



**FACULDADE DE ENGENHARIA  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉCTRICA**

**Proposta de Instalação de Cabo de Guarda para Mitigação dos Disparos na Linha de  
Alta Tensão de 110 kV da CL9 (SE-Chicumbane – SE-Lindela)**

Nhancale, Elias Isaías

**Supervisores:**

Eng. Manuel Jossai Cumbi (UEM)

Eng. Mário Focas (EDM)

Maputo, Junho de 2024



**FACULDADE DE ENGENHARIA  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉCTRICA**

**Proposta de Instalação de Cabo de Guarda para Mitigação dos Disparos na Linha de Alta Tensão de 110 kV da CL9 (SE-Chicumbane – SE-Lindela)**

Nhancale, Elias Isaías

**Supervisores:**

Eng. Manuel Jossai Cumbi (UEM)

Eng. Mário Focas (EDM)

Maputo, Junho de 2024

## DEDICATÓRIA

*Este trabalho dedico em especial a minha mãe Teresa Magaia, Minha parceira Rosa Manjate, minha filha Elaine Elias e meus irmãos, António e Gervásio Nhancale.*

## **AGRADECIMENTOS**

A todos os que contribuíram presto os meus maiores agradecimentos. Entretanto, não seria justo e, muito menos correcto, deixar passar esta oportunidade de agradecer á aquelas que particularmente contribuíram para a sua realização. Que passo a manifestar o meu agradecimento a todos e de uma forma particular:

- ❖ Agradeço a Deus pela saúde e força de trabalho.
- ❖ Agradeço em primeiro aos meus pais.
- ❖ Agradeço aos meus irmãos, por sempre me terem apoiado na decisão de qual caminho tomar e por sempre estarem demonstrando vosso amor e carinho para comigo.
- ❖ Agradeço ao corpo docente da faculdade de engenharia que influenciaram na minha formação até ao presente momento.
- ❖ Agradeço aos meus colegas que muito me apoiaram, especificamente ao Gerson Chambe, Carlos Muchanga, Dinis Manganhela e Manuel Zumba.

## RESUMO

Este relatório teve por base a realização do estágio profissional na EDM – Direcção de Transmissão Sul. O projecto consiste em dimensionar o cabo de guarda OPGW numa linha de Transmissão de alta tensão de 110 kV designada de CL9, que liga subestação de Chicumbane a subestação de Lindela, na região sul de Moçambique, onde o cabo anteriormente colocado se encontra corroído devido a condições adversas de temperatura. O cabo corroído da linha era de aço com alma de alumínio, porem deste projecto é o OPGW, um cabo que apresenta diversas vantagens, como melhor resistência mecânica, maior resistência a corrosão, menos pesado em relação ao cabo de aço com alma de alumínio e possui duas funcionalidades (a do cabo de guarda e transmissão de informação), pois ele tem uma alma de fibra óptica. No entanto apresenta-se inicialmente uma base teórica referente as linhas de transmissão de alta tensão, seguidamente, expõem-se a memória descritiva e justificativa do projecto, ou seja, são efectuados os cálculos mecânicos do cabo OPGW, esses cálculos que nos possibilitam conhecer as tensões máximas e mínimas a serem aplicadas sobre no cabo, avaliar a estabilidade dos respectivos apoios que irão suportar o cabo de guarda e por último é feita uma abordagem sobre os impactos que este tipo de projecto tem no meio ambiente em que estão inseridos, bem como as medidas de prevenção e minimização.

Palavras – chaves: cálculo de linhas de transmissão, cabo de guarda OPGW.

## ÍNDICE

DEDICATÓRIA .....	i
AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO.....	i
ABREVIATURAS, SIMBOLOS E ACRONIMOS .....	i
CAPÍTULO I. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Contextualização .....	1
1.2. Formulação do Problema .....	1
1.2. Justificativa .....	2
1.4. Objectivos .....	2
1.5. Metodologia .....	2
1.6. Organização do trabalho.....	3
CAPÍTULO II. REVISÃO LITERÁRIA .....	4
2.1. Estrutura de um sistema eléctrico de potência .....	4
CAPITULO III. DIMENSIONAMENTO DE CABO DE GUARDA .....	25
3.1. Características da Linha Aérea.....	25
3.2. Características do Cabo de Guarda.....	25
3.3. Cálculo Mecânico.....	26
CAPITULO IV. AVALIAÇÃO DE RISCO NA LINHA CHICUMBANE-LINDELA .....	42
4.1. Avaliação de riscos.....	42
CAPITULO V. IMPACTO ECONOMICO.....	45
CAPITULO VI. IDENTIFICAÇÃO DEIMPACTOS AMBIENTAIS.....	48
5.1. Presença de torres e de linha eléctrica.....	48
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	51
ANEXO.....	53

## LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS

ACS	<i>Aluminium Cladded Steel</i>
ACSR	<i>Aluminium Cable Steel Reinforced</i>
AGS	<i>Armour Grip Suspension</i>
AT	Alta Tensão
MT	Media Tensão
BT	Baixa Tensão
EDM	Electricidade de Moçambique
OPGW	<i>Optical Ground Wire</i>
RSLEAT	Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão
SE	Subestação
SEE	Sistema Eléctrico de Energia
°C	Grau Celsius
A	Ampere
daN	Deca Newton
kA	Quilo ampere
kg	Quilograma
kV	Quilovolt
kW	Quilowatt
m	Metro
mm	Milímetro

## LISTA DE FIGURAS

FIGURE 1-ESTRUTURA DE UM SISTEMA DE POTÊNCIA.....	4
FIGURE 2 - EXEMPLO DE SECÇÃO CONDUTOR ACSRC.....	8
FIGURE 3 - EXEMPLO CONDUTOR ACCC.....	8
FIGURE 4- COMPORTAMENTO TÉRMICO DO CABO ACCC.....	10
FIGURE 5 - GEOMETRIA DE CABO DE GUARDA, FIGURA ACIMA COM CABO DE GUARDA E FIGURA ABAIXO SEM CABO DE GUARDA.....	11
FIGURE 6 - SECÇÃO CONDUTORA OPGW.....	12
FIGURE 7- A ESQUERDA TEMOS ISOLADOR CERÂMICO E A DIREITA TEMOS ISOLADOR DE VIDRO.....	13
FIGURE 8 - ISOLADOR RESINA E ISOLADOR A COMPÓSITO.....	14
FIGURE 9 - CADEIA DE ISOLADORES DE SUSPENSÃO.....	15
FIGURE 10 - CADEIA DE ISOLADORES DE AMARRAÇÃO.....	15
FIGURE 11- APOIO DE ALINHAMENTO.....	16
FIGURE 12- APOIO DE ANGULO.....	16
FIGURE 13- APOIO DE DERIVAÇÃO.....	17
FIGURE 14- APOIO FIM DE LINHA.....	17
FIGURE 15 - APOIO DE REFORÇO EM ALINHAMENTO.....	17
FIGURE 16 - ESQUEMAS DOS TIPOS DE AMARRAÇÃO.....	18
FIGURE 17 - ESQUEMA DA FUNDAÇÃO DO APOIO METÁLICO.....	19
FIGURE 18 - LINHA COM BALIZAGEM.....	19
FIGURE 19 - BIRD FLIGHT DIVERTER BFD.....	20
FIGURE 20 - CONJUNTO SINALÉTICA DE UM APOIO.....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
FIGURE 21- LIGAÇÃO A TERRA DE POSTES DE BETÃO (A ESQUERDA) E METÁLICO (A DIREITA).....	21
FIGURE 22 - LIGAÇÃO A TERRA DE ARMAÇÃO A UM POSTE DE BETÃO.....	22
FIGURE 23- MODELO ELECTROGEOMÉTRICO.....	23
FIGURE 24 - MAPA DA REDE SUL 110 kV.....	25
FIGURE 25- DIAGRAMA DE DECISÃO DO ESTADO MAIS DESFAVORÁVEL.....	35
FIGURE 26 -LIGAÇÃO DE REDE DE TERRA AO APOIO.....	40

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS E MECÂNICAS DO CABO DE GUARDA OPGW AS/AA/32/113 .....	26
TABELA 2 VALORES DA PRESSÃO DINÂMICA DO VENTO, EM FUNÇÃO DA ALTURA DO SOLO .....	29
TABELA 3 VALORES DA PRESSÃO DINÂMICA DO VENTO, EM FUNÇÃO DA ALTURA DO SOLO PARA UMA ALTURA SUPERIOR A 600M.....	29
TABELA 4 VALORES DE COEFICIENTE DE REDUÇÃO.....	30
TABELA 5 VALORES DE COEFICIENTE DE REDUÇÃO.....	30
TABELA 6 VALORES DE COEFICIENTE DE REDUÇÃO.....	33
TABELA 7 TENSÃO DE MONTAGEM PARA CADA CANTÃO.....	37
TABELA 8 TEMPERATURA A CONSIDERAR PARA O ESTADO DE VERÃO .....	37
TABELA 9 FREQUÊNCIA DE DISPARO DA CL9.....	47

# CAPÍTULO I. INTRODUÇÃO

## 1.1. Contextualização

Sistemas eléctricos de potência (SEP) são grandes sistemas de energia que englobam a geração, transmissão e distribuição de energia eléctrica. A geração de energia eléctrica faz-se em Centrais localizadas em função de suas características próprias. Centrais hídricas, que usam a força das águas dos rios e lagos através de represas. São localizadas nos pontos dos rios e lagos considerados mais eficientes para o armazenamento do volume de água ideal.

Centrais a Gás localizam-se junto aos gasodutos ou conduta de transporte (Central de Temane e central de Ressano Garcia).

Centrais térmicas podem ser localizadas em pontos mais convenientes para a transmissão e controle e geradores eólicos são localizados em pontos com maior volume de ventos.

Os centros de geração de energia eléctrica geralmente encontram-se distantes dos centros de consumo, sendo por essa razão necessário realizar-se o seu transporte. Para realizar esse transporte de energia eléctrica dos centros de produção para os consumidores são utilizadas as linhas de transporte de energia eléctrica, sendo em AT, MT e BT para o caso em particular as linhas aéreas de alta tensão, porém estas devem estar protegidas contra as descargas atmosféricas que estas encontram-se sujeitas.

A protecção destas descargas atmosféricas, consegue-se com a instalação de cabos de guarda, evitando deste modo que as linhas estejam sempre sujeitas a disparos ou desligamento indesejadas devido a ocorrência das descargas atmosféricas. Com este trabalho pretende-se mitigar os efeitos dos disparos ou desligamento indesejadas na linha de alta tensão de 110 KV, que interliga SE- Chicumbane a SE-Lindela designada por CL9.

## 1.2. Formulação do Problema

As linhas de alta tensão, são sem sombra de dúvidas de elevada importância pois são responsáveis pelo transporte de energia eléctrica das centrais geradoras até aos centros de consumo. Pela sua relevância, quando estes entram em defeito (avaria) trazem grandes prejuízos a concessionária, sendo estes problemas criados maioritariamente pela inexistência do cabo de guarda. Tendo em conta que, o cabo de guarda possui a função de impedir que as descargas atmosféricas atinjam os condutores de fase, reduzindo deste modo as possibilidades de ocorrência de interrupção no fornecimento de energia eléctrica. Temos como referência a linha designada por CL9 que interliga a subestação de Chicumbane a subestação de Lindela. É uma linha de capital importância para a empresa EDM, tendo em conta que, ela fornece a

energia eléctrica nas províncias de Gaza e Inhambane. Porém, é uma linha que tem sofrido muita das vezes os disparos devido a obsolência do cabo de guarda.

O que fazer de modo a reduzir significativamente os disparos da linha contra descargas atmosféricas na linha CL9?

### **1.3. Justificativa**

Tendo em conta ao elevado nível de disparos da linha devido o índice de descargas atmosféricas nessa linha, vários estudos, estão sendo feito para minimizar este impacto indesejado, podendo com isso, a instalação do cabo OPGW – usando a técnica moderna por forma a minimizar os impactos de descargas atmosféricas na linha. O cabo OPGW é adequado para instalação em linhas de transmissão, pois tem a dupla função de fio de terra e fio de comunicação. O OPGW conduz a corrente de curto-circuito e fornece resistência contra a luz, pois protege os condutores.

### **1.4. Objectivos**

#### **1.3.1. Objectivo Geral**

- Dimensionar o cabo de guarda para a linha de alta tensão de 110 KV (CL9);

#### **1.3.2. Objectivos Específicos**

- Seleccionar o cabo de guarda adequado para mitigação das descargas atmosféricas;
- Avaliar o impacto económico trazido pelas interrupções do fornecimento da energia eléctrica no troço em causa.
- Avaliar a estabilidade dos apoios a ser empregue o cabo de guarda;
- Fazer avaliação de risco na linha (Chicumbane-Lindela);

### **1.5. Metodologia**

Para se alcançar os objectivos acima traçados, será necessário o uso de pesquisa bibliográfica, que segundo Martins e Pinto (2001, p.410) a pesquisa bibliográfica procura explicar um problema e propôr soluções a partir de referências teóricas publicadas em documentos e contribuições científicas. Será usada esta metodologia para elaboração do resumo teórico e procedimentos da memória descritiva e justificativa. Para o alcance dos objectivos específicos também foi necessário uma pesquisa em campo, esta envolve a colecta de dados directamente no local onde os fenómenos ou situações de interesse ocorrem, isso inclui observações,

entrevistas e questionários aos técnicos experientes na área e com o conhecimento da linha, por forma a ter mais informações sobre as características da linha.

## **1.6. Organização do trabalho**

O trabalho está organizado em capítulos, sendo que este é constituído por:

**CAPÍTULO I: considerações iniciais**, neste capítulo faz-se uma breve apresentação do trabalho, a parte introdutória, apresenta-se a formulação do problema, a justificativa da escolha do tema, os objectivos do trabalho e a respectiva metodologia usada para a realização do presente relatório.

**CAPÍTULO II: revisão da literatura**, aqui faz-se a descrição e fundamentação teórica dos componentes que fazem parte do sistema a ser projectado, assim como os conceitos dos elementos envolvidos na elaboração do relatório.

**CAPÍTULO III: dimensionamento**, constitui a base do projecto, onde se apresenta os cálculos efectuados nos dimensionamentos.

**CAPÍTULO IV:** neste capítulo faz-se avaliação de risco na linha Chicumbane - Lindela.

**CAPÍTULO V:** neste capítulo faz-se avaliação do impacto ambiental no acto de implementação e depois implementação.

**CAPÍTULO VI: considerações finais**, neste ponto são apresentadas as conclusões tiradas e recomendações.

**Anexos**, são apresentados peças desenhadas, assim como algumas especificações técnicas dos materiais e sua montagem.

## CAPÍTULO II. REVISÃO LITERÁRIA

### 2.1. Estrutura de um sistema eléctrico de potência

Para *Hadi Saadat*, sistemas eléctricos de potência (SEP) são grandes sistemas de energia que englobam a geração, transmissão e distribuição de energia eléctrica. A geração de energia eléctrica faz-se em Centrais localizadas em função de suas características próprias. Centrais hídricas, que usam a força das águas dos rios e lagos através de represas, são localizadas nos pontos dos rios e lagos considerados mais eficientes para o armazenamento do volume de água ideal. Centrais a Gás localizam-se junto aos gasodutos ou conduta de transporte (Central de Temane e de Ressano Garcia) Centrais térmicas podem ser localizadas em pontos mais convenientes para a transmissão e controle. Geradores eólicos são localizados em pontos com maior volume de ventos.

