



**FACULDADE DE ENGENHARIA**  
**LICENCIATURA EM ENGENHARIA ELÉCTRICA**  
**ESTÁGIO PROFISSIONAL**

**MELHORAMENTO DE DESEMPENHO FACE ÀS DESCARGAS  
ATMOSFÉRICAS, DE LINHA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA  
ELÉCTRICA DE 110KV E 49 km QUE INTERLIGA AS  
SUBESTAÇÕES DE MACIA E CHICUMBANE (CL2).**

**Autor:**

Cuna, Celso Samuel

**Supervisores:**

Eng. Gerson Zango (UEM)

Eng. Deulário Mabecua (Empresa)

Maputo, Junho de 2025



**FACULDADE DE ENGENHARIA**  
**LICENCIATURA EM ENGENHARIA ELÉCTRICA**  
**ESTÁGIO PROFISSIONAL**

**MELHORAMENTO DE DESEMPENHO FACE ÀS DESCARGAS  
ATMOSFÉRICAS, DE LINHA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA  
ELÉCTRICA DE 110KV E 49 km QUE INTERLIGA AS  
SUBESTAÇÕES DE MACIA E CHICUMBANE (CL2).**

**Autor:**

Cuna, Celso Samuel

**Supervisores:**

Eng. Gerson Zango (UEM)

Eng. Deulário Mabecua (Empresa)

Maputo, Junho de 2025

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha amada família, que esteve incansavelmente ao meu lado, oferecendo apoio incondicional, incentivo constante, crença no meu sucesso, compreensão e motivação em cada etapa desta jornada. Porém, sem o vosso suporte, a concretização deste relatório não teria sido possível. O meu profundo agradecimento e amor a cada um de vocês.

*“A vitalidade é demonstrada não apenas pela persistência, mas pela capacidade de começar de novo, assim como o homem não teria alcançado o possível se, repetidas vezes, não tivesse tentado o impossível, daí que, porque a energia é um fluxo constante e a nossa missão é otimiza-lo para um futuro sustentável” (F.Scott Fitzgerald)*

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar a minha profunda gratidão a todos que contribuíram para a concretização deste relatório. Em primeiro lugar, o meu profundo agradecimento aos meus pais, pilares fundamentais nesta caminhada, pelo amor incondicional, apoio constante e por sempre acreditarem em mim. A minha querida família, agradeço o apoio inabalável em todas as minhas decisões e por me envolverem sempre com vosso amor e carinho, que foram a minha força motriz. Ao corpo docente da Faculdade de Engenharia, reconheço a influência significativa na minha formação académica e profissional até o presente momento. Agradeço a dedicação e o conhecimento transmitido. Aos meus colegas, tanto os mais próximos quanto os que cruzaram meu caminho, agradeço o apoio mútuo, a troca de conhecimentos e a camaradagem. Por fim, aos meus colegas de serviço durante o estágio profissional, que se empenharam para que eu pudesse alcançar a minha graduação, o meu especial agradecimento pela colaboração e ensinamentos.

## RESUMO

A linha de transmissão de 110 kV CL2 (Macia–Chicumbane) apresenta vulnerabilidades significativas, com elevado número de desligamentos maioritariamente provocados por descargas atmosféricas, resultantes da ausência de cabo de guarda desde a sua implementação, cuja instalação se revela inviável por razões de segurança (distâncias de isolamento) e fragilidades estruturais das torres. Para mitigar estes desligamentos, foram propostos métodos normalizados, nomeadamente a instalação de para-raios de linha, que desviam as correntes de surto para terra, protegendo os isoladores e evitando disparos indevidos; a melhoria da resistência de aterramento das torres, através da reestruturação de malhas e medições sucessivas, permitindo dissipar de forma eficaz as correntes de surto; e a instalação de isoladores com saias de maiores dimensões, aumentando a distância de escoamento e a capacidade de isolamento face a sobretensões. Estes métodos serão analisados mediante cálculos e estudos de viabilidade técnica e económica, com o objectivo de melhorar significativamente os índices de desligamentos da linha causados por descargas atmosféricas.

**Palavra chave:** Vulnerabilidade de linha de transmissão devido a descargas atmosféricas.

## **ABSTRACT**

The 110 kV CL2 transmission line (Macia–Chicumbane) presents significant vulnerabilities, with a high number of outages mainly caused by lightning strikes. These issues are primarily due to the absence of an overhead ground wire since the line's implementation—a solution deemed unfeasible due to safety constraints (isolation distances) and structural weaknesses of the towers. To mitigate these outages, standardised methods have been proposed, including the installation of line surge arresters to divert surge currents safely to ground, thereby protecting insulators and preventing unnecessary trips; improvement of tower grounding resistance through grid restructuring and successive measurements to ensure effective current dissipation; and the installation of larger insulator sheds to increase the creepage distance and enhance insulation performance under overvoltage conditions. These methods will be evaluated through technical calculations and feasibility studies to assess their effectiveness in significantly improving the reliability of the transmission line against lightning-induced outages.

**Keywords:** Transmission line vulnerability due to atmospheric discharges.

# ÍNDICE

DEDICATÓRIA.....	I
AGRADECIMENTOS.....	II
RESUMO.....	III
ABSTRACT.....	IV
ÍNDICE.....	V
LISTA DE SIMBOLOS.....	X
LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE TABELAS.....	XII
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Formulação do Problema.....	2
1.2 Pergunta de Pesquisa.....	2
1.3 Justificativa.....	3
1.4 Objectivo.....	3
1.4.1 Objectivo geral.....	3
1.4.2 Objectivos específicos.....	3
1.5 Metodologia.....	4
1.6 Organização do Trabalho.....	4
CAPÍTULO II.....	6
2. Revisão da Literatura.....	6
2.1 Descarga atmosférica.....	6
2.2 Descarga em Torre.....	7
2.3 Descarga disruptiva directa (“Itálico” Flashover).....	8
2.3.1 Causas.....	8

2.3.2 Consequências .....	8
2.4 Descarga disruptiva indirecta (“Itálico” Backflashover) .....	9
2.4.1 Causas .....	9
2.5 Distância de escoamento ou de fuga de um isolador .....	9
2.5.1 Factores que influenciam a distância de escoamento .....	10
2.5.2 Importância da Distância de Escoamento .....	10
2.6 Corrente de curto-circuito .....	11
2.7 Corrente de curto-circuito no contexto de descargas atmosféricas .....	11
2.7.1 Consequências de uma corrente de curto-circuito .....	11
2.7.2 Medidas de protecção contra curto-circuito .....	12
2.8 Torre de transmissão .....	12
2.8.1 Importância das torres de energia eléctrica .....	12
2.9 Isolador de energia eléctrica .....	13
2.9.1 Tipos de Isoladores .....	13
2.10 Pára-raios de linha de transmissão .....	14
2.10.1 Função e benefícios do pára-raios de linha de transmissão .....	14
2.11 Sistema de aterramento de torres de transmissão .....	15
2.11.1 Importância do Sistema de Aterramento de Torres de Transmissão .....	15
CAPÍTULO III .....	16
3. Melhoramento de desempenho da linha de transmissão 110kv face às descargas atmosféricas	16
3.1 Instalação de cabo de guarda .....	16
3.1.1 Distância entre os Condutores e o Cabo de Guarda .....	17
3.2 Melhoramento de desempenho de isolamento .....	17
3.2.1 Aumento da distância de isolamento .....	17
3.3 Instalação de pára-raios de linha nas torres .....	18

3.3.1 Análise de como os pára-raios de linha melhoram o desempenho sem cabo de guarda .....	19
3.3.2 Pontos estratégicos para instalação de pára-raios nas Torres .....	20
3.3.3 Escolha de pára-raios de linha .....	20
3.3.3.1 Vantagens .....	21
3.4 Melhoramento de aterramento das torres .....	22
3.5 Redução da magnitude das sobretensões induzidas .....	22
CAPITULO IV: .....	23
4. Dados de incidência de descargas atmosféricas .....	23
4.1 Clima predominante .....	24
4.2 Cálculo da densidade de descarga atmosférica .....	24
4.3 Área de exposição equivalente .....	25
4.4 Frequência média anual de descargas .....	25
4.5 Dados do registo de falha na linha CL2 .....	26
Tabela 2: Dados de disparos da linha em dias de mau tempo. (Fonte: II) .....	26
4.5.1 Vulnerabilidade da linha .....	26
4.5.2 Topografia e características do solo .....	26
4.5.3 Cálculo de probabilidade de ocorrência de falha .....	27
4.5.4 Corrente crítica de descarga .....	28
4.5.5 Cálculo da probabilidade de corrente ser excedida .....	28
4.5.6 Determinação de inpedância da linha .....	28
4.5.7 Descarga Directa no Condutor de Fase .....	28
4.5.8 Velocidade de Propagação (v) .....	29
4.6 Dimensionamento do pára-raios de linha .....	29
4.6.1 Determinação da tensão máxima de operação contínua (MCOV) .....	29

4.6.2 Cálculo das sobretensões temporárias (tov) .....	29
4.6.2.1 Determinação de factor de Aterramento (k) .....	30
4.6.2.2 Impedância sequencia zero ( $Z_0$ ) e Impedancia sequencia positiva ( $Z_1$ ) .....	30
4.6.2.3 Aplicar uma Margem de Segurança .....	31
4.6.3 Selecção da MCOV do Pára-raios .....	31
4.6.4 Especificação técnica de pára-raios poliméricos de 120 kV .....	31
4.6.5 Capacidade de Absorção de Energia .....	32
4.6.6 Densidade Ceráunia .....	32
4.6.7 Corrente nominal de descarga recomendada pelo IEC .....	33
4.6.8 NBI (nível básico de isolamento) .....	33
4.6.9 Determinação da tensão residual do pára-raios ( $U_r$ ) .....	33
4.6.10 Verificação da coordenação de isolamento .....	34
4.6.11 Capacidade de Energia absorvida .....	34
4.7 Cálculo de aprimoramento de isolamento .....	35
4.7.1 Determinação de fuga nominal do isolador proposto .....	35
4.7.2 Determinação de distância de fuga total da cadeia de isolador .....	35
4.7.3 Peso total das cadeias de isoladores na torre .....	35
4.7.4 Distância de escoamento mínima requerida .....	36
4.7.5 Coordenação de Isolamento Aprimorada .....	37
4.7.6 Benefícios Técnicos de isolador de Vidro de Maior Dimensão .....	37
4.8 Cálculo de estabilidade dos apoios .....	38
4.8.1 Eixo Longitudinal (eixo x) .....	39
4.8.2 Eixo Transversal (eixo y) .....	39
4.8.3 Eixo Vertical (eixo z) .....	39
4.9 Melhoramento de sistema de aterramento .....	40

4.9.1 Medição de resistência de aterramento .....	40
4.9.2 Determinação da resistividade do solo .....	40
4.9.3 Redimensionamento de condutor de aterramento .....	42
4.9.4 Determinação de secção mínima do condutor de aterramento .....	42
4.9.5 Implementação de Melhorias .....	43
4.9.6 Verificação Pós-Implementação .....	43
CAPITULO V .....	44
5. Avaliação económica e orçamental de projecto .....	44
5.1 Estimativa de Custos de Investimento do projecto .....	44
5.2 Benefícios (Redução de custos operacionais) .....	45
5.3 Cálculo da Redução de Perdas .....	45
5.4 Perdas anuais sem instalação de pára-raios, aprimoramento de isoladores e melhoramento de aterramento .....	45
5.5 Redução esperada de desligamentos .....	45
5.6 Análise de viabilidade econômica .....	46
5.7 Valor Presente Líquido (VPL) .....	46
5.7.1 Interpretação do Resultado .....	46
5.8 Cálculo do Valor presente líquido (“Itálico”Payback ) .....	47
CAPITULO VI .....	48
6. Conclusão .....	48
7. Recomendações .....	49
7.1 Análise de desempenho pós-implementação .....	49
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	50
ANEXOS .....	51

## LISTA DE SIMBOLOS

SIMBOLO	DESCRIÇÃO
	Resistência eléctrica
	Indutância eléctrica
	Transformador eléctrico
	Ligação em estrela com neutro aterrado
	Ligação em triângulo
EDM	Electricidade de Moçambique
RSLEAT	Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão
SE	Subestação Eléctrica
SEE	Sistema Eléctrico de Energia
INAM	Instituto Nacional de Meteorologia de Moçambique
NB	Norma brasileira regulamentadora
UEM	Universidade Eduardo Mondlane
MCOV	Máxima tensão de operação continua
TOV	Tensão temporária de operação
SEP,s	Sistemas eléctricos de potência
PBPE-LT	Pára-raios de baixa perda de energia de linha de transmissão
IEC	Comissão electrotécnica internacional
IEEE	Instituto de engenheiros electricistas e electrónicos
°C	Grau Celsius
A	Ampere
daN	DecaNewton
kA	Quilo ampere
kg	Quilograma
kV	Quilovolt
kW	Quilowatt

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1: Formação de descarga atmosférica ..... 6

Figura 2: Modelo Idealizado de Impulso Atmosférico..... 7

Figura 3: Descarga Atmosférica na Torre de Transmissão..... 7

Figura 4: Torre com característica inviável para instalação de cabo de guarda..... 17

Figura 5: Forma de onda de descarga atmosférica (Fonte: Mamede filho, 2010.)..... 23

Figura 6: Diagrama unifilar da linha de transmissão CL2..... 30

Figura 7: Diagrama de modelo para uma linha de transmissão Média..... 31

Figura 8: Para-raio de linha 120KV..... 33

Figura 9: Saia de isolador de vidro..... 36

Figura 10: Representação esquemática da medição de Resistência de aterramento utilizando o Meggar..... 39

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: 1. Dados climatológicos da região sul.....	24
Tabela 2: Dados de disparos da linha em dias de mau tempo .....	26
Tabela 3: Nível de poluição (IEC 60815).....	37
Tabela 4: Determinação de resistividade media, partir dos dados de medições de resistência efectuadas no campo.....	40
Tabela 5: Valores dos parâmetros dos condutores de aterramento mais usados.....	41
Tabela 6: Necessidades e custo.....	43

## CAPÍTULO I

### 1. Introdução

Os Sistemas de Potência (SEPs) desempenham um papel crucial na sociedade moderna, sendo responsáveis pela produção, transmissão e distribuição eficiente da energia elétrica até o consumidor final. No entanto, esses sistemas são caracterizados por redes complexas, compostas por uma variedade de elementos que devem operar de forma confiável para atender à demanda energética.

