lançamento do cabo.
- deformação plástica (creep): é a deformação que o cabo sofre no decorrer dos anos, que é proporcional ao valor da tração. Este valor deve ser considerado quando do lançamento do cabo através de uma correção nos valores de seu esticamento.

### 2.5.5 Esforço devido ao vento transversal máximo

O vento de projeto é dado pela equação (2.11):

$$V_p = K_r \cdot K_d \left( \frac{H}{10} \right)^{1/n} \cdot VT \quad (2.11)$$

onde

- $k_r \Rightarrow$  coeficiente de rugosidade do terreno
- $k_d \Rightarrow$  coeficiente de correção do período de integração
- $H \Rightarrow$  altura média do cabo pára-raios
- $N \Rightarrow$  fator para correção de velocidade do vento com a altura
- $VT \Rightarrow$  vento transversal máximo

### 2.5.6 Esforço devido à carga longitudinal

O valor da carga é calculado na condição EDS.

### 2.5.7 Esforço devido ao ângulo da linha

O esforço devido ao ângulo é dado pela equação (2.12):

$$F = 2 \cdot T \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (2.12)$$

onde

- $T \Rightarrow$  tração no cabo com vento máximo
- $\alpha \Rightarrow$  ângulo da linha

### 2.5.8 Vibrações eólicas

Os cabos, depois de instalados, ficam submetidos às vibrações eólicas, que podem comprometer a operação das linhas de transmissão. Assim, torna-se necessário introduzir elementos que possam propiciar uma operação mecânica adequada da linha, para uma dada condição de equilíbrio.

Esta condição se verifica quando a potência fornecida pelo vento for igual a soma das potências dissipadas pelo cabo e transmitidas para fora do vão.

A potência fornecida pelo vento ao cabo depende de alguns fatores tais como: comprimento do vão, velocidade do vento, diâmetro do cabo e amplitude de vibração da onda estacionária.

A potência dissipada pelo cabo é função da amplitude da onda de vibração, da velocidade do vento, do diâmetro do cabo e do tipo do cabo.

A potência transmitida para fora dos vãos é função de diversos fatores relacionados à construção da linha de transmissão, como a forma de conexão do cabo à estrutura, grau de rigidez e do tipo da estrutura, entre outros.

Deste modo, a linha deve ser protegida contra as vibrações eólicas pela instalação de amortecedores nos cabos OP-GW, nas proximidades das estruturas.

A amplitude de vibração máxima tolerável pelo cabo, que pode ser vista como uma deformação dinâmica, é controlada pela sua tração, pela condição de trabalho (zona plástica ou elástica), pelas tensões radiais de compressão do grampo de fixação, pelas tensões de flexão devidas à curvatura nos pontos de fixação, pelas tensões residuais de fabricação e aquelas introduzidas durante o seu lançamento.

## 2.6. Considerações sobre os cabos OP-GW

O cabo pára-raios com fibra ótica (OP-GW) deve atender os requisitos básicos exigidos pela sua própria concepção:

- atuar como um cabo pára-raios convencional, no que diz respeito às características elétricas e mecânicas do mesmo;

- garantir total integridade do sistema de comunicação, presente no seu interior, independente de qualquer solicitação externa.

Levando em consideração esses requisitos, os cabos OP-GW devem:

- possuir diâmetro e peso similares ao cabo pára-raios convencional ao qual está substituindo;
- ter características elétricas e mecânicas equivalentes ao cabo convencional;
- suportar as vibrações eólicas as quais a linha de transmissão é submetida;
- suportar a corrosão provocada por fatores ambientais;
- suportar a queda de raios, sem que haja qualquer alteração nas suas características.

Os elementos que compõem os cabos OP-GW são os seguintes:

### 2.6.1 Fibra ótica

A fibra ótica é constituída de sílica ou plástico, e tem a forma de um filamento cilíndrico de dimensões microscópicas. É um elemento de transmissão ótica formado por um núcleo e uma camada externa (casca), sendo que cada um destes elementos possui índices de refração diferentes, ou seja, para que haja propagação da luz, é necessário que o índice de refração do núcleo seja maior que o da camada externa.

Isto faz com que a luz percorra o núcleo refletindo na fronteira com a casca por todo o trajeto da fibra, conforme mostrado na figura 2.2:

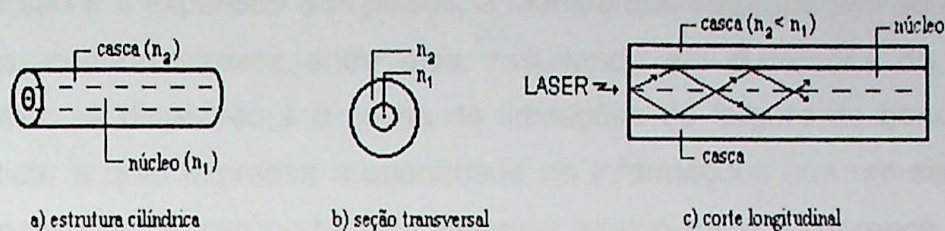


Figura 2.2 – Propagação da luz através da fibra ótica

A diferença dos índices de refração, entre núcleo e casca, é obtida pela utilização de materiais dielétricos diferentes, ou através de dopagem com materiais semicondutores na sílica. Essa diferença é representada pelo perfil de índices da fibra ótica.

Assim, diferentes materiais dielétricos, associados a diferentes formatos de perfis de índices de refração, levam a diferentes tipos de fibras óticas, com diversas características de transmissão e, conseqüentemente, aplicações distintas.

A transmissão, através da fibra ótica, é definida pela atenuação e pela dispersão dos sinais transmitidos. A atenuação está relacionada às perdas de transmissão e a dispersão à capacidade de transmissão, sendo a primeira definida como a perda de potência de um sinal luminoso ao longo de sua propagação.

Os fatores que causam atenuação são: absorção de impurezas, espalhamento por irregularidades na deposição de material, trincas e deformações ou, ainda, por fatores externos com emendas e conexões. Por aumentar linearmente com a distância, a atenuação é um dos parâmetros utilizados na determinação da distância máxima entre um transmissor e um receptor.

A dispersão é a expansão dos pulsos, à medida que se propagam ao longo da fibra, criando atrasos entre eles, resultando em distorções do sinal transmitido. A dispersão é a causa de limitações de largura de banda da fibra ótica, a qual expressa a quantidade de informações que um sistema tem capacidade de transportar. Em sistemas analógicos é a diferença entre as frequências mínima e máxima que podem ser transportadas. Em sistemas digitais determina a taxa máxima de transmissão de informação por unidade de tempo (bits por segundo).

As fibras são classificadas pelas características de transmissão, definidas pelo perfil de índice de refração e pela propagação em um ou vários modos, sendo o modo definido com uma frente de onda eletromagnética da luz. Assim, as fibras óticas são classificadas nos seguintes tipos:

- Fibra ótica multimodo com índice degrau: neste tipo de fibra ótica o núcleo e a casca são claramente definidos. O núcleo tem índice de refração constante (constituído por um único tipo de material) e diâmetro variável entre 50 e 400  $\mu\text{m}$ . Os sinais refletem na casca em vários ângulos, resultando em comprimentos de caminhos diferentes. Isto faz com que ocorra um fenômeno denominado dispersão modal, e limita a largura de banda. Como a atenuação é elevada ( $> 5 \text{ dB/km}$ ), este tipo de fibra é utilizado em transmissão de dados para curtas distâncias e para iluminação.
- Fibra ótica multimodo com índice gradual: neste tipo de fibra a dispersão modal é reduzida devido ao fato da velocidade ser a mesma para todos os modos do sinal. A atenuação é da ordem de  $3 \text{ dB/km}$ , esta fibra é empregada em telecomunicações.

- Fibra ótica monomodo: o reduzido diâmetro do núcleo ( $8\ \mu\text{m}$ ) permite que apenas um modo seja propagado através da fibra provocando a diminuição da dispersão do pulso. O valor da atenuação varia entre 0,2 e 0,7 dB/km e, portanto, transmite sinais a longas distâncias. A fibra monomodo é utilizada em sistemas de telefonia de longas distâncias.
- Fibra ótica de dispersão deslocada: neste tipo de fibra as condições de dispersão cromática nula foram deslocadas da janela de transmissão de 1310 nm para a janela de 1550 nm, onde as perdas de transmissão são menores. Este tipo de fibra ótica é utilizado em sistemas de transmissão de longas distâncias e com altas faixas, acima de 2,5 Gbps.

Notas:

a) dispersão cromática é aquela causada pela diferença de velocidade dos diferentes comprimentos de onda que compõem o espectro da luz transmitida.

b) janelas de transmissão são os comprimentos de onda de operação de uma fibra ótica, para a qual a atenuação tem um ponto de mínimo. São usadas três janelas: janela de 850 nm para fibras multimodo, de 1310 nm para fibras mono ou multimodo e de 1550 nm aplicável apenas a fibras monomodo.

### 2.6.2 Núcleo Ótico

O núcleo ótico é formado por fibras óticas dispostas helicoidalmente em torno de um elemento, geralmente composto de material FRP (Fiber Reinforced Plastic). Esta maneira de dispor as fibras implica na ocorrência de vazios, que devem ser preenchidos por um material que não provoque pressão ou dano às fibras.

A resistência mecânica do conjunto é garantida pela aplicação de um revestimento de material termoplástico, como o epóxi. Porém, como este

material é quebradiço, a aplicação de um outro revestimento, para fornecer flexibilidade ao conjunto, é comum ao se constituir a unidade ótica.

O número de unidades óticas em um cabo é definido na sua especificação. Se houver mais de uma unidade ótica, as mesmas são agrupadas, e sobre este conjunto aplica-se um enchimento com fios de aramida, visando proteger as unidades óticas. Finalmente, esse conjunto recebe um enfaixamento com fitas de poliamida, que apresenta alta resistência à temperatura, para garantir proteção térmica às fibras óticas tanto durante a fabricação do cabo quanto durante a circulação de corrente de curto-circuito, como mostrado na figura 2.3.

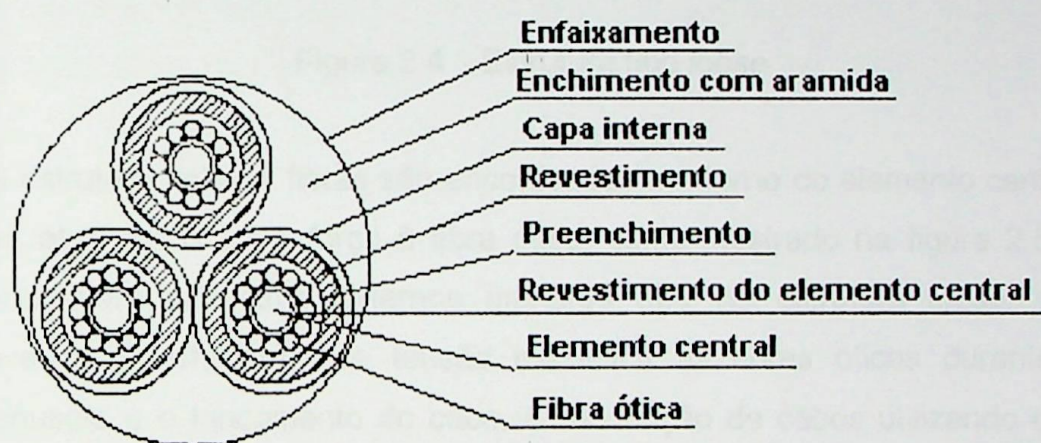


Figura 2.3 – Detalhe do núcleo ótico

Os núcleos óticos são construídos utilizando a estrutura *loose*, na qual as fibras não estão fisicamente vinculadas ao elemento de tração do cabo, ou a estrutura *tight*, onde as fibras estão vinculadas ao elemento de tração do cabo.

Na estrutura *loose*, as fibras ficam soltas dentro de tubetes plásticos e têm um certo excesso para que não ocorram deformações da fibra, devido ao manuseio e lançamento do cabo, conforme mostrado na figura 2.4. Esta estrutura apresenta um aumento no diâmetro externo do cabo, bem como da

atenuação causada pelo acúmulo do excesso de fibras em regiões de grandes desniveis na parte inferior dos cabos.

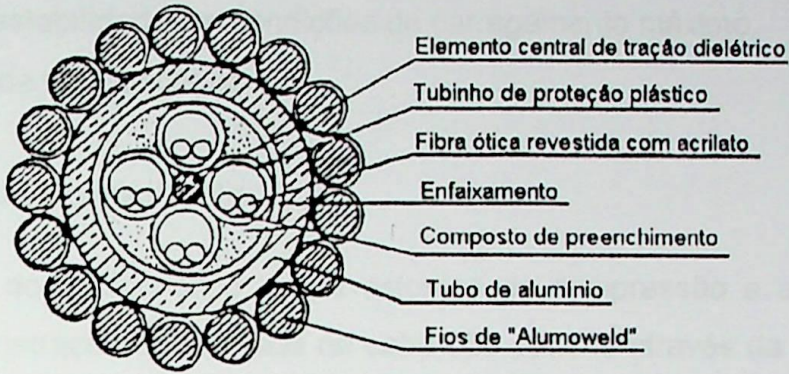


Figura 2.4 – Estrutura tipo *loose*

Na estrutura *tight* as fibras são encordoadas em torno do elemento central, que atua como um reforço à fibra ótica, como mostrado na figura 2.5, e apresentam diâmetros externos menores que na estrutura *loose*, não havendo transferência de tensão mecânica às fibras óticas durante o manuseio e o lançamento do cabo. A fabricação de cabos utilizando este tipo de construção requer uma tecnologia avançada.

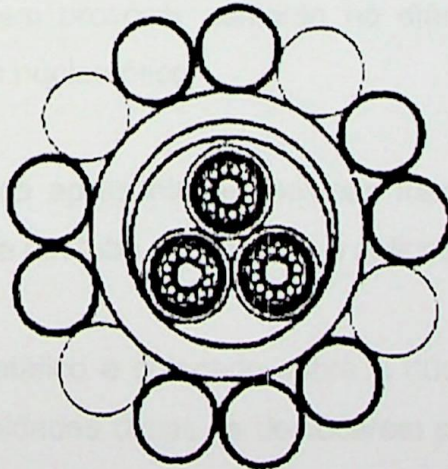


Figura 2.5 – Estrutura tipo *tigh*

A especificação do núcleo ótico leva em consideração os seguintes critérios:

- Não causar aumento significativo no diâmetro externo do cabo.
- Possuir estabilidade para uma grande faixa de temperatura.
- Possuir estabilidade em condições de carregamento máximo.
- Viabilidade de fabricação.

### 2.6.3 Proteção do núcleo ótico

A proteção do núcleo ótico contra esforços de compressão e a vedação contra a penetração de umidade no cabo são obtidas através da aplicação de um tubo metálico sobre o núcleo ótico ou utilização de um espaçador metálico ou de um elemento que contenha ranhuras, conforme figura 2.6.

O tubo metálico é constituído por uma lâmina de alumínio, soldada longitudinalmente e, posteriormente, trefilada. Isto resulta num alto valor da carga de ruptura, bem como da carga de escoamento, garantindo, assim, atendimento às solicitações mecânicas do cabo OP-GW.

A espessura do tubo é especificada visando garantir uma folga entre o tubo e o núcleo ótico, sem provocar aumento no diâmetro do cabo e, ainda, fornecer proteção ao núcleo ótico.

O espaçador metálico apresenta as mesmas funções do tubo metálico e requer a utilização de um tubo metálico ou a aplicação de fitas de alumínio.

Quando um tubo metálico é colocado sobre o núcleo e o espaçador há a possibilidade das unidades óticas se deslocarem para fora das ranhuras e, por isso, ficarem prensadas entre o tubo e o espaçador, quando o cabo é submetido a esforços mecânicos.

Na aplicação de fitas de alumínio sobre o núcleo ótico, a proteção mecânica e a estanqueidade oferecidas não são suficientes para garantir que as fibras óticas não sofram danos.

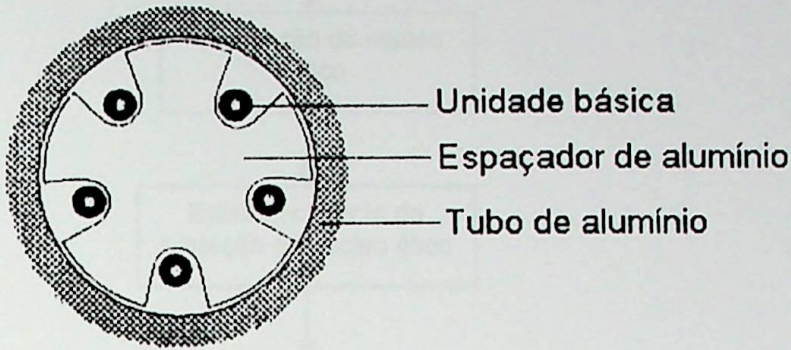


Figura 2.6 – Núcleo ótico com espaçador

#### 2.6.4 Fios metálicos

Os fios metálicos, de aço-alumínio e/ou alumínio liga, fornecem a resistência elétrica e mecânica do cabo OP-GW, e atendem os requisitos contidos nas normas nacionais e/ou internacionais.

Os parâmetros peso, resistência elétrica e carga de ruptura definem: o número de fios, o material a ser utilizado, o diâmetro dos fios e o número de camadas que irão compor o cabo OP-GW.