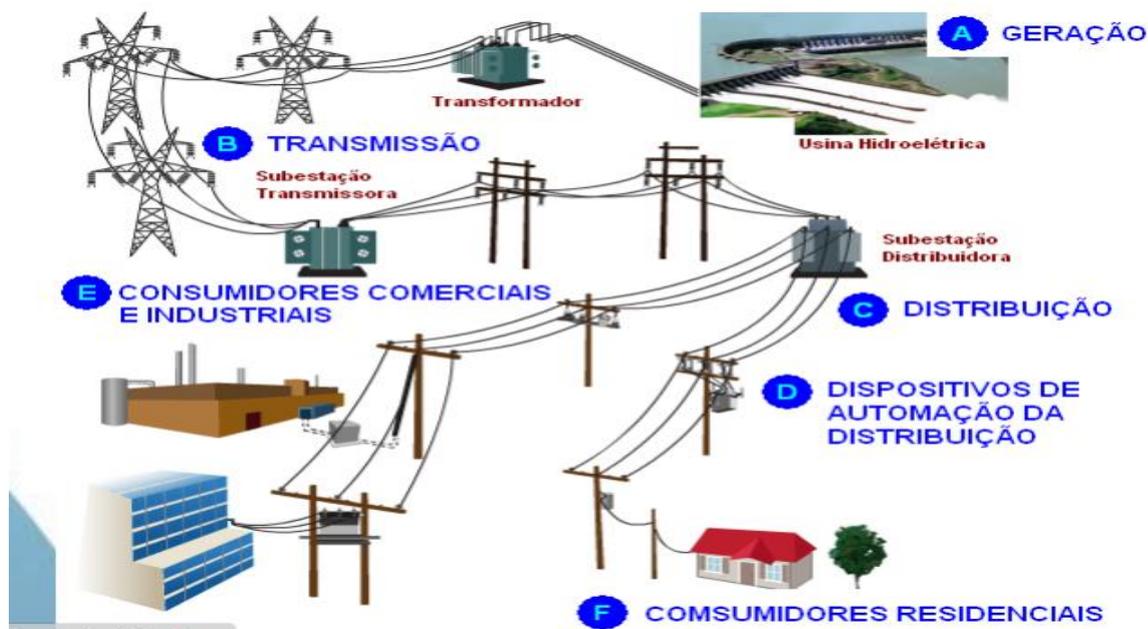


Figura 1-Estrutura de um sistema de potência

FONTE: Adolpho Eletricista, 2015

O objectivo de um SEP é gerar, transmitir e distribuir energia eléctrica atendendo a determinados padrões de fiabilidade, disponibilidade, qualidade, segurança e custos, com o mínimo impacto ambiental e o máximo de segurança pessoal.

### 2.1.1. Geração de energia eléctrica

Geração de energia eléctrica uma tensão alternada é produzida, a qual é expressa por uma onda sinusoidal, com frequência fixa e amplitude que varia conforme a modalidade do atendimento em baixa, média ou alta tensão. Essa onda sinusoidal propaga-se pelo sistema eléctrico mantendo a frequência constante e modificando a amplitude à medida que trafegue por transformadores. Os consumidores ligam-se ao sistema eléctrico e recebem o produto e o serviço de energia eléctrica.

### 2.1.2. Linha de transporte de alta tensão

Transmissão de energia eléctrica é o processo de transportar energia entre dois pontos. O transporte é realizado por linhas de transmissão de alta potência, a rede de transmissão de energia é dividida em duas faixas: **a transmissão propriamente dita**, para potências mais elevadas e ligando grandes centros, **e a distribuição**, usada dentro de centros urbanos.

Em geral apenas poucos consumidores com um alto consumo de energia eléctrica são conectados às redes de transporte onde predomina a estrutura de linhas aéreas. Cada linha de transmissão possui um nível de tensão nominal, onde encontramos valores até de 750 kV, sendo que para o caso de Moçambique o nível máximo operado pela EDM é de 400 kV (Linha da MOTRACO). As linhas de distribuição são usualmente na faixa de 66, 33, 22 e 11 kV para consumidores industriais e 0,4 kV para consumidores domésticos. Para a conversão entre níveis de tensão, são usados como equipamento fundamental o transformador de potência. Os transformadores de grande porte (para grandes elevações ou diminuições na tensão do sistema) encontram-se normalmente nas subestações.

#### 2.1.2.1. Linhas de transmissão subterrâneas

Uma solução para os grandes centros urbanos é o uso de linhas subterrâneas. A principal dificuldade é na isolação e blindagem dos condutores, de forma a acomodarem-se nos espaços reduzidos, ao contrário das linhas aéreas que utilizam cabos nus, utilizando-se do ar como isolante natural. O uso de condutores isolados também dificulta a dissipação de calor, reduzindo consideravelmente a capacidade da linha.

### **2.1.2.2. Linhas de transmissão submarinas**

A travessia de rios e canais por linhas aéreas demanda um projecto especial, por quase sempre que haver a necessidade de transpor um vai muito grande. Neste caso, a catenária formada pelos cabos será imensa, necessitando o uso de cabos com liga especial e torres gigantescas. O uso de linhas submarinas evita o uso destas estruturas, reduzindo a poluição visual e evitando problemas em locais com travessias de navios. A linha submarina tem a limitação de possuir uma grande capacitância, reduzindo o seu alcance prático para aplicações em corrente alternada, facto no qual é preferível o uso de linhas em corrente contínua.

### **2.1.2.3. Linhas aéreas de alta tensão**

As linhas aéreas são as mais predominantes, pelo facto de a sua implementação ser relativamente fáceis comparativamente as subterrâneas e submarinas. Visto que usam como meio isolante o ar e geralmente utilizam-se condutores nus para tensões nominais de transporte, Porém para linhas de distribuição em cidades e zonas inter-urbanas recomenda-se o uso de condutores isolados.

### **2.1.3. Elementos constituintes das linhas**

Uma linha eléctrica, segundo o RSLEAT, é definida como o conjunto de condutores, de isolantes, de acessórios e de suportes destinados ao transporte e distribuição de energia eléctrica. Numa linha AT, os principais elementos constituintes são os seguintes:

- Condutores
- Cabos de guarda
- Isoladores
- Apoios, metálicos ou em betão armado, respetivas armações e fundações;
- Sistema de ligação à terra, por varetas revestidas de cobre e condutores de cobre;
- Conjuntos sinaléticos;
- Balizagem aeronáutica dos condutores e dos apoios, diurna e noturna, nos casos em que é obrigatória;
- Dispositivos de protecção à avifauna, nos casos em que se justifique.

### 2.1.3.1. Condutores

São o conjunto de cabos através dos quais a corrente eléctrica circula para transporte de energia eléctrica, dependendo do tipo de linha, estes podem ser nus ou com revestimento para o caso de linhas subterrâneas e submarinas, as características necessárias para condutores de linhas de transmissão:

- Alta condutibilidade eléctrica;
- Natureza e pureza do material condutor, que determina a sua resistividade  $\rho$  [ $\Omega.m$ ];
- Comprimento;
- Secção transversal útil;
- Temperatura;
- Frequência;
- Baixo custo;
- Boa resistência mecânica;
- Baixo peso específico;
- Alta resistência à oxidação e corrosão

Os materiais condutores mais empregados para as linhas de transmissão são:

- **Cobre** – depois do ferro, o cobre é o metal de maior uso na indústria eléctrica.
- **Alumínio** – possui propriedades mecânicas e eléctricas que o tornam de fundamental importância em certas aplicações da engenharia.

#### Condutores ACSR

Para linhas aéreas com uma grande extensão em quilómetros, o condutor ACSR é o mais indicado para realizar o seu transporte de energia. É ainda versátil para ser utilizado como cabo de guarda para protecção das linhas MAT e AT contra descargas atmosféricas. É constituído por uma ou várias camadas de fios de alumínio, dispostos em camadas concêntricas em torno de um núcleo (alma) de aço galvanizado de alta resistência. É possível variar a proporção relativa da área de secção transversal de alumínio e aço, a fim de se obter a melhor relação entre capacidade de transporte de corrente e resistência mecânica para cada aplicação. Apresenta também boa resistência à corrosão e boa relação entre peso e força. Apresenta-se um exemplo de um condutor ACSR, na Figura (2).

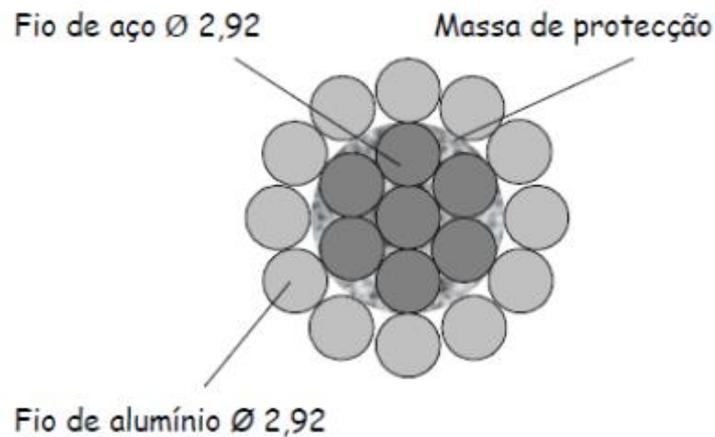


Figura 2 - Exemplo de secção condutor ACSRC

**FONTE:** Carvalho, 2018

### Condutores ACCC

O condutor ACCC é composto por um núcleo compósito de fibra de carbono e de vidro que se encontram ligados por uma resina epoxy de alta temperatura, sendo concebido como um sólido de uma só peça sem espaços vazios, tal como se pode observar na figura (3).



Figure a - Exemplo Condutor ACCC

**FONTE:** Carvalho, 2018

Para a produção deste núcleo característico recorre-se a um processo de ultrassão, no qual, as fibras de carbono e de vidro são impregnadas com resina e puxadas através de um molde especialmente aquecido para completar a secagem. Como este núcleo não é metálico, as perdas de histerese são eliminadas, que podem ser tão altas quanto 6% num condutor com núcleo com 3 camadas de aço e 20% num condutor com núcleo com camada única de aço, sob condições de corrente elevada. Pela mesma razão, este também não corrói, não oxida, não

sofre fadiga característica de materiais metálicos, como acontece nos condutores convencionais. As fibras utilizadas no núcleo são 25% mais resistentes e 60% mais leves que o aço, originando uma diminuição do peso do núcleo. Este tipo de condutor não só tem a particularidade da condução da corrente elétrica ser realizada através dos fios de alumínio mas também destes terem um formato trapezoidal de superfície lisa e suave que contribui para a dissipação da vibração eólica e serem totalmente recozidos, tornando os condutores mais compactos, e contribuindo para o aumento a longevidade do tempo de vida do condutor. Estas características permitem que o condutor ofereça uma maior condutividade. O facto dos fios de alumínio serem recozidos traz inúmeras vantagens como o aumento da condutividade e resistência à fadiga, mas provoca também uma diminuição da resistência à tracção do condutor, que é colmatada pelo próprio núcleo compósito, que é capaz de suportar todos os esforços a que o cabo é sujeito. Todo este alumínio adicional, característico dos condutores ACCC, tem uma grande contribuição para a redução das perdas da linha entre 30 e 40%.

Este tipo de condutor é utilizado em linhas aéreas AT com necessidade de diminuição das flechas, com a possibilidade de operar a altas temperaturas, quando comparado com outros condutores com o mesmo peso e diâmetro, uma vez que nestas altas temperaturas o comportamento térmico é realizado pelo núcleo, como será analisado na secção seguinte. Para além de todos estes benefícios na prestação do condutor, este tipo de condutor é mais viável economicamente, uma vez que reduz o custo geral do projeto para situações de aperfeiçoamento de linhas existentes ou, na futura construção de novas plataformas aéreas por este tipo de condutor, permitir flechas mais reduzidas e um aumento da capacidade de transporte.

### **Comportamento Térmico Condutor ACCC**

A principal particularidade dos condutores ACCC, é o facto de ser um condutor que consegue operar em altas temperaturas sem apresentar deformações plásticas e sem ter risco de rotura. Este fenómeno pode ser explicado pelo seu comportamento térmico, que é diferente devido ao seu núcleo compósito e ter ligas de alumínio ou alumínio recozido. Para explicarmos o seu comportamento térmico temos de primeiro definir o que é temperatura de ponto de Joelho. Esta coincide com o ponto em que o comportamento do aumento da flecha é alterado à medida que a temperatura vai subindo. Para descrever melhor este assunto, recorre-se a uma representação do gráfico da figura (4), que destaca este ponto de temperatura de Joelho ao se dividir em duas zonas:

- zona 1- pré ponto de Joelho;
- zona 2- pós ponto de Joelho

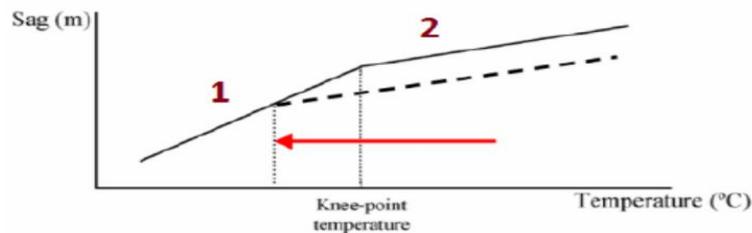


Figura 3- Comportamento térmico do cabo ACCC

**FONTE:** Carvalho, 2018

Ao analisarmos o gráfico da figura (3.3), é fácil concluir que para temperaturas abaixo do ponto de Joelho, o incremento da flecha é maior, ao mesmo tempo que para temperaturas acima do ponto de Joelho este incremento é menor. Esta redução do aumento da flecha deve-se à perda das propriedades mecânicas por parte do alumínio, tornando inexistente a sua contribuição para o comportamento físico do cabo que, a partir desse ponto, se restringe às suas funções eléctricas. Acima da referida temperatura de Joelho, apenas o núcleo compósito dá o seu contributo para o incremento da flecha. Esta conclusão é observável ao compararmos o aumento da flecha nas duas zonas, que é mais reduzido

Para temperaturas acima do ponto de temperatura de Joelho. Este comportamento físico do condutor, quando acima do ponto de Joelho, baseia-se apenas no coeficiente de expansão do núcleo compósito, que é menor que o mesmo coeficiente abaixo desse ponto, característica que é discriminada nas datasheet de todos os condutores ACCC e factor importante no cálculo dos parâmetros na equação de estados do cálculo mecânico descrito mais em pormenor no capítulo 5. Por este motivo, o aumento da flecha com a temperatura, é menor acima do ponto de Joelho.

*A função matemática da temperatura com a flecha depende de:*

- Coeficiente de expansão do condutor;
- Coeficiente de expansão do núcleo;
- Temperatura na qual ocorre o ponto de Joelho.

Analisando agora a influencia do comprimento dos vãos, podemos concluir que quanto maior

for o seu valor, menor será a diminuição da tensão no condutor à medida que a temperatura aumenta. Como a tensão do alumínio está associada à tensão do condutor, a sua diminuição também será necessariamente menor. Seguindo esta linha de raciocínio, é fácil chegar à conclusão de que quanto maior o comprimento do vão, maior será a temperatura do ponto de Joelho. Ainda no gráfico da figura (3.3) está evidenciado com uma seta vermelha a deslocação da temperatura do ponto de Joelho para valores de temperatura inferiores e verifica-se que é uma situação mais favorável para maximizar a operação a altas temperaturas e a tensões mais baixas, uma vez que o aumento da flecha torna-se menos acentuado a uma temperatura menor, permitindo que o condutor se mantenha em operação até temperaturas superiores aquando a temperatura do ponto de Joelho era superior (Carvalho, 2018).

### 2.1.3.2. Cabos de Guarda

As linhas aéreas de distribuição de energia, no caso de sofrerem descargas atmosféricas, estão sujeitas a falhas de isolamento que levam a curto-circuitos, o que pode levar a uma interrupção do serviço de fornecimento de energia. Para prevenir a danificação dos elementos das linhas aéreas contra descargas atmosféricas são usados os cabos de guarda. Os cabos de guarda são então colocados a um nível superior em comparação aos condutores da linha e estão ligados ao sistema terra, de forma a conseguirem intercepar uma descarga atmosférica, escoando-a para o solo, impedindo assim que as correntes de defeito atinjam e danifiquem os condutores e os restantes elementos das linhas aéreas.