Um desafio inerente à operação dos SEPs é a imprevisibilidade de fenômenos naturais, como as descargas atmosféricas. A incidência de raios pode desencadear sobretensões e falhas induzidas, como flashovers (descargas disruptivas) e backflashovers (descargas de retorno) em linhas aéreas de transmissão, comprometendo a integridade do sistema elétrico. As falhas em linhas de transmissão representam um risco significativo, podendo gerar oscilações e instabilidades no sistema de potência, com o potencial de causar blecautes de grande magnitude.

Para mitigar esses riscos e garantir a confiabilidade esperada, é imperativo adotar medidas preventivas e corretivas eficazes. O desempenho das linhas aéreas, um componente vital dos SEPs, é frequentemente avaliado pela taxa de desligamentos por 100 km, portanto, a implementação de ações que aprimorem esse desempenho é fundamental. As principais estratégias comumente empregadas incluem:

- Instalação de cabos de guarda nas linhas;
- Redução da resistência de aterramento das torres;
- Aumento do nível de isolamento das linhas; e
- Instalação de para-raios de linha nas torres. [Fonte: II]

## 1.1 Formulação do Problema

A linha de transmissão de energia elétrica em questão desempenha um papel estratégico, assegurando a interligação vital entre as subestações de Macia e Chicumbane, na província de Gaza, e suprindo a demanda energética da província de Inhambane. Contudo, essa infraestrutura crítica apresenta vulnerabilidades significativas:

**Ausência de cabo de guarda:** O projecto original da linha não incluiu a instalação de cabos de guarda, um componente essencial para a proteção contra descargas atmosféricas.

**Aterramento comprometido:** Os cabos de aterramento das torres apresentam interrupções decorrentes de corrosão galvânica, comprometendo a eficácia do sistema de proteção contra surtos de tensão.

**Histórico de desligamentos:** Nos últimos cinco anos, a linha tem sofrido inúmeros desligamentos durante períodos de mau tempo, indicando uma alta susceptibilidade a falhas induzidas por descargas atmosféricas.

Diante desse cenário, surge a necessidade premente de reduzir a frequência de desligamentos da linha, visando alcançar um desempenho aceitável. Isso requer a implementação de medidas corretivas eficazes e em conformidade com as normas técnicas vigentes, a fim de garantir a confiabilidade e a estabilidade do sistema de transmissão. [Fonte: II].

## 1.2 Pergunta de Pesquisa

***Como proteger a linha de transmissão de 110KV, face as descargas atmosféricas, para reduzir os índices de desligamentos, de modo a garantir a confiabilidade do sistema eléctrico, através de implementação e avaliação de métodos eficazes ?.***

### **1.3 Justificativa**

A melhoria do desempenho da linha de transmissão é uma medida de carácter estratégico e prioritário, justificada pelos seguintes aspectos:

- Garantia da confiabilidade do fornecimento de energia eléctrica;
- Minimização de danos à infraestrutura da linha;
- Redução de perdas económicas;
- Optimização da operação do sistema eléctrico.

### **1.4 Objectivo**

#### **1.4.1 Objectivo geral**

O objectivo é de reduzir os índices de desligamentos e garantir a confiabilidade do sistema eléctrico, através de implementação de métodos de melhoramento propostos de linha de transmissão de 110KV CL2 (SE Macia – SE Chicumbane).

#### **1.4.2 Objectivos específicos**

- Identificar e analisar os métodos propostos para melhoramento de desempenho das linhas de transmissão, com foco em técnicas de protecção contra descargas atmosféricas.
- Caracterizar a linha de transmissão e propor soluções para reduzir desligamentos causados por descargas atmosféricas.
- Desenvolver algoritmos para análise de dados (como taxas de desligamento, correntes de surto e tensões induzidas) dos métodos propostos para resolução do problema.
- Realizar ensaios com programas computacionais para avaliação da aplicabilidade dos métodos escolhidos.
- Demonstrar a viabilidade económica das soluções, considerando custos de implementação e benefícios a longo prazo.

## 1.5 Metodologia

Para elaboração do relatório de estágio serão considerados os seguintes passos:

- **Revisão bibliográfica:** Consistirá na pesquisa e leituras de livros, catálogos, publicações científicas, conteúdos da internet e consulta de técnicos da especialidade.
- **Pesquisa de campo:** Serão feitas visitas em alguns pontos do objecto do trabalho.
- **Elaboração do relatório:** Será apresentada de forma resumida a informação adquirida na literatura, demonstrando os resultados de pesquisa, dos cálculos, simulações, bem como a discussão dos mesmos.

## 1.6 Organização do Trabalho

O trabalho está organizado em capítulos, sendo:

**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 projetado, assim como os conceitos dos elementos envolvidos na elaboração do relatório.

**CAPÍTULO III:** Descrição dos métodos propostos para o melhoramento de linhas de transmissão e apresentação de limitações de aplicabilidade mediante as características actuais da linha em alusão. Apresentar parâmetros que demonstram a inviabilidade de alguns métodos propostos do problema.

**CAPÍTULO IV:** Determinação de cálculos, para dimensionamento de para-raios de linha, bem como das diferentes alternativas que complementam as soluções propostas para mitigação das sobretensões atmosféricas.

**CAPÍTULO V:** Análise das viabilidades económicas dos métodos escolhidos para implementação na linha de transmissão com vista a reduzir falhas.

**Melhoria do Desempenho da Linha de Transmissão de 110 kV Macia–Chicumbane (CL2) face a Descargas Atmosféricas.**

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

Anexos, são apresentados desenho, assim como algumas especificações técnicas dos materiais.

## CAPÍTULO II

### 2. Revisão da Literatura

#### 2.1 Descarga atmosférica

Em termos mais técnicos, uma descarga atmosférica é uma transferência repentina e massiva de carga elétrica entre regiões com potenciais eléctricos significativamente diferentes. Essas regiões podem estar:

- Dentro da mesma nuvem: A maioria das descargas ocorre internamente nas nuvens de tempestade.
- Entre diferentes nuvens: Descargas podem ocorrer entre duas ou mais nuvens.
- Entre uma nuvem e o solo: Estas são as descargas mais perigosas e as que mais nos preocupam em termos de segurança e impacto em infraestruturas.
- Entre uma nuvem e o ar: Descargas podem ocorrer da nuvem para o ar circundante. [Fonte: VII]

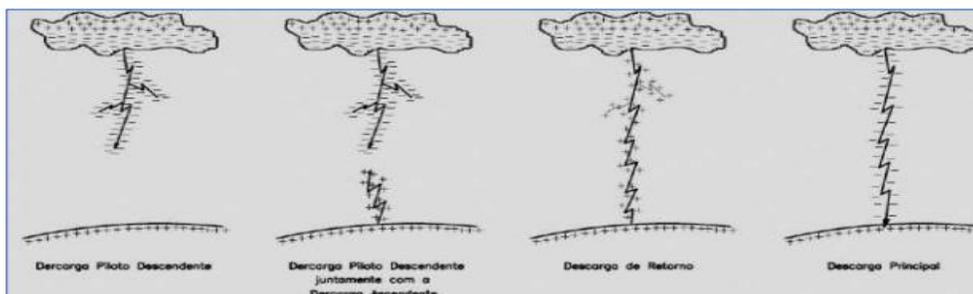


Figura 1: Formação de descarga atmosférica [fonte. VI]

A descarga atmosférica também conhecida como frente de onda rápida tem a característica de um pulso de corrente que gira em torno de 50us (microssegundos), sendo que o tempo inicial de amplitude zero até o pico, conhecido como tempo de crista, tem a duração de 1,2us e do instante de pico da corrente até o zero é conhecido como tempo de calda e varia em torno de 50us. Seguindo as características de uma descarga atmosférica a Figura 2 mostra o modelo de descarga atmosférica adotada como referencia para este trabalho. [Fonte: IX]

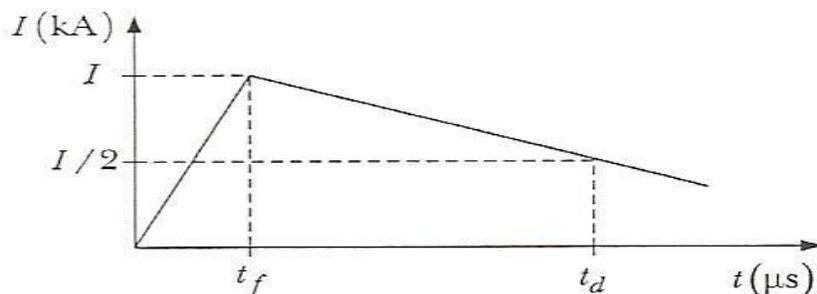


Figura 2: Modelo Idealizado de Impulso Atmosférico. [Fonte: IX]

## 2.2 Descarga em Torre

Quando um raio atinge umas das torres de uma linha de transmissão, é estabelecido um processo de propagação de ondas de tensão e corrente nos cabos de guarda, nas torres próximas e no sistema de aterramento, com reflexões conforme impedância característica envolvida.

A Figura 3 abaixo, mostra a representação de uma torre, no qual a impedância da torre é sempre de valor fixo e a resistência de aterramento depende do projecto do aterramento, quanto mais eficiente for, menor será a resistência de aterramento e melhor será o escoamento do pulso de corrente para a terra. Isso gera uma menor tensão no ponto onde a descarga atmosférica atingiu, transformando as chances de acontecer algum tipo de rompimento de isolação no sistema menor. [Fonte: XIII]

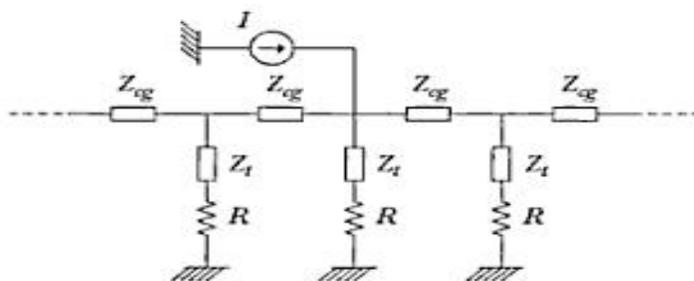


Figura 3: Descarga Atmosférica na Torre de Transmissão. [Fonte: XIII]

### 2.3 Descarga disruptiva directa ( *Flashover* )

Ocorre quando uma descarga atmosférica atinge directamente um condutor de fase da linha de transmissão ou um cabo pára-raios (se existir). A corrente de raio flui directamente através do isolador (ou ao longo de sua superfície devido à sobretensão) para a estrutura da torre (aterrada) ou entre condutores de fase e isso causa um curto-circuito momentâneo, resultando no disparo dos dispositivos de protecção da linha. A sobretensão que causa a descarga disruptiva directa se desenvolve directamente no isolador devido ao impacto directo da corrente de raio ou à onda de tensão induzida no condutor atingido. [Fonte:!] ]

#### 2.3.1 Causas

- ✚ Sobretensões: Picos de tensão anormais devido a descargas atmosféricas (raios), manobras de chaveamento ou falhas no sistema.
- ✚ Poluição: Acúmulo de poeira, salinidade, humidade ou outros contaminantes na superfície do isolador, reduzindo sua capacidade de isolamento.
- ✚ Danos ao isolador: Rachas ou outras imperfeições na superfície do isolador.
- ✚ Condições climáticas: Chuva intensa ou névoa podem humedecer a superfície do isolador e facilitar o caminho para a corrente.