O cabo OP-GW é projetado de acordo com o fluxograma apresentado na figura 2.7, a seguir:

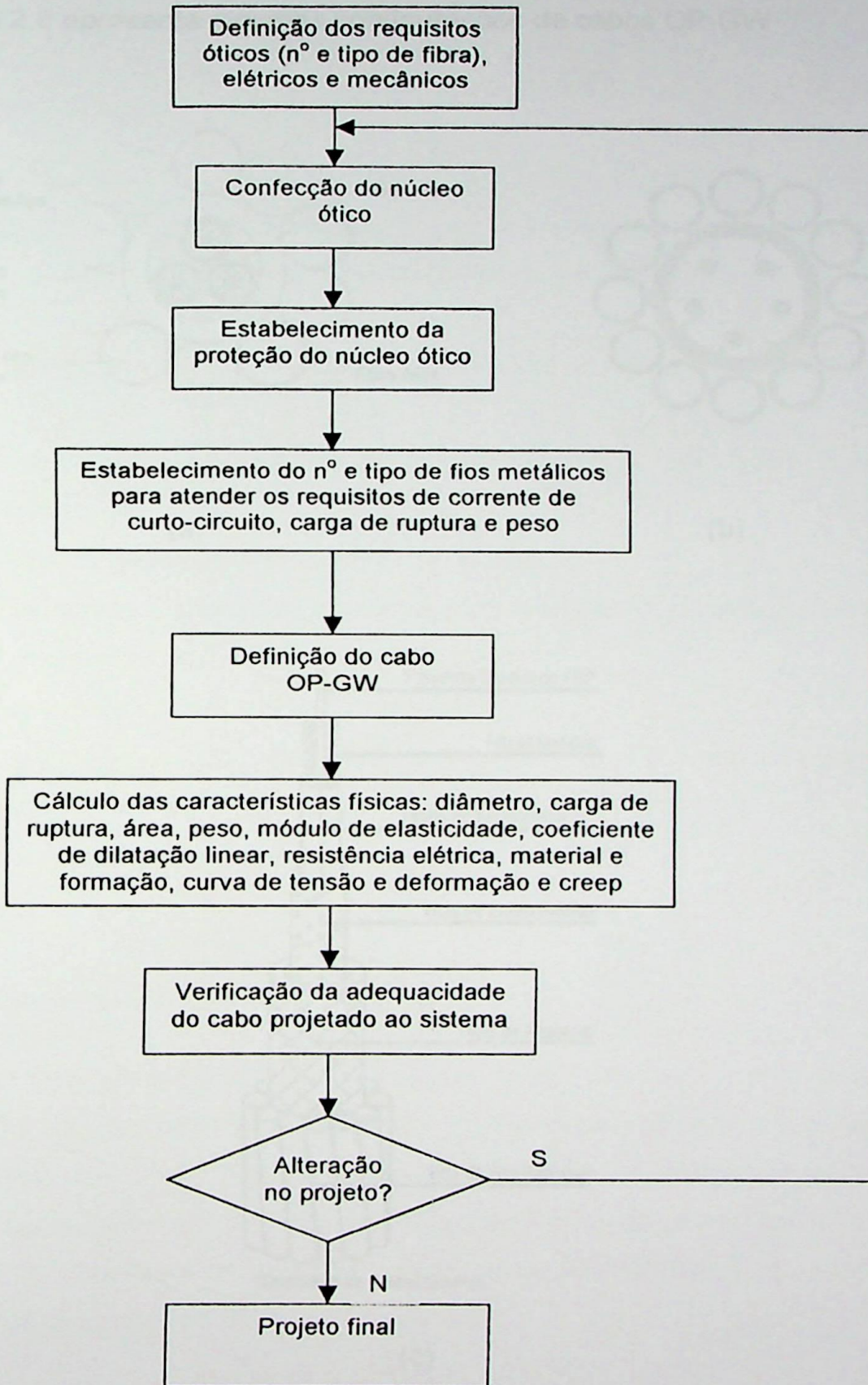
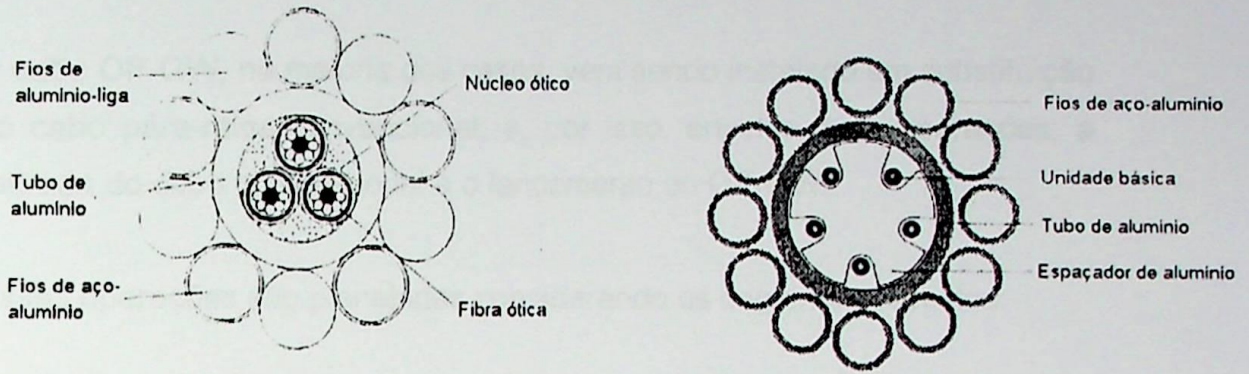


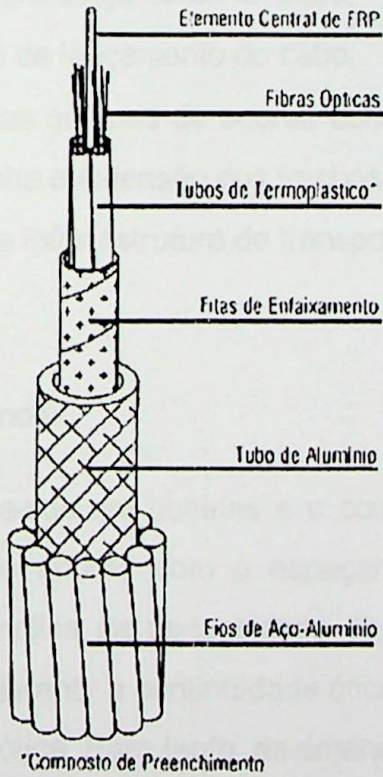
Figura 2.7 – Projeto do cabo OP-GW

A figura 2.8 apresenta algumas configurações de cabos OP-GW



(a)

(b)



(c)

Figura 2.8 – Configurações do cabo OP-GW

## 2.7 Instalação dos cabos OP-GW

### 2.7.1 Generalidades

O cabo OP-GW, na maioria dos casos, vem sendo instalado em substituição ao cabo pára-raios convencional, e, por isso, envolve duas operações: a retirada do cabo convencional e o lançamento do OP-GW.

Essas operações são planejadas considerando os seguintes aspectos:

- Análise detalhada dos desenhos de planta e perfil das linhas de transmissão;
- Facilidade de acesso ao canteiro de obras;
- Se necessário, promover a abertura de acessos às praças de montagem dos equipamentos para lançamento do cabo;
- Definição do sentido de lançamento do cabo;
- Dimensionamento das equipes de acordo com o cronograma executivo, desligamentos da linha e extensão dos trechos.
- Dimensionamento da infra-estrutura de transporte

### 2.7.2 Execução de emendas

O cabo OP-GW é fornecido em bobinas e o comprimento dos lances são definidos no projeto de acordo com o espaçamento dos vãos entre as estruturas. Este fato implica na necessidade de se efetuar emendas nas fibras óticas, para que garantir a continuidade ótica do cabo, minimizando as perdas na transmissão ótica. Para tanto, as emendas devem ser executadas em locais apropriados para essa finalidade.

### 2.7.3 Acessórios do cabo OP-GW

Os acessórios necessários para a instalação do cabo OP-GW são similares aos utilizados para o cabo pára-raios convencional, sendo que os principais são:

- Caixa de emenda das fibras óticas

As emendas das fibras óticas são realizadas no interior da caixa e por isso essas caixas apresentam proteção contra corrosão, umidade e outros cuidados para evitar danos às fibras óticas. As caixas são aterradas e fixadas às torres a uma altura adequada visando impedir danos por vandalismos.

- Sistema de descida do cabo OP-GW na torre

A descida do cabo OP-GW ocorre nas estruturas onde são instaladas as caixas de emenda. Este sistema é composto por um dispositivo de suporte e guia do cabo junto com um fixador regulável, que permite fixar o cabo em cantoneiras de diversas dimensões.

- Amortecedor

A proteção da linha contra vibrações eólicas é obtida pela instalação de amortecedores nos cabos OP-GW, nas proximidades das estruturas. A colocação de amortecedores não deve provocar torção ou desgaste do cabo, como também, não deve permitir seu deslizamento, de forma que as características elétricas, mecânicas e óticas do cabo não sejam comprometidas.

- Sistema de fixação do cabo em suspensão

O cabo OP-GW é fixado em torres de suspensão através de grampos, cuja finalidade é promover o controle de carga de escorregamento do cabo. O eixo do grampo forma uma linha vertical com o ponto de engate

na estrutura, pois as trações horizontais no cabo são iguais em ambos sentidos do cabo.

- Sistema de fixação em ancoragem

A ancoragem do cabo é feita através de um dispositivo denominado "grampo de ancoragem", que garante um agarramento elevado sem causar compressão nas fibras óticas, e se dá nas torres "fim de linha" e de viabilização de ângulos da linha de transmissão.

Para a elaboração deste capítulo foram utilizadas mais intensamente as referências [2], [3] e [4].

### 3 Interface Transmissão – Distribuição – Telecomunicações

#### 3.1 Histórico

A necessidade da utilização de um dispositivo para realizar a interface entre os sistemas elétrico e o de telecomunicações foi detectada quando de estudos de implantação de cabos OP-GW em linhas de transmissão da Eletronorte, cujos cabos pára-raios se encontravam energizados.

Este tipo de sistema é denominado PRE (pára-raios energizados) e consiste em um sistema trifásico no qual duas das fases são os cabos pára-raios e o solo é tomado como a terceira fase, conforme mostra a figura 3.1.

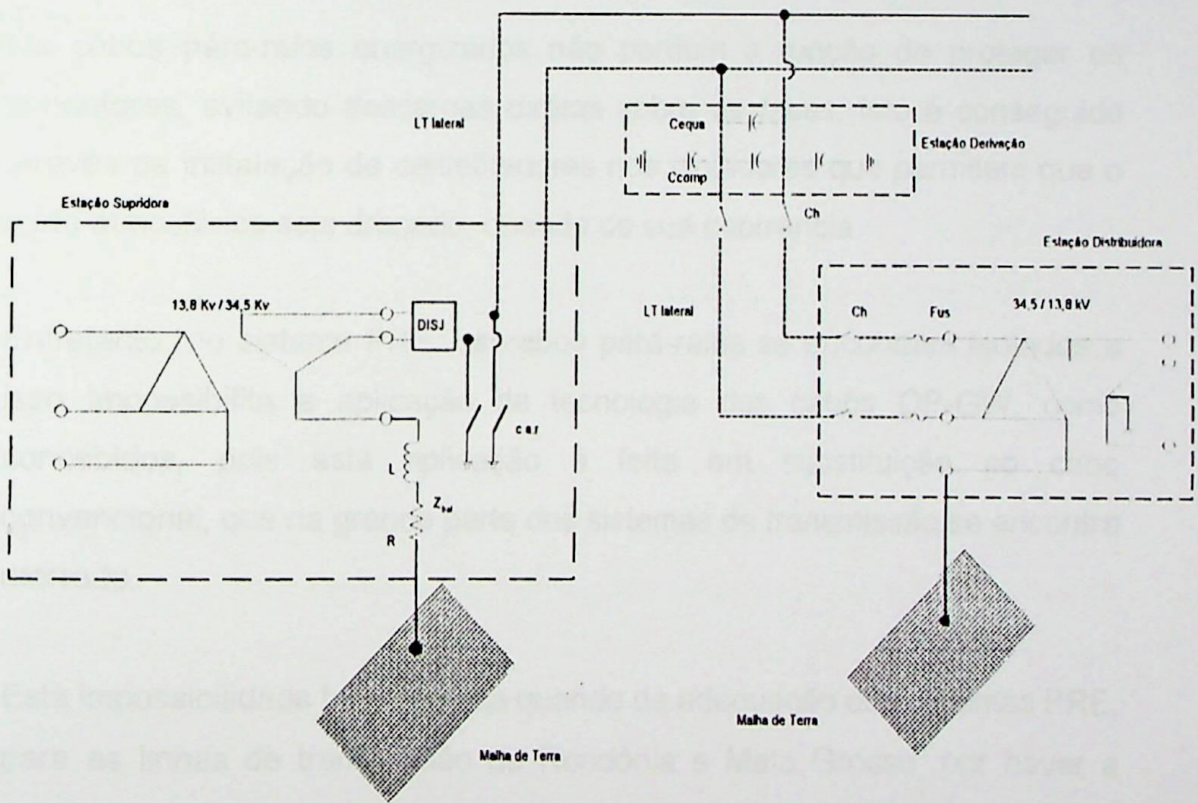


Figura 3.1 – Esquema básico do Sistema PRE

Este sistema foi concebido através da constatação da existência de inúmeras comunidades situadas nas proximidades das rotas das linhas de transmissão sem, no entanto serem beneficiadas com o fornecimento de energia elétrica, o que pode ser considerado como um dos fatores do êxodo rural no Brasil, além de gerar um grande descontentamento nos habitantes dessas comunidades levando, muitas vezes, a atos de vandalismo às torres e isoladores das linhas de transmissão.

Os equipamentos utilizados neste sistema são os mesmos dos sistemas convencionais, permitindo que os sistemas de transmissão, com tecnologia PRE, e distribuição compartilhem a infra-estrutura já existente, tornando o sistema atraente economicamente, devido aos baixos custos de implantação, além de provocar um baixo impacto ambiental.

Os cabos pára-raios energizados não perdem a função de proteger os condutores, evitando descargas diretas sobre as fases. Isto é conseguido através da instalação de centelhadores nos isoladores que permitem que o surto atmosférico seja drenado, quando de sua ocorrência.

Entretanto, no sistema PRE, os cabos pára-raios se encontram isolados e isso impossibilita a aplicação da tecnologia dos cabos OP-GW, como concebidos, pois esta aplicação é feita em substituição ao cabo convencional, que na grande parte dos sistemas de transmissão se encontra aterrado.

Esta impossibilidade foi detectada quando da adequação dos sistemas PRE, para as linhas de transmissão de Rondônia e Mato Grosso, por haver a necessidade de um dispositivo que promovesse a interface entre o sistema elétrico e o sistema de comunicação <sup>[5]</sup>.

Os cabos, acessórios e dispositivo que serão utilizados nestes sistemas devem atender aos requisitos elétricos e mecânicos do sistema elétrico onde serão aplicados, além de garantir proteção às fibras óticas contra umidade, intempéries e ação do campo elétrico gerado pelas linhas de transmissão <sup>[6]</sup>.

### 3.2 Alternativas Tecnológicas

Os tipos de cabos óticos que podem ser aplicados nos sistemas que possuem cabos pára-raios isolados (sistemas PRE), naqueles que não possuem cabos pára-raios (sistemas de subtransmissão em 69 kV e de distribuição em 34,5 kV) e em linhas de transmissão em 765 kV, são apresentados a seguir.

#### 3.2.1 Cabo OP-PW (Optical Phase Wire)

O cabo OP-PW é idêntico ao cabo OP-GW, quanto às características construtivas, porém, é instalado como fase nos sistemas elétricos.

Conforme solicitado na etapa anterior ao desenvolvimento dos protótipos, os acessórios, tais como caixas de emenda, grampos de suspensão e de ancoragem, dentre outros, são similares aos utilizados na instalação do cabo OP-GW.

Deste modo, como o cabo OP-PW e os acessórios são similares ao cabo OP-GW, sua implantação apresenta características similares às do sistema OP-GW, tais como custos inferiores àqueles praticados na instalação dos sistemas subterrâneos, alta confiabilidade, maior rapidez na implantação <sup>[1]</sup>.

#### 3.2.2 Cabo Auto-Sustentado

O cabo dielétrico auto-sustentado é projetado de acordo com os esforços mecânicos impostos ao cabo e com as restrições de deformação, para garantir a integridade das fibras óticas. Como este cabo é totalmente

dielétrico, sua instalação e manutenção podem ser feitas com o circuito energizado.

Este tipo de cabo é indicado para linhas de distribuição, com vãos até 200 metros entre estruturas. Sua aplicação em linhas de transmissão, com vãos da ordem de 700 a 1000 metros, como é o caso de alguns sistemas elétricos brasileiros, não é recomendada.

O cabo dielétrico auto-sustentado pode ser projetado, também, para longas interligações, e sua instalação é feita quando a linha de transmissão não pode sair de operação ou quando a instalação de cabo OP-GW apresentar necessidade de grandes reforços estruturais.

Quando os cabos óticos dielétricos são instalados em linhas de alta tensão, pode ocorrer a degradação do material de capa devido ao campo elétrico induzido na superfície, o que provoca o fenômeno do trilhamento elétrico elevando, assim, a probabilidade de falha do cabo dielétrico <sup>[1]</sup>.

### 3.2.3 Cabo Espinado

O cabo espinado consiste em espinar o núcleo ótico em torno do cabo pára-raios, e é mais adequado para instalação em curtas interligações.