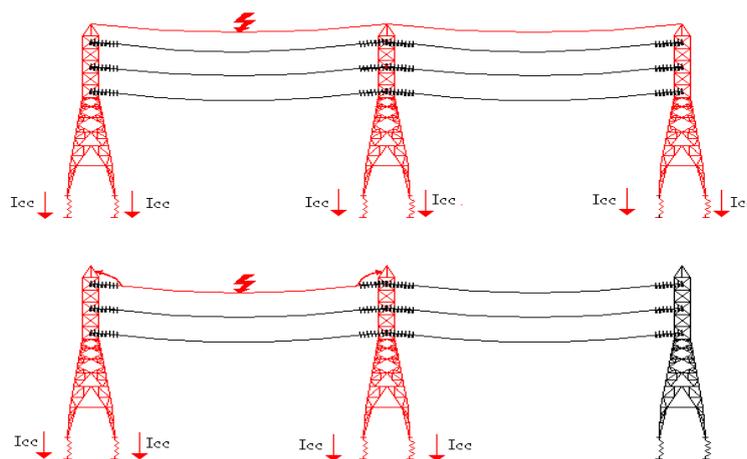


Figura 4 - Geometria de cabo de guarda, figura acima com cabo de guarda e figura abaixo sem cabo de guarda

**FONTE:** Autor

Tipicamente são utilizados dois tipos de cabo, cuja escolha depende da necessidade de acrescentar ligações de telecomunicações e telecomando, ou se existir a necessidade de

proteção contra descargas atmosféricas.

Para o primeiro caso, o cabo mais comum a ser utilizado é o Optical Power Ground Wire (OPGW), que se trata de um cabo constituído por um núcleo dielétrico com fibras óticas inseridas, um tubo para proteção mecânica e armação de fios condutores representado na figura (6).

*Como alternativa utiliza-se o cabo ACSR*

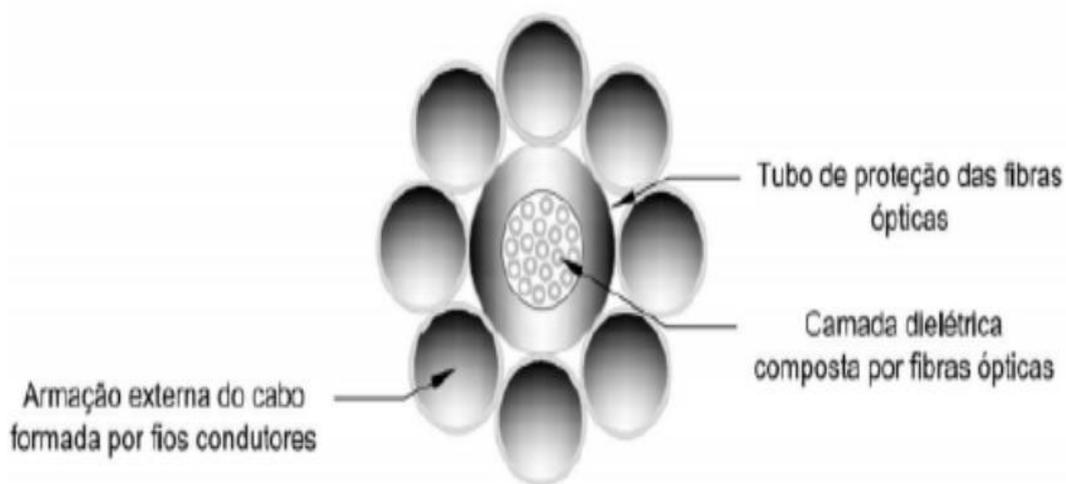


Figura 5 - secção condutora OPGW

**FONTE:** Carvalho, 2018

### **Secção dos Condutores**

No que diz respeito a escolha da secção dos condutores a adoptar, são vários os critérios a considerar. E, no entanto, de referir que em última análise a escolha da secção esta limitada as secções normalizadas existentes.

Assim, analisados os critérios e efectuados os cálculos que conduzem a um valor de secção transversal, deve ser escolhida a secção normalizada imediatamente superior. A escolha do tipo de condutores e a secção a utilizar esta a cargo do Planeamento da Gestão da Rede.

*Os critérios a considerar são os seguintes:*

- Intensidade de corrente admissível em regime permanente;
- Queda de tensão;
- Aquecimento;

- Características mecânicas dos condutores;
- Intensidade de curto-circuito admissível;
- Efeito Coroa;
- Aparelhagem de protecção;
- Perdas de energia;
- Preço.

### 2.1.3.3. Isoladores

Os isoladores são os elementos das linhas aéreas que têm como principal função impedir a passagem de corrente elétrica para os apoios, aliada à função mecânica de suporte dos cabos condutores. Para se proceder à seleção dos isoladores, é necessário ter em conta o nível de poluição das zonas por onde a linha é projetada. A nível construtivo os isoladores podem ser fabricados em porcelana, vidro, resina ou material compósito. Atualmente, uma vez que o fabrico de isoladores de porcelana é mais dispendioso, os isoladores de vidro são a escolha preferencial por possuírem boas características de isolamento, baixa fragilidade levando a baixos custos e uma melhor resposta às exigências de serviço. Nas figuras seguintes estão representados exemplos de isoladores de cerâmica e vidro, seguidos dos isoladores de resina e material compósito (Carvalho, 2018).



*Figura 6- A esquerda temos isolador cerâmico e a direita temos isolador de vidro*

**FONTE:** Carvalho, 2018

Para classificar o tipo de isolador, estes podem ser categorizados sendo do tipo rígido ou de cadeia. Os primeiros têm vantagens a nível económico, pelo seu menor custo de produção, mas são menos utilizados e inviáveis em linhas de alta tensão pela sua fragilidade, complicada

montagem e ao facto de, em caso de defeito, ser necessária a substituição do isolador, algo que os isoladores em cadeia não sofrem, visto serem emparelhados para que seja possível a remoção da campânula onde ocorre o defeito.



Figura 7 - Isolador resina e isolador a compósito

**FONTE:** Carvalho, 2018

As cadeias de isoladores contêm vários isoladores de vidro ou porcelana envidraçada, acessórios metálicos e material ligante que une os isoladores. Para níveis de tensão de 60 kV, as cadeias ainda incorporam um sistema anti-arco, mais conhecido por hastes de descarga, por onde são orientados os possíveis arcos contornamentos originários de sobretensões atmosféricas. Estas cadeias podem ainda ser classificadas como cadeias de amarração, ou de suspensão, cada uma com características que se adaptam melhor à função que o apoio onde se inserem vai desempenhar. As cadeias de suspensão são um conjunto de discos isoladores dispostos em série numa posição vertical, como mostra a figura (8).

O cabo condutor fica então suspenso na extremidade inferior e a extremidade superior é ligada ao braço de apoio. Para esta solução ser implementada é considerada uma boa prática, pela EDP-Distribuição, a utilização de apoios de alinhamento e que os vãos adjacentes ao apoio onde serão inseridos não sejam muito desequilibrados.



Figura 8 - Cadeia de isoladores de suspensão

**FONTE:** Carvalho, 2018

As cadeias de amarração têm uma disposição horizontal, quase anulando assim o desvio que a cadeia de isoladores poderia sofrer pela sua oscilação devido a ventos fortes e intensos. Este tipo de cadeias são preferencialmente escolhidas para apoios que estejam sujeitos a esforços mais elevados, nomeadamente apoios de onde existam mudanças de direcção da linha, travessias com vãos de comprimentos elevado, apoios de ângulo, fim de linha e de reforço.

Apesar de todas estas garantias oferecidas, têm um custo superior, devido ao facto de ser necessário instalar o dobro de cadeias por apoio, uma vez que não se encontram concentradas em apenas um ponto de fixação, tal como as cadeias de suspensão. Este tipo de cadeia encontra-se representado na figura (9).



Figura 9 - Cadeia de isoladores de amarração

**FONTE:** Carvalho, 2018

#### **2.1.3.4. Apoios**

Os apoios de uma linha aérea têm como função o suporte de todos os elementos das linhas aéreas mencionados neste capítulo, nomeadamente: cabos condutores, cabos de guarda, isoladores e outros acessórios presentes na linha.

Para a escolha dos apoios a implementar num projeto de linhas aéreas tem de ser levado em

consideração os esforços que irão sustentar, o local onde serão implantados, as suas características físicas e mecânicas e também aspectos económicos, tal como o preço da sua implementação. Os apoios podem ser de ferro, betão armado ou madeira. Comparando apenas os apoios de betão e de ferro, economicamente os de betão são mais viáveis, pelo seu menor custo e menor área de ocupação no terreno, o que facilita as negociações com os proprietários dos terrenos onde os apoios serão instalados. Apesar destas vantagens, os apoios de betão são caracterizados por não serem desmontáveis em módulos, tal como os de ferro, o que facilitaria o seu transporte.

Numa linha aérea existem vários tipos de apoios, que apresentam funções diferentes, conforme os esforços a que estão sujeitos:

- **Apoio de alinhamento:** apoio disposto em troços retilíneos da linha, sem existência de ângulos ou derivações.

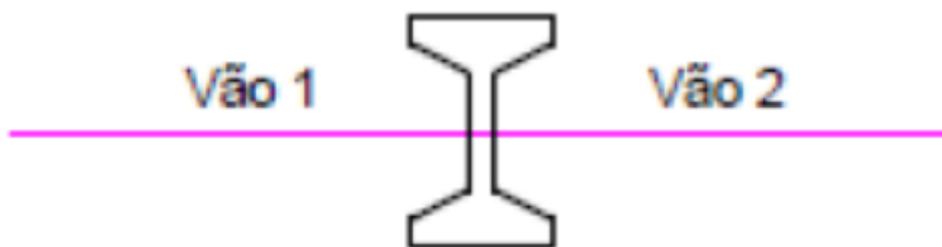


Figura 10- Apoio de alinhamento

FONTE: Carvalho, 2018

- **Apoio de ângulo:** apoio colocado onde a linha perfaz uma mudança de direção, perfazendo um ângulo.

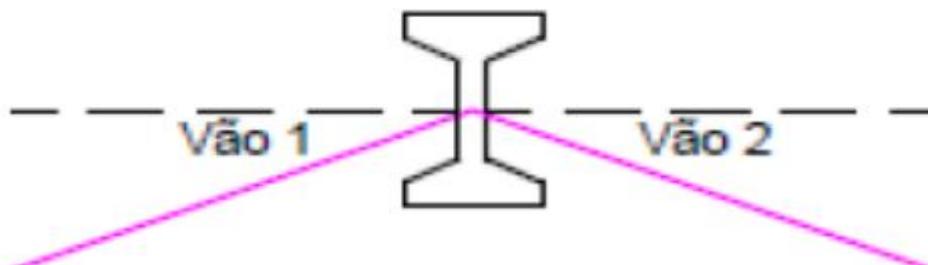


Figura 11- Apoio de ângulo

FONTE: Carvalho, 2018

- **Apoio de derivação:** apoio onde se estabelecem uma ou mais derivações de linha.

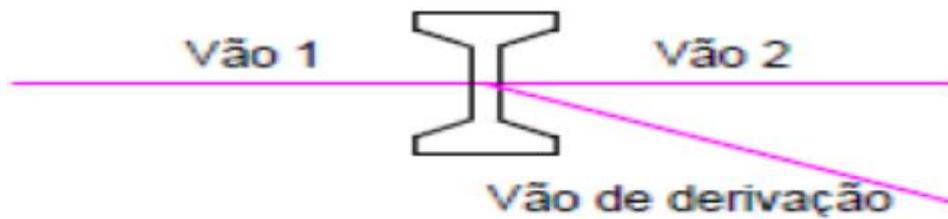


Figura 12- Apoio de derivação

FONTE: Carvalho, 2018

- **Apoio de fim de linha:** apoio capaz de suportar todo o esforço total dos condutores e cabos de guarda de um só lado da linha. Normalmente colocados no início e fim da linha.

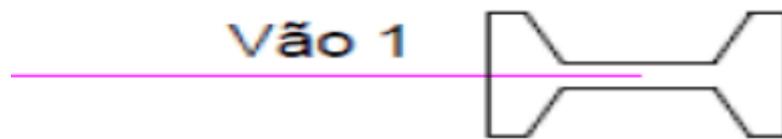


Figura 13- Apoio fim de linha

FONTE: Carvalho, 2018

- **Apoio de reforço:** apoio que suporta esforços capaz de reduzir as consequências negativas em caso de rutura de um cabo ou condutor (15);

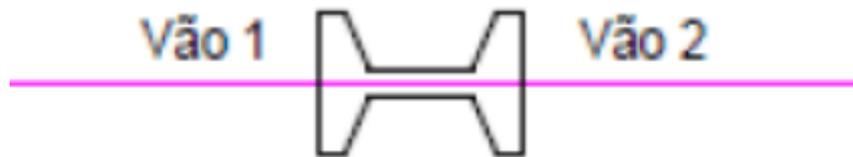


Figura 14 - Apoio de reforço em alinhamento

FONTE: Carvalho, 2018

A escolha dos apoios deve depender, em primeira instância, das condições impostas pelo RSLEAT, tendo de cumprir as distâncias mínimas obrigatórias, para todos os elementos das linhas aéreas relativamente a todos os possíveis obstáculos, garantindo o funcionamento e a segurança de todos os elementos da linha, como por exemplo a distância mínima entre condutores. Ela deve também garantir que o apoio suporta os esforços exercidos pelos condutores, cabos de guarda, isoladores, entre outros.

### 2.1.3.5. Armações

Podemos considerar as armações como estruturas metálicas inseridas nas posições superiores dos apoios e não como elemento "separado" das linhas aéreas, embora com características distintas suficientes para necessitarem de ser analisadas separadamente. A estas estruturas cabe-lhes suportar os esforços provenientes dos condutores e isoladores da linha. Para o caso dos apoios em betão as armações são fornecidas em separado, de acordo com o tipo usado pela EDP Distribuição, como mostra a figura (16). Já para os apoios metálicos, as armações já vêm incorporadas no respetivo apoio. Os diferentes tipos de armações estão dependentes da forma como estão dispostos os condutores e da tipologia do apoio a que esta pertence, sendo que as configurações mais utilizadas pela EDP são as seguintes:

- Esteira vertical dupla;
- Esteira horizontal;
- Galhardete;
- Triângulo.

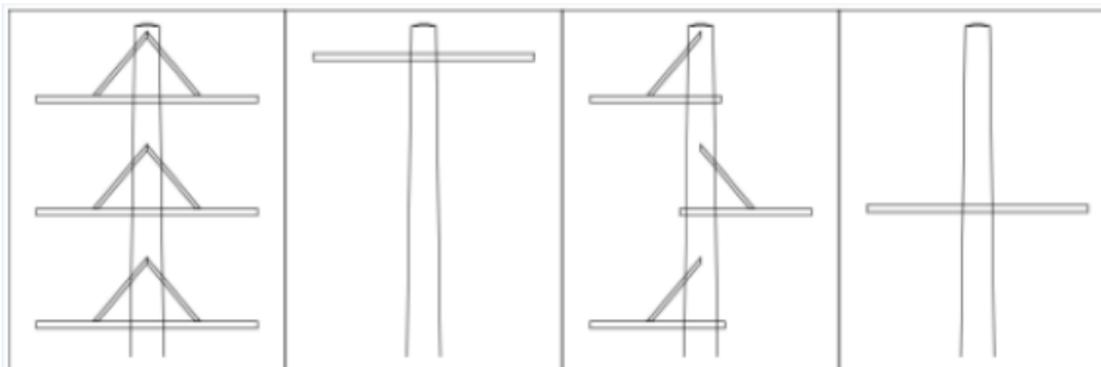


Figura 15 - Esquemas dos tipos de amarração

**FONTE:** Carvalho, 2018

### 2.1.3.6. Fundações

Aos maciços de fundação é atribuída a função de transmitir todos os esforços que o sistema de transmissão à terra acarreta (forças de tração, forças devidas da ação do vento, peso dos apoios, peso dos condutores, peso dos cabos de guarda, peso dos isoladores e respetivos acessórios), sendo por isso fulcrais na segurança da estrutura do apoio e consequente mente do sistema de linhas aéreas. Para o dimensionamento de maciços de fundação é necessário considerar critérios influenciados pelos locais onde estes serão implementados, tais como,

natureza do terreno, a função do apoio, os esforços envolvidos que terá de suportar e a altura do apoio associado.