#### 2.3.2 Consequências

- Curto-circuitos: Interrupção do fornecimento de energia.
- Danos a equipamentos: Queima de isoladores, condutores e outros componentes.
- Incêndios: O arco eléctrico gerado pode inflamar materiais próximos.
- Perigos para a segurança: Risco de choque eléctrico para pessoas próximas

## 2.4 Descarga disruptiva indirecta ( *Backflashover* )

Ocorre quando uma descarga atmosférica atinge a torre de transmissão ou o cabo guarda. A corrente de raio flui para a terra através da impedância de aterramento da torre. Essa alta corrente causa uma elevação significativa no potencial da torre em relação ao potencial da terra distante e se esse aumento no potencial da torre for suficientemente alto, a diferença de potencial entre a estrutura da torre e o condutor de fase (que está isolado da torre pelo isolador) pode exceder a rigidez dieléctrica do isolador e do ar circundante. Nesse caso, ocorre uma descarga disruptiva (arco eléctrico) da torre para o condutor de fase, através do isolador.

Embora o raio não tenha atingido directamente o condutor de fase, a elevação do potencial da torre induz uma sobretensão no isolador que leva a descarga disruptiva indirecta. [Fonte: I]

### 2.4.1 Causas

- ✚ Alta resistência de aterramento da torre: Dificulta a dissipação rápida da corrente do raio, elevando o potencial da torre.
- ✚ Corrente de raio elevada: Raios com correntes de pico muito altas podem induzir tensões elevadas mesmo em sistemas de aterramento razoáveis.
- ✚ Características da impedância da torre: A impedância de surto da torre influencia a magnitude da sobre tensão gerada pela corrente do raio.
- ✚ Número e tipo de isoladores: Isoladores com menor capacidade de suportar de surtos de tensão são mais suscetíveis a descarga disruptiva indirecta.

### 2.5 Distância de escoamento ou de fuga de um isolador

É uma medida crítica que define a distância ao longo da superfície do isolador pela qual a corrente eléctrica pode fluir devido a contaminação, humidade ou outros factores. Para garantir a segurança e eficiência do sistema de transmissão de energia, é fundamental que os isoladores possuem uma distância de escoamento suficiente, para

evitar que correntes de fuga causem falhas ou danos ao sistema eléctrico. Isso é especialmente importante em ambientes com alto índice de contaminação ou humidade, onde a probabilidade de falhas é maior. [Fonte:VII]

### **2.5.1 Factores que influenciam a distância de escoamento**

- Contaminação da superfície: A presença de sujeira, poeira e outros materiais contaminantes na superfície do isolador pode reduzir a resistência da superfície. Isso faz com que a corrente eléctrica tenha um caminho mais fácil para escapar ao longo da superfície.
- Umidade: A humidade (chuva e ou neblina) também diminui a resistência do isolador e pode permitir que a corrente eléctrica percorra a superfície do isolador de maneira mais eficiente.
- Material do isolador: O tipo de material usado para fabricar o isolador (como cerâmica, vidro ou compósitos) também influencia a distância de escoamento. Materiais com superfícies mais lisas e resistentes à contaminação geralmente têm distâncias de escoamento menores e maior resistência à fuga de corrente.
- Tensão aplicada: A tensão eléctrica nos condutores também influencia a distância de escoamento. Tensões mais altas aumentam a probabilidade de a corrente buscar um caminho alternativo ao longo da superfície do isolador.
- Desenho do isolador: O desenho e a geometria do isolador, como a forma de suas pias (superfícies de descarga) e o comprimento de seu corpo, podem afectar a distância de escoamento, ajudando a aumentar a resistência da superfície ou proporcionando mais espaço para dissipação da carga. [Fonte: XIII]

### **2.5.2 Importância da Distância de Escoamento**

- Evitar falhas eléctricas: Se a distância de escoamento for muito curta ou insuficiente, há maior risco de que a corrente eléctrica escape do isolador e cause uma falha, como um curto-circuito ou uma descarga eléctrica na torre ou estrutura

metálica. Isso pode danificar a linha de transmissão ou causar interrupções no fornecimento de energia.

- Desempenho do sistema: A distância de escoamento adequada ajuda a garantir o bom desempenho do sistema de transmissão, minimizando perdas de energia e prevenindo a falha do isolamento.
- Segurança: Manter uma distância de escoamento apropriada é fundamental para a segurança do sistema eléctrico, pois evita que a corrente atinja partes da estrutura de aterramento ou da torre, o que poderia resultar em riscos de choque eléctrico ou incêndio. [Fonte: XIII]

## **2.6 Corrente de curto-circuito**

É uma corrente eléctrica de alta intensidade que ocorre devido a falhas no circuito, e pode ser perigosa para a segurança do sistema eléctrico, causando danos a equipamentos e até incêndios se não for devidamente controlada. [Fonte: XII]

## **2.7 Corrente de curto-circuito no contexto de descargas atmosféricas**

Refere-se ao fenómeno em que uma descarga eléctrica de alta intensidade, proveniente de um raio ou de um fenómeno atmosférico, gera uma falha eléctrica que pode resultar em um curto-circuito dentro de um sistema eléctrico. Esse tipo de curto-circuito ocorre quando a corrente eléctrica induzida pela descarga atmosférica segue por um caminho inesperado e de baixa resistência, geralmente através de cabos, equipamentos e sistemas eléctricos. [Fonte: III]

### **2.7.1 Consequências de uma corrente de curto-circuito**

- Danos a equipamentos: Equipamentos como geradores, transformadores, motores e outros componentes podem ser danificados pela corrente excessiva, já que não foram projectados para suportar tal intensidade.

- Interrupção de fornecimento: O sistema eléctrico pode ser desligado para evitar maiores danos, o que pode causar interrupções no fornecimento de energia. [Fonte: III]

### **2.7.2 Medidas de protecção contra curto-circuito**

Aterramento adequado: Sistemas de aterramento ajudam a desviar a corrente para a terra em casos de falha de isolamento, evitando o aumento da intensidade da corrente no circuito. [Fonte: III]

## **2.8 Torre de transmissão**

É uma estrutura metálica usada para sustentar as linhas de transmissão de energia eléctrica de alta tensão, levando electricidade de uma usina geradora até as subestações e, eventualmente, até os consumidores finais. Essas torres são essenciais para a infra-estrutura eléctrica, pois permitem a distribuição de energia eléctrica em distâncias longas, garantindo que a electricidade seja transportada de forma segura e eficiente. [Fonte: VIII]

### **2.8.1 Importância das torres de energia eléctrica**

- ❖ Transporte de electricidade de longa distância: As torres permitem o transporte eficiente de electricidade sem perdas excessivas de energia ao longo do caminho, utilizando altas tensões que reduzem as perdas resistivas.
- ❖ Segurança: Elas garantem que as linhas de transmissão estejam isoladas e seguras, evitando acidentes como choques eléctricos ou incêndios em áreas residenciais ou industriais.
- ❖ Estabilidade do Sistema Eléctrico: As torres de energia eléctrica mantêm a estabilidade da rede eléctrica, permitindo que a electricidade seja distribuída de forma controlada e eficiente a grandes distâncias.

- ❖ **Eficiência e Confiabilidade:** Elas garantem que as linhas de transmissão sejam estáveis e que a energia chegue aos pontos de consumo com a menor perda possível. Isso é essencial para garantir a confiabilidade e continuidade do fornecimento de electricidade. [Fonte: VII]

## **2.9 Isolador de energia eléctrica**

É um componente utilizado em sistemas eléctricos para isolar condutores de alta tensão de partes metálicas ou de outras estruturas condutoras, como torres, pilares ou postes, garantindo que a electricidade não se espalhe indesejadamente e não cause curto-circuitos ou perdas de energia. Ele tem a função principal de evitar que a corrente eléctrica flua para o solo ou para estruturas que não são parte do circuito, além de permitir que os condutores (cabos de energia) sejam sustentados de forma segura e eficiente. [Fonte: VII]

### **2.9.1 Tipos de Isoladores**

Existem vários tipos de isoladores, que variam de acordo com a aplicação, o material de fabricação e o design. Os principais tipos incluem:

- **Isoladores de vidro:** Tradicionalmente usados em linhas de transmissão de média e alta tensão. E são transparentes permitindo fácil visualização de fissuras ou falhas no material, o que facilita a manutenção.
- **Isoladores de Cerâmica:** Usados em linhas de transmissão de alta tensão e em sistemas onde a durabilidade é essencial. A cerâmica é resistente ao calor, tem boa resistência eléctrica e é muito robusta. Contudo, são mais pesados que outros tipos de isoladores e podem ser quebradiços sob impacto.
- **Isoladores Compostos:** Fabricados com materiais compósitas, como plástico reforçado com fibra ou silicone. São mais leves e têm maior resistência a vibrações, impactos e agentes ambientais (como chuva ácida ou corrosão). São

particularmente eficazes em ambientes onde a contaminação atmosférica é um problema (por exemplo, áreas costeiras com salinidade elevada). [Fonte: VII]

## **2.10 Pára-raios de linha de transmissão**

É um dispositivo crucial para proteger as linhas de transmissão de descargas atmosféricas (raios), desviando a corrente eléctrica para a terra e prevenindo danos aos equipamentos do sistema de energia eléctrica. Ele ajuda a aumentar a confiabilidade, segurança e disponibilidade do fornecimento de energia, tornando o sistema mais resistente a falhas causadas por fenómenos naturais como raios. [Fonte: VII]

### **2.10.1 Função e benefícios do pára-raios de linha de transmissão**

- Protecção contra descargas atmosféricas: O principal objectivo de um pára-raios de linha de transmissão é proteger a linha de transmissão contra os danos causados por raios, que podem gerar curtos-circuitos e até danificar permanentemente os componentes do sistema.
- Evitar danos a equipamentos: Protege equipamentos sensíveis, como transformadores, disjuntores e outros dispositivos electrónicos que podem ser danificados por sobretensões causadas por descargas atmosféricas.
- Reduzir o tempo de inactividade: Ao proteger a linha de transmissão de surtos eléctricos, os pára-raios contribuem para a manutenção da continuidade do fornecimento de energia, reduzindo o tempo de interrupção do serviço.
- Aumento da confiabilidade do sistema: A presença de pára-raios aumenta a replicabilidades do sistema eléctrico, diminuindo a probabilidade de falhas devido a descargas atmosféricas. [Fonte: XII]

## **2.11 Sistema de aterramento de torres de transmissão**

É um componente crítico da infra-estrutura eléctrica que garante a segurança e a protecção do sistema de transmissão de energia eléctrica. Ele tem a função de conduzir de forma segura as correntes eléctricas indesejadas (como descargas atmosféricas ou falhas no sistema) para o solo, evitando danos às torres e equipamentos, além de proteger pessoas e animais contra choques eléctricos. [Fonte: XII]

### **2.11.1 Importância do Sistema de Aterramento de Torres de Transmissão**

- Protecção contra raios: O sistema de aterramento protege as torres contra descargas atmosféricas (raios), que podem causar danos irreparáveis à estrutura metálica e aos equipamentos conectados a elas, como transformadores e isoladores. [Fonte: VI]
- Segurança da equipa de manutenção: O aterramento também garante a segurança de equipas de manutenção que trabalham em torno das torres, pois reduz o risco de choques eléctricos acidentais durante o trabalho com a rede eléctrica.
- Evitar danos à estrutura da torre: Ao permitir que a corrente eléctrica seja dissipada de forma segura, o sistema de aterramento evita o aquecimento excessivo ou a corrosão da estrutura metálica da torre, aumentando sua durabilidade.
- Conformidade com as normas: Um sistema de aterramento eficiente garante que as torres de transmissão atendam aos padrões de segurança estabelecidos pelas normas técnicas, assegurando a qualidade e a confiabilidade da transmissão de energia eléctrica. [Fonte: VI]

## **CAPÍTULO III**

### **3. Melhoramento de desempenho da linha de transmissão 110kv face às descargas atmosféricas**

As opções para o melhoramento do desempenho da linha de transmissão de 110kV face às descargas atmosféricas, e considerando as limitações específicas da linha, podemos destacar alguns pontos importantes:

- Instalação de cabo de guarda;
- Melhoramento de desempenho de isolamento;
- Instalação de para raios de linha nas torres; e
- Melhoramento de aterramento das torres. [Fonte: XIII]

#### **3.1 Instalação de cabo de guarda**

O principal objectivo do cabo de guarda é proteger a linha de transmissão contra os danos causados por raios. Ele é instalado acima dos cabos de fase, geralmente no topo das torres de transmissão, e atua como uma estrutura que atrai as descargas atmosféricas, desviando-as para o solo sem que atinjam os condutores de energia. Com isso, o risco de falhas no sistema de transmissão devido a raios é reduzido. Isso evita custos com reparos e manutenção e garante maior confiabilidade do sistema. Em termos de desempenho de linha de transmissão, o impacto directo do cabo de guarda está mais relacionado à segurança, confiabilidade e protecção contra falhas. Ele não afecta directamente a capacidade de transmissão de energia (ou a eficiência da transmissão), mas contribui para um sistema mais resiliente e robusto contra descargas atmosféricas, melhorando assim o desempenho operacional geral da linha.