O cabo espinado é submetido a valores elevados de campo elétrico, o que provoca uma total deterioração do cabo, devido ao fenômeno de trilhamento elétrico no material da capa. Outro fato que leva a deterioração do cabo é a abrasão que ocorre na capa, causada pela contração e dilatação térmica do cabo pára-raios, uma vez que os cabos espinado e pára-raios, possuem valores diferentes de coeficiente de dilatação linear.

O espinamento do núcleo ótico em torno do cabo pára-raios leva a um aumento do diâmetro e conseqüentemente a um aumento do peso do cabo

por km, bem como, provoca uma instabilidade eólica no sistema, devido ao perfil em formato de hélice deste cabo <sup>[1]</sup>.

### 3.3 Particularidades dos sistemas com cabos óticos sob tensão

A utilização de cabos óticos submetidos à tensão alternada, primeira opção para o Sistema PRE, exclui a aplicação de sistemas dielétricos auto-sustentados. Deste modo, são consideradas duas alternativas tecnológicas:

- cabos OP-PW; e
- cabos óticos espinados.

A utilização de cabos, inicialmente projetados para operação desenergizada, impõe uma série de questões, quando de sua instalação como fase de sistemas elétricos. No entanto, de um modo geral, as solicitações aplicadas ao sistema ótico devem ser divididas em termos de cláusulas comuns e específicas.

#### 3.3.1 Cabos OP-PW & Espinados – Cláusulas Comuns

A utilização de cabos OP-PW, ou mesmo espinados, implica em solicitações térmicas, transitórias e em regime, ao núcleo ótico. Por isso, em termos comparativos, os cabos OP-PW devem ser avaliados, principalmente, quanto ao desempenho dos acessórios utilizados para a sua derivação (terminal ótico).

As cláusulas comuns são pertinentes ao comportamento das fibras óticas, frente às solicitações térmicas oriundas de curtos-circuitos e, no caso específico sob análise, da passagem de corrente em regime, quer pelo cabo OP-PW quer pelo cabo ACSR, utilizado como suporte pelos cabos espinados.

Deste modo, é necessário analisar resultados de ensaios que venham a comprovar a capacidade térmica dos sistemas de fibras óticas frente a correntes de curto-circuito e as de regime permanente, passível de controle e limitação via projeto do sistema, ou seja, por meio da temperatura máxima de operação dos condutores.

Dentro deste contexto, é conveniente tecer os seguintes comentários:

- Qual a máxima temperatura de operação admissível para o seu sistema Cabo - Fibra Ótica, bem como, qual o máximo valor do binômio Corrente x Tempo associado a este evento?
- Existem dados relativos à degradação das fibras óticas, utilizadas nos cabos OP-PW e Espinados, após a aplicação de surtos de temperatura elevada?

Comportamento sob regime permanente:

- Qual a máxima temperatura de operação admissível para o seu sistema Cabo - Fibra Ótica?
- Existem dados relativos à degradação das fibras óticas utilizadas nos cabos OP-PW e Espinados frente a ciclos térmicos?

É conveniente ressaltar que dentro do contexto, cabos energizados, é interessante notar que o problema técnico relativo ao desempenho das fibras óticas independe da tecnologia utilizada. No entanto, é ainda adequado lembrar que os sistemas OP-PW apresentam elevada flexibilidade de projeto, pois, nestes casos, é sempre possível, através da escolha adequada dos componentes metálicos e de sua distribuição, prover sistemas dotados de maior capacidade térmica, bem como, melhor desempenho com respeito a distribuição de calor ao redor de todo o pacote de fibras óticas, fato que não ocorre com os sistemas espinados que, em contrapartida, apresentam

uma linha de contacto definida com o sistema metálico responsável por seu suporte, este, sob temperatura elevada <sup>[7]</sup>.

### 3.3.2 Cabos Espinados – Cláusulas Específicas

Com relação aos cabos espinados, é necessário tecer, de modo complementar, as seguintes considerações, algumas delas de cunho mecânico e relativas ao comportamento do cabo espinado como elemento da linha de transmissão.

- Que efeito o cabo espinado produz em termos de amortecimento, uma vez que elementos pré-formados são utilizados como amortecedores?
- Em cabos espinados como deve ser a instalação dos acessórios necessários ao sistema.
- Qual é o valor limite de corrente suportável pelo cabo espinado em relação á descarga atmosférica?
- Qual o comportamento físico – mecânico (danos superficiais) de um cabo espinado frente a curto-circuito sustentado?
- Foram realizados estudos relativos ao comportamento do revestimento dos cabos espinados sob presença de atividade corona a seco e sob chuva?
- Qual o comportamento dos materiais utilizados na fabricação dos cabos espinados frente a elevação de temperatura?
- Como são evitados os fenômenos de trilhamento elétrico e descarga de banda seca nos pontos de amarração, emenda e derivação de cabos espinados?
- Qual é a suportabilidade do material do revestimento de cabos espinados frente aos ácidos mais comuns?
- Qual é o efeito do ataque destes ácidos sobre os compostos envelhecidos sob a ação de raios ultra-violetas?

- Que metodologia estatística é utilizada para estimar a vida útil de cabos espinados? Que ensaios são realizados para comprovar tais valores? [7]

### 3.3.3 Escolha do cabo

A escolha do cabo a ser utilizado deve ser realizada de acordo com uma cuidadosa avaliação técnico-econômica.

Ainda que o desempenho das fibras óticas seja basicamente o mesmo independente das tecnologias analisadas existem várias incógnitas em relação à utilização do cabo espinado, principalmente no que diz respeito a confiabilidade, e que por isso devem ser analisadas antes de se iniciar sua instalação, vem que a alternativa técnica mais viável é a aplicação de cabo OP-PW, uma vez que o cabo é idêntico ao OP-GW, que tem sido largamente utilizado em linhas de transmissão de energia elétrica [1].

### 3.4 Comentários sobre a utilização de cabos dielétricos auto-sustentados

Apesar de serem utilizados em uma série de linhas de transmissão os cabos dielétricos auto-sustentados impõem os seguintes questionamentos:

- A instalação de cabos dielétricos auto-sustentados próximos aos cabos fase das linhas de transmissão e submetidos continuamente à ação de campos elétricos que pode levar ao trilhamento e erosão elétricos. Deste modo, como deve ser feita a fixação do cabo nas estruturas para minimizar estes efeitos?
- Existe compatibilidade elétrica entre os materiais das amarrações e da capa do cabo?
- A instalação do cabo dielétrico auto-sustentado em alguns sistemas elétricos leva a inclusão de um quinto, sexto e até sétimo cabo, assim haverá necessidade de reforços estruturais para suportar os esforços mecânicos provocados pela inclusão do cabo?

- Que medidas podem ser tomadas para minimizar os efeitos causados por vibrações eólicas e oscilações verticais?

Pesquisas de novos materiais para capa e experiências laboratoriais vêm sendo realizados por fabricantes em parceria com universidades e empresas de energia para melhoria do desempenho destes cabos, com a finalidade de implantação em sistemas elétricos com vãos superiores a 200 metros, que são normalmente indicados para instalação dos cabos dielétricos auto-sustentados. Cabe ressaltar que recentemente alguns fabricantes têm reportado iniciativas de sucesso nesse campo [3], [7].

### 3.5 Sistema OP-PW

#### 3.5.1 Descrição

O sistema OP-PW é similar a um sistema convencional de energia elétrica possuindo, porém, cabos fase com fibra ótica incorporada em seu interior, sendo que o cabo e os acessórios utilizados devem ser projetados para atender aos requisitos elétricos e mecânicos do sistema elétrico.

A diferença entre os sistemas é que o sistema OP-PW, conforme discutido nesse texto, necessita de terminais óticos de característica universal, ou seja, capazes de prover condições para transição e emenda, conforme apresentado na figura 3.2. Estes terminais são responsáveis pela interface entre as partes energizadas e aterradas, e têm a finalidade de permitir a execução de derivações óticas, bem como facilitar a manutenção e operação dos sistemas elétricos e de telecomunicações, independentemente [8].

Os sistemas OP-PW podem possuir dois tipos de acessórios, ou seja:

- Emendas (energizadas), conforme tecnologia Felten und Guilleaume.



- Terminais óticos utilizados para derivações das redes de telecomunicações ou ainda para a execução de emendas óticas na condição de sistema aterrado, requisito imposto por grande parte das empresas brasileiras de energia e telecomunicações.

Deste modo, por necessidade e requisitos do mercado este estudo contempla somente o desenvolvimento dos terminais óticos, que como vantagem adicional permitem a manutenção dos procedimentos padrão desenvolvidos para os cabos OP-GW.

Os terminais desenvolvidos neste trabalho e apresentados neste texto utilizam materiais desenvolvidos pelas seguintes empresas:

- cabo e anel equalizador de potencial: Alcoa Alumínio S.A.
- invólucro do terminal ótico: Cellpack

A figura 3.3 mostra a instalação recomendada para os terminais óticos.

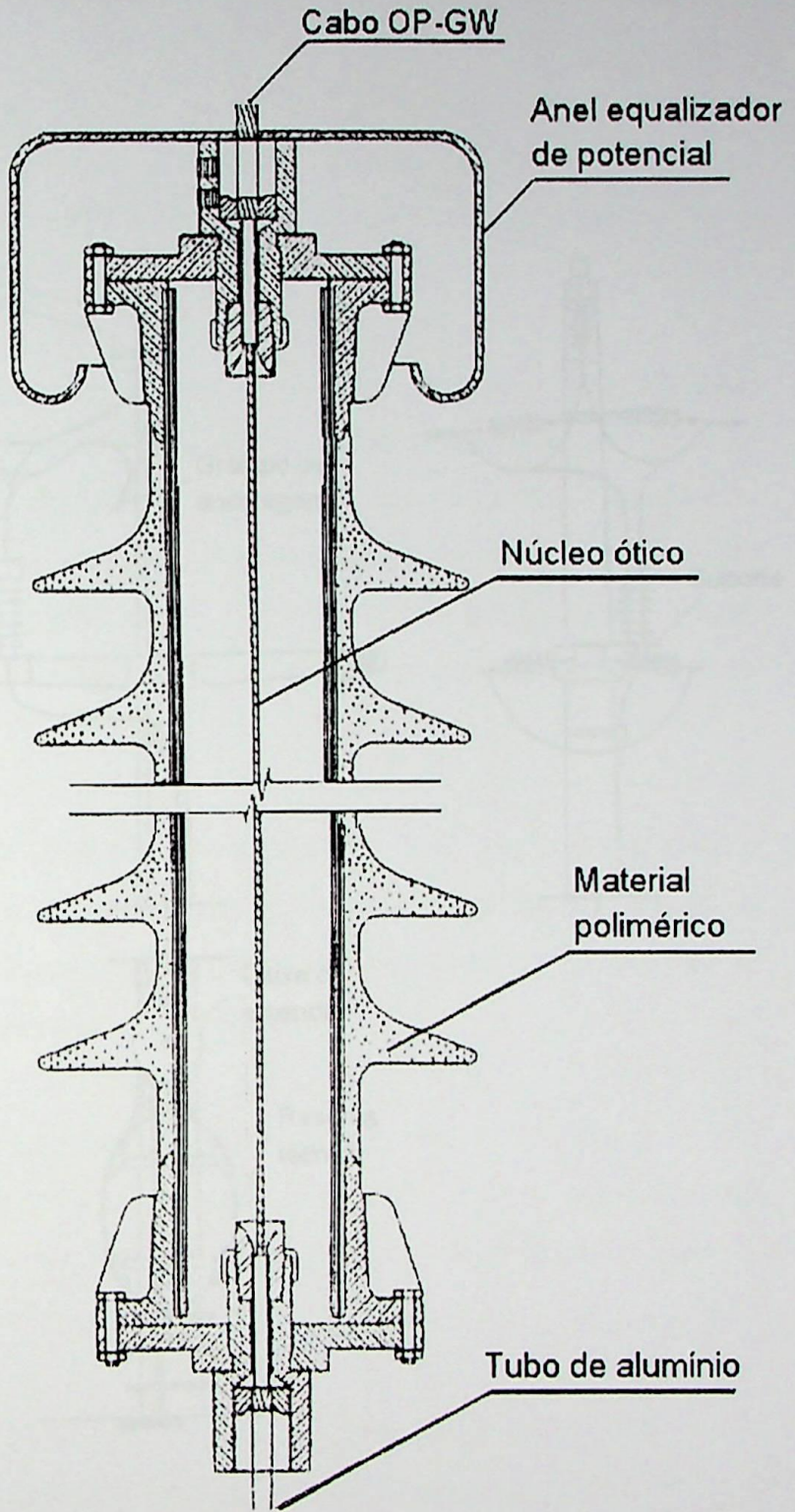


Figura 3.2 Terminal ótico

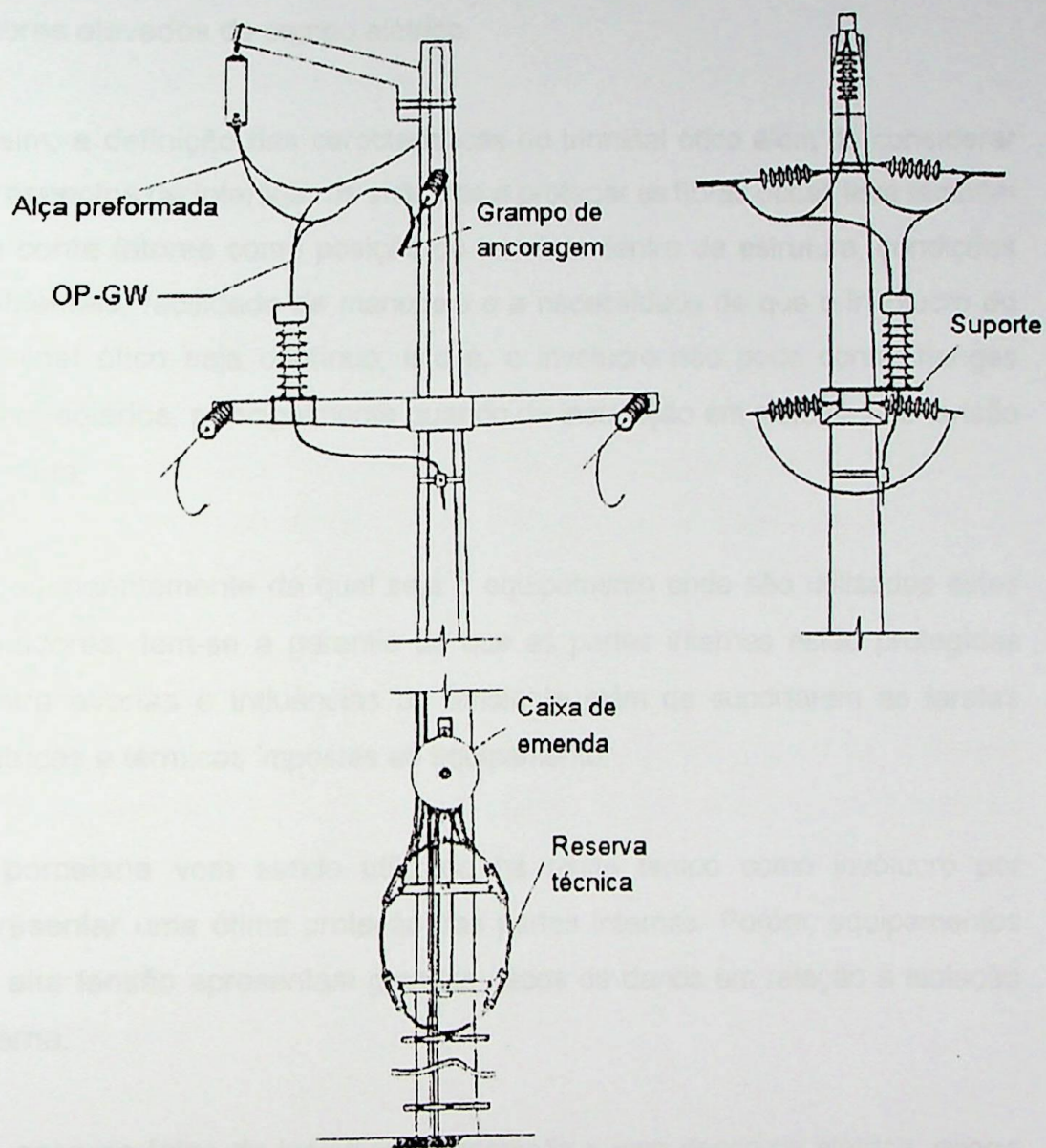


Figura 3.3 Padrão de montagem do terminal ótico em um sistema de 69 kV

### 3.5.2 Requisitos do terminal ótico

A função do terminal ótico é prover a interligação entre as partes energizadas (sistema elétrico) e isoladas (sistema de telecomunicações) bem como fornecer proteção à fibra ótica contra umidade, intempéries e valores elevados de campo elétrico.

Assim, a definição das características do terminal ótico além de considerar os aspectos de interligar os sistemas e proteger as fibras óticas leva também em conta fatores como posição do terminal dentro da estrutura, condições ambientais, facilidade de manuseio e a necessidade de que o invólucro do terminal ótico seja contínuo, isto é, o invólucro não pode conter flanges intermediários, principalmente quando de instalação em sistemas de tensão elevada.

Independentemente de qual seja o equipamento onde são utilizados estes isoladores, tem-se a garantia de que as partes internas estão protegidas contra avarias e influências do ambiente além de suportarem as tarefas elétricas e térmicas impostas ao equipamento.