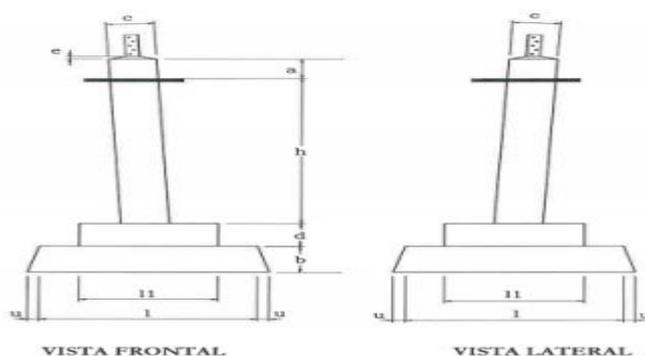


Figura 16 - Esquema da fundação do apoio metálico

**FONTE:** Carvalho, 2018

### 2.1.3.7. Balizagem Aeronáutica

A balizagem aeronáutica tem como função facilitar a identificação dos vários elementos das linhas aéreas de transmissão de energia, por parte dos pilotos de aeronaves, e conseqüentemente facilitar a realização das suas operações de voo em segurança, tais como, descolagens, operações de salvamento e emergência e nos combates contra incêndios. As balizas colocadas são esferas de fibra de vidro ou de resina de poliéster com dimensões com cerca de 50 cm de diâmetro e 5kg de peso. Na figura (18) é ilustrado a balizagem num troço de uma linha aérea.



Figura 17 - Linha com balizagem

**FONTE:** Carvalho, 2018

### 2.1.3.8. Dispositivos de Protecção à Avifauna

É um facto que as linhas aéreas são capazes de contribuir para a morte de aves, tanto por colisão com os condutores da linha, ou até por electrocussão nos apoios. Para minimizar o impacto deste facto, foram criados diversos equipamentos de sinalização para Avifauna.

- Salva-pássaros;
- Anti-nidificação;
- Anti-poiso;
- Plataforma para ninhos.

Para a protecção da avifauna são colocados dispositivos de anti-colisão para aves, que deverão ser instalados nos cabos de guarda e nos cabos condutores de forma alternada, de 10 em 10 metros, tornando visíveis às aves estes elementos das linhas aéreas, e diminuindo assim o risco de colisão com estes.



Figura 18 - Bird flight diverter BFD

**FONTE:** Carvalho, 2018

### 2.1.3.9. Conjuntos Sinaléticas

Segundo o Artigo 55 do regulamento R.S.L.E.A.T., nos apoios das linhas aéreas deverão ser afixados em locais bem visíveis, uma ou mais placas de sinalização de segurança de dimensões apropriadas. Esta sinalização deverá alertar para os perigos de electrocussão e identificar a empresa encarregada pela linha aérea. Estarão, então, assim afixados aos apoios as seguintes informações em chapas metálicas:

- Placas de Aviso de “Perigo de Morte”: devem de ser colocadas a 4 m do solo, com a face voltada para caminhos ou estradas adjacentes ao apoio;
- Numeração de Apoios: deverá ser inscrito na parte mais visível dos caminhos ou estradas, o

número de ordem e demais características indicadas no perfil;

- Contacto de Emergência;
- Empresa responsável pela linha;
- Nome da linha.

### 2.1.3.10. Sistemas de Ligação à Terra

M.A.S.T.C. Ribeiro, descreve os sistemas de ligação a terra como uma medida de protecção que visa garantir que, em caso de falha, a corrente eléctrica tenha um caminho seguro para a terra, minimizando o risco de choques eléctricos e danos aos equipamentos.

Nas linhas aéreas é fulcral a existência de um sistema de ligação à terra, para garantir a segurança de pessoas, equipamentos e instalações. Esta protecção é feita pelo escoamento de correntes de defeito oriundas de um curto-circuito ou de uma descarga atmosférica para o solo. No solo estão enterrados eléctrodos de terra para onde são escoadas essas correntes de defeito. Em caso de defeito, todos os elementos metálicos das linhas aéreas estão sujeitos a sofrer as consequências desse defeito. Todos esses elementos necessários ao suporte dos condutores, seccionamento e protecção das linhas, estão ligados à terra. Existem vários tipos de eléctrodos de terra que podem melhorar os valores da resistência de terra, nomeadamente a serpentina simples, serpentina dupla, serpentina dupla longa, a estrela ou através de brocagem. É necessário respeitar um valor de resistência de terra inferior a  $30\Omega$ , ou inferior a  $20\Omega$  em zonas públicas.

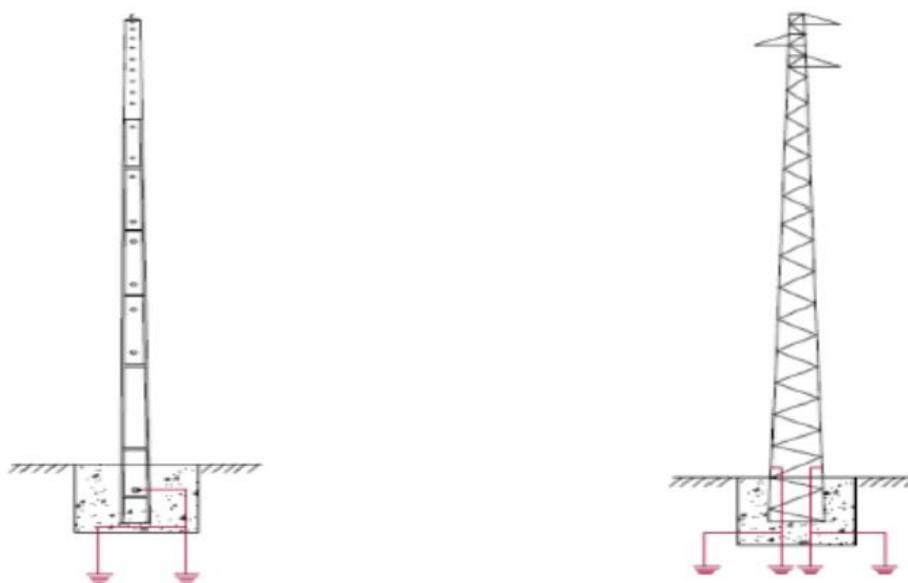


Figura 19- Ligação a terra de postes de betão (a esquerda) e metálico (a direita)

**FONTE:** Autor

Quanto aos cabos de guarda, estes encontram-se ligados individualmente ao circuito de terra de cada um dos apoios através do terminal de terra aéreo existente nos apoios de betão ou à estrutura metálica de fixação destes cabos. O material usado para estabelecer a ligação à terra deverá ser o mesmo do cabo de guarda ou cobre, garantindo também uma secção, pelo menos, equivalente ao do cabo de guarda.

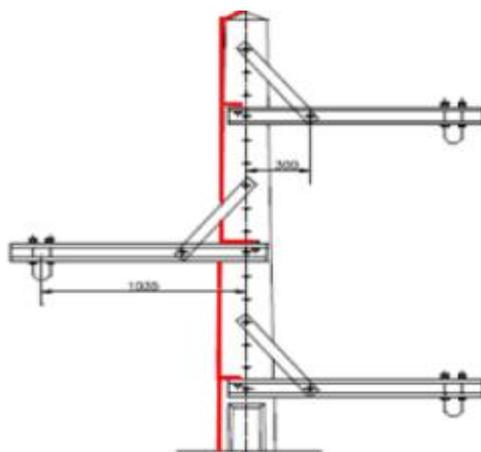


Figura 20 - Ligação a terra de armação a um poste de betão

**FONTE:** Carvalho, 2018

## 1.7. 2.2. Modelo electrogeométrico

Para reduzir os efeitos de uma descarga atmosférica sobre uma linha AT, são instalados por cima dos condutores de fase um ou dois cabos de guarda. Estes cabos encontram-se ligados directamente a terra em cada apoio e têm como função interceptar as descargas e conduzir as correntes de descarga para a terra por intermédio dos apoios. O seu posicionamento em relação aos condutores de fase é otimizado utilizando o modelo electrogeométrico.

Quando uma descarga atmosférica se aproxima de uma linha ou da terra, existe uma distância ( $d$ ) denominada distância vencida pelo salto, na qual a descarga pode incidir na linha, ou na terra. Esta distância é em função da carga do traçador e da amplitude da corrente da descarga. Para determinar esta distância estabeleceu-se uma expressão analítica entre a distância do traçador ao objecto no solo para o qual se pode desenvolver uma descarga ascendente. Admitindo uma ligação do objecto à terra de boa qualidade, a distância vencida pelo salto  $d$ , é dada pela seguinte equação:

$$d = 6,7 \times I^{0,8} \quad (m) \quad (2.1)$$

Onde:

$d$ -Distância vencida pelo salto [m];

$I$ -Intensidade de corrente de descarga [kA].

O Modelo Eletrogeométrico permite determinar de forma aproximada, a máxima corrente que provoca uma falha da blindagem. O método consiste em determinar mediante uma análise geométrica, a distância vencida pelo salto que pode provocar uma falha de blindagem, tendo em conta a disposição geométrica dos condutores.

Podemos então afirmar que uma blindagem eficaz requer um posicionamento estratégico do cabo de guarda, de modo a que a descarga atmosférica atinja directamente o cabo de guarda ou o solo, e nunca um condutor de fase. A fim de provar a eficiência do cabo de guarda, desenhou-se à sua volta e à volta dos condutores de fase, um círculo de diâmetro  $D$ , obtido a partir da equação 5. Além disso, é desenhada uma linha reta paralela a uma distância  $\beta S \times D$  da superfície do solo, como se pode ver a partir das Figuras 5. A posição mais favorável dos cabos de guarda é obtida quando os círculos à volta dos condutores de fase e dos cabos de guarda se encontram no mesmo ponto na linha recta paralela à superfície do solo (Figura 23)

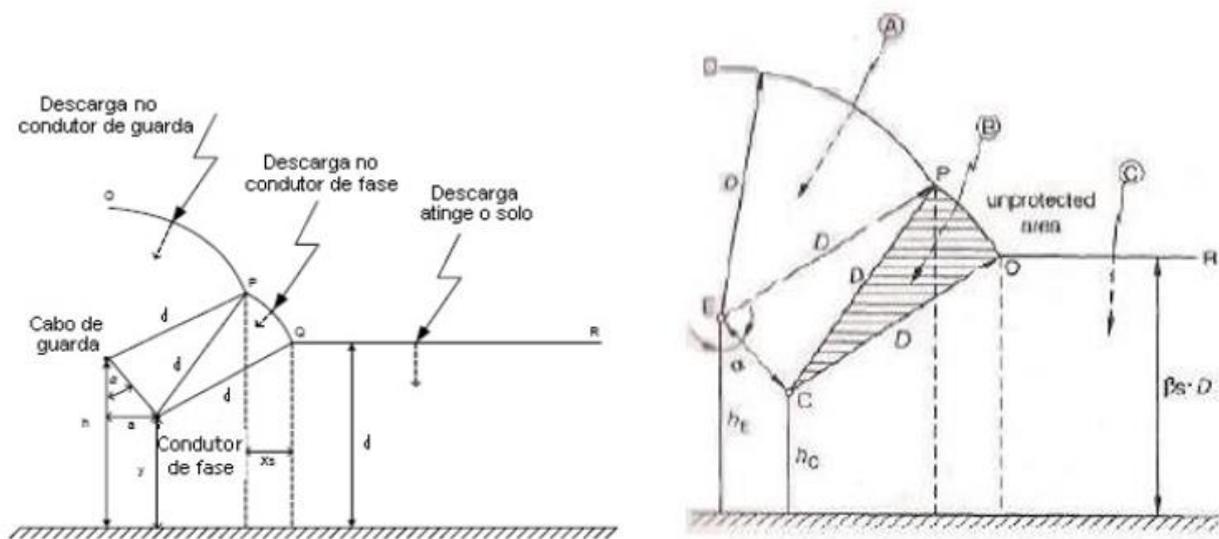


Figura 21- Modelo electrogeométrico

FONTE: BARBOSA, T.,2014

O modelo electrogeométrico permite determinar de forma aproximada, a máxima corrente que provoca uma falha da blindagem, se a distância vencida pelo salto não for conhecida, determina-

se a corrente máxima através da equação através da equação:

$$d = \frac{h+y}{2 \times (1 - \text{sen} \alpha_b)} \quad 2.2$$

$$d = \frac{h + y}{2 \times (1 - \text{sen} \alpha_b)} = \frac{35 + 21,4}{2 \times (1 - \sin 20)} = 42,8$$

Onde:

$h, y$  – Alturas do cabo de guarda e do condutor de fase, respectivamente [m].

$$h = 30 \text{ m}$$

$$y = 21,4 \text{ m}$$

Calcula-se a intensidade de descargas que será:

$$I = \sqrt[0,8]{\frac{d}{6,7}} = \sqrt[0,8]{\frac{42,86}{6,7}} = 10,17 \text{ kA}$$

O valor da intensidade de descarga calculada na linha CL9 será de 10,17 kA.



Tabela 1: Características eléctricas e mecânicas do cabo de guarda OPGW AS/AA/32/113

Tipo de cabo	OPGW AS/AA/ ST 32/113	Unidade
Secção de aço	32.17	(mm <sup>2</sup> )
Secção alumínio	112.59	(mm <sup>2</sup> )
Secção total	144.76	(mm <sup>2</sup> )
Peso total do cabo	0.55	(kg/m)
Composição	6x3.2+12x 3.2	(n <sup>o</sup> fiosxm m)
Diâmetro nominal do cabo	16	(mm)
Carga de rutura-RTS	7320	(kg)
Coefficiente de dilatação linear	18.7	(1/°C10- 6)
Módulo de elasticidade	7920	(N/mm <sup>2</sup> )
Resistência óhmica, 20°C	0.269	(Ω/km)

FONTE: Catálogo OPW ZTT

### 1.11. 3.3. Cálculo Mecânico

O cálculo mecânico num projecto de uma linha aérea é fulcral para garantir as condições e estabilidade dos elementos da linha a ser projectada. Recorre-se então a um conjunto de ferramentas matemáticas de cálculo que prevêm os esforços mecânicos que virão a ser suportados pelos elementos das linhas aéreas, para diversos estados atmosféricos com características atmosféricas diferentes, nomeadamente a previsão dos impactos que as variações do vento e da temperatura exercem nos esforços calculados. Podemos então agora definir os objetivos e etapas destes cálculos mecânicos como os seguinte:

- Dimensionamento da tensão mecânica exercida pelos condutores durante a montagem da linha, tendo sempre em conta as condições climatéricas ocorrentes nesse momento.
- Determinação das forças e acções exercidas pelos agentes atmosféricos e pelos cabos condutores e de guarda para os diferentes estados atmosféricos

característicos da região da linha a ser projectada. Nomeadamente, a acção da temperatura nos elementos da linha, a acção do peso dos cabos condutores e de guarda, a acção do vento, acção do gelo nos cabos condutores e guarda e finalmente os coeficientes de sobrecarga para os diferentes estados atmosféricos;

- Determinar uma primeira disposição dos apoios na linha a ser projectada onde se descreva o número de apoios, os vãos entre cada um deles e que apoios estão inseridos em cada cantão, para o cálculo dos vãos equivalentes e críticos de cada um destes. Após isto, descobre-se seu pior estado atmosférico para cada cantão;
- Determinação do parâmetro da catenária para cada cantão em diversas situações e condições atmosférica a partir da tensão calculada pela equação de estados usando todos os dados calculados nas etapas anteriores. Posteriormente calcular as diferentes flechas (incluindo a máxima), consoante a temperatura.
- Verificação das distâncias de segurança regulamentares entre os condutores e os diversos elementos/obstáculos, no local de inserção da linha;
- Dimensionamento dos apoios de acordo com a sua estabilidade recorrendo ao cálculo de todos os esforços longitudinais, transversais e verticais a que os apoios estão sujeitos;
- Escolha dos apoios de acordo com os catálogos dos fabricantes, garantindo que os esforços calculados a que os apoios estão sujeitos sejam menores que os esforços máximos tabelados.