Mas devido às características estruturais das torres existentes tais como: distancia de fixação de cabo de guarda próximo ao do isolador, que significará separação insegura de flecha de cabo guarda com relação ao condutor; Fragilidade das cantoneiras usadas e dos maciços da torre, dado o tempo longo construído, esta medida não é viável (linha construída em 1982). [Fonte: II]

### 3.1.1 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 deve ser inferior à distância mínima regulamentar entre condutores, que será de 1,75m. Dai que a distância de cabo de guarda é a mesma que os condutores de fase. [Fonte: II]



Figura 4: Torre com característica inviável para instalação de cabo de guarda. [Fonte: II].

## 3.2 Melhoramento de desempenho de isolamento

Este método, foca em aprimorar as características dos próprios isoladores para garantir um desempenho confiável. As abordagens mencionadas são:

### 3.2.1 Aumento da distância de isolamento

- Aplicação de isoladores de maior comprimento: Utilizar isoladores mais longos aumenta a distância física entre os pontos de potencial diferente (condutor e estrutura de suporte). Isso dificulta a ocorrência de descargas disruptivas ao

longo da superfície do isolador, mas devido a distancia insegura no delta da torre essa medida não é viável.

- Acréscimo de campânulas (ou saias): Adicionar mais campânulas de isolador aumenta o comprimento e o caminho de fuga . Mas igualmente ao método anterior não é viável devido a insegurança no delta da torre, somente para a fase central.
- Instalação de isoladores com perfil aerodinâmico: Isoladores com características aerodinâmico são projectados para que o vento e a chuva ajudem a limpar a superfície do isolador, removendo poeira, sal e outros contaminantes que podem reduzir a resistência superficial e melhorar a correntes de fuga. O formato das campânulas é otimizado para esse efeito de autolimpeza. Essa sugestão mostra se necessária e ideal para optimização de isolamento, devendo ser acompanhado por outras medidas que serão abordadas mais a baixo, dada a ausência de cabo de guarda.
- Aplicação de campânulas de maior dimensão: Este método mostra-se promissor para controle das sobre tensões com a ausência de cabo de guarda na linha, dependente da capacidade de suporte da torre do peso destes isoladores. Campânulas maiores oferecem maior protecção contra a deposição de poluentes na parte inferior, onde a umidade tende a se acumular. Elas também aumentam a distância de fuga, não somente pelo tamanho dos discos mais também pelos degraus entre as bordas das campânulas, dificultando ao contorno da tensão eléctrica. Perem este método é promissor devendo ser implementado para solucionar a questão de controlo das sobre tensões. [Fonte: II]

### **3.3 Instalação de pára-raios de linha nas torres**

A instalação de pára-raios directamente na linha, próximos aos isoladores, é uma solução eficaz. Eles oferecem um caminho preferencial para a descarga atmosférica à terra, protegendo os isoladores contra sobretensões elevadas que poderiam causar

descargas disruptivas. Esta medida é promissora, especialmente considerando o elevado índice de descargas incidência, atmosféricas na região. Os pára-raios de linha serão instalados a uma distância de falha de 21km, com uma margem de erro de 10%, isto é, do ponto de indicação da falha, ira se incrementar 5 torres afrente e 5 atrás totalizado 11 torres que serão instalados pára-raios de linha. [Fonte: VII]

### **3.3.1 Análise de como os pára-raios de linha melhoram o desempenho sem cabo de guarda**

- ✚ Derivação das sobretensões: A principal função dos pára-raios de linha é fornecer um caminho de baixa impedância para a descarga das sobretensões atmosféricas directamente para a terra, antes que essas sobretensões atinjam um nível capaz de causar correntes de surto nos isoladores. Eles atuam como "válvulas de segurança" para a linha.
- ✚ Limitação da magnitude da sobretensão: Quando uma onda de sobretensão atinge o ponto onde um pára-raios de linha está instalado, ele rapidamente entra em condução, limitando a tensão máxima que pode atingir os isoladores e os equipamentos conectados à linha. A energia da sobretensão é desviada para o sistema de aterramento da torre.
- ✚ Protecção contra disrupções directos: Ao limitar a magnitude das sobretensões que viajam pela linha (induzidas por descargas próximas ou directas), os pára-raios de linha reduzem significativamente a probabilidade de ocorrência de disrupções directos nos isoladores.
- ✚ Protecção contra disrupções indirectas: Mesmo que uma descarga atmosférica atinja a torre, o pára-raios de linha instalado na mesma torre ajuda a limitar a elevação do potencial da torre em relação aos condutores de fase. Ao fornecer um caminho preferencial para a descarga da corrente de raio, ele reduz a tensão entre a torre e os condutores, diminuindo a chance de uma disrupção indirecta.
- ✚ Redução do número de disparos: Ao prevenir correntes de surto, os pára-raios de linha contribuem directamente para a redução do número de disparos da

linha causados por descargas atmosféricas, melhorando a continuidade do fornecimento de energia e a confiabilidade do sistema.

- ✚ Protecção de equipamentos: Além de proteger os isoladores, os pára-raios de linha também ajudam a proteger outros equipamentos conectados à linha, como transformadores em subestações, contra os efeitos prejudiciais das sobretensões transitórias. [Fonte:XI]

### **3.3.2 Pontos estratégicos para instalação de pára-raios nas Torres**

A instalação selectiva em zonas estratégicas oferece uma solução mais eficiente em termos de custo, concentrando a protecção onde ela é mais necessária. Embora uma instalação em todas as torres pudesse oferecer uma protecção teórica ainda maior, o custo e a logística geralmente tornam essa abordagem impraticável. Essa zona envolve:

- Áreas de alta incidência de descargas atmosféricas.
- Trechos da linha com histórico de falhas frequentes.
- Locais com características topográficas ou de solo que aumentam a vulnerabilidade. [Fonte: XII]

### **3.3.3 Escolha de pára-raios de linha**

A constante evolução dos sistemas eléctricos exige das concessionárias de electricidade um fornecimento de energia cada vez mais estável e confiável. Linhas de transmissão de energia são elementos vitais nesta confiabilidade, e estão sujeitas a desligamentos temporários provocados por descargas atmosféricas, que causam disrupções nos isoladores que levam o disjuntor da subestação a desligar a linha. Os pára-raios para linhas de transmissão Balestro foram desenhados para excelente performance na protecção contra sobretensões de linhas de transmissão, podendo ser aplicados directamente suspensos à linha, na mísula das torres ou em braço auxiliar. Assim garantem a protecção dos isoladores de suspensão contra descargas disruptivas directas provocadas por descargas atmosféricas e reduzem o nível de sobretensão dos

condutores das LT's, tanto de descarga atmosférica como de manobras. Os pára-raios tipo PBPE-LT oferecem características de protecção optimizadas, grande resistência mecânica e elevada resistência às intempéries, com seu invólucro em borracha de silicone e um sistema de vedação da parte activa que impede a penetração de humidade, mesmo em condições extremas de poluição e intempérie. [Fonte: XI]

### **3.3.3.1 Vantagens**

- Menores níveis de tensão residual, optimizando a coordenação de isolamento;
- Alta capacidade de absorção de energia, adequada para as aplicações críticas;
- Estabilidade em suas características eléctricas mesmo em condições de solicitação severa;
- Alta resistência às intempéries (poluição, maresia, etc);
- Projecto não fragmentário, a construção da parte activa sem espaços internos de ar evita a explosão do invólucro em condições de falha, e os danos que esta condição poderia causar;
- Elevada resistência mecânica;
- Baixo peso, devido ao projecto com invólucro poliméricos, permite a instalação directamente nas linhas já existentes, sem necessidade de modificações nas estruturas das LT';
- Desligador automático adequadamente dimensionado para as solicitações impostas na aplicação em linhas de transmissão classe 2, para retirar do sistema o pára-raios em caso de falha deste, garantindo a continuidade de serviço da linha;
- Aumento da confiabilidade das linhas de transmissão com a redução dos desligamentos, e conseqüente aumento da vida útil dos contactos dos disjuntores da subestação, que irão operar com menor frequência.

## **Melhoria do Desempenho da Linha de Transmissão de 110 kV Macia–Chicumbane (CL2) face a Descargas Atmosféricas.**

- O Pára-raios Balestro PBPE-LT possui um inovador sistema de articulação que permite ao pára-raios absorver facilmente as oscilações naturais da linha, evitando assim eventual dano no mesmo.

### **3.4 Melhoramento de aterramento das torres**

Muitas vezes após a instalação de um aterramento, observa-se através de medições que o valor da resistência ficou superior ao desejado. Nesses casos empregam-se algumas técnicas capazes de melhorar o valor de resistência de terra. Essas técnicas atuam, basicamente, modificando a resistência do solo nas proximidades do eléctrodo, ou alterando as condições dos eléctrodos de aterramento, ou ainda, fazendo aplicação dessas duas possibilidades simultaneamente, segue os tipos de melhorias:

- Aumento do número de eléctrodos em paralelo;
- Aprofundamento dos eléctrodos;
- Tratamento químico do solo; e
- Tratamento físico do solo. [Fonte: VI]

### **3.5 Redução da magnitude das sobretensões induzidas**

- Quando uma descarga atmosférica atinge o solo próximo à linha de transmissão, ela cria um aumento repentino no potencial da terra. Esse aumento de potencial se propaga radialmente a partir do ponto de impacto.
- As torres de transmissão, estando em contacto com o solo através de seus sistemas de aterramento, também terão seu potencial elevado. [Fonte: VIII]

## CAPITULO IV:

### 4. Dados de incidência de descargas atmosféricas

As regiões com maior densidade de raios (obtidas através de mapas de raios e histórico de ocorrências) são prioritárias para a instalação de pára-raios de linha.

A gráfico abaixo, descreve o comportamento da formação da onda de descarga atmosférica onde atinge o seu valor máximo de tensão  $V_2$  num tempo  $T_2$ , compreendido entre 1 á 10  $\mu s$ . Já o valor médio  $V_1$ , correspondente ao valor médio da cauda da onda, é atingido num intervalo de tempo  $T_1$  de 20 a 50  $\mu s$ , caindo para zero ao final de  $T_0$  no intervalo de 100 a 200  $\mu s$ . A onda de tensão característica foi normalizada para os valores de  $T_1 = 50 \mu s$  e  $T_2 = 1,5 \mu s$ , normalmente conhecido como onda de  $1,2 \times 50 \mu s$ . Enquanto a onda característica da corrente de descarga foi normalizada para  $T_2 = 20 \mu s$  e  $T_1 = 8 \mu s$  também conhecida normalmente como onda de  $8 \times 20 \mu s$ . A finalidade de conhecer as formas de ondas e dos seus valores típicos de tensão e tempo, além das percentagens das suas ocorrências, possibilita os estudos destinados ao dimensionamento dos pára-raios de protecção contra sobretensões nas redes eléctricas e dos pára-raios de hastes destinados a instalação no geral. [Fonte: VII]

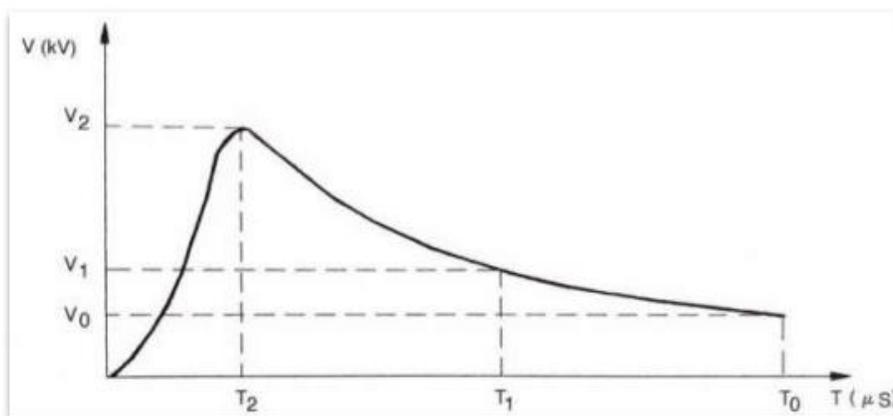


Figura 5: Forma de onda de descarga atmosférica [Fonte: VII]