A porcelana vem sendo utilizada há muito tempo como invólucro por apresentar uma ótima proteção das partes internas. Porém, equipamentos de alta tensão apresentam grandes riscos de danos em relação à isolação interna.

No caso de falha de isolamento associada a uma descarga elétrica, ocorre uma elevação muito rápida no valor da pressão interna, principalmente em equipamentos que utilizam óleo como meio de isolamento interno. Esta pressão produz um impacto quase que imediato sobre o corpo do invólucro, o que no caso da porcelana tem como resultado imediato a explosão do conjunto.

Para os isoladores que utilizam ar ou gás SF<sub>6</sub> como meio de isolamento o aumento da pressão interna é um pouco mais lento. No entanto, mesmo nesse caso, a explosão do conjunto pode ocorrer, principalmente se houver algum dano mecânico na porcelana causado durante o transporte e/ou na montagem e que não tenha sido percebido.

Em invólucros de porcelana também podem ocorrer fissuras, causadas por descargas elétricas ou por ciclos de temperatura ou radiação solar combinada com um resfriamento repentino, que levam a danos termomecânicos.

Os materiais poliméricos vêm sendo apresentados como uma alternativa real à aplicação da porcelana, uma vez que estes materiais apresentam peso reduzido, o que implica na facilidade de manuseio e transporte, e ainda um ótimo comportamento quando da utilização da borracha de silicone em relação à corrente de fuga e rigidez dielétrica.

Basicamente, pode-se dizer que os isoladores compostos podem ser utilizados em todos os equipamentos de alta tensão, como por exemplo, buchas, disjuntores, pára-raios, terminações de cabos, transformadores, entre outros.

As vantagens que os isoladores compostos apresentam sobre os de porcelana são:

- Maior segurança para equipamentos e pessoal em casos de explosão.
- Maior segurança em casos de vandalismo.
- Peso reduzido (maior facilidade no manuseio e conseqüentemente menores riscos de danos no transporte).
- Tolerâncias de fabricação mais apuradas.
- Excelentes características dielétricas do revestimento de borracha de silicone.

- Possibilidade extremamente simples de incorporar fibras óticas no tubo de suporte, proporcionando proteção contra agentes destruidores químicos e/ou mecânicos.

Os isoladores compostos com revestimento de borracha de silicone vêm sendo instalados há vários anos, sem que grandes problemas devidos a sua operação tenham sido detectados. Este tipo de isolador apresenta estrutura de fabricação conforme a Figura 3.4.

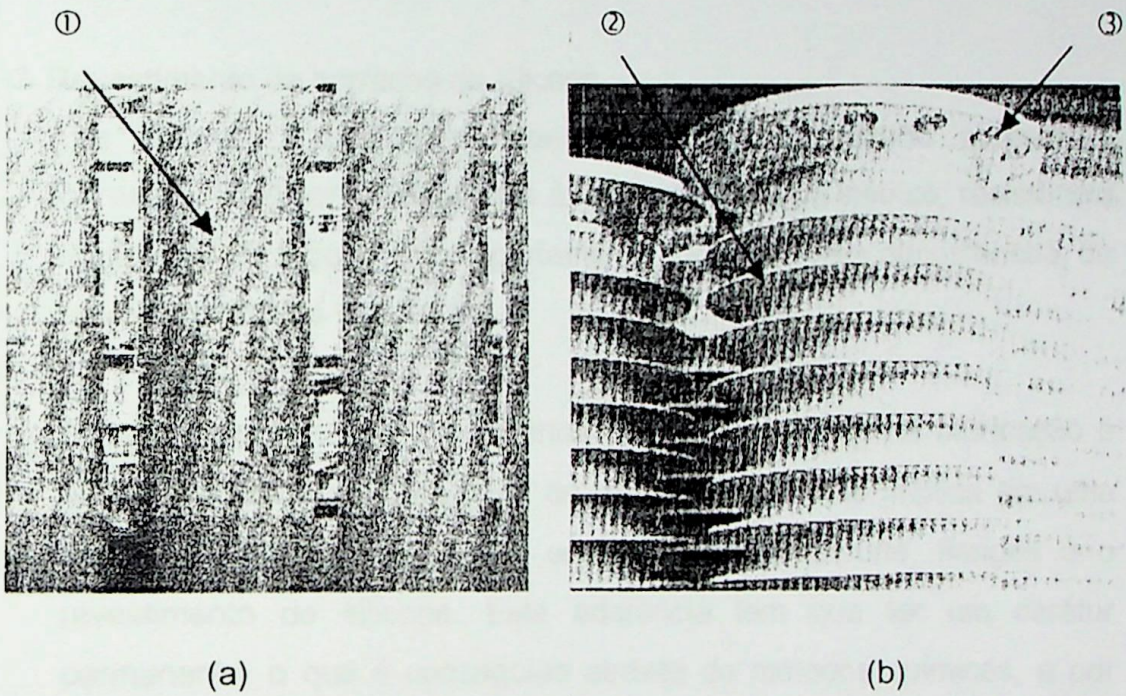


Figura 3.4 – Estrutura básica do isolador composto <sup>[9]</sup>

Onde:

① Tubo de suporte

A finalidade do tubo de suporte é atender os requisitos mecânicos e elétricos. Como tais requisitos são diferentes para as diversas aplicações, o dimensionamento e fabricação do tubo de suporte são feitos de acordo com a especificação do sistema onde o isolador será instalado.

O tubo de suporte é, na maioria das vezes, confeccionado em resina epóxi como matriz e fibras de vidro como material de reforço. Em algumas aplicações o material de reforço utilizado é fibra de poliéster ou fibra de aramida.

Para atender os requisitos mecânicos são considerados, além do tipo de fibra e da resina, outros parâmetros como a quantidade de fibras, quantidade de camadas de fibra, ângulo de bobinamento de fibra e processo de fabricação usado.

## ② Revestimento de borracha de silicone

Um silicone é considerado de boa qualidade quando apresentar características como resistência à formação de arco elétrico; resistência à corrente de fuga; bom comportamento contra agentes atmosféricos, de envelhecimento e hidrofobia.

Os silicones reticulados apresentam baixa viscosidade na fabricação e alta elasticidade em toda faixa de temperatura, o que implica em uma aderência sem tensão interna entre o tubo de suporte, flanges e o revestimento de silicone. Esta aderência tem que ter um caráter permanente, o que é conseguido através de métodos químicos, e por este motivo é considerada como o ponto crucial na fabricação dos isoladores.

Nos casos onde existem partes em borracha de silicone vulcanizada, a adesão de uma nova camada é realizada com o uso de um processo de dispersão de borracha de silicone, que deve possuir o mesmo valor de elasticidade, porém uma maior rigidez mecânica que a borracha de silicone do revestimento. O número de junções depende do comprimento do isolador e do uso de equipamentos apropriadamente dimensionados.

Nestes casos, o processo de fabricação exige um elevado grau de limpeza e controle de qualidade, pois um controle de aderência é praticamente impossível depois do processo de vulcanização.

### ③ Flanges metálicos

Geralmente, os isoladores são terminados em ambas extremidades com armaduras metálicas, denominadas flanges. Os flanges têm a finalidade de fixação e conexão do isolador com os equipamentos de alta tensão e ainda promover a transmissão das forças que atuam sobre o isolador.

Os flanges metálicos, embora apresentem diferentes formas, são sempre robustos e fixados hermeticamente ao tubo de suporte. A fixação dos flanges ao tubo de suporte é obtida através de contração <sup>[9]</sup>.

### 3.5.3 Cláusulas específicas para os terminais óticos para o sistema OP-PW

Os requisitos mecânicos que devem ser atendidos pelos terminais óticos estão relacionados com os procedimentos adotados para a vedação do sistema e com aspectos de montagem e fixação do terminal junto às torres ou pórticos.

Quanto aos requisitos elétricos os terminais devem ser submetidos a ensaios que considerem as seguintes questões:

- Qual a máxima temperatura de operação em regime permanente? E sob curto-circuito?
- Existem dados relativos à atenuação introduzida por causa da instalação dos terminais?
- Qual é o limite de descargas parciais admissível para os terminais óticos? Que medidas podem ser tomadas para garantir este valor em condições externas adversas?

- Quais os valores admissíveis frente a tensão em frequência industrial a seco e sob chuva?
- Quais os valores admissíveis frente a impulsos atmosféricos? E a impulsos de manobra?

Assim, as respostas a essas questões fornecerão subsídios para estimar o desempenho do terminal ótico e sua instalação.

#### 3.5.4 Especificação do invólucro do terminal ótico

A figura 3.5 e a tabela 3.1 apresentam as dimensões para o invólucro do terminal ótico escolhido.

Os ensaios específicos do invólucro são objetos de normas específicas. Considerando a extensa experiência internacional no assunto estes pontos não foram objeto de discussão nesse trabalho.

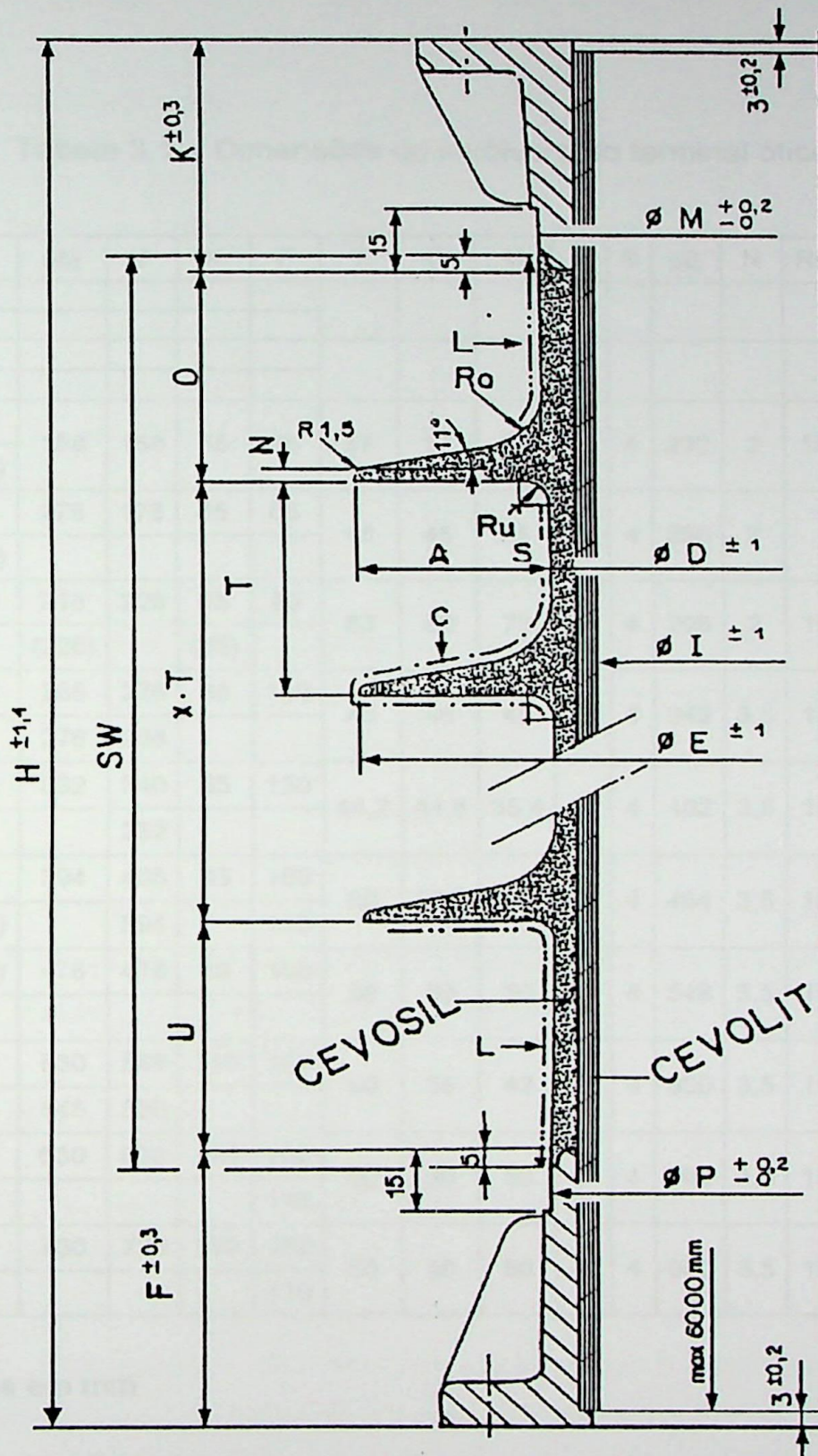


Figura 3.5 – Dimensões do invólucro

Tabela 3.1 – Dimensões do invólucro do terminal ótico

$\phi D$	$\phi I$	$\phi M$	$\phi P$	K	F	T	O	U	A	S	$\phi E$	N	R <sub>o</sub>	R <sub>u</sub>	C
(56)															
(126)															
142	130	158	158	55	85	57	57	57	41	4	232	2	15	5	125,19
	(134)														
166	150	178	178	65	65	45	45	45	41	4	256	2			113,19
	(158)														
206	198	216	226	55	85	63	62	73	41	4	296	2	15	5	113,19
	(226)														
257	248	268	276	65	110	45	46	45	39	4	342	3,5	15	5	109,55
312,2	300	332	340	85	130	44,2	44,8	35,4	41	4	402	3,5	15	5	112,39
			332												
373,6	350	394	408	85	160	60	59,5	94,5	41	4	464	3,5	15	5	128,19
	(360)		394												
(458)	(450)	478	478	85	160	50	50	50	41	4	548	3,5	15	5	118,19
510	500	530	548	110	160	50	58	49	41	4	600	3,5	15	5	118,19
	486		548												
(610)	600	630	630	110	160	50	50	50	41	4	700	3,5	15	5	118,19
(710)	700	730	730	110	160	50	50	50	41	4	800	3,5	15	5	118,19

Dimensões em mm

## 4. Desenvolvimento

### 4.1 Considerações Iniciais

O comprimento do invólucro, a distância de escoamento e o número de saias são definidos pela tensão máxima de operação e do NBI do sistema que é de 350 kV, de acordo com a norma NBR 6939/81 – Coordenação do Isolamento – Procedimentos. Os diâmetros mínimos, interno e externo, do invólucro foram definidos em função do custo e disponibilidade de fabricação. Já as dimensões do anel de equalização de potencial foram definidas através do estudo de gradiente elétrico.

Assim, o dimensionamento final do terminal ótico é definido através da realização de simulações considerando diversos valores para as dimensões do sistema de equalização até que o valor do campo elétrico no interior do isolador seja inferior ao valor máximo de 1,5 kV/mm.

Como o objetivo das simulações era definir dimensões de um sistema (terminal ótico) não foi desenvolvido um programa computacional específico. Nesse caso foi utilizado um pacote computacional, que usa o Método dos Elementos Finitos, para análise de fenômenos eletromagnéticos e térmicos.

### 4.2 Método dos Elementos Finitos

Os fenômenos eletromagnéticos são completamente descritos pelas equações de Maxwell. Porém, a solução analítica de tais equações torna-se impraticável quando referentes a dispositivos e sistemas que possuem geometrias complexas. Geralmente para esses obtém-se soluções aproximadas através da utilização de métodos de cálculo numérico.

O Método dos Elementos Finitos vem mostrando ser uma ferramenta bastante poderosa para a determinação de distribuições de campos eletromagnéticos e análise de desempenho de componentes elétricos, tais

como motores, geradores, transformadores, linhas de transmissão, sistemas de aterramento, aterramento atuadores eletromagnéticos, cabos elétricos, dentre outros.

A aplicação deste método permite a adoção de domínio bidimensional, que fornece uma precisão bastante razoável para a análise de um grande número de casos práticos de engenharia com ônus bem menor que o domínio tridimensional. O uso do domínio bidimensional também é justificado para dispositivos que sejam simétricos ou cujas conformações geométricas são tais que se possa fazer estimativas de funcionamento em partes ou no todo.

Para a utilização do Método dos Elementos Finitos o objeto em estudo deve ter a sua geometria dividida em várias partes, que são os elementos finitos. Essa divisão gera o que se denomina malha que é constituída por triângulos ou quadriláteros no caso bidimensional, cujos vértices são denominados nós da malha. É através dela que se monta um sistema de equações que permite determinar as grandezas de interesse. No caso eletromagnético, a solução é o vetor potencial magnético ( $A$ ) ou o potencial elétrico ( $V$ ) em cada nó da malha. A partir desses valores é possível determinar os campos magnéticos ( $B$  e  $H$ ) ou elétricos ( $E$  e  $D$ ) no interior dos elementos finitos e com isso efetuar os cálculos de energia, força, torque, indutância, capacitância, resistência, entre outros.

As tarefas executadas na utilização do Método dos Elementos Finitos são denominadas pré-processamento, processamento e pós-processamento.

O pré-processamento consiste no desenho da geometria do objeto em estudo, a geração da malha, a definição de: propriedades físicas dos materiais que constituem o objeto, valores das fontes de campo no objeto (densidade de corrente ou densidade de carga elétrica) e condições de contorno pertinentes ao fenômeno e ao objeto analisado.

O processamento se refere a montagem do sistema de equações, obtido através dos dados do pré-processamento e sua resolução pode ser efetuada através de método diretos ou iterativos, linear ou não-linear e com coeficientes reais ou complexos.

O pós-processamento, com os dados das etapas anteriores, é que permite a utilização dos resultados do Método dos Elementos Finitos, através dos vários procedimentos para cálculo e apresentação dos fenômenos estudados.