### **3.3.1. Tensões Mecânicas Máximas**

É necessário, numa primeira fase, calcular o valor teórico das tensões mecânicas para os condutores e cabo de guarda para, desta forma, ser possível identificar o limite de tensão a que estes conseguem estar sujeitos sem que sejam danificados, evitando-se riscos de rotura ( $t_{serv} \leq t_{max} [daN/mm^2]$ ). O cálculo da tensão máxima de tração é dado pela seguinte expressão:

$$t_{max} = \frac{t_{rotura}}{2,5 \times \sigma} \quad (3.1)$$

Tensão máxima de tracção de cabo de guarda OPGW

$$t_{max} = \frac{t_{rotura}}{2,5 \times \sigma} = \frac{7320}{2,5 \times 144,76} = 20,23 \text{ [daN]}$$

Assim sendo, o valor mais comum das tensões de serviço a adoptar nos condutores, utilizados na EDM, para os vãos situados ao longo da linha, varia entre os 7 e 12 daN/mm<sup>2</sup> e, para os cabos de guarda entre os 10 e 17 daN/mm<sup>2</sup>. No primeiro e último vão da linha, como se trata de vãos que terão apoios de fim de linha e, estes suportam a totalidade dos esforços, os valores das tensões serão inferiores aos verificados nos restantes vãos. Por fim, nas ligações dos apoios de fim de linha aos pórticos das subestações é utilizado um valor de tensão, para os condutores, entre os 0,5 e 1,0 daN/mm<sup>2</sup> e, para os cabos de guarda entre os 1 e 2 daN/mm<sup>2</sup>.

Sabendo tudo isto, convencionou-se para os cabo de guarda uma tensão máxima de serviço de 15 daN/mm<sup>2</sup> nos vãos centrais e de 12 daN/mm<sup>2</sup> nos vão adjacentes a apoios fim de linha. Esta redução deve-se à necessidade de reduzir os esforços suportados por estes apoios fim de linha que já têm de suportar o peso da linha toda. Por isso, não é aconselhável valores de tensão de serviço elevados que agravem mais estes esforços e possam provocar a queda dos apoios.

### 3.3.2. Força do vento

No cálculo das linhas aéreas, o vento deverá considerar-se, que actua numa direcção horizontal e a força proveniente da sua acção considerar-se-á paralela àquela direcção e deverá ser calculada através da seguinte expressão

$$F_v = \alpha \cdot c \cdot q \cdot d \text{ [daN]} \quad (3.2)$$

Onde:

F<sub>v</sub> – força proveniente da acção do vento [daN];

α – Coeficiente de redução;

c – coeficiente de forma;

q – pressão dinâmica do vento;

d – diâmetro do condutor.

Segundo RSLEAT O valor da pressão dinâmica do vento encontra-se directamente dependente da altura acima do solo a que se encontra o elemento da linha, sobre o qual se pretende calcular a ação do vento e do estado atmosférico pretendido, caracterizando este de acordo com a força do vento associada a cada estado, ou seja, vento máximo para o estado de Primavera e vento reduzido para o estado de Inverno. Na tabela (3) estão representados os valores de pressa dinâmica do vento consoante a altura acima do solo e o estado atmosférico em que se encontra:

*Tabela 2:* Valores da pressão dinâmica do vento, em função da altura do solo

Altura acima do solo (m)	Pressão dinâmica do vento q (Pa)	
	Vento máximo habitual	Vento reduzido
Até30	750	360
De30 a50	900	432
Acimade50	1050	504

**FONTE:** RSLEAT

Para zonas costeiras, numa faixa de 5 km, e para zonas situadas a uma altitude superior a 600 m, recomenda-se que seja acrescido 20% ao valor da pressão dinâmica do vento.

*Tabela 3:* Valores da pressão dinâmica do vento, em função da altura do solo para uma altura superior a 600M.

Altura acima do solo (m)	Pressão dinâmica do vento q (Pa)	
	Vento máximo habitual	Vento reduzido
Até30	900	360
De30 a50	1080	432
Acimade50	1260	504

**FONTE:** RSLEAT

No caso dos cabos utilizados na rede de transporte devem ser considerados os coeficientes de redução mostrados na tabela (3).

O coeficiente de forma dos condutores corresponde à influência geométrica da secção do cabo perante a acção do vento, cujo valor varia consoante o diâmetro do próprio cabo, tomando os seguintes valores. Segundo RSLEAT o coeficiente de forma (c) pretende traduzir a rugosidade do elemento vencido pelo vento. Apesar de os condutores serem de forma cilíndrica, estes possuem alguma rugosidade que será mais notória quanto maior for o seu diâmetro.

*Tabela 4: Valores de coeficiente de redução*

<b>Elemento</b>	<b>Coeficiente de redução (<math>\alpha</math>)</b>
Condutores e cabos de guarda	0,6
Apoios, travessas e isoladores	1

**FONTE: RSLEAT**

Segundo RSLEAT, o coeficiente de redução traduz, em cada caso, a variação da velocidade de actuação do vento ao longo de uma frente extensa, e o coeficiente de forma, a influência da geometria do elemento considerado e da direcção do vento.

*Tabela 5: Valores de coeficiente de redução*

	<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>Coeficiente de forma</b>
Condutores nus e cabos de guarda	Até 12,5	1,2
”	Acima de 12,5 e até 15,8	1,1
“	Acima de 15,8	1,0
Cabos isolados em feixe	-	1,3
Cabos suportados e cabos tipo 8	-	1,8
Isoladores	-	1,0

**FONTE: RSLEAT**

### 3.3.3. Força do vento

Forçado vento na hipótese do estação inverno

$$F_{v1} = 0,6 * 1 * 36 * 0,016 = 0,3456 \text{ daN}$$

Força do vento na hipótese do estação primavera

$$F_{v2} = 0,6 * 1 * 90 * 0,016 = 0,864 \text{ daN}$$

### 3.3.4. Coeficiente de Sobrecarga

De modo a determinar qual o estado atmosférico mais desfavorável é necessário calcular o coeficiente de sobrecarga, associado a cada um dos estados atmosféricos. Este coeficiente pretende reflectir as solicitações mecânicas nos condutores e cabo de guarda, provocadas pela influência do vento e temperatura. Após calcular os valores da força do vento para os estados de verão e Inverno, é possível efectuar o cálculo dos coeficientes de sobrecarga, que confere ao peso próprio do condutor um agravamento devido às acções do vento.

$$m_v = \frac{F_r}{W_c} = \frac{\sqrt{(w_c + w_g)^2 + F_v^2}}{w_c} \quad (3.3)$$

Onde:

- $F_R$  – força resultante [daN]
- $w$  – peso do condutor [daN]
- $w_g$  – peso específico do gelo
- **Para o Cabo OPGW**

Estado do inverno:

$$m_1 = \frac{\sqrt{0,55^2 + 0,3456^2}}{0,55} = 1,18$$

Estado da primavera:

$$m_2 = \frac{\sqrt{0,55^2 + 0,864^2}}{0,55} = 1,86$$

$$m_2 = \frac{\sqrt{0,55^2}}{0,55} = 1$$

Procede-se então ao cálculo do vão crítico, o qual se refere a um vão cuja tensão é máxima e os seus condutores ficam sujeitos a ela nos estados de inverno e primavera, sendo dada pela seguinte expressão.

Estado do verão:

$$L_{cr} = \frac{\sigma * t_{max}}{w} * \sqrt{\frac{24 * \alpha_d (\theta_2 - \theta_1)}{m_2^2 - m_1^2}} \quad (3.4)$$

Onde:

$\sigma$ - Secção do condutor em mm<sup>2</sup>

$T_{max}$ - tensão máxima de serviço do condutor em daN/mm<sup>2</sup>

$\omega$ - peso específico linear do condutor em daN/m

$\alpha_t$ - coeficiente de dilatação linear do condutor em °C<sup>-1</sup>,

$\theta_1$  e  $\theta_2$  são as temperaturas ambiente dos estados atmosféricos

$m_1$  e  $m_2$  Coeficientes de sobrecarga no estado de verão e inverno

#### ❖ Para o Cabo de OPGW

Assim sendo, para os cantões centrais, o vão crítico pode ser calculado como se segue:

$$L_{cr} = \frac{144,76 * 15}{0,5} * \sqrt{\frac{24 * 18,7 * 10^{-6} (15 - (-5))}{1,86^2 - 1,18^2}} = 286 \text{ m}$$

Já para o primeiro e o último cantão, o vão crítico pode ser calculado como se segue:

$$L_{cr} = \frac{144,76 \cdot 12}{0,5} * \sqrt{\frac{24 \cdot 18,7 \cdot 10^{-6} (15 - (-5))}{1,86^2 - 1,18^2}} = 229$$

O vão equivalente será dado pela seguinte expressão:

$$L_{eq} = \sqrt{\frac{\sum_1^N L_i^3}{\sum_1^N L_i}} [m] \quad (3.5)$$

Onde:

- $\sum_1^N L_i$  - Somatório dos vãos pertencentes ao cantão [m];

Tendo já delineados os vãos pertencentes a cada cantão, podemos então determinar os vãos equivalentes para cada um deles através da expressão acima, e para o cantão 1 obtemos:

$$L_{eq} = \sqrt{\frac{298^3 + 268^3}{298 + 268}} = 284 \text{ m}$$

Seguindo a mesma fórmula de cálculo, mas para os restantes cantões, obteve-se os seguintes resultados apresentados na tabela.

*Tabela 6:* Valores de coeficiente de redução (cantão 1-6)

<b>Número de Cantão</b>	<b>Cantão</b>	<b>Cantão Equivalente</b>
1	APOIO 1-APOIO 3	284
2	APOIO3 – APOIO5	426
3	APOIO5 – APOIO 22	419
4	APOIO22 – APOIO34	414
5	APOIO34 – APOIO38	390
6	APOIO38 –APOIO46	220

FONTE: Autor

Tabela 7: Valores de coeficiente de redução (cantão 7-34)

7	APOIO46 – APOIO51	325
8	APOIO51 – APOIO56	301
9	APOIO56 – APOIO74	404
10	APOIO74 – APOIO101	432
11	APOIO101 – APOIO120	409
12	APOIO120 – APOIO155	416
13	APOIO155 – APOIO167	389
14	APOIO167 – APOIO188	378
15	APOIO188 – APOIO203	364
16	APOIO203-APOIO223	234
17	APOIO223 – APOIO247	239
18	APOIO247 – APOIO 268	287
19	APOIO268 – APOIO301	365
20	APOIO301 –APOIO329	387
21	APOIOI329 – APOIO347	446
22	APOIO347 – APOIO363	402
23	APOIO363 – APOIO397	4014
24	APOIO397 – APOIO415	390
25	APOIO415 –APOIO438	415
26	APOIO438 –APOIO451	389
27	APOIO451 – APOIO480	376
28	APOIO480 –APOIO494	374
29	APOIO494 – APOIO517	330
30	APOIO517 – APOIO544	326
31	APOIO544 – APOIO567	327
32	APOIO567 – APOIO579	278
33	APOIO579 – APOIO595	268
34	APOIO595 – APOIO607	297

FONTE: Autor

Tabela 8: Valores de coeficiente de redução (cantão 35-40)

35	APOIO607 – APOIO618	256
36	APOIO618 – APOIO633	259
37	APOIO633 – APOIO646	245
38	APOIO646 – APOIO658	234
39	APOIO 663 – APOIO666	230
40	APOIO6666 – APOIO668	227

FONTE: Autor

### 3.3.4. Determinação do estado mais desfavorável

Conhecendo os valores dos coeficientes de sobrecarga e todos os vãos críticos e equivalentes para todos os cantões e cabos, podemos concluir para cada cantão, qual o estado atmosférico mais desfavorável através do fluxograma exposto.

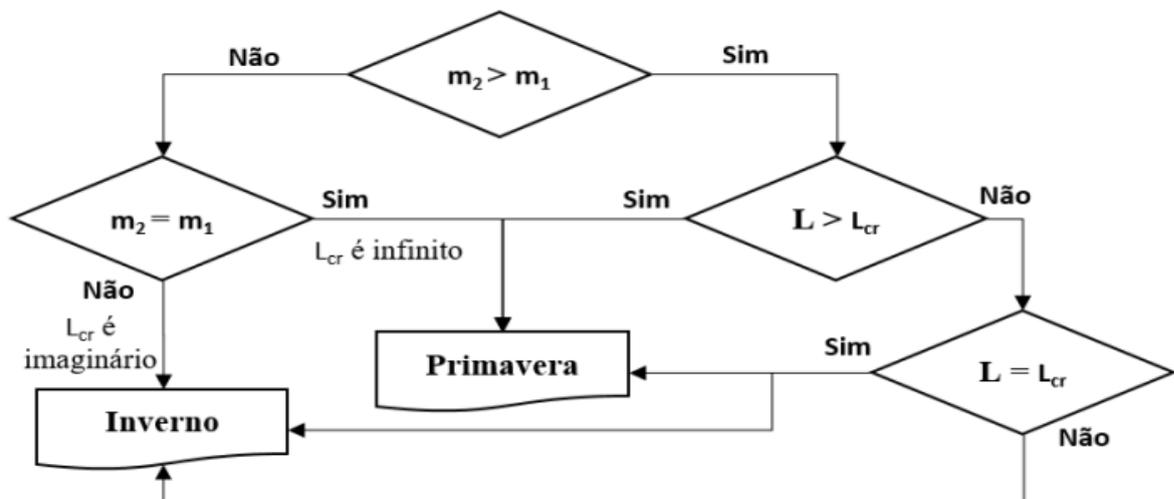


Figura 23- Diagrama de decisão do estado mais desfavorável

Será demonstrado o desenrolar do algoritmo no cantão 1, descobrindo o seu pior estado atmosférico neste caso.

Sendo que:

$$m_1 = m_{inv} = 1.18$$

$$m_2 = m_{prim} = 1.86$$

Interpretando o fluxograma concluímos

$$m_2 > m_1 \quad \text{sim}$$

$L_{eq} > L_{cr}$  sim

A partir dessa interpretação do fluxograma concluímos que o estado mais desfavorável para o cantão 1 e a primavera.

### 3.3.5. Equação dos estados

O objectivo da equação de estados é a determinação da tensão de montagem a aplicar aos condutores de um dado vão. A tensão de montagem é a tensão mecânica que assegura para qualquer que seja a condição meteorológica, a tensão máxima dos condutores não é ultrapassada.

$$\theta_i + \frac{t_{\theta_i}}{\alpha_d * E} - \frac{m_{\theta_i}^2 * w^2 * L_{mdio}^2}{24 * \alpha_d * \sigma^2 * t_{\theta_i}^2} = \theta_k + \frac{t_k}{\alpha_d * E} - \frac{m_k^2 * w^2 * L_{mdio}^2}{24 * \alpha_d * \sigma^2 * t_{mdio}^2} \quad (m) \quad (3.6)$$

Onde:

$\theta_i$  e  $\theta_k$  – Temperatura [°C];

$t_{\theta_i}$  e  $t_k$  – Tensão mecânica do condutor às temperaturas  $\theta_i$  e  $\theta_k$  [daN/mm<sup>2</sup>];

$\alpha_d$  – Coeficiente de dilatação linear [°C<sup>-1</sup>];

$E$  – Módulo de Young ou módulo de elasticidade [daN/mm<sup>2</sup>];

$\sigma$  – Secção do condutor [mm<sup>2</sup>];

$w$  – Peso próprio do condutor [daN/m];

$m_k$  – Coeficiente de sobrecarga do estado mais desfavorável.