#### 4.1 Clima predominante

O clima predominante na região sul de Moçambique é o tropical seco. O período mais quente do ano compreende os meses de Novembro a Abril e o mais frio os meses de maio a Outubro. O período de maior precipitação ocorre nos meses mais quentes, entre Novembro e Março. A humidade relativa média é de 66,6%, com pouca oscilação durante o ano. O mês com maior humidade relativa é Março com 71,0%, e o mês com a menor humidade é Junho com 63,5%. A tabela 1 ilustra os dados climatológicos. [Fonte: v]

Tabela 1: Dados climatológicos da região sul. (Fonte: V)

Mês	T. máx recorde (°C)	T. máx média (°C)	T. mín média (°C)	T. mín recorde (°C)	Precip. (mm)	Dias com chuva	H. relativa (%)	H. sol
Jan	43,0	29,9	22,3	16,0	171,1	8,1	68,0	243
Fev	39,0	29,6	22,3	16,0	130,5	7,6	69,0	226
Mar	40,0	29,3	21,5	17,0	106,6	7,0	71,1	248
Abr	39,0	27,8	19,4	11,0	56,5	4,4	67,5	240
Mai	38,0	26,4	16,8	8,0	31,9	2,8	66,0	243
Jun	34,0	24,6	14,8	4,0	17,6	2,4	63,5	240
Jul	36,0	24,4	14,2	1,0	19,6	1,8	65,0	248
Ago	39,0	25,3	15,4	7,0	15,0	2,2	64,0	248
Set	46,0	26,1	17,2	9,0	44,4	3,2	65,0	243
Out	45,0	26,5	18,3	12,0	54,7	5,5	66,5	217
Nov	44,0	27,4	19,7	11,0	81,7	7,9	67,0	210
Des	44,0	29,1	21,4	15,0	85,0	7,5	67,5	217
Ano	46,0	27,2	18,6	1,0	813,6	60,4	66,6	2838
<b>T.mín</b>	Temperatura mínima recorde							
<b>T.máx</b>	Temperatura máxima média							
<b>Precip.</b>	Precipitação							
<b>H. relativa</b>	Humidade relativa (%)							
<b>H. sol</b>	Hora de sol							

#### 4.2 Cálculo da densidade de descarga atmosférica

A densidade de descargas atmosféricas que atingem a terra ( $N_g$ ) é o número de raios por quilómetros quadrados, por ano, que atinge uma determinada região. Esse valor pode ser determinado pela equação:

$$N_g = 0,04 \times T_d^{1,25} \quad (\text{Equação 4.1})$$

Onde:

$N_g \rightarrow$  Densidade de descargas atmosféricas que atingem a terra ( $\text{km}^2/\text{ano}$ );

$T_d \rightarrow$  Número de dias de trovoada por ano (dias). [Fonte: VI]

- Histórico da província de Gaza: Esta província apresenta uma precipitação anual média entre 800 e 1.000 mm. Assumindo que uma proporção significativa desses dias de precipitação seja acompanhada de trovoadas, Gaza pode ter aproximadamente **60 a 80** dias de trovoada por ano, com maior incidência nos meses chuvosos. Estes dados são fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia de Gaza - Moçambique (INAM), logo a densidade anual fica: [Fonte: V]

$$N_g = 0,04 * 80^{1,25} = 9,57 \text{ km}^2/\text{ano}$$

### 4.3 Área de exposição equivalente

Corresponde à área do plano das estruturas, prolongada em todas as direcções, considerando a altura da mesma. Os limites da área de exposição equivalente estão afastados do perímetro da estrutura da torre no ponto considerado. [Fonte: XII]

$$A_e = L \times W + 2 \times L \times H + 2 \times W \times H + \pi \times H^2 \quad (\text{Equação 4.2})$$

$$A_e = 49000 \times 8 + 2 \times 49000 \times 25 + 2 \times 8 \times 25 + \pi \times 25^2$$

$$A_e = 139002 + 625\pi = 2.844.362,5m^2$$

Onde:

$L \rightarrow$  comprimento da linha, (m);

$H \rightarrow$  altura da torre (m);

$W \rightarrow$  largura da estrutura (m). Distância entre condutores extremos.

### 4.4 Frequência média anual de descargas

A frequência anual representa o número provável de descargas atmosféricas que podem atingir uma determinada edificação em um intervalo de um ano, a mesma pode ser determinada a partir da expressão: [Fonte: VII]

Melhoria do Desempenho da Linha de Transmissão de 110 kV Macia-Chicumbane (CL2) face a Descargas Atmosféricas.

$$N_d = N_g \times A_e \times 10^{-6} = 9,57 \times 2844362,5 \times 10^{-6} = 27,22 \text{ descargas/ano. (Equação 4.3)}$$

#### 4.5 Dados do registo de falha na linha CL2

Tabela 2: Dados de disparos da linha em dias de mau tempo. (Fonte: II)

2024						
Paine I	Data	Hora	Estado do tempo	Descrição da Manobra	Sinalização	MW
CL2	14/03/24	10:48	Chuva	CL2 -52 Disparo	PD Z2 fase T	35
CL2	14/03/24	10:54	Chuva	CL2-52 Ligado	-----	---
CL2	14/03/24	13:05	Trovão	CL2- 52 Disparo	PD Z1 fase T	24
CL2	14/03/24	13:06	Trovão	CL2-52 Ligado	-----	---
CL2	23/10/24	20:47	Chuva	CL2-52 Disparo	Sem sinalização	56.7
CL2	23/10/24	21:01	Chuva	CL2-52 Ligado	-----	---
CL2	13/12/24	23:58	Vento e Trovão	CL2-52 Disparo	PD Z1-21km fase R,N	38
CL2	14/12/24	00:01	Vento e Trovão	CL2-52 Ligado	-----	---
2025						
Paine I	Data	Hora	Estado do tempo	Descrição da Manobra	Sinalização	MW
CL2	06/01/25	22:52	Chuva e Trovão	CL2-52 Disparo	PD Z1-21km fase R,T	54.6
CL2	06/01/25	23:01	Chuva e Trovão	CL2-52 Ligado	-----	---

##### 4.5.1 Vulnerabilidade da linha

Trechos da linha que historicamente apresentam maior número de falhas devido a descargas atmosféricas também são considerados estratégicos, para o caso, essa distância de falha é de 21 km, onde serão instalados os pára-raios de linha. [Fonte: II]

##### 4.5.2 Topografia e características do solo

Em algumas situações, características geográficas ou do solo podem tornar certos trechos da linha mais susceptíveis a problemas relacionados a descargas atmosféricas, justificando a instalação de pára-raios. [Fonte: VI]

#### 4.5.3 Cálculo de probabilidade de ocorrência de falha

Este modelo estima o risco de falha com base na densidade de descargas atmosféricas e na configuração da linha:

$$R = N_g \times L \times P_f \quad (\text{Equação 4.4})$$

$$R = 30,129 \text{ descarga}/\text{km}^2/\text{ano}$$

Onde:

R- Risco de falha (por ano);

L – Comprimento da linha; e

$P_f$  – Probabilidade de falha por descarga atmosférica (a dimensional).

$$P_f = PEB \times PLD \times CLD \quad (\text{Equação 4.5})$$

$$P_f = 1.285 \frac{\text{descargas}}{\text{dia}} \times 0,1 \times 0,5$$

$$P_f = 0,06425 \text{ falhas /dia}$$

Onde:

PEB é a probabilidade de uma descarga atmosférica atingir a linha, considerando a densidade de descargas atmosféricas na região e a exposição da linha.

PLD é a probabilidade de falha devido à descarga atmosférica, que depende das características da blindagem da linha, da tensão suportável de impulso dos equipamentos e das interfaces isolantes ou dispositivos de protecção instalados.

CLD é um factor que depende da blindagem, aterramento e condições de isolamento da linha.

Assumindo uma densidade de descargas atmosféricas de 9,57 [descargas/km<sup>2</sup>/ano] para Gaza e considerando uma linha de transmissão de 49 km, temos:

$$= 1,285 \text{ descargas/dia} \quad (\text{Equação. 6})$$

Probabilidade de falha devido à descarga (PLD) = 10% e o factor CLD = 0,5.

#### 4.5.4 Corrente crítica de descarga

$$I_c = 0,041 \times Sm^{1,54} \quad (\text{Equação 4.7})$$

$$I_c = 0,041 \times 25^{1,54}$$

$$I_c = 5,829 \text{ kA}$$

Onde:  $S$  é a distância de descarga [m], sendo que a  $S = 25\text{m}$ , igual a altura da torre.

#### 4.5.5 Cálculo da probabilidade de corrente ser excedida

$$P(I_c) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_c}{31}\right)^{2,6}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{5,829}{31}\right)^{2,6}} = 0,987; \quad (\text{Equação 4.8})$$

#### 4.5.6 Determinação de impedância da linha

- Impedância característica da linha ( $Z_c$ )

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}; \quad Z_c = 68,989\Omega \text{ (valor de parametros de contrucao da linha)} \quad (\text{Equação 4.9})$$

Onde:  $L$  é a indutância em H;  $C$  é a capacitância em F.

#### 4.5.7 Descarga Directa no Condutor de Fase

Quando uma descarga atmosférica atinge directamente um condutor de fase, a corrente de pico  $I_p$  se injecta na linha no ponto de impacto. Essa corrente se divide em duas ondas que viajam em direcções opostas ao longo da linha. [Fonte: XII]

A magnitude da sobretensão inicial (V) gerada em cada direcção é dada por:

$$U = \frac{1}{2} Z_c I_p; \quad U = \frac{1}{2} * 68,989\Omega * 5,829\text{kA}; \quad U = 201,07 \text{ kV} \quad (\text{Equação 4.10})$$

Onde.  $I_p$  e a intensidade máxima de corrente de pico em kA.

#### 4.5.8 Velocidade de Propagação (v)

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_T}}; v = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{2,25}}; v = 2 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad (\text{Equação 4.11})$$

Onde:  $c$  - é a velocidade da luz no vácuo ( $3 \cdot 10^8$  m /s).

#### 4.6 Dimensionamento do pára-raios de linha

##### 4.6.1 Determinação da tensão máxima de operação contínua (MCOV)

Para a Tensão Máxima de Operação (fase-fase) igual a 110kV, fase-terra do sistema será: [Fonte: VIII]

$$U_{max\text{ fase-terra}} = \frac{110}{\sqrt{3}} = 63,5\text{kV}; \quad (\text{Equação 4.12})$$

##### 4.6.2 Cálculo das sobretensões temporárias (tov)

Dados do sistema

$R_1=5,140\Omega$ ;  $R_0=12,545\Omega$ ;  $X_1=19,418\Omega$ ;  $R_0=67,839$ .



Figura 6: Diagrama unifilar da linha de transmissão CL2. [Fonte: Autor]

Legenda: A, B –barramento de saída e chegada da linha respectivamente.