Os algoritmos que traçam linhas de campo ou equipotenciais sobre a geometria fornecida, os que calculam energia, força, torque e parâmetros, os que traçam gráficos de campos e potenciais sobre segmentos definidos no objeto são os constituintes do pós-processamento <sup>[10]</sup>.

#### 4.3 Formulação matemática

O cálculo do gradiente elétrico utilizando o Método dos Elementos Finitos é baseado na 4ª equação de Maxwell (ou Lei de Gauss da Eletrostática), dada na forma diferencial pela equação 4.1:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (4.1)$$

onde:

$\vec{D} \Rightarrow$  vetor deslocamento [ $C/m^3$ ]

$\rho \Rightarrow$  densidade volumétrica de cargas (geralmente  $\rho = 0$ )

O vetor deslocamento  $\vec{D}$  e o vetor campo elétrico  $\vec{E}$  estão relacionados através da equação 4.2:

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad (4.2)$$

onde:

$\varepsilon \Rightarrow$  permissividade elétrica do meio (possui valor constante em grande parte das aplicações).

O campo elétrico é dado pela equação 4.3:

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (4.3)$$

Combinando as equações 4.1 e 4.2 calcula-se o valor da tensão  $V$  em todos os nós da malha através da equação 4.4:

$$\nabla \cdot (\varepsilon \cdot \nabla V) = -\rho \quad (4.4)$$

Substituem-se os valores de  $V$ , obtidos na resolução da equação 4.4, na equação 4.3 e obtêm-se os valores de campo elétrico em todos os nós da malha [10].

#### 4.4 Pacote computacional

O pacote computacional utilizado para este estudo foi o FLUX2D [11] que é composto de diferentes módulos com funções separadas. A seguir estão relacionados os módulos básicos e suas respectivas funções:

- PREFLU: módulo no qual a geometria do problema em análise é definida e onde há a geração da malha.

A figura 4.1 apresenta geometria utilizada para a realização da simulação.

Figura 4.1 – Geometria do terminal ativo

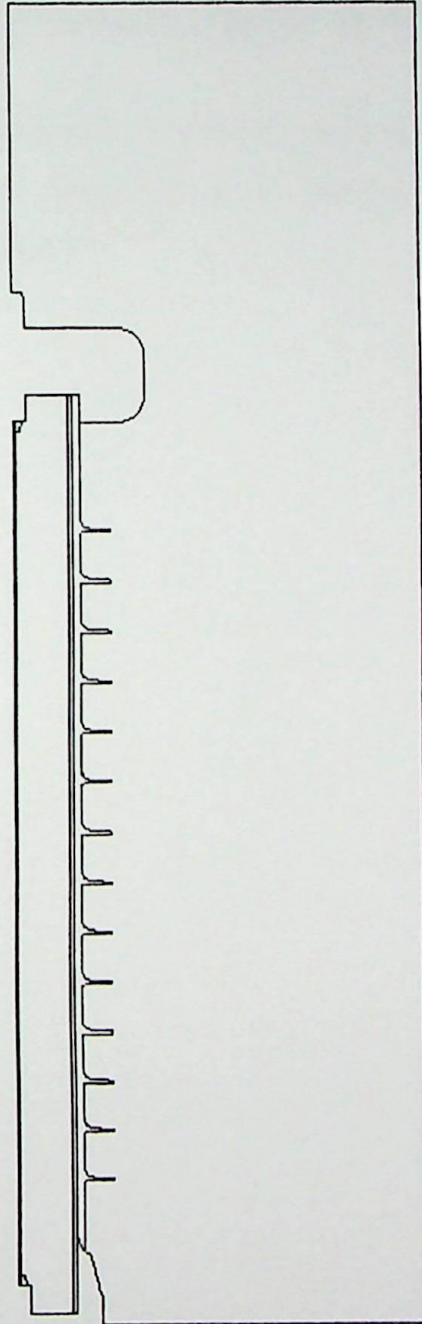


Figura 4.1 – Geometria do terminal ótico

- CSLMAT: este módulo contém as propriedades físicas dos vários materiais usados na manufatura de equipamentos elétricos, tais como permeabilidade magnética, condutividade, permissividade elétrica, entre outros.
- PROPHY: neste módulo são definidos os materiais que compõem o objeto em estudo, bem como as condições de contorno do problema.

Os materiais que compõem o isolador ótico e os meios considerados estão mostrados na figura 4.2 e os respectivos valores de  $\epsilon$  estão apresentados na tabela 4.1.

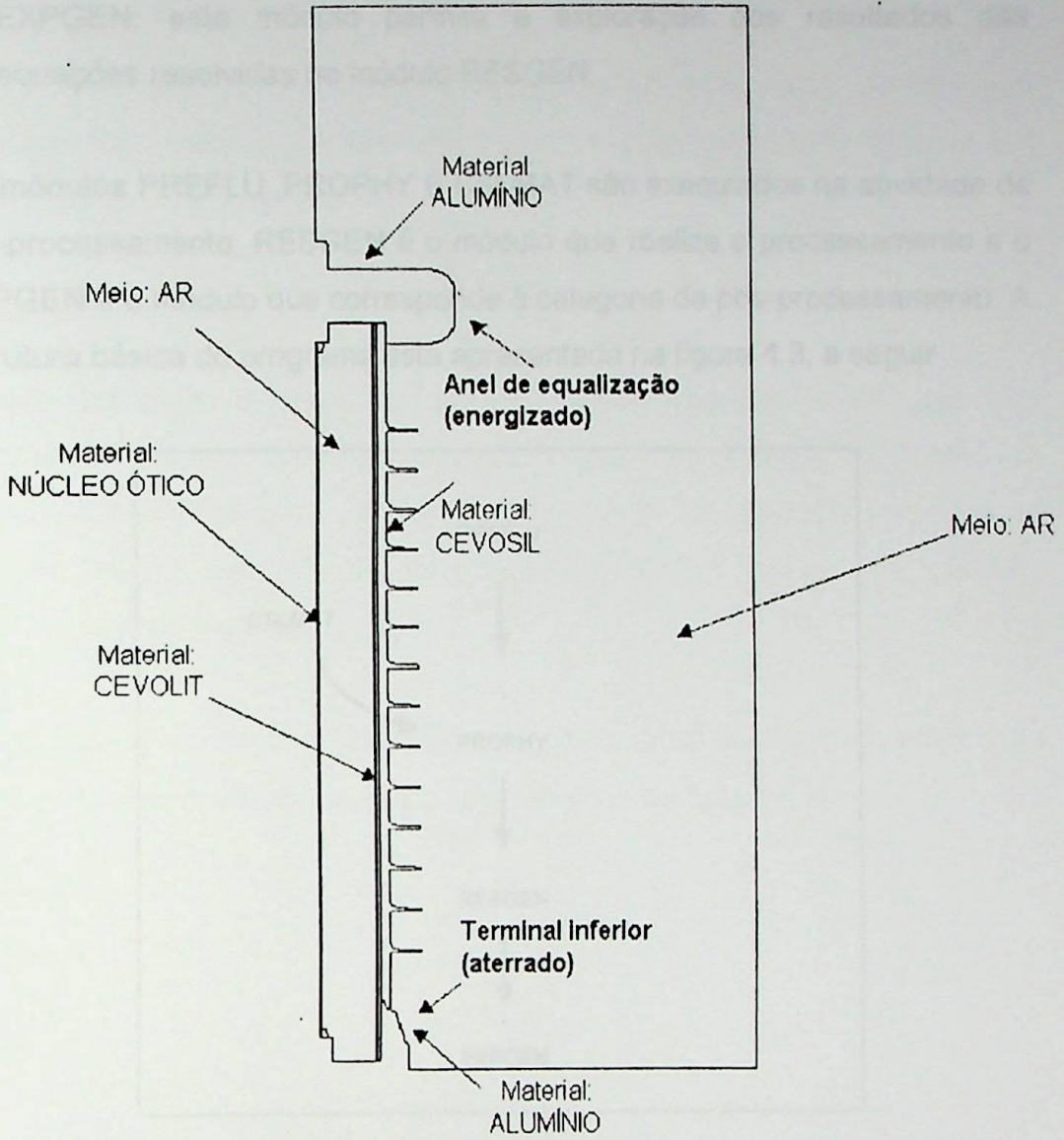


Figura 4.2 – Materiais

Tabela 4.1 – Propriedades físicas

Material	Permissividade elétrica ( $\epsilon$ )
Ar	1,0 (vácuo)
Fibra ótica	3,0 (vidro)
Cevolit	4,0
Cevosil	2,5

- RESGEN: é o módulo no qual é realizado o cálculo das equações obtidas através do módulo de pré-processamento.

- **EXPGEN:** este módulo permite a exploração dos resultados das equações resolvidas no módulo RESGEN.

Os módulos PREFLU, PROPHY E CSLMAT são executados na atividade de pré-processamento, RESGEN é o módulo que realiza o processamento e o EXPGEN é o módulo que corresponde à categoria de pós-processamento. A estrutura básica do programa está apresentada na figura 4.3, a seguir

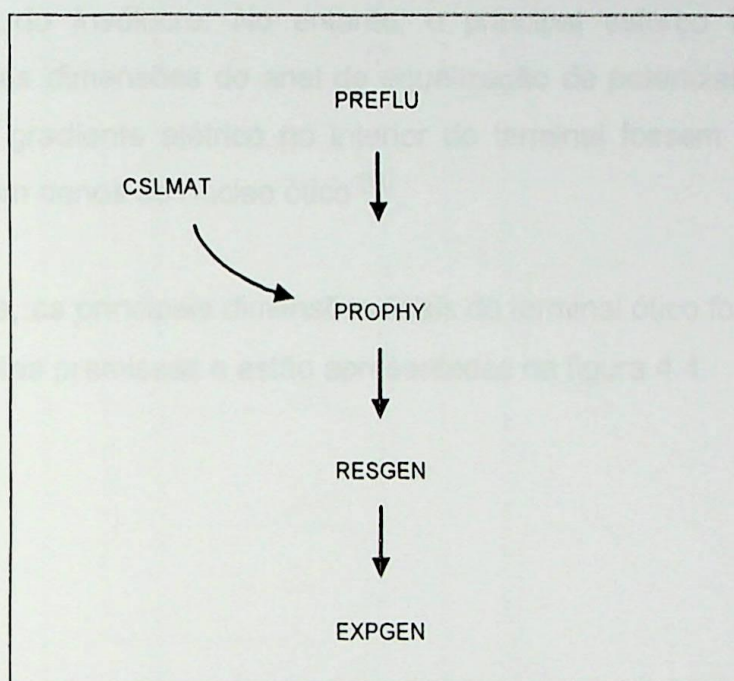


Figura 4.3 – Estrutura básica do FLUX2D

#### 4.5 Definição do invólucro

O invólucro que apresenta o menor diâmetro interno é fabricado apenas sob encomenda, por essa razão optou-se por aquele de menor diâmetro de fabricação comercial, conforme apresentado na tabela 3.1, ou seja.

Distância de escoamento: 1950 mm

Comprimento do isolador: 975 mm

Número de saias: 14

As dimensões iniciais adotadas para o anel de equalização de potencial consideraram valores que permitiram envolver o flange superior do invólucro conforme mostra a figura 4.4 <sup>[11]</sup>.

#### 4.5.1 Simulações

Foram realizadas diversas simulações visando uma melhor definição das dimensões do invólucro. No entanto, o principal esforço foi relativo à definição das dimensões do anel de equalização de potencial para que os valores de gradiente elétrico no interior do terminal fossem tais que não provocassem danos ao núcleo ótico <sup>[11]</sup>.

Desta forma, as principais dimensões finais do terminal ótico foram definidas a partir destas premissas e estão apresentadas na figura 4.4.

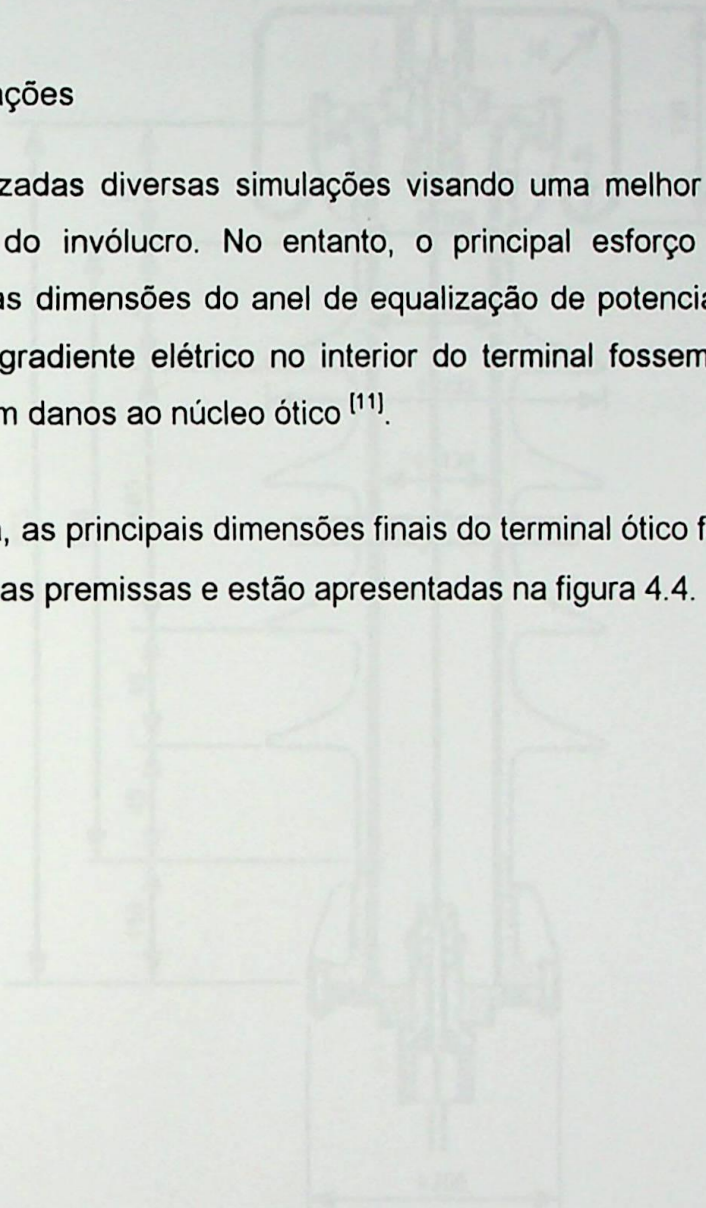


Figura 4.4 – Dimensões do terminal ótico

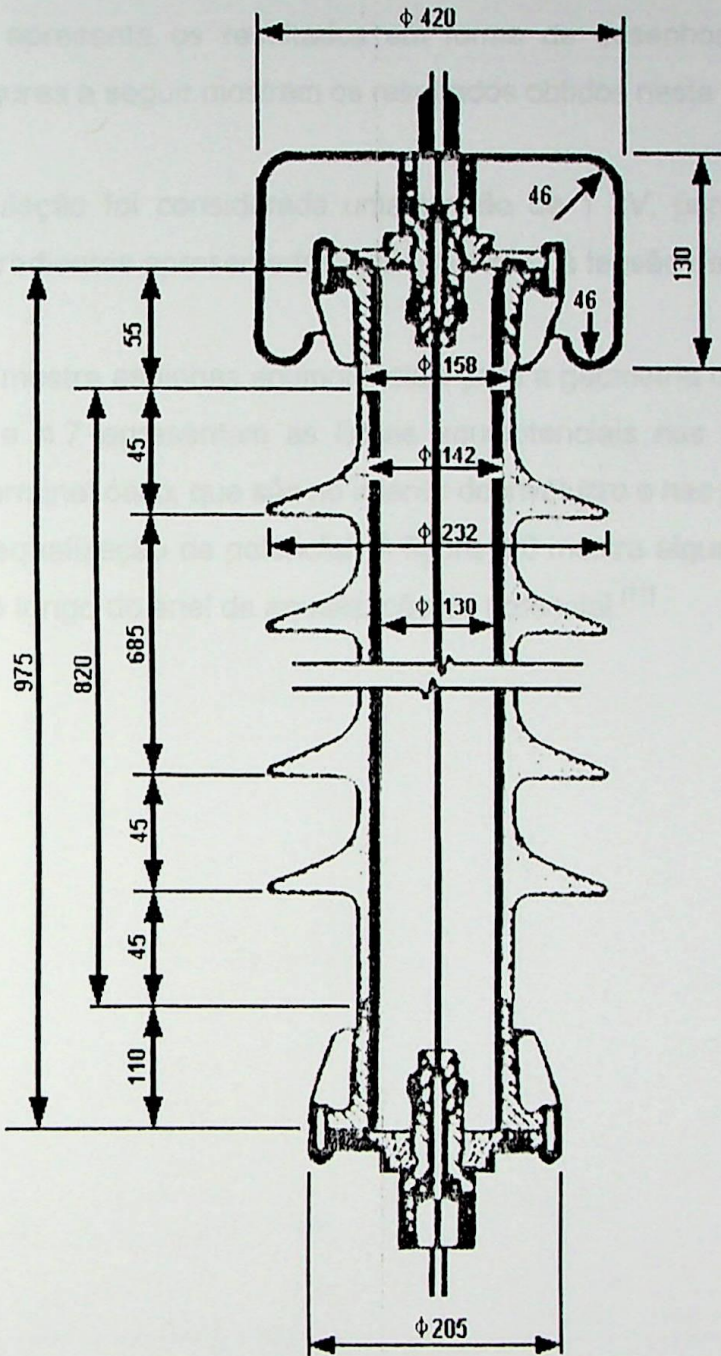


Figura 4.4 – Dimensões do terminal ótico

#### 4.5.2 Resultados

O FLUX2D apresenta os resultados em forma de desenhos e gráficos. Assim, as figuras a seguir mostram os resultados obtidos neste estudo.