Para o estado de flecha máxima, onde se considera a ausência de gelo e vento, o coeficiente de sobrecarga  $m_k=1$ . E o valor da temperatura  $\theta_k$  deve ser escolhido consoante o nível de tensão, conforme apresentado na tabela 6.

### A tensão de montagem de cabo OPGW

$$15 + \frac{t_{\theta_i}}{18,7 * 10^{-6} * 7920} - \frac{1,18^2 * 0,55^2 * 284^2}{24 * 18,3 * 10^{-6} * 144,76^2 * t_{\theta_i}^2}$$

$$= 75 + \frac{15}{18,7 * 10^{-6} * 7920} - \frac{1^2 * 0,55^2 * 284^2}{24 * 18,7 * 10^{-6} * 144,76^2 * 15^2}$$

$$t_{\theta_i} = 4,4 \text{ daN/mm}^2$$

Para os restantes cantões os resultados dos cálculos destas tensões na situação de flecha máxima, encontram-se na tabela.

*Tabela 9 Tensão de montagem para cada cantão*

Cantão	$t_{\theta_i}$	Cantão	$t_{\theta_i}$	Cantão	$t_{\theta_i}$	Cantão	$t_{\theta_i}$
1	4.4	11	5.67	21	6.87	31	6.78
2	4.94	12	5.98	22	5.47	32	4.45
3	4.51	13	4.21	23	5.94	33	4.78
4	4.7	14	4.78	24	6.7	34	4.89
5	5.2	15	6.41	25	5.56	35	5.12
6	6.22	16	4.57	26	4.67	36	4.65
7	5.4	17	5.24	27	4.85	37	4.68
8	4.89	18	5.65	28	5.45	38	5.76
9	4.45	19	4.67	29	6.21	39	5.85
10	5.7	20	4.78	30	6.18	40	4.57

FONTE: Autor

### 3.3.6. Flechas de cabo de guarda

A flecha de cabo de guarda entre dois apoios depende, fundamentalmente, da velocidade do vento, tensão máxima de serviço e temperatura. A flecha máxima dos condutores e cabo de guarda deverá ser determinada para temperaturas em regime permanente nas seguintes condições.

*Tabela 10 Temperatura a considerar para o estado de verão*

Classe da linha	Nível de tensão	Temperatura
2ª	1<Un<33kV	+50°C
3ª	33≤ Un<110 kV	+65°C
3ª	Un ≥110 kV	+75°C

FONTE: Autor

$$f_{max} = \frac{m_k \cdot w \cdot L \cdot L}{8 \cdot \sigma \cdot t_{mk}} \quad (3.7)$$

O cálculo das flechas de cabo de guarda é dado através da expressão:

Onde:

- $m$  – Coeficiente de sobrecarga (unitário pois na regulação dos condutores pressupõe-se que não há vento);
- $L$ – Comprimento do vão [m];
- $\sigma$ – Secção do condutor [mm<sup>2</sup>];
- $\omega$ – Peso próprio do condutor [daN/m];
- $t\theta_i$ – Tensão de montagem do condutor à temperatura  $\theta_i$  [daN/mm<sup>2</sup>].

Cálculo da flecha máxima tendo em conta ovão 1 á 2 que será  $L=368m$

$$f_{max} = \frac{1 * 0,55 * 298 * 298}{8 * 144,76 * 6,6} = 6.4 m$$

### 3.3.6. Distâncias Mínimas Regulamentares

#### 3.3.6.1. Distância dos condutores ao solo

No artigo 27º do RSLEAT é indicada a distância mínima regulamentar entre os condutores das linhas aéreas e o solo, nas condições de flecha máxima dos condutores, desviados ou não pelo vento a uma distância  $D$ .

Entre os cabos isolados das linhas, nas condições de flecha máxima, desviados ou não pelo vento, e o solo deverá manter-se uma distância não inferior a 6m e em locais de difícil acesso o valor será de 1m.

No caso das linhas aéreas de alta tensão, a 110 kV, a distância mínima  $D$  permitida entre os condutores e o solo é obtida pela expressão seguinte:

$$D=6,0 +0,005*110kV=6,55 [m]$$

#### 3.3.6.1. Distância entre condutores

No artigo 31º do RSLEAT é indicada a distância mínima regulamentar entre os condutores das linhas aéreas atendendo às oscilações provocadas pelo vento.

Para as linhas de alta tensão, a 110 kV, a distância mínima entre condutores é dada pela expressão seguinte:

$$D = k * \sqrt{f + d} + \frac{U}{150} \text{ (m)} \quad (3.8)$$

Onde:

f – Flecha máxima do condutor [m];

• k – Coeficiente dependente da natureza dos condutores:

a) Condutores de cobre, bronze, aço e alumínio-aço – k = 0,6;

b) Condutores de alumínio e de ligas de alumínio – k = 0,7.

• d – Comprimento da cadeia de isoladores suscetíveis de oscilarem transversalmente à linha:

a) Cadeias de Amarração – d = 0 m;

b) Cadeias de Suspensão – d = 1,2 m.

• U – Tensão nominal da linha [kV];

$$D = k * \sqrt{f + d} + \frac{U}{150} = 0,7 * \sqrt{2,11 + 0} + \frac{110}{150} = 1,75 \text{ m}$$

Segundo o RSLEAT a distancia entre condutores montados na CL9 não devem ser inferior a 1,75 [m]

### 3.3.6.2. Distância entre os Condutores e o Cabo de Guarda

O artigo 32º do RSLEAT indica que a distância mínima regulamentar entre os condutores e os cabos de guarda não devem ser inferior à distância mínima regulamentar entre condutores, que será de 1,75m. Dai que a distancia de cabo de guarda é a mesma que os condutores de fase.

### 3.3.7. Estabilidade dos Apoios

Durante o dimensionamento dos apoios deverá ter-se em conta os esforços suportados por estes, de maneira a que estes sejam dimensionados para as aguentar. Estes esforços tanto podem ter como origem fatores externos, como a acção do vento, ou os próprios elementos das linhas, como as tensões dos

condutores, o peso destes e das cadeias de isoladores.

Em termos de cálculo, os esforços terão vários factores que os condicionam, como:

- Forças de tracção dos condutores
- Forças de tracção máxima exercidas em caso de rotura;
- A sobrecarga do vento e peso dos componentes, como os condutores, apoios, isoladores e travessas.

Para o caso da CL9, não haverá necessidade de dimensionar os apoios, pois a mesma possuía um cabo de guarda, ou seja, foi montada tendo em conta os esforços de cabo de guarda e o cabo OPGW (o cabo proposto) possui um peso específico menor em relação ao cabo de guarda antigo (ACSR)

### 3.3.8. Ligação dos Cabos de Guarda

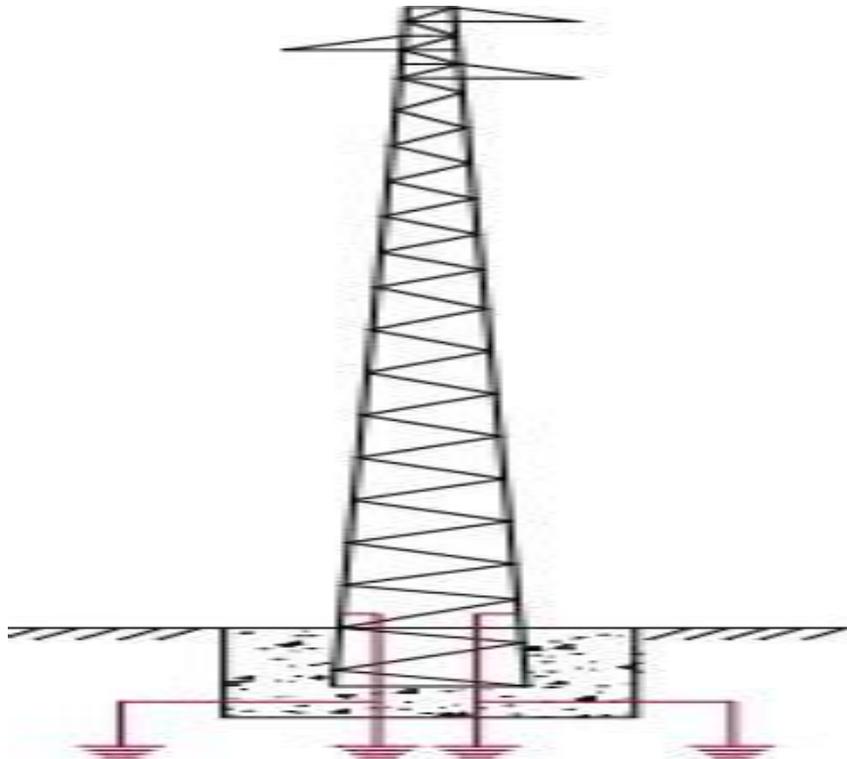


Figura 24 -Ligação de rede de terra ao apoio

**FONTE:** Autor

A ligação à terra dos sistemas eléctricos tem como objectivo garantir a segurança de pessoas, equipamento e instalações, consistindo na criação de um ponto comum e de referência entre as partes electricamente condutoras e a terra. Para prevenir ocorrências que não garantam a segurança dos elementos descritos, ter-se-ão de projectar ligações

à terra eficazes e que assegurem, por um lado, que as pessoas que estejam nas proximidades de instalações eléctricas não sejam expostas a tensões de passo e de contacto superiores aos máximos admissíveis face à temporização das protecções existentes e ao valor presumível de resistividade média do terreno onde se encontra a instalação, e por outro lado que escoem para a terra em circunstâncias normais de correntes eléctricas, sem afectar os equipamentos ou a continuidade de serviço.

Nas linhas aéreas AT, todos os elementos metálicos (normalmente fora de tensão) necessários ao suporte dos condutores e ao seccionamento e protecção das linhas, têm de ser ligadas à terra. Tratando-se de apoios de betão armado, os suportes metálicos dos isoladores devem ser ligados a terra do próprio apoio. Devem ainda ser ligados a terra dos apoios, as estruturas metálicas dos aparelhos de corte ou de manobra. Esta ligação é assegurada interligando-se o terminal de terra existente na parte inferior do apoio com o eléctrodo de terra, através de cabo de cobre nu. Os postes metálicos devem ser ligados à terra, interligando-se os terminais de terra existentes em cada um dos montantes aos eléctrodos de terra, e interligando-os entre si. Em zonas públicas ou frequentadas, o valor da resistência de terra não deve exceder 20 Ohm. É possível observar-se nas peças desenhadas no anexo 2.

Os cabos de guarda deverão ser ligados individualmente ao circuito de terra de cada um dos apoios através do terminal de terra aéreo existente nos apoios de betão, ou, à estrutura metálica de fixação destes cabos. A ligação à terra deverá ser efetuada através de fio de cobre ou do mesmo material do cabo de guarda, de secção pelo menos equivalente à deste.

A intensidade de corrente máxima que percorre os cabos de guarda, na ocorrência de um curto-circuito fase-terra, deverá ser tomada como 75% do valor da corrente de defeito fase-terra, assumindo-se que toda a corrente flui pela secção de alumínio nos cabos de guarda em alumínio-aço.

## CAPITULO IV. AVALIAÇÃO DE RISCO NA LINHA CHICUMBANE-LINDELA

### 1.12. 4.1. Avaliação de riscos

Lopes, 2004 aborda a avaliação de risco como uma ferramenta essencial para a tomada de decisões informadas em projectos e operações, permitindo que empresas e organizações minimizem os riscos antes que se tornem problemas reais.

É a etapa chave no processo de prevenção, na medida em que, ao permitir conhecer o risco, contribui com informação muito importante para o planeamento das intervenções preventivas adequadas.

#### 4.1.1. Fases da Avaliação do Risco

A avaliação de risco pode compreender duas fases:

- ❖ A análise do risco, que visa determinar a magnitude do risco;
- ❖ Avaliação do risco, que visa avaliar o significado que o risco assume.

**Análise do Risco:** A análise de risco pretende uma decomposição detalhada do objecto seleccionado para alvo de avaliação (uma simples tarefa, um local, um equipamento, uma situação, uma organização ou sistema).

A concretização da análise de risco deve compreender 2 etapas:

##### 1) Identificação do perigo e possíveis consequências

O Registro das descargas facultada pela EDM mostra que a CL9 é uma das linhas que tem tido vários disparos devido a acção de descargas atmosféricas, estes disparos tem um grande impacto económico na concessionária e falta de qualidade energética.

Pela localização está em zona propensa a descargas em toda extensão. Dai que se recomenda a colocação de cabo de guarda em toda a extensão.

A falta de cabo de guarda na CL9 provoca uma instabilidade ao sistema eléctrico, interrompendo o fornecimento de energia eléctrica. Quando essas ondas atingem uma torre e os condutores de fase há:

- Rotura de cadeias de isoladores que fica submetida a uma tensão muito elevada, que se eventualmente for superior àquela que a cadeia suporta;
- Rompimentos dos pontos de contactos;

- Danificação dos equipamentos de descargas atmosféricas;
  - Curto-circuito fase-terra.
- 2) **Estimativa do risco** (qualitativa ou quantitativa) dos riscos identificados, valorando a consequências da materialização do perigo a **gravidade**.

De acordo com riscos, pode-se estimar a probabilidade, podendo ser classificada como probabilidade “5” (provavelmente ocorrerá) pode ocorrer várias vezes por ano. A classificação de impacto (gravidade) é Catastrófico.

#### 4.1.2. Cálculo do risco de falha

O risco de falha é o número de anos durante os quais é esperado que não ocorra falha do sistema de protecção aérea. O seu cálculo é feito pelo seguinte método:

$$GFD=0,12*Ni \quad (4.1)$$

$$GFD=0,12*3=0,36 \text{ [descargas/km}^2\text{/ano]}$$

Onde,

*GFD* é o número médio de descargas à terra por unidade de área e unidade tempo em determinado local [descargas/km<sup>2</sup>/ano]

*Ni* é o nível ceráunio (dias de trovada numa determinada região por ano)

O número de descargas para uma determinada área A, calcula-se por:

$$N_s = \frac{GFD \times A}{1000} \quad (4.2)$$

$$N_s = \frac{GFD \times A}{1000} = \frac{0,36 \times 92}{1000} = 0,03312 \text{ [descargas/Km}^2\text{/ano]}$$

A corrente crítica de descarga será:

$$I_c = 0,041 * S_m^{1,54}$$

$$I_c = 0,041 * 40^{1,54} = 12,02 \text{ kA}$$

Onde:

*S<sub>m</sub>* é a distância de descarga [m], sendo que a *S<sub>m</sub>*=40m

Esta corrente representa o valor a partir do qual a descarga é absorvida pela rede

de terras e ocorrer na sua área de actuação. A probabilidade da corrente a ser excedida é dada pela seguinte expressão:

$$P(I_C) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_C}{31}\right)^{2,6}} \quad (4.3)$$

$$P(I_C) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_C}{31}\right)^{2,6}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{12,02}{31}\right)^{2,6}} = 0,92$$

Sendo, evidentemente, a probabilidade de não ser excedida:  $1 - P(I_C) = 0,08$ .

Podemos chegar ao número de descargas por ano que provocam falhas na malha de terra aérea fazendo o produto do número de descargas para uma dada área pela probabilidade da corrente da descarga atmosférica ser inferior a corrente crítica:

$$\text{Descargas defalha} = N_s * (1 - P(I_C))$$

$$\text{Descargas defalha} = N_s * (1 - P(I_C)) = 1,33 * (1 - 0,83) = 0,00226 \quad (4.4)$$

### 1.13. 4.2. Medidas de mitigação do risco

Para melhorar o fornecimento de energia eléctrica pela empresa EDM, recomenda-se a colocação de cabo de guarda OPGW em toda extensão a partir da subestação de Chicumbane á subestação de Lindela. Possibilitando o aumento da confiabilidade da linha, o que permitirá aumentar a potência. E ainda fazer-se a colocação da rede de terra em todos os apoios como ilustra na peça desenha 02 do anexo 2.