T1,T2 – Transformadores de potencia. [Fonte: Autor]

#### 4.6.2.1 Determinação de factor de Aterramento (k)

É o factor de aterramento, que relaciona a máxima tensão fase-terra durante uma falta com a tensão fase-neutro nominal em sistemas trifásicos. [Fonte: V]

$$K_1 = \frac{X_0}{X_1} = \frac{67,838}{19,418} = 3,494; \text{ (Equação 4.13) e } K_2 = \frac{R_0}{X_1} = \frac{12,545}{19,418} = 0,646; \text{ (Equação 4.14)}$$

Para sistemas com neutro efectivamente aterrado ( $0 \leq \frac{X_0}{X_1} \leq 3$  e  $0 \leq \frac{R_0}{X_1} \leq 1$ ) o factor de aterramento é inferior a 1,4 o que resulta em:

$$0 \leq 3,494 \leq 3 \wedge 0 \leq 0,646 \leq 1 - \text{ Não satisfaz}$$

Solução: Aumentar a MCOV do Pára-raios para utilizar um sistema efectivamente aterrado. Visto que como as sobretensões temporárias esperadas nas fases serão maiores, o pára-raios precisa ser capaz de suportar essa tensão mais alta continuamente sem degradar. O pára-raios seleccionado é de 120kV. [Fonte: III]

#### 4.6.2.2 Impedância sequencia zero ( $Z_0$ ) e Impedancia sequencia positiva ( $Z_1$ )

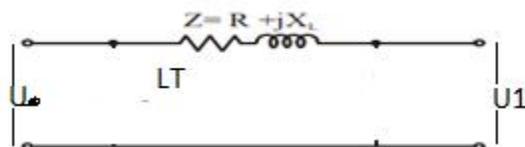


Figura 7: Diagrama de modelo para uma linha de transmissão curta [Fonte: V]

$$Z_0 = R_0 + jX_0; Z_0 = 12,545 + j67,838 \text{ ohm}; \text{ (Equação 4.15)}$$

$$Z_1 = R_1 + jX_1; Z_1 = 5,140 + j19,418 \text{ ohm}; \text{ (Equação 4.16)}$$

$$Z = Z_0 + 2Z_1 = (12,545 + j67,838) + 2(5,140 + j19,418) = 22,825 + j106,674\Omega.$$

$$k_{calculado} = \frac{Z_0 + 2Z_1}{3Z_1} = 0,34. \text{ (Equação 4.17)}$$

## Melhoria do Desempenho da Linha de Transmissão de 110 kV Macia-Chicumbane (CL2) face a Descargas Atmosféricas.

Como o valor de factor de aterramento calculado é muito inferior, o aterramento deve ser melhorado atendendo as recomendações para o uso de valor normalizado.

$$k_{seleccionado} = 1,3. \text{ onde } k < 14; \text{ (Equação 4.18)}$$

$$U_{MCOV} = U_{max\ fase\ terra} * k; \text{ (Equação 4.19)}$$

$$U_{MCOV} = 63,5 * 1,3$$

$$U_{MCOV} = 82,6\text{kV}$$

### 4.6.2.3 Aplicar uma Margem de Segurança

Para cobrir possíveis imprecisões no cálculo da TOV e garantir uma vida útil mais longa para o pára-raios, é comum aplicar uma margem de segurança (geralmente entre 5% e 15%) sobre a tensão de sobretensão temporária calculada. Vamos usar uma margem de segurança de 10%.

$$U_{MCOV-adequado} = U_{MCOV} * (1 + Margem\ de\ segurança); \text{ (Equação 4.20)}$$

$$U_{MCOV-adequado} = 82,6 * (1 + 0,10) = 90,8\text{kV}. \quad \text{[Fonte: V]}$$

### 4.6.3 Selecção da MCOV do Pára-raios

Com base no cálculo, o pára-raios seleccionado deve ter uma MCOV superior a 90,8 kV. Os fabricantes oferecem pára-raios com valores padronizados de MCOV. Porem com consultas de catálogos dos fabricantes, foi seleccionado o pára-raios com de valor igual a 120kV, para garantir que a MCOV do pára-raios seja maior que a tensão máxima de operação contínua calculada para o sistema. [Fonte: XII]

### 4.6.4 Especificação técnica de pára-raios poliméricos de 120 kV

Tensão Nominal do Sistema: 110kV

Tipo: Balestro PBPE-LT

MCOV Seleccionada: 96kV

**Melhoria do Desempenho da Linha de Transmissão de 110 kV Macia–Chicumbane (CL2) face a Descargas Atmosféricas.**

Corrente Nominal de Descarga: 10kA

Classe de Descarga: Classe 2

Instalação: Em pontos estratégicos ao longo da linha (intercalar, em trechos de alta densidade ceráunia/resistividade de solo), com um estudo de campo para determinar a densidade ideal. [Fonte: IV]

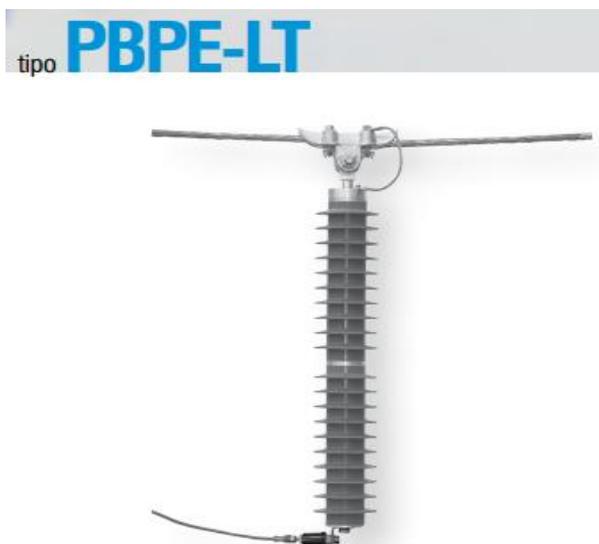


Figura 8: Pára-raios de linha 120kV [Fonte: [WWW.PBPE-LT](http://WWW.PBPE-LT)]

#### **4.6.5 Capacidade de Absorção de Energia**

Os pára-raios são classificados por sua capacidade de absorção de energia (Classe 1, 2, 3, 4, 5, etc., conforme IEC 60099-4 ou ANSI C62.11). Para linhas de transmissão de 110kV e 49 km, a probabilidade de descargas directas é relevante. Pára-raios de linha são frequentemente de Classe 2 ou superior. [Fonte: IV]

#### **4.6.6 Densidade Ceráunia**

Se a região tem uma densidade alta (muitos dias de trovoadas ou alta densidade de descargas/km<sup>2</sup>/ano), o pára-raios de maior capacidade de absorção de energia podem ser necessários.

#### 4.6.7 Corrente nominal de descarga recomendada pelo IEC

A Corrente de descarga eléctrica passante através do pára-raios para a terra durante sua actuação. Como regra geral, recomendado pela IEC 60099-4:

Faixa I (acima de 1 kV a 245 kV): 10 kA; Faixa II (acima de 245 kV): 20 k.

#### 4.6.8 NBI (nível básico de isolamento)

Segundo as normas (IEEE C62.11 ou IEC 60099-4). Para 110 kV, o NBI típico é:

**NBI**  $\approx$  450 – 550 kV (impulso relâmpago 1,2/50  $\mu$ s).

#### 4.6.9 Determinação da tensão residual do pára-raios ( $U_r$ )

O pára-raios precisa limitar a sobretensão a um valor inferior ao NBI da instalação.

$U_r$ - Tensão residual do pára-raios, ou seja, a tensão máxima que o pára-raios permite passar para o sistema durante uma descarga atmosférica ou surto. Quanto menor for essa tensão, melhor será a protecção contra sobretensões.

NBI- Nível Básico de Isolamento do sistema, é a maior tensão que os equipamentos do sistema podem suportar sem falha. Esse valor é especificado pelos fabricantes e normas técnicas.

Margem de segurança de 20%: Significa que a tensão residual do pára-raios deve ser no máximo 80% do NBI do sistema. Isso assegura que, mesmo durante uma descarga, a tensão no sistema não ultrapasse os limites de segurança dos equipamentos.

Logo se NBI = 550 kV

$$U_r \leq 550 * 0,8 = 440kV. \text{ (Equação 4.21)}$$

Este valor é sempre verificado nos catálogos dos fabricantes apresentando valores típicos de  $U_r$  para os diferentes modelos (em função de corrente de surto).

#### 4.6.10 Verificação da coordenação de isolamento

Compara a tensão de protecção ( $U_p$ ) do pára-raios com a tensão suportável dos equipamentos protegidos:

$U_p$ - Tensão de protecção, ou seja, a tensão residual máxima que o pára-raios deve permitir que passe no sistema após a actuação do dispositivo de protecção

(quando ocorre uma descarga atmosférica ou surto). Quanto menor a tensão de protecção, melhor a protecção contra sobretensões.

Margem de coordenação: Trata-se de uma margem de segurança que deve ser aplicada para garantir que a tensão residual do pára-raios não ultrapasse os limites de operação seguros para os outros equipamentos conectados ao sistema. Essa margem normalmente varia de **20% a 25%** do valor do NBI. [Fonte: IX]

#### 4.6.11 Capacidade de Energia absorvida

A energia que o pára-raios deve dissipar ( $W$ ) pode ser estimada em função da corrente de descarga ( $I$ ), da duração do impulso ( $t$ ) e da tensão residual ( $U_p$ ):

$$W = U_p * I * t \quad (\text{Equação 4.22})$$

$$W = 120\text{kV} * 10\text{kA} * 10 \mu\text{s}$$

$$W = 7,2\text{kJ}$$

A capacidade de energia do pára-raios deve ser suficiente para suportar as descargas esperadas.

## 4.7 Cálculo de aprimoramento de isolamento

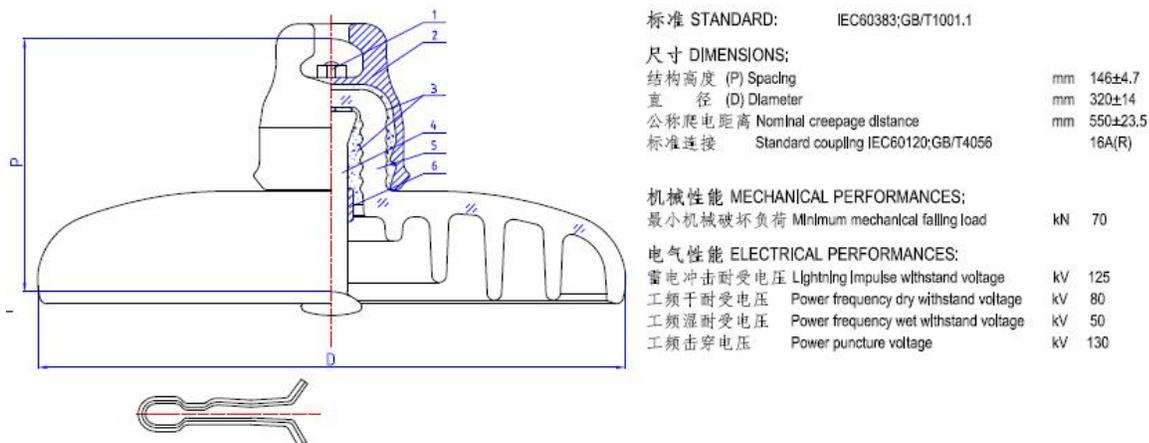


Figura 9: Saia de isolador de vidro. [Fonte: X]

### 4.7.1 Determinação de fuga nominal do isolador proposto

#### Dados

Peso do isolador = 5.5 [daN]

Nr de saias por cadeia de isoladores = 8

Tensão de serviço = 110kV

### 4.7.2 Determinação de distância de fuga total da cadeia de isolador

$$D_{\text{Fuga total de cadeia de isolador}} = D_{\text{Fuga nominal}} \times N_r; \text{ (Equação 4.23)}$$

$$D_{\text{Fuga total de cadeia de isolador}} = 526,5\text{mm} \times 8 = 4213\text{mm};$$

### 4.7.3 Peso total das cadeias de isoladores na torre

$$W_{\text{total de cadeia de isolador}} = W_{\text{peso da saia}} \times 8 = 5,5 \times 8 = 44[\text{daN}]; \text{ (Equação 4.24)}$$

$$W_{\text{total de cadeia na torre}} = W_{\text{cadeia de isoladores}} \times 8 = 44 \times 3 = 132[\text{daN}]$$

**Melhoria do Desempenho da Linha de Transmissão de 110 kV Macia–Chicumbane (CL2) face a Descargas Atmosféricas.**

Tabela 3: Nível de poluição (IEC 60815). [Fonte: III]

Nível de Poluição (IEC 60815)	Descrição da Poluição	Distância de Escoamento Específica Nominal Mínima (mm/kV)
Muito Leve (Very Light)	Áreas com poluição insignificante, como áreas rurais limpas	> 16 (em alguns casos, até 12 mm/kV com experiência)
Leve (Light)	Áreas com baixa densidade de poluentes, sem fontes próximas	16
Média (Medium)	Áreas agrícolas com alguma indústria leve, áreas costeiras com baixa salinidade	20
Pesada (Heavy)	Áreas industriais com poluição significativa, áreas costeiras com média salinidade	25
Muito Pesada (Very Heavy)	Áreas com alta concentração de indústrias pesadas, áreas costeiras com alta salinidade, desertos com tempestades de areia frequentes	31 (em casos extremos, pode ser necessário > 31 mm/kV)

#### 4.7.4 Distância de escoamento mínima requerida

A linha encontra-se próximo a zona costeira com média salinidade, logo, a distância de escoamento específico é igual a 25 mm/kV. Expressa pela fórmula: [Fonte: X]

$$D_{esc,min} = U_n \times D_{esc,especific}; \quad (\text{Equação 4.25})$$

$$D_{esc,min} = 110kv \times \frac{25mm}{kv} = 2750mm$$

Onde:

$D_{esc,min}$  - Distância de escoamento mínimo em mm;

$U_n$  - Tensão nominal do sistema;

$D_{esc,especific,min}$  - Distância de escoamento específico nominal mínimo (tabelado)

Isto significa que os isoladores escolhidos devem ser iguais ou superiores a este valor, isto é;

$$D_{esc,min} < D_{esc,total \text{ do isolador}} \quad (\text{Equação 4.26})$$

$$2750mm < 4213mm$$

#### 4.7.5 Coordenação de Isolamento Aprimorada

Fórmulas de Cálculo (Coordenação)

Margem de Segurança:

$$MS = \frac{BIL}{S_{max}} * 100\%; \quad (\text{Equação 4.27})$$

$$MS = \frac{550}{Up * I} * 100\%$$

$$MS = 0,458 = 46\%$$

Onde:

MS é a margem de segurança.