Para a simulação foi considerada uma tensão de 1 kV, porém todos os valores de gradientes apresentados estão referidos à tensão de 69 kV.

A figura 4.5 mostra as linhas equipotenciais para a geometria completa e as figuras 4.6 e 4.7 apresentam as linhas equipotenciais nas regiões mais críticas do terminal ótico, que são no interior do invólucro e nas proximidades do anel de equalização de potencial. A figura 4.8 mostra alguns valores de gradiente ao longo do anel de equalização de potencial <sup>[11]</sup>.

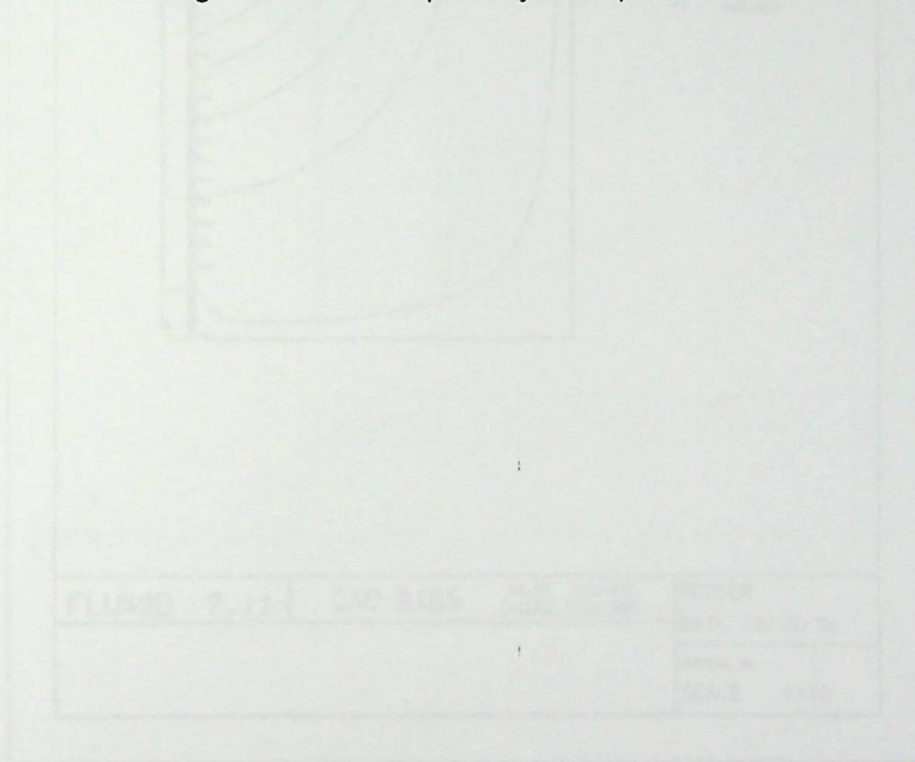


Figura 4.5 – Linhas equipotenciais – geometria completa

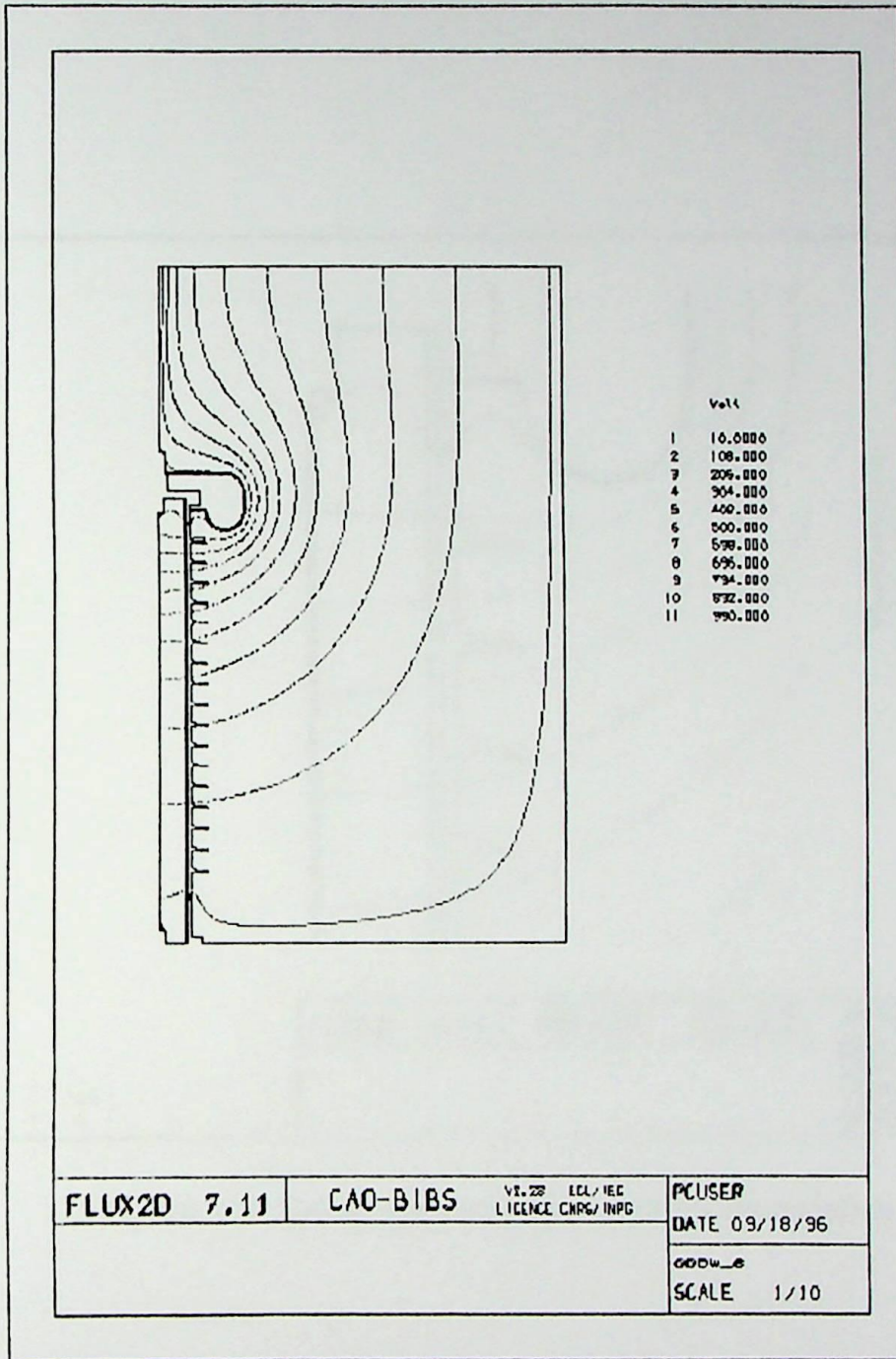


Figura 4.5 – Linhas equipotenciais – geometria completa

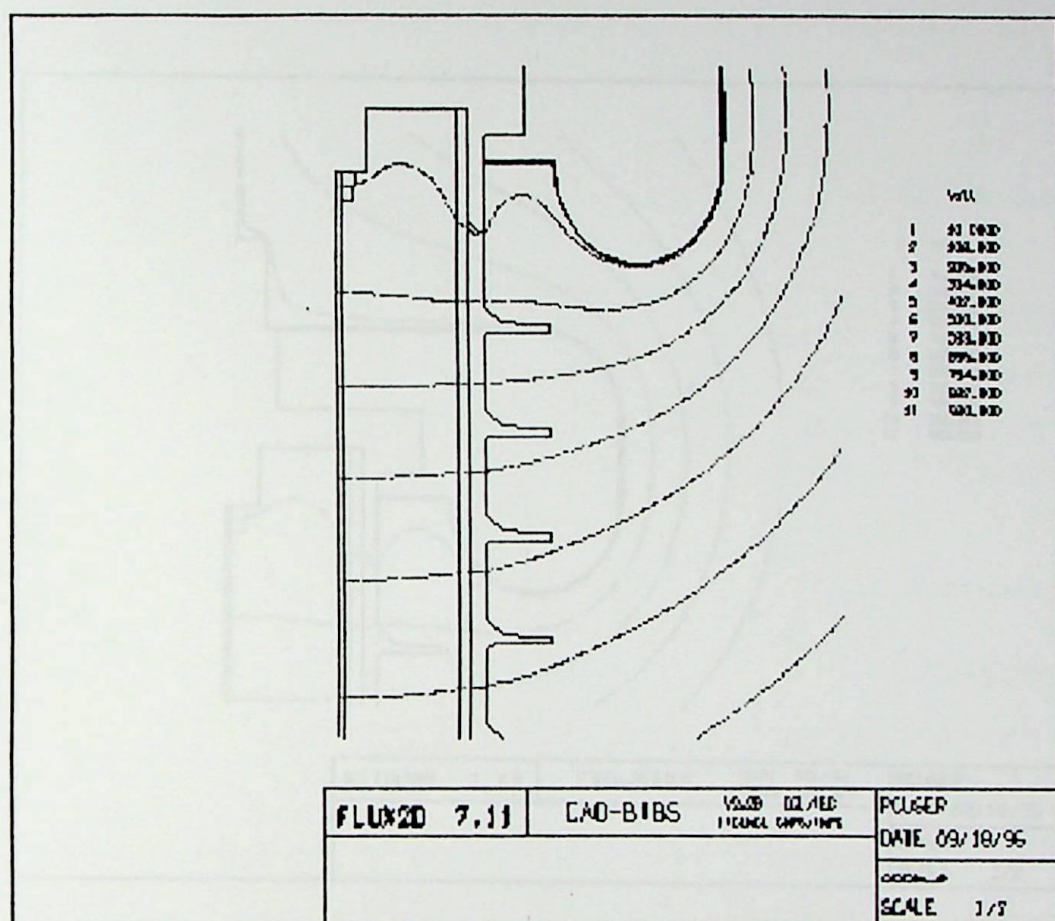


Figura 4.6 - Linhas equipotenciais – interior do invólucro

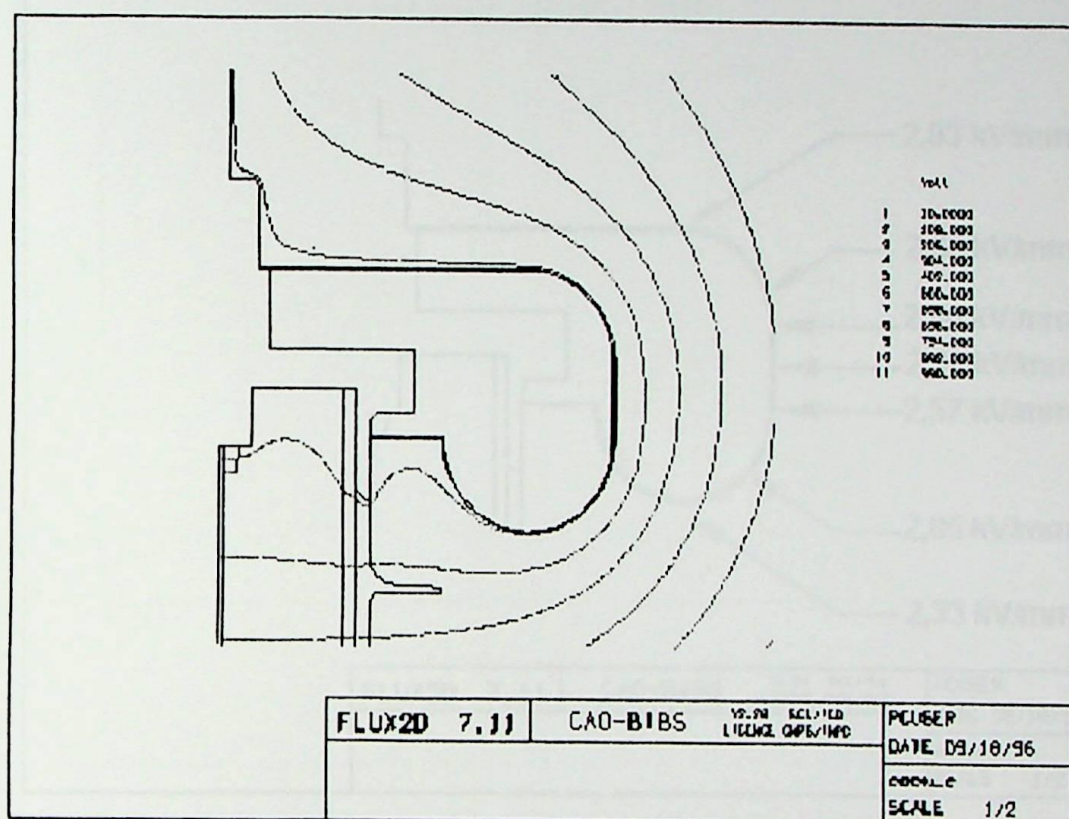


Figura 4.7 - Linhas equipotenciais – anel de equalização de potencial

O gráfico apresentado na figura 4.8 mostra a distribuição do gradiente elétrico no interior do resistor, já que os núcleos do ímã são considerados no intervalo mostrado na figura 4.10.

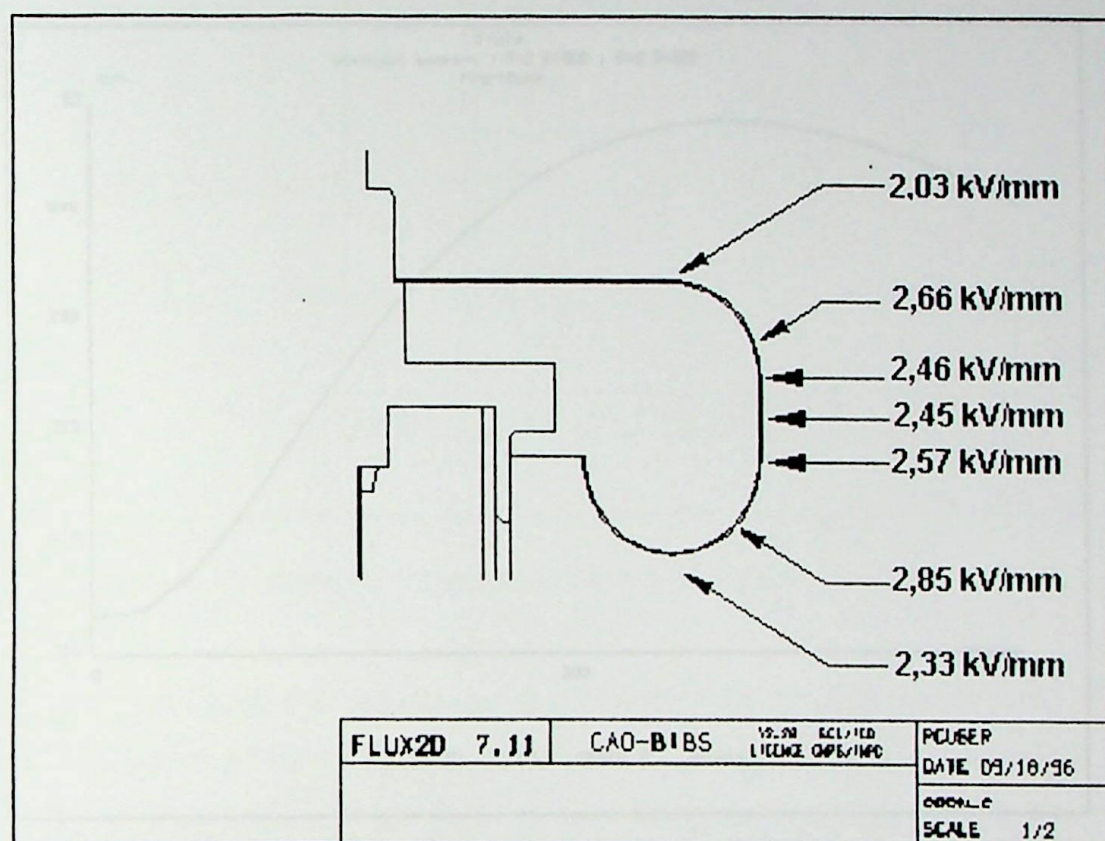


Figura 4.8 - Gradientes ao longo do anel de equalização de potencial

O gráfico apresentado na figura 4.9 mostra a distribuição do gradiente elétrico no interior do isolador, junto ao núcleo óptico, sendo considerado o intervalo mostrado na figura 4.10.