Com o objectivo de minimizar os efeitos das descargas atmosféricas em linhas aéreas de transmissão de energia, é usual a instalação de cabos de guarda. Este tipo de cabos encontram-se ligados à terra em todos os apoios da linha, criando assim um caminho para a passagem das elevadas correntes desencadeadas por este fenómeno.

## CAPITULO V. IMPACTO ECONOMICO

Os surtos de origem atmosférica são os principais causadores de perturbações nas linhas de transmissão influenciando significativamente nos indicadores de qualidade da energia fornecida, por isso as companhias de distribuição de energia eléctrica vêm realizando importantes investimentos em pesquisas visando o aumento na qualidade da mesma. O uso cada vez mais frequente da energia eléctrica nas indústrias equipadas com os mais diversos equipamentos electrónicos que controlam e monitoram os processos de automação, e que geralmente são dispositivos sensíveis, necessitam de energia com qualidade pois possuem baixa tolerância à variações de frequência, tensão e corrente. É importante salientar que eventos ocorridos no passado em sistemas de energia eléctrica não causavam tantos efeitos como actualmente, pois, hoje os desligamentos resultam em danos aos equipamentos e máquinas que envolvem mais electrónica e são, portanto, mais sensíveis. Os custos das perdas devido à qualidade da energia eléctrica é uma pesquisa que já vem sendo realizadas e contabilizadas nos últimos anos com vários trabalhos realizados em diversas partes do mundo.

A maioria dos desligamentos acidentais nas Redes de Distribuição de Energia Eléctrica é provocada por Descargas Atmosféricas directas ou indirectas, muitas vezes acarretando danos em equipamentos do sistema. Os custos causados pelas descargas atmosféricas são de grandes proporções, tais como: desligamento total ou parcial de um alimentador, queima de transformadores, danos em pára-raios, rompimento de condutores de alta tensão/baixa tensão, isoladores danificados ou banco de capacitores.

Corroborando com o pensamento acima, para Silva et al. (2003), a maioria dos desligamentos acidentais produzem danos irreparáveis, o que é possível observar com a frequência das falhas em equipamentos e componentes das redes de distribuição, em especial nos transformadores de distribuição e isoladores e principalmente nas redes de distribuição rurais que são expostas a uma maior incidência directa de descargas atmosféricas.

Segundo Gomes et al. (1997), é necessário conhecer o custo das interrupções acidentais, e deste modo determinar a manutenção preventiva para melhorar a confiabilidade no sistema em função dos custos de investimentos e das interrupções. Para Gomes et al. (1997), quanto aos custos associados às falhas eles foram definidos como:

- a) Custos de Reparos (CR): Custos relativos aos reparos ou à compra de novos equipamentos danificados pela perda da qualidade de energia eléctrica.
- b) Custos de Produto sem Elaboração Estragados (CEE): Custo directo associado à perda de material durante o processo de manufactura.
- c) Custos de Produtos Acabados Estragados (CAE): Custo directo associado à perda de material já fabricado ou em estoque.
- d) Custo de Matéria-prima ou Produtos Primários Deteriorados (CMP): Custo directo associado à perda de matérias-primas ou produtos primários, estocados.
- e) Custos de Vendas não Realizadas (CV): Custo associado à perda de vendas que não foram feitas devido à interrupção da energia eléctrica.
- f) Custo da Protecção (CPR): Este custo se refere ao gasto que o consumidor industrial tem para se proteger da perda da qualidade de energia eléctrica.
- g) Custo de Geração Própria (CGP): Custo devido à geração de energia alternativa através de geradores de emergência, baterias etc. em caso de interrupção.
- h) Custo de Perdas de Informações (CIN): Custo associado a perdas de informações guardadas em meio computadorizado decorrente de interrupção ocorrida. Esse custo é estimado pelo cálculo da reposição da informação.
- i) Custo de Horas Extras (CHE): Custo associado à operação do estabelecimento, quando o seu horário normal de funcionamento é prolongado devido à falha da energia eléctrica.
- j) Custo de Retomada ou Reinício da Produção (CRP): Este custo refere-se aos gastos utilizados para se retomar o ritmo normal da produção no caso de ocorrência de uma interrupção. Inclui-se, neste item, os custos de preparo das máquinas, limpeza de resíduos, reposição de ferramentas, reprogramação da produção, reafirmação dos equipamentos computadorizados e estabelecimentos

dos novos padrões.

A linha de transmissão CL9 alimenta uma considerável na província de Inhambane, assim sendo a cada segundo em que a linha fica fora de serviço significa grandes perdas monetários, tanto para a concessionária, tanto para as indústrias até os pequenos consumidores.

A tabela abaixo facultada pela EDM, mostra o número de disparos em cada ano para os últimos 3 anos e as respectivas causas de ocorrência, o tempo médio em que a linha esteve fora de serviço em cada ano e o estado de temperatura.

Tabela 11 frequência de disparo da CL9

	DATAS/HORAS INICIO	DATAS/HORAS FIM	CAUSAS DA OCORRÊNCIA	ESTADO DO TEMPO	DISPAROS	TEMPO MEDIO ENTRE FALHAS(h)
2022	12/01/2022 08:42:00	12/01/2022 08:51:00	PD zona 3, fase T/N, sem indicação da distância	Normal	8	816.22
	9/20/2022 20:54	9/20/2022 21:08	Protecção a distância zona1, defeito de terra	Chuvoso com trovoadas		
	9/20/2022 21:18	9/21/2022 3:42	Protecção a distância zona 1, a 26.45Km, defeito de terra, causado por presença de papagaios ao longo da linha CL9	Chuvoso com trovoadas		
	11/10/2022 3:32	11/10/2022 12:08	os reparação da avaria (isolador partido na torre 259 em Z	Normal		
	11/26/2022 11:27	11/26/2022 11:30	otecção a distância zona 1, fase T, 165 Km e defeito de te	Chuvoso com Vento		
	12/6/2022 9:28	12/6/2022 9:39	Disparo. Protecção a distância, zona 3, fase R, 197.4Km	Chuvoso, vento com trovoadas		
	12/6/2022 10:56	12/6/2022 14:48	Disparo, tentativa sem sucesso as 11:08, após abate da linha não se achou nenhuma anomalia. Protecção a distância, zona 3, fase S, 242.6Km.	Normal		
	12/17/2022 23:21	12/18/2022 2:05	Protecção a distância zona 3 fase S a 210.7Km	Chuvoso com trovoadas		
2023	20/02/2023 15:03:00	20/02/2023 15:14:00	Protecção a distância, zona 4 a 206.9Km nas fases RST	Normal	7	1,250.1
	05/04/2023 08:42:00	05/04/2023 15:58:00	Disparo. Condutor rompido na torre 21 em Chicumbane. Protecção a distancia, zona 1 a 7Km e defeito de terra, na fase R.	Normal		
	13/06/2023 00:14:00	13/06/2023 00:33:00	Mau tempo.	Normal		
	26/09/2023 19:46:00	26/09/2023 19:59:00	Disparo PD zona 2 fases RT a 105.8 Km	Vento		
	26/09/2023 20:17:00	26/09/2023 20:20:00	Disparo PD zona 2 fase T a 142.3 Km	Vento		
	26/09/2023 20:21:00	26/09/2023 20:25:00	Disparo PD zona 2 fase T a 58.3 Km	Vento		
2024	12/12/2023 18:55:00	12/12/2023 18:59:00	PD zona 3 a 223Km, fase R	Normal	11	1,212.23
	17/01/2024 23:45:00	17/01/2024 23:56:00	Actuacao da protecção de distancia Z1	Normal		
	17/01/2024 13:28:00	17/01/2024 13:31:00	Protecção a distancia , zona 1, a 53Km, fases RS	Normal		
	28/01/2024 13:24:00	28/01/2024 13:28:00	Protecção a distancia ,zona 4, a 183.1 Km, fases RS.	Normal		
	02/02/2024 01:29:00	02/02/2024 07:48:00	PD zona 2 nas fases RST	Normal		
	15/03/2024 00:39:00	15/03/2024 00:43:00	Protecção a distância zona 3 fase T 180.9KM	Normal		
	24/03/2024 00:50:00	24/03/2024 01:06:00	Protecção a distância, zona 3 a 208.5Km e defeito de terra nas fases RST.	Chuvoso		
	24/03/2024 01:37:00	24/03/2024 02:36:00	Protecção a distância, zona 3 a 217Km e nas fases RST. Tentativa sem sucesso com protecção a distância zona 2 nas fases RST.	Chuvoso		
	24/03/2024 12:05:00	24/03/2024 12:09:00	PD, ZM2, fase S & N a 60.27Km	Chuvoso		
	16/04/2024 23:56:00	17/04/2024 00:35:00	Disparo actuando a Protecção a distância, zona 1	Normal		
	20/05/2024 08:01:00	20/05/2024 08:41:00	Protecção a distância zona1, 116KM nas fases RST	Normal		
24/05/2024 16:16:00	24/05/2024 16:26:00	Protecção a distância, zona 2, fases RST.	Normal			

**FONTE:** Autor

Da tabela pode-se verificar que num total de 26 disparos ocorridos nos últimos 3 anos, 8 destes ocorreram devido a descargas atmosféricas em dias chuvosos com trovoadas.

## **CAPITULO VI. IDENTIFICAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS**

Impacto ambiental é o conjunto das alterações favoráveis e desfavoráveis produzidas em parâmetros ambientais e sociais, num determinado período de tempo e numa determinada área, resultantes da realização de um projecto, comparadas com o desenvolvimento que ocorreria nessa área se o projecto não avançasse.

O projecto da linha CL9 é uma linha aérea de alta tensão e tem de reger pelos diversos aspectos relacionados com os impactos ambientais, uma vez que, por um lado, está-se a lidar com energia eléctrica e, conseqüentemente, com campos electromagnéticos. Por outro lado, ao se estabelecer um traçado vai se alterar irreversivelmente a zona, tanto ao nível dos habitats naturais, como da fauna e flora. Estes protocolos visam criar métodos para a compatibilização das redes eléctricas com a conservação do meio ambiente circundante, tendo já resultado em diversos processos de remodelação de linhas antigas por forma a minimizar os impactos ambientais.

### **1.14. 5.1. Presença de torres e de linha eléctrica**

A presença da linha eléctrica aérea introduzirá um risco de colisão para aves e morcegos, levando a um aumento de mortalidade destes animais, com impacto potencial na diversidade específica.

A colisão de aves ocorre em todos os tipos de linhas aéreas (energia, comunicações, linhas férreas, etc.), incluindo torres aéreas de suspensão, porque as aves não vêem os cabos. O risco de colisão é mais alto com baixa visibilidade (como à noite ou com nevoeiro) ou com cabos de pequeno diâmetro.

Nas linhas de alta voltagem existem dois tipos de cabos: cabos condutores e cabos de terra. Os cabos de terra causam a maioria da mortalidade das aves visto estarem colocados mais alto do que os cabos de condução e serem de diâmetro mais pequeno. O risco de colisão está também relacionado com o número de planos horizontais em que os cabos são esticados, sendo maior à medida que o número de planos horizontais aumenta. O risco de mortalidade é também maior em estruturas verticais do que em estruturas horizontais.

### **5.1.1. Medidas de Mitigação**

- Limitar a perturbação fora das fronteiras das áreas de manutenção;
- Limitar a remoção de vegetação à área necessária;
- Limitar o mais possível a entrada e circulação de veículos não pertencentes ao projecto;
- Sinalizar os cabos de guarda com dispositivos anti colisão (BFD) com 35 cm de diâmetro, vermelhos e brancos, alternando as cores nos dois cabos de terra de 5 em 5m.

(ou seja, em cada cabo de terra, a distância entre BFD é de 10m). Usar este esquema de sinalização em áreas onde a linha atravessa ou se desenvolve perto de rios, zonas húmidas ou massas de água (ao longo do corredor inteiro) ou de grandes áreas de floresta ou de matas não degradadas.

## CAPITULO VII. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### Conclusão

#### 1.15.

Esse estudo concluiu que a utilização de cabos de guarda OPGW em linhas aéreas AT, apresenta grandes vantagens, uma vez que este tipo de cabo apresenta grandes probabilidades de interceptar a descarga, impedindo-a de atingir directamente os condutores de fase. Nas ligações a novas subestações, é frequentemente necessário dotar a linha de um circuito de telecomunicações por fibra óptica. Nestes casos as linhas AT devem ser equipadas com cabo de guarda incorporando fibras ópticas (OPGW) em toda a sua extensão.

Quando uma descarga atmosférica atinge directamente um apoio metálico provoca a elevação do potencial das estruturas metálicas, devido à parcela da corrente que é escoada pela resistência de terra desse apoio, sendo a restante corrente conduzida pelo cabo de guarda para os apoios mais próximos.

Instalado em linhas de transmissão de energia eléctrica de alta tensão, o OPGW não sofre com vandalismo e é super resistente, raramente apresenta falha ou rompimento, além de ser imune a interferências electromagnéticas e meteorológicas, como ventos, chuva e gelo.

### Recomendações

Recomenda-se:

- A colocação de cabo de guarda OPGW em toda a extensão;
- Garantir que a resistência de terra seja inferior ou igual a  $20\Omega$ .
- Sinalizar os cabos de guarda com dispositivos anticollisão (BFD) com 35 cm de diâmetro.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

01. DGE, "Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão," 1993.
02. EDM, "Caracterização da Rede Nacional de Transporte", Maputo, 2024
03. EDPDRE-C34-122 – Guia técnico cabo de guarda com fibra óptica
04. Fortes, Jose Miguel - "Projecto de construção de redes MT/PT/BT/IP" Porto 2006
05. J. Duncan Glover, Mulukutla S. S. (2012). Power System Analysis and Design, 5ª edição, SI, Stamford, USA
06. Rocha, Luís Filipe - Estudo sobre a utilização de cabo de guarda, Dissertação de mestrado, Porto 2014
07. Solidal, Q. & Q. (2007). Guia Técnico. Solidal - Condutores Eléctricos, S.A., Quintas & Quintas - Condutores Eléctricos, S.A, 10ª Ed., p. 12, p.92, pp. 214-255
08. Silva, Luís Gonçalo - "Fases de instalações de uma linha aérea de transmissão de energia" Porto 2006
09. Teixeira, Daniel António, Projecto de uma Linha Aérea de Alta Tensão, Dissertação de mestrado, Porto 2017

**ANEXO**

## Anexo 1: Especificação de alguns materiais usados nas linhas de transmissão

### 1.16. TEXTO A1-1: ACESSÓRIOS DE CABO DE GUARDA OPGW

Nas figuras seguintes, são apresentados os acessórios juntamente com as referências a pinças de amarração, guarda cabos para pinças de amarração e antivibrador, também estes utilizados para a instalação de cabos OPGW.