BIL é o nível básico de isolamento do equipamento (kV).

$S_{max}$  é a máxima sobretensão esperada (kV).

Nota: Uma margem de segurança adequada (geralmente acima de 20-30%) é essencial para garantir a confiabilidade.

$$D_{esc,min} < D_{esc,total \text{ do isolador}}$$

$$2750mm < 3915mm$$

#### 4.7.6 Benefícios Técnicos de isolador de Vidro de Maior Dimensão

- Maior distância de escoamento superficial: Os discos de vidro maiores aumentam o caminho de fuga superficial, reduzindo a probabilidade de contornamento durante eventos de sobretensão.
- Maior rigidez dielétrica por disco: A estrutura molecular do vidro confere alta resistência eléctrica, tornando os discos mais eficazes contra picos de tensão.
- Desempenho consistente: Ao contrário de materiais compostos, o vidro não sofre degradação significativa por acção UV ou envelhecimento térmico. Isso garante desempenho uniforme ao longo do tempo. [Fonte: VII]

**Melhoria do Desempenho da Linha de Transmissão de 110 kV Macia–Chicumbane (CL2) face a Descargas Atmosféricas.**

- Fácil inspeção e manutenção: Sua transparência permite identificar fissuras internas, trincas ou contaminações sem a necessidade de desmontagem, o que melhora a confiabilidade do sistema.

- Menor taxa de falha: Estudos mostram que isoladores de vidro têm menor incidência de falhas por descarga disruptiva directa e ruptura dieléctrica comparado a compostos em ambientes tropicais e costeiros.

Tabela: 4 Comparação de matérias de isoladores. [Fonte: VII]

Característica	Vidro (maior dimensão)	Porcelana	Composite (Polímero)
<b>Rigidez dieléctrica</b>	Alta ( $\approx 140\text{--}160$ kV por disco)	Média-alta ( $\approx 130\text{--}150$ kV por disco)	Média ( $\approx 110\text{--}130$ kV por disco)
<b>Resistência a UV e poluição</b>	Alta resistência à poluição	Boa resistência, mas pode acumular sujeira	Requer manutenção regular contra UV e envelhecimento
<b>Transparência / inspeção</b>	Permite inspeção visual fácil	Não permite	Não permite
<b>Vida útil</b>	Longa (pouco envelhecimento)	Longa, mas frágil a impactos	Reduzida em ambientes agressivos
<b>Custo-benefício</b>	Excelente relação desempenho/preço	Moderado	Alto custo para desempenho inferior

#### 4.8 Cálculo de estabilidade dos apoios

Para se proceder ao dimensionamento de um apoio é necessário ter em consideração os esforços que irão ser exercidas sobre ele, uma vez que, se um dimensionamento não for bem realizado, há a possibilidade de os apoios não resistirem aos esforços que neles irão incidir, como por exemplo os esforços provocados pela acção do vento, as tensões dos condutores, o próprio peso destes e cadeias de isoladores. No cálculo absoluto dos esforços das torres intervêm vários factores, tais como: [Fonte: IX]

- A sobrecarga do vento e peso dos componentes (condutores isoladores, travessas);
- Forças de tração dos condutores;
- Forças de tração máxima exercidas em caso de roptura.

#### 4.8.1 Eixo Longitudinal (eixo x)

$$F_x = n_{cond} * T_{condx} \quad (\text{Equação 4.28})$$

Onde:

$n_{cond}$  – Número de condutores;

$T_{condx}$  – Tração do condutor sobre a linha [daN];

Tração de um condutor entre os vãos da linha:  $328,5 * 0,5 = 1642,5$  [daN]

$$F_x = 3 * 1642,5 = 4927,5[\text{daN}]$$

#### 4.8.2 Eixo Transversal (eixo y)

$$F_y = n_{cond} * P_{cond} + n_{iso} * P_{iso} \quad (\text{Equação 4.29})$$

Onde:

$n_{iso}$  – Número de isoladores;

$P_{cond}$  – Peso do condutor sobre a linha [daN];

$P_{iso}$  – Peso de isoladores;

Peso da cadeia de isoladores: 44 [daN]

$$P_{cond} = 1.2 * \frac{vao_{esquerda} + Vao_{direita}}{2} \quad (\text{Equação 4.30})$$

$$P_{cond} = 1.2 * \frac{400 + 400}{2} = 480 [\text{daN}];$$

$$F_y = 3 * 480 + 3 * 44 = 1572 [\text{daN}];$$

#### 4.8.3 Eixo Vertical (eixo z)

$$F_z = n_{cond} * F_{vento} + n_{iso} * F_{vento-iso} \quad (\text{Equação 4.31})$$

$$F_z = 3 * 100,67 + 3 * 1256,86 = 4072,56 [\text{daN}];$$

## Melhoria do Desempenho da Linha de Transmissão de 110 kV Macia-Chicumbane (CL2) face a Descargas Atmosféricas.

Onde:  $F_{vento}$  – Força de vento;

Vento sobre um condutor na linha:  $0,6 * 1 * 108 * 0,02345 * 132,5/2 = 100,67 [N]$

Vento sobre a cadeia de isoladores:  $F_v = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * C_d * A$  (Equação 4.32)

Onde:  $F_v$ - Força de vento (N)

$\rho$  - Densidade do ar ( $\approx 1,225 \text{ kg/m}^3$ )

V - Velocidade do vento (30 m/s)

$C_d$  - coeficiente de arrasto ( $\approx 1,2$  para isoladores)

A- área projectada da cadeia de isoladores ( $0,15\text{m}^2$ )

$$F_v = \frac{1}{2} * 1,225 * 30^2 * 1,2 * 1,9 = 1256,85N$$

Área do isolador;  $A = \pi r^2 * n_{saias} = 0,080384\text{m}^2 * 24 = 1,9\text{m}^2$  (Equação 4.33)

D = 320 mm ; r = 160mm.

## 4.9 Melhoria do sistema de aterramento

### 4.9.1 Medição de resistência de aterramento

Para o efeito foi utilizado o método de Wenner que consiste do aparelho MEGGER da marca FLUKE de três (3) terminais sendo dois (2) de corrente e um (1) terra. Foi também utilizados dois (2) eléctrodos de aproximadamente 50cm de comprimento e diâmetro de 15mm, e foram obtidos resultado da resistência R apresentado na tabela 4.

### 4.9.2 Determinação da resistividade do solo

A direcção preferencial para realização das medições é perpendicular a ao eixo da LT. A seguir mostra um esquema de como foi feita a medição.

**Melhoria do Desempenho da Linha de Transmissão de 110 kV Macia-Chicumbane (CL2) face a Descargas Atmosféricas.**

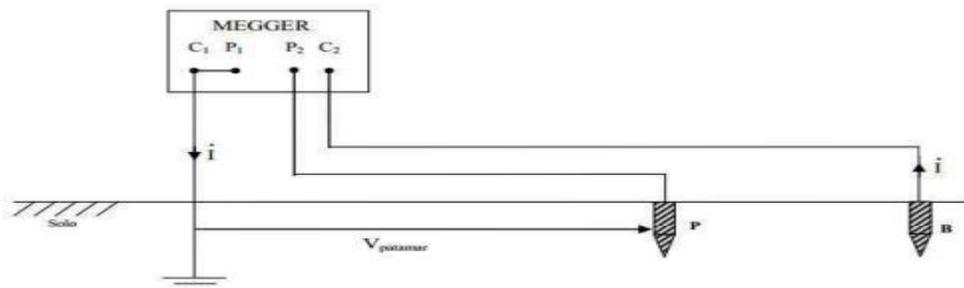


Figura 10: Representação esquemática da medição de Resistência de aterramento utilizando o Meggar. [Fonte: XI]

Na figura, o ponto C2 representa à conexão a haste de corrente (B), o ponto P2 representa à conexão a haste de potencial (P) enquanto o curto-circuito entre C1 e P1, a conexão a estrutura da torre. A resistência de aterramento pode ser obtida indirectamente pela relação  $R=V/I$ . A única diferença em relação ao instrumento aqui mostrado é que esse cálculo é feito directamente, já estabelecendo a relação entre as grandezas de tensão e corrente. [Fonte: X]

Tabela 5: Determinação de resistividade media, apartir dos dados de medições de resistência efectuadas no campo. [Fonte: II]

a (m)	$2\pi a$	R (Ω) Ponto1	R (Ω) Ponto2	R (Ω) Ponto3	R (Ω) Ponto4	R (Ω) Ponto5	$R_{media}$ (Ω)	$\rho_{media}$ (Ω/m)
16	100,48	23,6	29,1	27,5	21,8	18,9	24,12	2.423,6
32	201	8,7	5,3	7,5	3,8	2,6	43,8	8.803,8

Para a determinação de resistividade do solo foi utilizada a expressão para  $a > 32m$

$$\rho = 2\pi aR; \text{ (Equação. 31)}$$

Onde: R- Resistência medida (Ω); a - Espaçamento dos eléctrodos (m);

$$\text{Para } a=16; \delta\% = \left| \frac{R_m - R}{R_m} \right| * 100; \delta\% = \left| \frac{24,12 - 29,1}{24,12} \right| * 100; \delta\% = - 20,6\% \text{ (Equação 4.34)}$$

$$\text{Para } a=32; \delta\% = \left| \frac{R_m - R}{R_m} \right| * 100; \delta\% = \left| \frac{43,8 - 8,7}{43,8} \right| * 100; \delta\% = 80\%$$

Os desvios máximos em relação a média aritmética não estão todos dentro do valor admissível (50%), portanto o ponto com a distância 32m será considerado, visto que 16m esta abaixo do recomendado.

#### 4.9.3 Redimensionamento de condutor de aterramento

O processo de cálculos apresentado, objectiva a definição dada a condutores de aterramento padrão para linhas, bem como de interligação das hastes em função dos tipos de sistema que se destina. [Fonte: VIII]

#### 4.9.4 Determinação de secção mínima do condutor de aterramento

Os condutores de aterramento devem ser dimensionados para suportar as máximas correntes de falha que podem circular para a terra, cujas formula para o cálculo será:

$$S = \sqrt{\frac{t \times \alpha_r \times \rho_r \times 10^4}{TCAP \times \ln \left( \frac{T_m - T_a}{T_r - T_a} \right)}} = S = \sqrt{\frac{0.000020 \times 0,00378 \times 3,318 \times 10^4}{3,682 \times \ln \left( \frac{850 - 40}{20 - 40} \right)}} = 82 \text{mm}^2. \text{ (Equação 4.35)}$$

Onde:

S – Seção do condutor (mm<sup>2</sup>);

tc – duração da aplicação da corrente (s);

Tr – Temperatura de referência das constantes do material (em °C);

Tm - Temperatura máxima suportável pelos materiais utilizados (em °C);

Ta – Temperatura ambiente, expressa em graus Celsius (°C);

$\rho_r$  – Resistividade do condutor de aterramento na temperatura de referência Tr ( $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ );

$\alpha_r$  – Coeficiente térmico de resistividade do condutor na temperatura de referência Tr (1/°C);

$K_o$  = ou () – coeficiente térmico de condutividade do condutor a 0 °C ou na temperatura de referência Tr;

Melhoria do Desempenho da Linha de Transmissão de 110 kV Macia-Chicumbane (CL2) face a Descargas Atmosféricas.

TCAP – factor de capacidade térmica por unidade de volume ( $J/(cm^3 \cdot ^\circ C)$ );

Tabela 6: Valores dos parâmetros dos condutores de aterramento mais usados. (Fonte: IV)

Tipo do condutor	Condutividade	Coefficiente térmico de resistividade	Fator $k_0$ a 0° C	Temperatura de Fusão $T_m$	Temperatura limite $T_m$	Resistividade e a 20 °C $\rho_r$	Fator de capacidade térmica TCAP
	%	fator $\alpha_r (20^\circ C^{-1})$	°C	°C	°C	$\mu\Omega \cdot cm$	$J/(cm^3 \cdot ^\circ C)$
Cobre macio	100	0,003 93	234	1083	850	1,724	3,422
Cobre duro	97	0,00381	242	1084	850	1,777	3,422
Aço revestido em cobre <sup>(a)</sup>	53	0,00378	245	1084	850	3,318	3,682
	40	0,00378	245	1084	850	4,397	3,846
	30	0,00378	245	1084	850	5,862	3,846
	21	0,00378	245	1084	850	8,374	3,854
Haste de aço revestido em cobre	20	0,00378	245	1084	850	8,621	3,846

#### 4.9.5 Implementação de Melhorias

Com base na análise, implementar-se -a técnicas para reduzir a resistência de aterramento, como:

- Instalação de mais hastes de aterramento em paralelo.
- Utilização de malhas de aterramento.