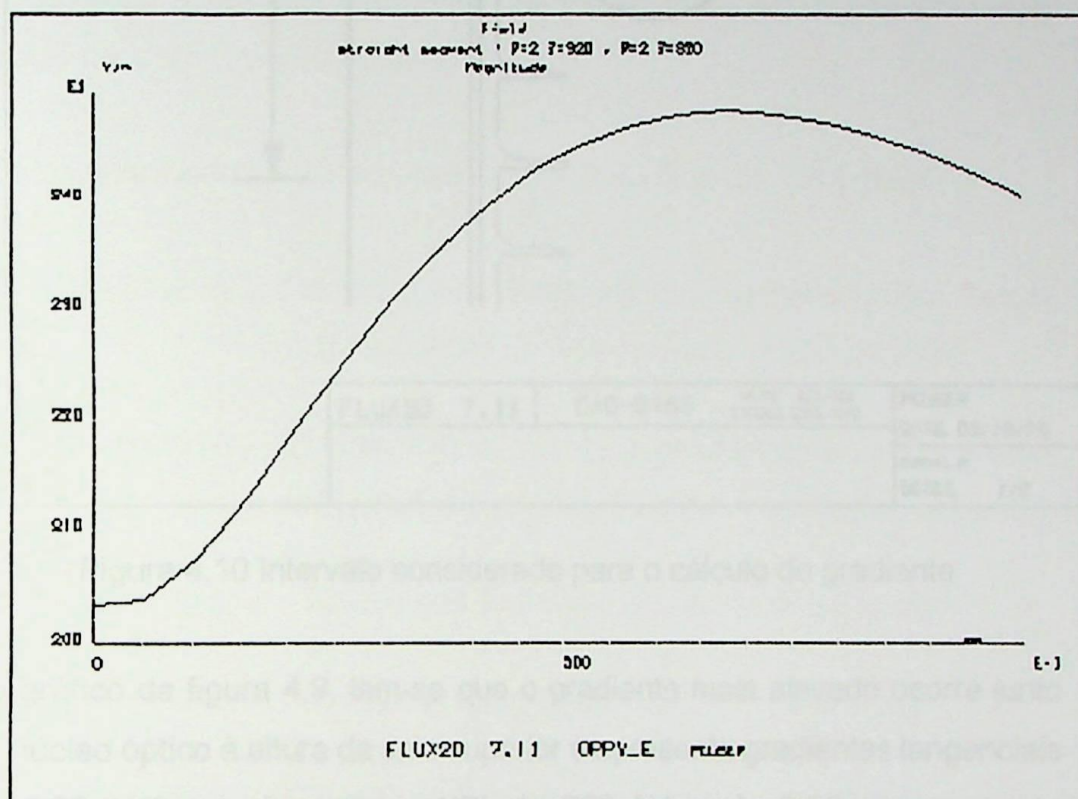


Figura 4.9 - Gradiente elétrico no interior do invólucro junto ao núcleo óptico

#### 4.5.3 Comentários

Os valores de gradiente obtidos estão de acordo com os valores admitidos para uma operação adequada do material tipo DP-PW.

Podem notar que os valores de gradiente junto ao núcleo óptico são os que não ocorrerá dano ao mesmo em condições normais de operação e os gradientes nas proximidades do eixo de ejeção de potencial também mostram que não haverá ocorrência de descarga elétrica. Posteriormente foram realizadas análises que comprovam estes resultados.

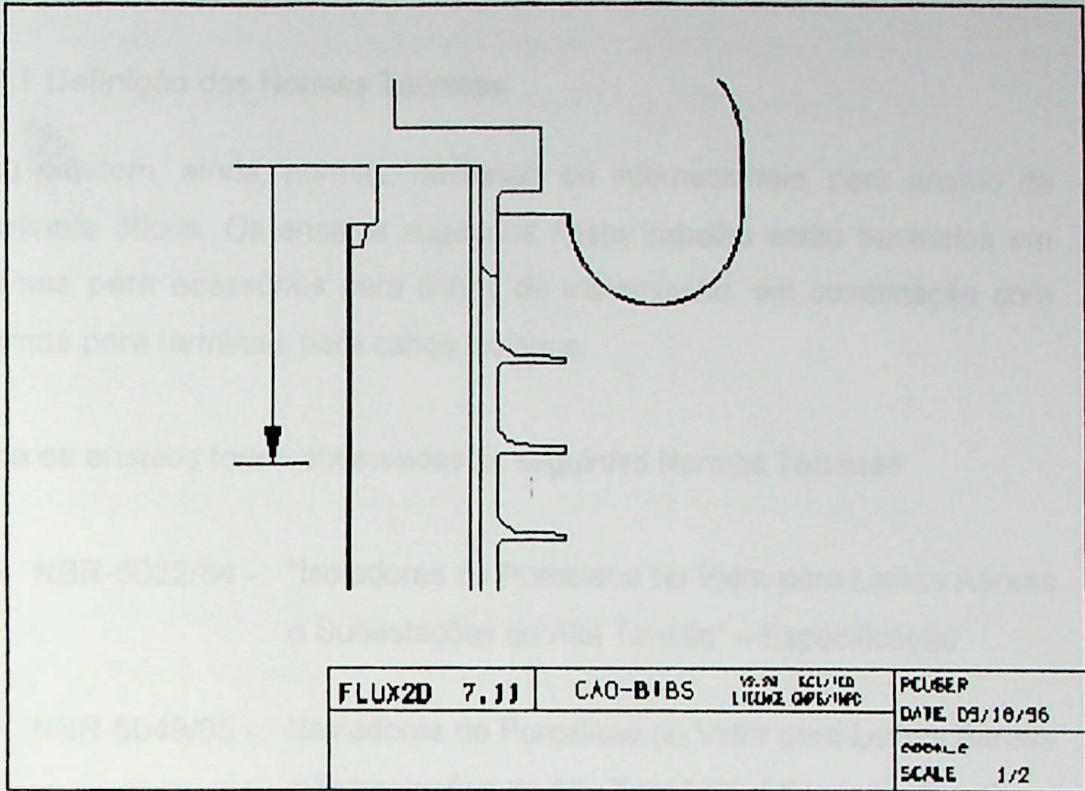


Figura 4.10 Intervalo considerado para o cálculo do gradiente

Do gráfico da figura 4.9, tem-se que o gradiente mais elevado ocorre junto ao núcleo óptico à altura da saia superior e apresenta gradientes tangenciais de 0,92 kV/mm referente ao NBI de 350 kV e de 0,08 para corrente alternada.

#### 4.5.3 Comentários

Os valores de gradiente obtidos estão de acordo com os valores admissíveis para uma operação adequada do terminal ótico OP-PW.

Pode-se notar que os valores de gradiente junto ao núcleo óptico são tais que não ocorrerá dano ao mesmo em corrente alternada ou a impulso e, os gradientes nas proximidades do anel de equalização de potencial também mostram que não haverá ocorrência de descarga elétrica. Posteriormente, foram realizados ensaios que comprovam estes resultados.

## 4.6 Ensaaios em protótipos

### 4.6.1 Definição das Normas Técnicas

Não existem, ainda, normas, nacionais ou internacionais, para ensaio de terminais óticos. Os ensaios sugeridos neste trabalho estão baseados em normas para acessórios para linhas de transmissão, em combinação com normas para terminais para cabos isolados.

Para os ensaios foram observadas as seguintes Normas Técnicas:

- NBR-5032/84 - “Isoladores de Porcelana ou Vidro para Linhas Aéreas e Subestações de Alta Tensão” – Especificação
- NBR-5049/85 - “Isoladores de Porcelana ou Vidro para Linhas Aéreas e Subestações de Alta Tensão” – Método de Ensaio
- NBR-6936/92 - “Técnicas de Ensaaios Elétricos de Alta Tensão”
- NBR-6939/81 - “Coordenação do Isolamento” – Procedimento
- NBR-6940/81 - “Técnicas de Ensaaios Elétricos de Alta Tensão – Medição de Descargas Parciais” – Procedimento
- NBR-9314/86 - “Emendas e Terminais para Cabos de Potência com Isolação para Tensões de 1 a 35 kV” – Especificação

### 4.6.2 Ensaaios

As amostras submetidas aos ensaios, em número de 3, são compostas do invólucro, do anel de equalização de potencial e do núcleo óptico, montados conforme instalação no campo. Deste modo, foram realizados os seguintes ensaios <sup>[12]</sup>.

- Ensaio de Descargas Parciais;
- Ensaio de Tensão Suportável em Frequência Industrial a Seco;
- Ensaio de Tensão Suportável em Frequência Industrial sob Chuva;
- Ensaio de Tensão Suportável sob Impulso Atmosférico, com Forma Normalizada;
- Verificação do Nível de Descarga Externa, sob Impulso Atmosférico, com Forma de Onda Normalizada; e
- Ensaio de Névoa Salina

Os ensaios podem ser divididos em 3 grupos com diferentes objetivos.

Um primeiro grupo é formado apenas pelo ensaio de descargas parciais, cujo objetivo é verificar a ausência da atividade elétrica no interior do invólucro, fato este responsável pela integridade do sistema ótico. O valor do parâmetro de controle escolhido foi de 3 pC, embora o valor admissível seja de 5 pC, conforme a norma NBR-6940.

Um segundo grupo é formado pelos ensaios dielétricos sob frequência industrial a seco e sob chuva e impulso, cujo objetivo é verificar o cumprimento dos requisitos dielétricos do sistema de acordo com o estabelecido em norma, 140 kV eficazes e 350 kV de pico, respectivamente.

Finalmente, o terceiro grupo é formado apenas pelo ensaio de névoa salina, cujo objetivo é permitir a verificação dos dados de suportabilidade do invólucro, fornecidos pelo seu fabricante, bem como permitir o estabelecimento de um processo de envelhecimento acelerado causado por atividade elétrica externa que acoplada ao interior do invólucro pode iniciar o ataque ao composto de revestimento das fibras óticas como também gerar óxido de nitrogênio, que na presença de vapor d'água resulta em amônia, ácido nítrico e outros compostos corrosivos <sup>[12]</sup>.

#### 4.6.3 Normas e Requisitos

##### - Descargas Parciais

O ensaio de descargas parciais é realizado de acordo com a norma NBR-6940. Aplica-se tensão de 44 kV e o nível máximo de descarga admissível é de 5 pC <sup>[15]</sup>.

##### - Tensão Suportável em Frequência Industrial a Seco

O ensaio de tensão suportável em frequência industrial a seco é realizado de acordo com a norma NBR-5049 <sup>[17]</sup>. Aplica-se tensão igual a 140 kV, conforme norma NBR-6939 <sup>[16]</sup>, por 1 minuto, não sendo permitida a ocorrência de descarga durante este período.

##### - Tensão Suportável em Frequência Industrial sob Chuva

O ensaio de tensão suportável em frequência industrial sob chuva é realizado de acordo com a norma NBR-5049 <sup>[17]</sup>. Após a amostra ser submetida a chuva artificial por 15 minutos ininterruptos aplica-se tensão de 140 kV, conforme norma NBR-6939 <sup>[16]</sup>, por 10 segundos, não sendo permitida a ocorrência de descarga durante este período.

##### - Tensão Suportável de Impulso Atmosférico

O ensaio de tensão suportável de impulso atmosférico é realizado de acordo com a norma NBR-6939 <sup>[16]</sup>. Este ensaio tem a finalidade de determinar a suportabilidade frente a impulsos de 350 kV. São aplicados 15 impulsos de polaridade positiva e 15 de polaridade negativa, com forma de onda 1,2 x 50 µs.

##### - Envelhecimento sob Névoa Salina

O ensaio de envelhecimento sob névoa salina é realizado de acordo com a norma NBR-9314 <sup>[18]</sup>. A finalidade deste ensaio é verificar o comportamento do núcleo óptico, após decorrido algum tempo em operação. Assim, as

características do núcleo óptico devem ser verificadas antes e depois da realização do ensaio. A duração do ensaio é de 500 horas e deve ser precedido e sucedido por medição de descargas parciais.

#### 4.6.4 Abertura e Inspeção das Amostras

Após a conclusão dos ensaios, as amostras são abertas para que se possa verificar se houve algum tipo de dano ao núcleo óptico.

#### 4.6.5 Execução e Resultados dos Ensaio

##### - Medição de descargas parciais

A tensão foi elevada até o valor de 60 kV e mantida por 1 minuto. Após a medição do nível de descargas parciais para este nível de tensão, esta foi reduzida para 44 kV, fazendo novas medições. Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 4.2 <sup>[19]</sup>.

Tabela 4.2 – Resultados da medição de descargas parciais

Amostra	60 kV	44kV
1	Menor que 3 pC	Menor que 3 pC
2	Menor que 3 pC	Menor que 3 pC
3	Menor que 3 pC	Menor que 3 pC

##### - Ensaio de tensão suportável em frequência industrial, a seco

Para cada uma das amostras a tensão foi elevada a uma taxa de 0,5 a 3 kV/s, até 140 kV, sendo mantida por 1 minuto.

Não se constatou qualquer perfuração do dielétrico ou descarga externa nos terminais <sup>[19]</sup>.

- Ensaio de tensão suportável em frequência industrial, sob chuva

Para cada uma das amostras, e após estabilização de chuva artificial sobre elas, a tensão foi elevada a uma taxa de 0,5 a 3 kV/s, até 140 kV e mantida por 10 segundos.

Não se constatou qualquer perfuração do dielétrico ou descarga externa nos terminais <sup>[19]</sup>.

NOTA: Condições de ensaio

- Precipitação: 3 ( $\pm$  0,3) mm/min (componente vertical)
  - Temperatura da água: 20 °C
  - Resistividade da água: 39  $\Omega$  x cm
  - Resistividade da água: 42  $\Omega$  x cm (referida a 20 °)
- 
- Ensaio de tensão suportável de impulso atmosférico, com forma de onda normalizada

Para cada uma das amostras foram feitas aplicações de 10 impulsos em polaridade positiva, seguidos de 10 impulsos em polaridade negativa, com forma de onda normalizada de 1,2 x 50 s e valores de crista de 350 kV.

Quando da mudança de polaridade foram feitas aplicações de impulsos reduzidos, em polaridade inversa, para despolarização do dielétrico <sup>[19]</sup>.

NOTAS:

1. Condições de ensaio

- Temperatura de bulbo seco: 27 °C
- Temperatura de bulbo úmido: 22 °C
- Pressão atmosférica: 710 mmHg
- Umidade relativa: 76%

2. Os valores aplicados de tensão não foram corrigidos para as condições ambientais.

Não se constatou qualquer perfuração do dielétrico ou descarga externa nos terminais. Os oscilogramas das figuras 4.11 e 4.12 mostram os resultados obtidos.

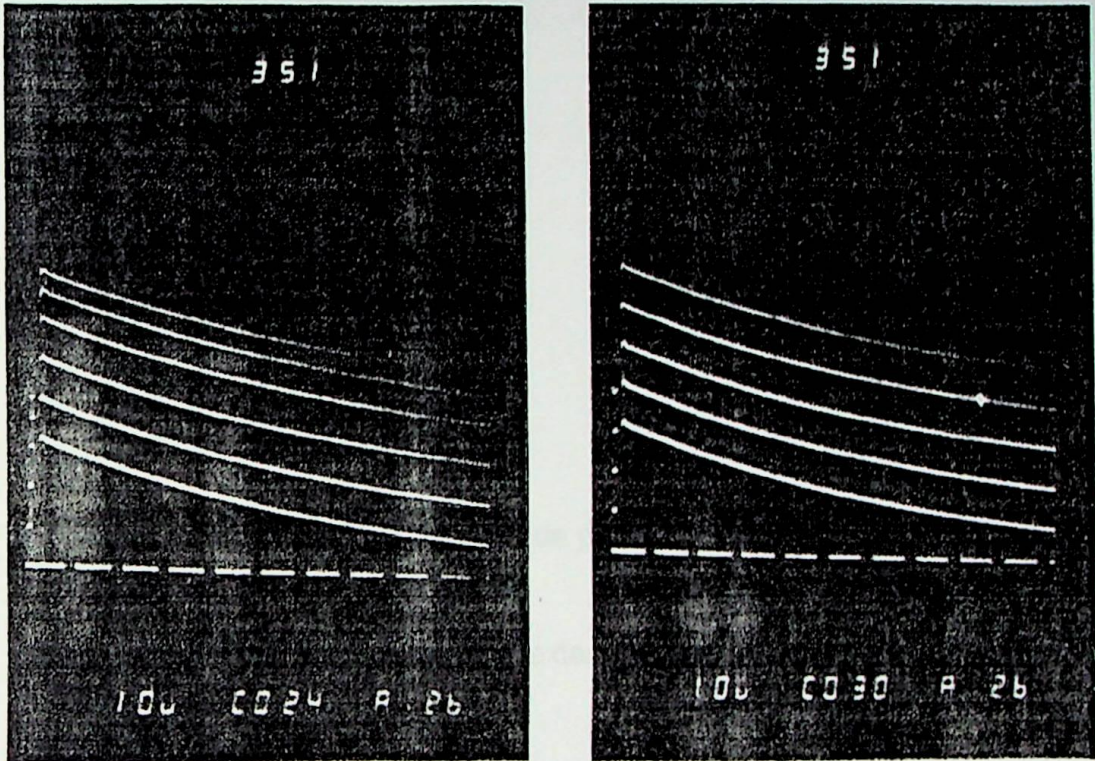


Figura 4.11 – Aplicação de tensão de polaridade positiva (amostra 1)



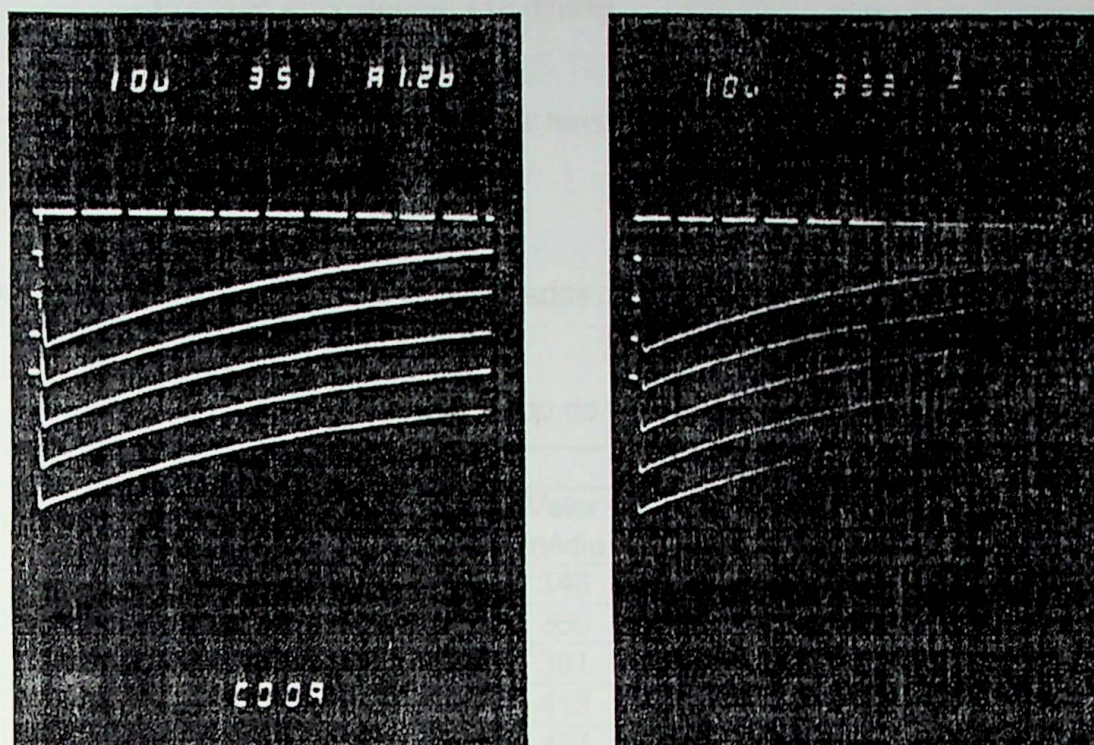


Figura 4.12 – Aplicação de tensão de polaridade negativa (amostra 1)

- Verificação do nível de descarga externa, sob impulso atmosférico, com forma de onda normalizada

A amostra 2 do terminal polimérico foi submetida a 3 aplicações de impulsos em polaridades positiva e negativa, com forma de onda normalizada e tensão de 350 kV ( $\pm 3\%$ ), equivalente a 100% do NBI. Este valor foi gradativamente aumentado, em 5% do valor inicial, com 3 aplicações em ambas as polaridades, até a verificação dos valores de descargas externas.