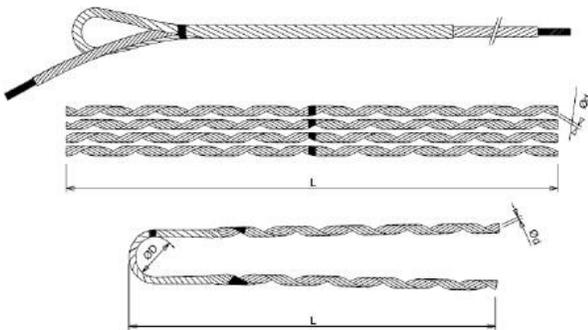


Figura A1.1-1: Pinça de amarração para cabos OPGW

FONTE: Carvalho, 2018

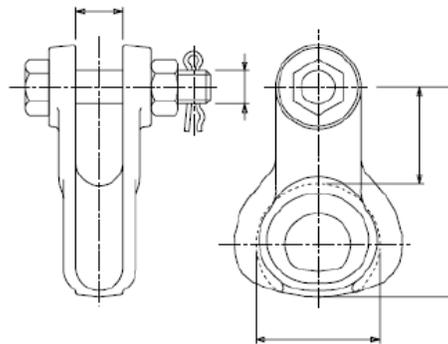


Figura A1.2-1: Guarda cabos para pinça de amarração

FONTE: Carvalho, 2018

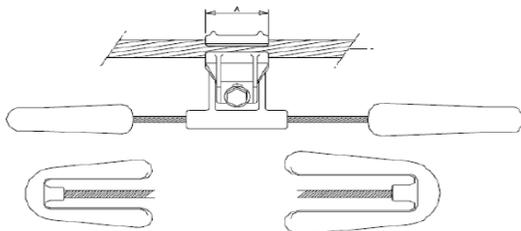


Figura A1.3-1: Antivibrador para cabos OPGW

FONTE: Carvalho, 2018

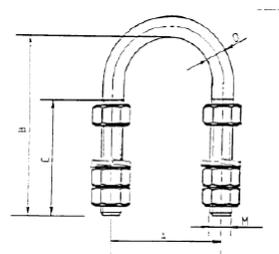


Figura A1.4-1: Estribo

FONTE: Carvalho, 2018

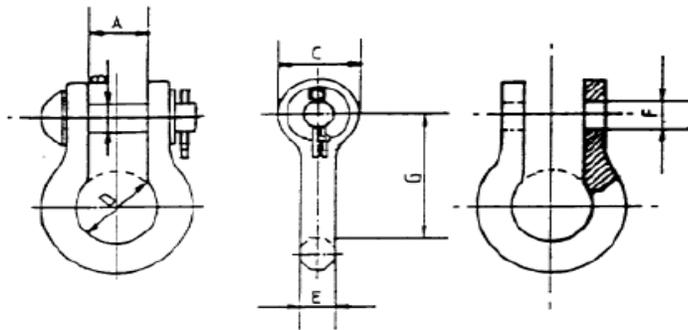


Figure A1.5-2: Manilha direita

FONTE: Carvalho, 2018

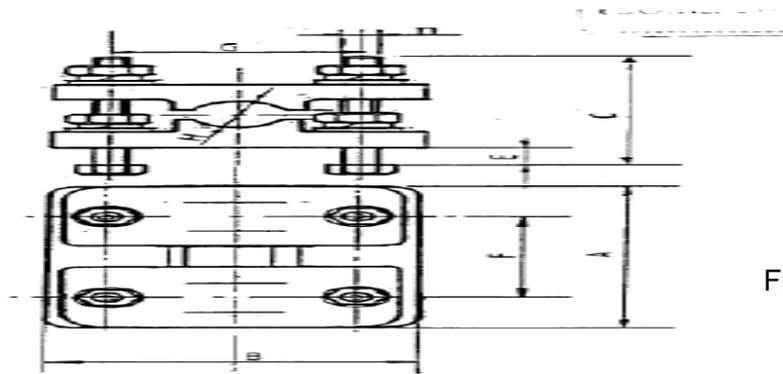


Figure A1.7-2: Ligador para um cabo de guarda

FONTE: Carvalho, 2018

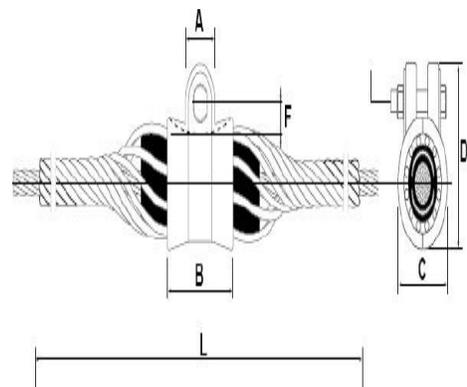


Figura A1.6-2: Pinça de suspensão antivibratória

FONTE: Carvalho, 2018

**ANEXO 2:** Ilustração da malha de terra (FONTE: autor)

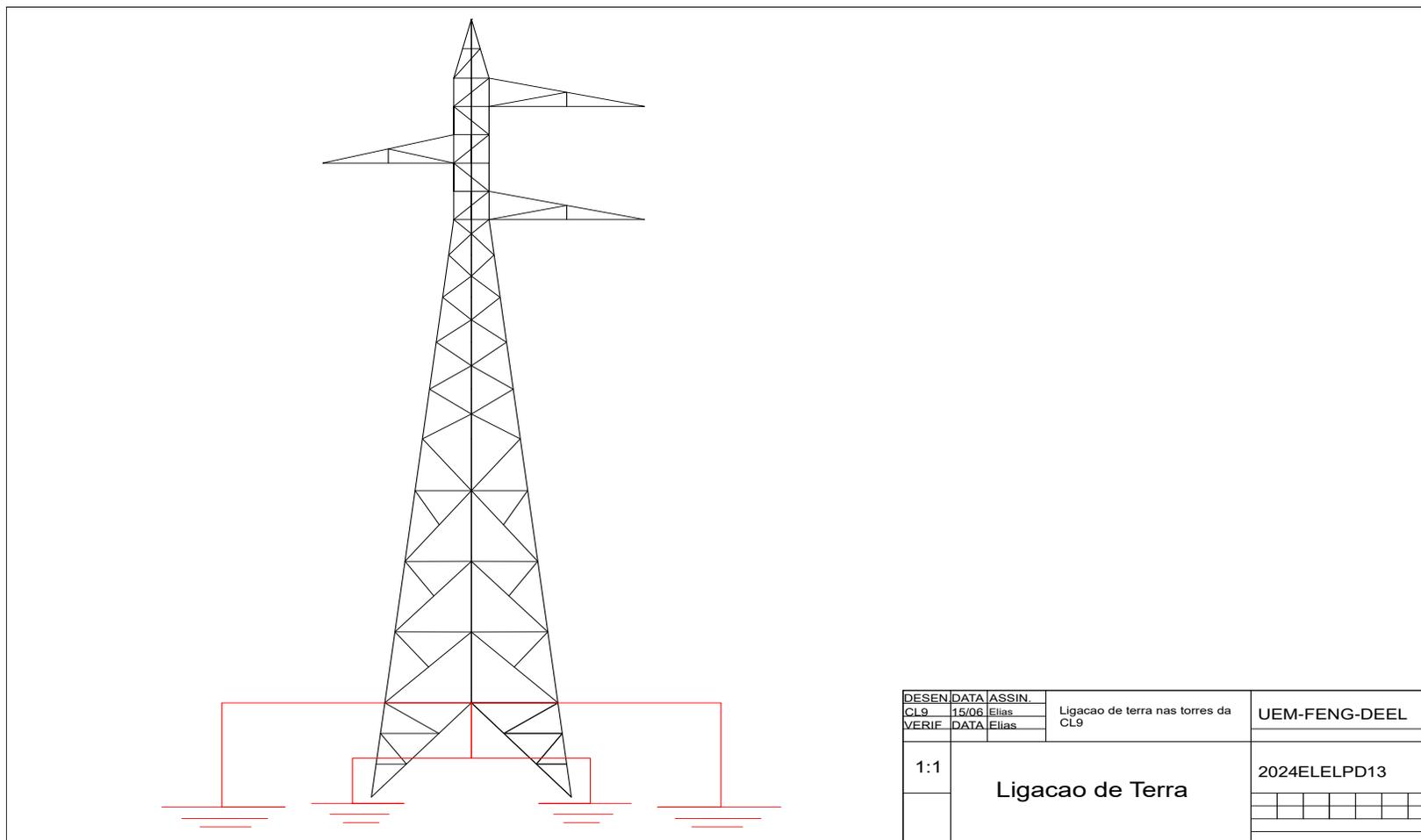


Figura A2-3: Ligação da terra nas torres da CL9 (FONTE: autor)

**ANEXO 3:** esquematização da linha contendo cabo de guarda (FONTE: autor)

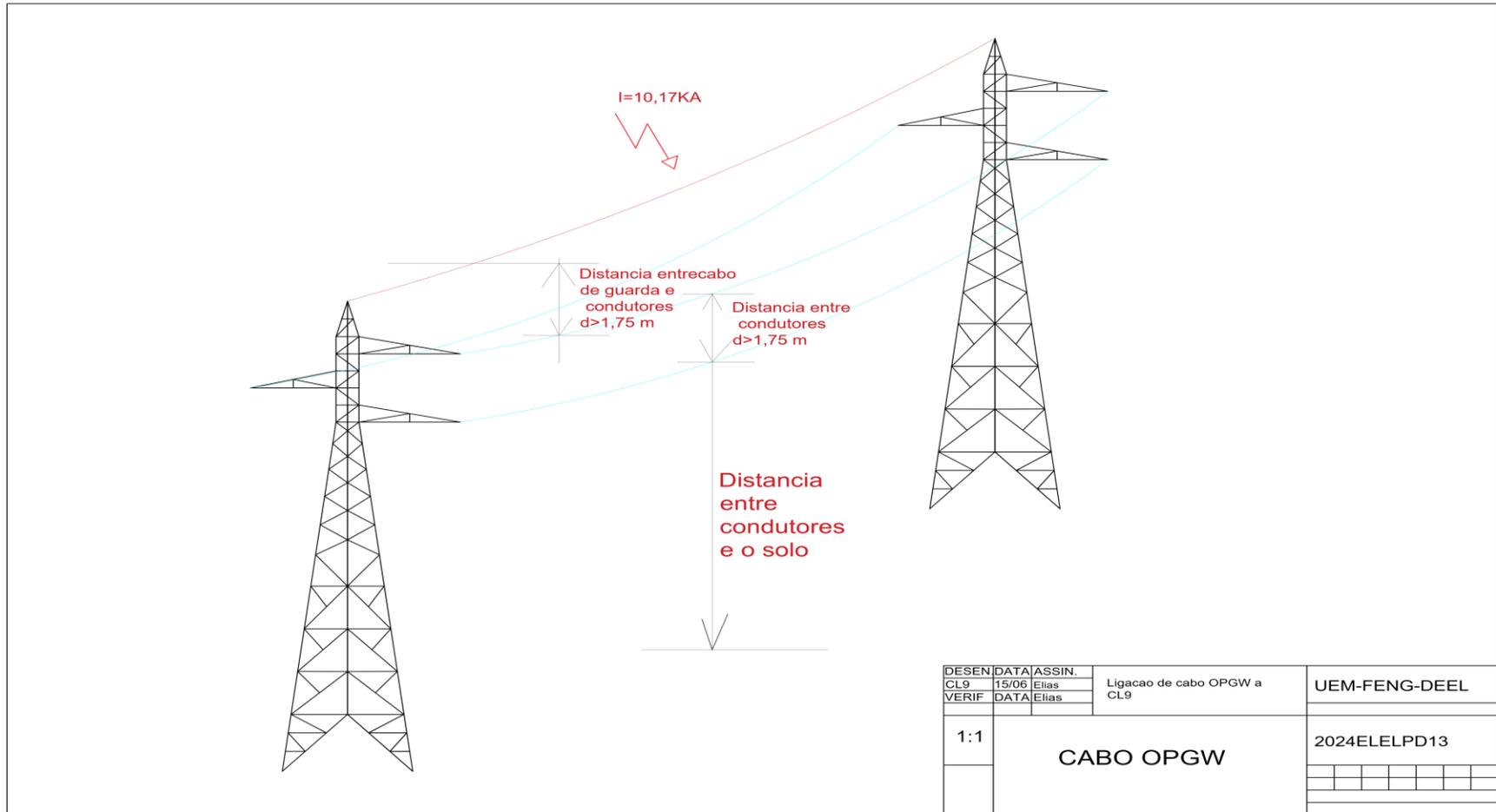


Figura A3-4: ligação do cabo OPGW a CL9 (FONTE: autor)

**ANEXO 4:** ligação do cabo OPGW entre as subestações (FONTE: autor)

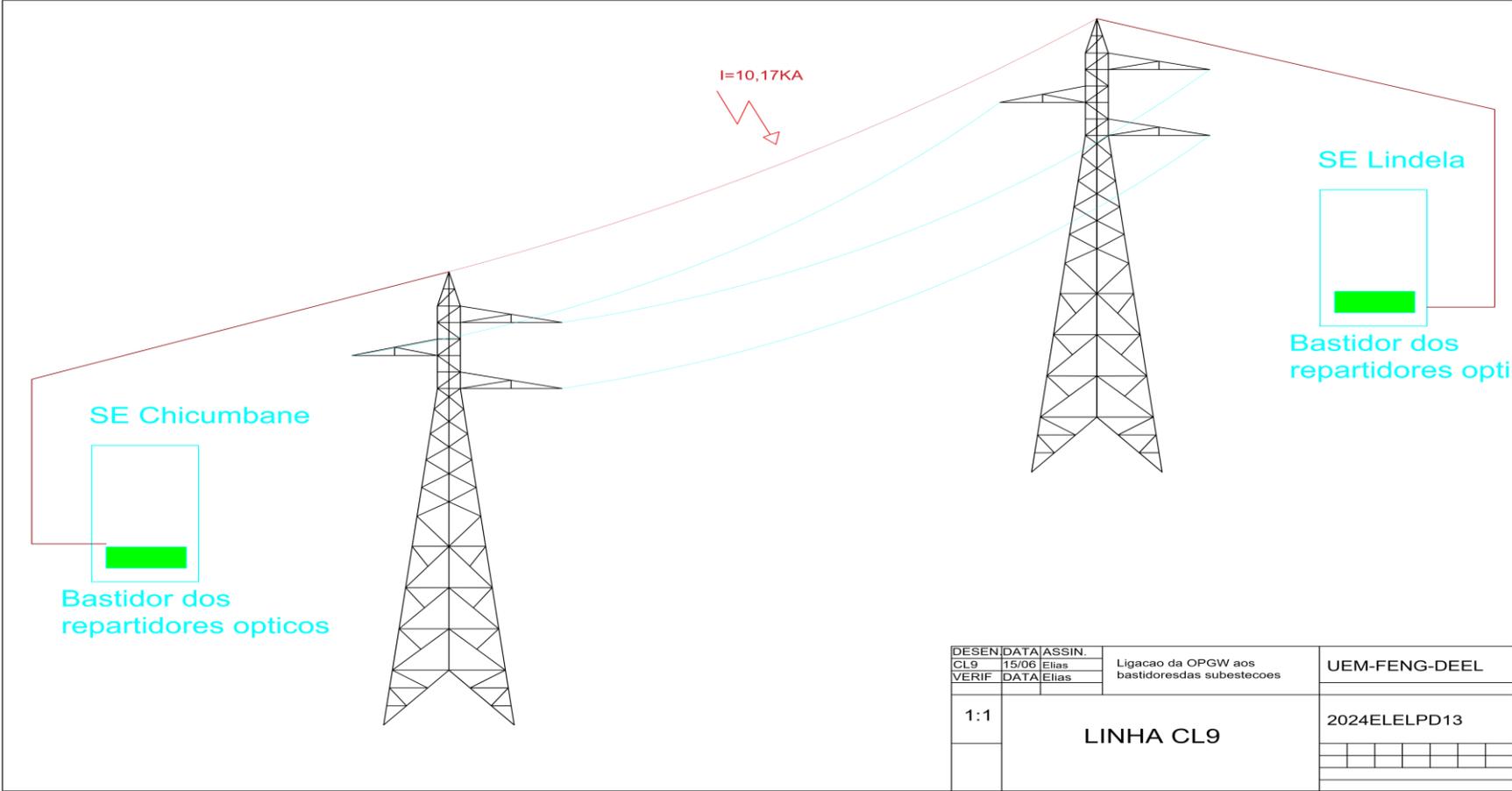


Figura A4-5: Ligação da OPGW aos bastidores das subestações (FONTE: autor)