Quando da mudança de polaridade foram feitas aplicações de impulsos reduzidos, em polaridade inversa, para despolarização do dielétrico <sup>[19]</sup>.

**NOTAS:**

1. Condições de ensaio
  - Temperatura de bulbo seco: 25 °C
  - Temperatura de bulbo úmido: 18 °C

- Pressão atmosférica: 718 mmHg

- Umidade relativa: 60%

2. Os valores aplicados de tensão não foram corrigidos para as condições ambientais.

Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Resultado do ensaio de tensão

% NBI	Polaridade Positiva				Polaridade negativa			
	Apl.1	Apl.2	Apl.3.	Valor médio	Apl.1	Apl.2	Apl.3.	Valor médio
100	346	346	346	346	344	346	346	345
105	364	367	366	366	368	368	368	368
110	394	394	385	391	392	396	392	393
115	413	413	414	413	410	410	410	410
120	427	427	427	427	427	427	427	427
125	438	443	443	441	446	445	445	445
130	462	462	462	463	463	463	463	463
135	480*	480*	481*	480*	485	485	485	485
140	-	-	-	-	488	488	488	488
145	-	-	-	-	505	505	505	505
150	-	-	-	-	524	524	524	524
155	-	-	-	-	543*	543*	543*	543*

(\*) Valores correspondentes a descargas externas.

- Ensaio de névoa salina

A amostra 3 do terminal polimérico foi submetida ao ensaio de névoa salina, com concentração de 20 g/l de cloreto de sódio em água, por 500 horas e tensão aplicada de 44 kV, conforme figura 4.13 <sup>[19]</sup>.

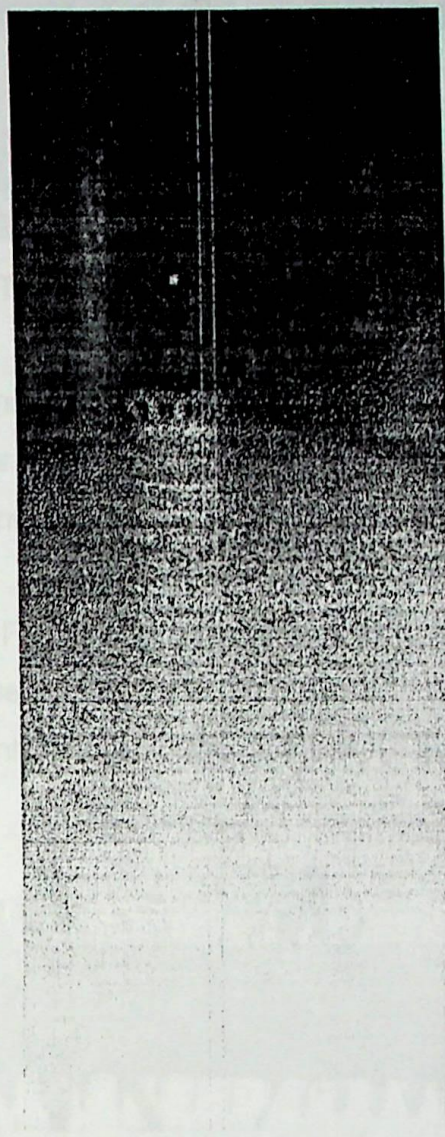


Figura 4.13 – Ensaio de névoa salina

O terminal polimérico suportou as 500 horas de ensaio a que foi submetido com algumas descargas superficiais, porém não sofrendo descargas externas que provocassem a interrupção do ensaio, como pode ser observado na figura 4.14.

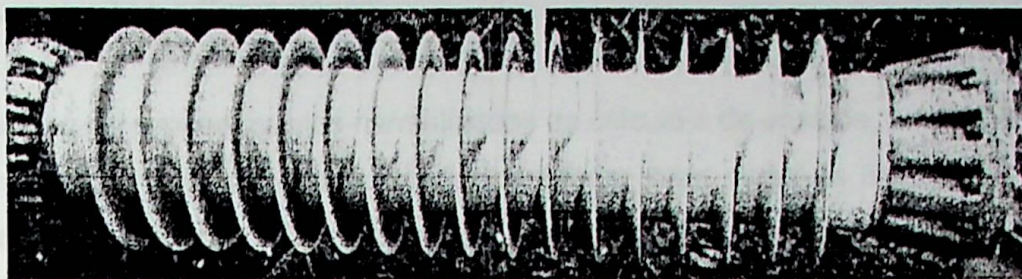


Figura 4.14 – Terminal ótico após ensaio de névoa salina <sup>[19]</sup>

NOTA: Ao término do ensaio de névoa salina o terminal polimérico foi lavado com água corrente notando-se grande facilidade para a remoção da camada de sal depositada durante o ensaio, não se constatando quaisquer danos à superfície do material. A seguir, a amostra foi submetida ao Ensaio de Tensão Suportável em Frequência Industrial, a seco, com aplicação de 140 kV por 1 minuto, não se constatando perfuração do dielétrico ou descarga externa no terminal, conforme mostrado na figura 4.15.

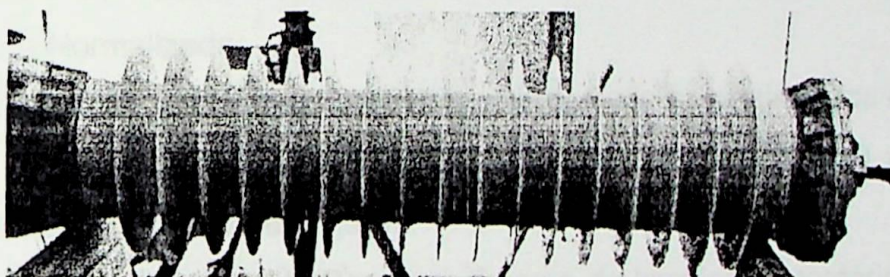


Figura 4.15 – Terminal ótico após ensaio de tensão suportável em frequência industrial a seco

## 5. Conclusões e Comentários

A adoção de procedimentos normalizados de cálculo e de ensaios, nos quais foram respeitadas as condições de montagem, bem como os limites pré-estabelecidos para as solicitações, permitiu, para os três protótipos ensaiados, a obtenção dos seguintes resultados <sup>[12]</sup>:

– Ensaio de Descargas Parciais:

Para o limite máximo sob tensão fase-terra de 44 kV foram obtidos valores da ordem de 3 pC.

– Ensaio de Tensão Suportável em Frequência Industrial a Seco:

Ausência de descargas externas ou internas aos terminais óticos, para uma aplicação de 140 kV eficazes por 1 minuto.

– Ensaio de Tensão Suportável em Frequência Industrial sob Chuva:

Ausência de descargas externas ou internas aos terminais óticos, para uma aplicação de 140 kV eficazes por 10 segundos.

Ensaio de Tensão Suportável de Impulso Atmosférico, com Forma de Onda Normalizada

Ausência de descargas externas ou internas aos terminais óticos quando da aplicação de 10 impulsos de 350 kV com forma  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$ , nas polaridades positiva e negativa.

– Verificação do Nível de Descarga Externa de Impulso Atmosférico, com Forma de Onda Normalizada:

Aplicação de impulsos com forma  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$ , a partir de 350 kV, polaridades positiva e negativa, crescentes em degraus de 5% até a ocorrência de evidências de descargas externas ou internas aos terminais óticos.

Assim, foram determinados os limites de suportabilidade para as polaridades positiva e negativa de 480 kV e 543 kV, respectivamente.

– Ensaio de Névoa Salina:

Apenas um dos protótipos foi submetido ao ensaio de névoa salina, sob tensão aplicada de 44 kV e concentração salina de 20 g/litro, grau médio

de poluição, durante 500 horas, período no qual pode ser observada a ocorrência de atividades elétricas superficiais que não resultaram em descarga total, o que resultaria na interrupção do ensaio.

Após a realização do ensaio o protótipo foi submetido à inspeção externa, quando pode ser constatado um processo de degradação natural no invólucro, mais especificamente na borracha de silicone. O protótipo foi submetido, então, a um novo ensaio de tensão suportável em frequência industrial a seco, e também neste ensaio não houve a ocorrência de evidências de descargas externas ou internas ao terminal ótico.

Como pode ser observado os resultados dos ensaios estão de acordo com os valores previstos inicialmente e assim é possível afirmar que o terminal ótico desenvolvido apresenta uma elevada probabilidade de suportar as solicitações de campo existentes nos sistemas de classe de tensão 72,5 kV.

A tabela 5.1 apresenta as principais características do terminal ótico desenvolvido para a classe de tensão de 72,5 kV.

Tabela 5.1 – Características Técnicas do Terminal Ótico – 72,5 kV

Terminal Ótico – 72,5 kV	
Tensão nominal (kV)	69
Capacidade de fibras	72
Comprimento (mm)	975
Diâmetro máximo (anel de equalização de potencial) (mm)	420
Diâmetro máximo do invólucro (mm)	232
Distância de escoamento (mm)	1950
Tensão suportável, 60 Hz a seco (kV)	140
Tensão suportável, 60 Hz, sob chuva (kV)	140
Nível básico de isolamento (kV)	350
Nível de descargas parciais – 44 kV (pC)	< 3

A aplicação desta modalidade de cabos óticos atinge na Europa a ordem de 1000 km em sistemas de distribuição em média tensão, basicamente na Polónia. Para níveis de tensão mais elevados, 30 e 110 kV, em 1993 existiam instalados, na Áustria e na Alemanha, respectivamente, 12 e 13 km de cabo OP-PW.

A tecnologia e os métodos de ensaio relacionados ao material do invólucro (borracha de silicone) são, a exemplo de qualquer isolador polimérico, de responsabilidade de seu fabricante, que neste caso detém vasta tecnologia e experiência na área. Esta condição foi amplamente discutida com os responsáveis pela instalação desse sistema no Brasil, que concordaram em analisar os resultados dos ensaios de tipo do fabricante do invólucro polimérico, mantendo obviamente as restrições usuais caso fossem detectadas falhas e problemas.

Deste modo, considerou-se que a instalação em campo deste tipo de material não implicaria na ocorrência de grandes problemas, uma vez que a tecnologia utilizada na manufatura dos invólucros conta com cerca de 15 anos de aplicação.

Podem ser instalados isoladores de porcelana, porém devem ser observados fatores como dimensionamento da estrutura suporte e eventuais dificuldades de montagem.

Os ensaios realizados permitem concluir que os terminais óticos apresentam um bom índice de desempenho em relação aos aspectos de projeto e verificação em laboratório, portanto é razoável supor que também no campo os terminais óticos venham apresentar um bom desempenho.

Não existem, ainda, dados relativos ao desempenho operativo deste sistema, uma vez que não houve avanços nas tratativas entre empresas de energia elétrica e de telecomunicações para a implantação de uma linha

aplicando esta tecnologia. Porém, esforços têm sido envidados nesta direção dada a relevância de haver este tipo de sistema em operação.

Contudo, deve ser ressaltado que a obtenção de dados de campo apresentam algum grau de dificuldade, uma vez que seria necessário realizar inspeções periódicas para a coleta de dados de operação, o que nem sempre é possível.

Assim, uma boa alternativa para a avaliação de desempenho do sistema é realizar ensaios sintéticos em um sistema composto de cabo OP-PW e terminal ótico. Nestes ensaios são reproduzidas as condições dielétricas e térmicas, através de aplicação de tensão e de correntes via indução, respectivamente.

Estes ensaios permitem reproduzir todos os esforços térmicos em regime permanente e verificar como estes esforços podem influir na degradação das fibras óticas no interior do cabo OP-PW, uma vez que podem ser repetidos várias vezes.

Com respeito aos cabos OP-PW, ou ainda, em uma série de aplicações recentes no Brasil cabos OP-GW isolados, o desenvolvimento dessa tecnologia permite a aplicação de links óticos em linhas de classe de tensão 72,5 kV, que na região sudeste são construídas sem cabos pára-raios. Paralelamente, esse tipo de acessório e conceito estende a utilização dos sistemas OP-GW para as linhas na classe de tensão de 765 kV, uma vez que estas linhas são construídas com os cabos de guarda isolados.

Quando se observa que por motivos de corrosão das fundações das linhas de transmissão existe uma tendência a trabalhar com cabos de guarda isolados, a solução proposta pode ser o fator decisivo no processo de escolha entre cabos óticos metálicos e dielétricos.

6. Referências Bibliográficas

- [1] NISHIMURA, F. et al; "Cabos Óticos Aéreos e suas Aplicações", ALCOA ALUMÍNIO S.A., 1995
- [2] ARELLANO, R.R., "Critérios de Implantação de Sistemas de Comunicação Utilizando Cabos Pára-Raios com Fibra Ótica", Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, 1997.
- [3] <http://www.furukawa.com.br/pdf/optico.pdf>
- [4] [http://www.pirelli.com.br/pt\\_BR/cables\\_systems/telecom/prod\\_sol/optic\\_cables/para\\_raios.jhtml](http://www.pirelli.com.br/pt_BR/cables_systems/telecom/prod_sol/optic_cables/para_raios.jhtml)
- [5] D'Ajuz, et al "A Cura da Malária no Setor Elétrico"; Palestra ELETRO NORTE.
- [6] Martinez, M.L.B. et al "Estudos Elétricos Necessários para Implantação da Tecnologia de Cabos Pára-Raios Energizados", VIII Encontro Regional Latino Americano da Cigré, Jun/99.
- [7] Martinez, M.L.B., D'Ajuz, A., "Requisitos Eletro-Mecânicos Necessários aos Sistemas de Fibras Óticas Quando de Cabos Pára-Raios Energizados", VIII Encontro Regional Latino Americano da Cigré, Jun/99.
- [8] NISHIMURA, F. et al; "Novos Sistemas Óticos Aéreos: OP-PW e OP-MW", ALCOA ALUMÍNIO S.A., 1996.
- [9] "Porcelana ou Material Composto (Composite Insulator) como Isoladores em Equipamentos de Alta Tensão', CELLPACK, 1993.
- [10] CARDOSO, J.R., "Introdução ao Método dos Elementos Finitos para Engenheiros Eletricistas", Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1994.

- [11] "Sistema OP-PW – Cálculo do Gradiente Elétrico", ALCOA ALUMÍNIO S.A., 1996.
- [12] Martinez, M.L.B. et al, "Cabos óticos energizados – OPPW projeto e ensaios dos dispositivos de interface entre os sistemas de potência e comunicação", XIV SNPTEE, Outubro/97.
- [13] NBR 5032/84 – "Isoladores de Porcelana ou Vidro para Linhas Aéreas e Subestações de Alta Tensão" – Especificação.
- [14] NBR 6939/81 – "Coordenação do Isolamento" – Procedimento
- [15] NBR 6940/81 – "Técnicas de Ensaio Elétricos de Alta Tensão – Medição de Descargas Parciais" – Procedimento.
- [16] NBR 6936/92 – "Técnicas de Ensaio Elétricos de Alta Tensão".
- [17] NBR 5049/85 – "Isoladores de Porcelana ou Vidro para Linhas Aéreas e Subestações de Alta Tensão" – Método de Ensaio.
- [18] NBR 9314/86 – "Emendas e Terminais para Cabos de Potência com Isolação para Tensões de 1 a 35 kV" – Especificação.
- [19] Relatório de Ensaio Dielétricos em Terminais Óticos - 3M LAB ALTA TENSÃO – 1996.