#### 4.9.6 Verificação Pós-Implementação

Após as melhorias, realize novas medições para verificar se o objectivo de resistência foi alcançado no valor  $R \leq 10\Omega$ .

Hastes suficientemente afastadas,  $\frac{1}{R_{eq}} \approx \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$ . Se as hastes forem idênticas ( $R_i = R$ ),

$$\text{então } R_{eq} = \frac{R}{n}; R_{eq} = \frac{43,8}{4} = 10,95\Omega \text{ (Equação 4.36)}$$

Onde:  $R_{eq}$  é a resistência equivalente.

n é número de hastes de aterramento em paralelo.

## CAPITULO V

### 5. Avaliação económica e orçamental de projecto

A avaliação económica visa justificar o investimento, comparando os custos de instalação com os benefícios (principalmente a redução de custos por desligamentos).

#### 5.1 Estimativa de Custos de Investimento do projecto

Tabela 7: Custos para realização do projecto (Fonte: I)

Item	Categoria de custo/necessidade	Descrição do equipamento	Un	Qtd	Preço Unitário (Mt)	Preço total (Mt)
1	Materiais de Para-raios de linha PBPE-LT	Para-raios de linha 110 KV com contadores de Descarga p	Un	33	19.000,00	627.000,00
		Terminal de alumínio para para-raios	Un	66	249,17	16.445,22
		Acessórios para Para-raios	Un	66	640,00	42.240,00
2	Materiais - Isoladores	Isoladores de Vidro (Campânulas de Maior Dimensão) 110KV 70KN	Un	264	1.645,26	434.348,64
3	Materiais - Aterramento	Condutor de aço	M	1000	470,04	470.040,00
		Terminal de aço galvanizado para cabo de terra	Un	22	277,3	6.100,00
		Eléctrodos de Aterramento em aço cobreado (hastes tipo copperweld)	Un	44	333,76	14.685,44
		Aditivos para redução de resistividade (se necessário)	Kg	100	1050	105.000,00
		Grampos de Aterramento	Un	50	920	46.000,00
4	Mão de obra e serviços	Equipe de Instalação (Eletricistas, Técnicos, Supervisor)	Dia	5	50.000,00	250.000,00
		Equipamentos e Máquinas (Guindastes, Ferramentas)	Dia	1	55.000,00	55.000,00
		Transporte de Materiais e Pessoal	Fixo	1	100.000,00	100.000,00
		Segurança do Trabalho (EPIs, Treinamentos)	Fixo	1	120.000,00	120.000,00
		Testes e Comissionamento. Final	serv	1	100.000,00	100.000,00
Sub Total			2.344.619,30 Mt			
Custos indirectos e contingências		Contingência (Imprevistos)	30.000,00			
<b>Total do projeto</b>			<b>2.374.619,30 Mt</b>			

## 5.2 Benefícios (Redução de custos operacionais)

Os principais benefícios derivam da redução de desligamentos, que implicam em:

- ✚ Redução de perdas de energia: Menos interrupções significam mais energia entregue e, conseqüentemente, mais receita.
- ✚ Redução de multas por interrupção: As agências reguladoras aplicam multas às concessionárias por excederem limites de duração e frequência de interrupções.
- ✚ Redução de custos de manutenção de emergência: Menos viagens para restabelecer a linha.
- ✚ Melhoria da imagem da empresa e satisfação do cliente. [Fonte: VIII]

## 5.3 Cálculo da Redução de Perdas

- Número médio de desligamentos por ano = 4 desligamentos/49 km/ano.
- Duração média de cada desligamento: 24 minutos.
- Potência média transmitida pela LT: 56,7 MW.
- Custo da energia não entregue (kwh): 8,91Mt/kwh.

## 5.4 Perdas anuais sem instalação de pára-raios, aprimoramento de isoladores e melhoramento de aterramento

$4\text{desligamentos/ano} \times 0,4\text{h/desligamento} \times 56700 \text{ kW} \times 8,91/\text{kWh} = 808.315,2\text{Mt/ano};$   
(Equação.29).

## 5.5 Redução esperada de desligamentos

Estudos indicam que a instalação de pára-raios pode reduzir os desligamentos por descargas atmosféricas em 50% a 70%. Usaremos 60%. Redução de custos anuais:  
 $0,60 \times 808.315,2 = 484.989,12 \text{ Mt/ano}$

## 5.6 Análise de viabilidade econômica

São utilizados indicadores como VPL (Valor Presente Líquido), TIR (Taxa Interna de Retorno) e Payback.

## 5.7 Valor Presente Líquido (VPL)

O VPL mede a atractividade de um investimento, descontando os fluxos de caixa futuros para o presente.

$$VPL = - CAPEX + \sum_{t=1}^n \frac{\text{Benefícios anuais}}{(1+TMA)^t}; \text{ (Equação 4.37)}$$

$$VPL = - CAPEX + \sum_{t=1}^n \frac{\text{Benefícios anuais}}{(1+TMA)^t} \quad \text{Benefícios} = \text{Benefícios anuais} * \left[ \frac{1-(1+TMA)^{-n}}{TMA} \right]$$

$$VPL = - 2.374.619,30 + 4.129.197,37 \quad \text{Benefícios} = 484.989,12 \text{ Mt} * \left[ \frac{1-(1+0,10)^{-20}}{0,10} \right]$$

$$VPL = 1.754.578,068 \text{ Mt} \quad \text{Benefícios} = 484.989,12 * 8,514 = 4.129.197,37 \text{ Mt}$$

(Equação 4.38)

Onde:

CAPEX- Investimento inicial.

Benefícios anuais: Redução de custos (OPEX).

TMA- Taxa Mínima de Atractividade (taxa de desconto que representa o custo de oportunidade do capital). Vamos considerar 10% ao ano (0,10). Esta taxa varia de empresa para empresa e reflecte o custo de capital e o risco do projecto.

n- Vida útil do projecto (20-30 anos para pára-raios).

### 5.7.1 Interpretação do Resultado

O VPL calculado é de 1.754.578,068 Mt

Um VPL positivo (como neste caso) indica que o projecto é financeiramente viável e que o retorno esperado do investimento é maior do que o custo de oportunidade do capital. Em outras palavras, o projecto agrega valor à empresa.

**Melhoria do Desempenho da Linha de Transmissão de 110 kV Macia–Chicumbane (CL2) face a Descargas Atmosféricas.**

Se o VPL fosse negativo, o projecto não seria atractivo, pois não estaria gerando retorno suficiente para cobrir o custo de oportunidade.

Se o VPL fosse zero, o projecto estaria apenas cobrindo o custo de oportunidade, sem adicionar valor extra.

### **5.8 Cálculo do Valor presente líquido (“Itálico”Payback )**

Tempo necessário para que o investimento inicial seja recuperado pelos benefícios acumulados.

$$Payback = \frac{\textit{Investimento Inicial}}{\textit{Benefícios anuais médios}}; \text{ (Equação 4.39)}$$

$$Payback = \frac{2.374.619,30}{484.989,12}$$

$$Payback = 4,9 \approx 5 \text{ anos}$$

## CAPITULO VI

### 6. Conclusão

Este projecto tem como objectivo principal aprimorar a confiabilidade e a segurança da linha de transmissão de 110 kV, minimizando os impactos das descargas atmosféricas, através da implementação de uma série de melhorias estratégicas, buscamos reduzir significativamente as interrupções no fornecimento de energia e os custos associados a danos e manutenção.

As soluções propostas abrangem o aprimoramento do isolamento da linha, através da aplicação de campânulas de vidro de maiores dimensões, o que contribui para aumentar a distância de escoamento e a resistência dieléctrica do sistema. Além disso, foi realizado o dimensionamento para instalação de pára-raios de linha, dispositivos cruciais para a protecção contra sobretensões transitórias causadas por raios, desviando a corrente para a terra. Um pilar fundamental deste projecto é o melhoramento do sistema de aterramento das torres, dado que um sistema de aterramento eficiente é vital para dissipar a energia das descargas atmosféricas de forma segura, protegendo os equipamentos e garantindo a segurança operacional.

Porém foi feita a viabilidade económica deste projecto e os resultados foram bastante promissores, com um tempo de retorno do investimento de 5 anos. Este período demonstra a eficiência e o retorno financeiro das melhorias implementadas, tornando o projecto não apenas tecnicamente robusto, mas também financeiramente atractivo. É importante ressaltar que a opção de instalação de cabo de guarda não foi implementada devido à inviabilidade técnica relacionada à distância não segura entre o cabo de guarda e o condutor de fase, o que nos levou a focar em outras estratégias de protecção eficazes. Com tudo, as acções executadas neste projecto solidificam a resiliência da linha de transmissão frente às descargas atmosféricas, contribuindo para a estabilidade do sistema eléctrico e para a continuidade do fornecimento de energia. As melhorias implementadas não apenas garantem a protecção da infra-estrutura, mas também trazem benefícios económicos a longo prazo, reforçando o compromisso com a excelência operacional e a sustentabilidade

## **7. Recomendações**

### **7.1 Análise de desempenho pós-implementação**

É crucial realizar uma análise comparativa do desempenho da linha antes e depois das melhorias implementadas. Isso envolve a comparação de indicadores como:

- ❖ Índice de interrupções por descargas atmosféricas.
- ❖ Tempo médio de reparo de falhas relacionadas a raios.
- ❖ Custos de manutenção associados a danos causados por raios.

Essa análise permitirá quantificar os benefícios reais do projecto e validar as premissas económicas, fornecendo dados concretos para futuros projectos de melhoria.

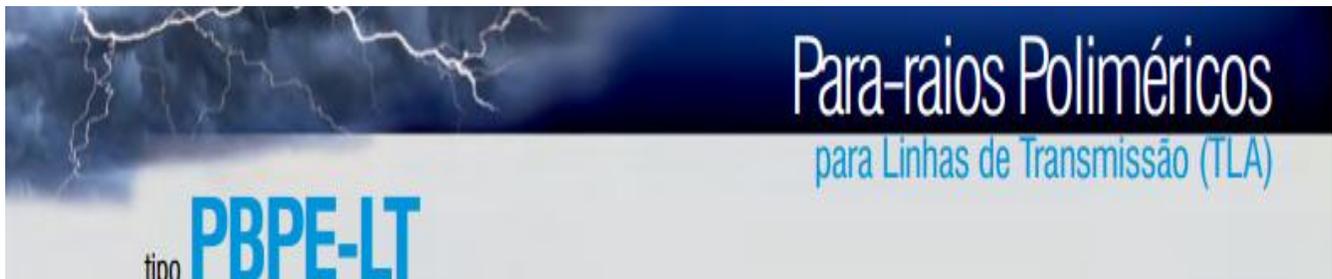
## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- I. [BARBOSA, T., Protecção Contra Descargas Atmosféricas de Edificações Utilizando a Ferragem Estrutural, Tese de Bacharel, 2014;]
- II. [EDM – Divisão Transporte Sul, “Caracterização da linha de transporte CL2 (Macia-Chicumbane), Maputo”.]
- III. [IEC, 2006 – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – IEC 62305 - Protection against lightning - Part 2: Risk management. Genebra;]
- IV. [IEEE- Instituto de engenheiros electricistas e electrónicos]
- V. [INAM - Instituto nacional de meteorologia];
- VI. [Kindermann, G & Campagnolo, J. Aterramento eléctrico, 3ª Edição, SAGRA-DC Luzatto, Porto Alegre, 1995.]
- VII. [MAMEDE FILHO, J. Instalações Eléctricas Industriais. 7a Edição, 2010;
- VIII. Mendonça, Ana Lisa- “Método de avaliação de risco”, Algarve,2013.]
- IX. [MODENA J. e SUETA H. (2011) Medição da Resistividade do Solo. Aterramentos Eléctricos;]
- X. [Nanjing Electric (China)]
- XI. [PEREIRA, M. P.(1987) Transístores eléctricos UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMININSE.]
- XII. [SANTOS, M.R – Evolução de pára-raios em estudos de sobretensões Coordenação de isolamento. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO]
- XIII. [VISACRO FILHO, S. Descargas Atmosféricas: Uma abordagem de engenharia 1ª Edição.]

## **ANEXOS**

## Anexos 1: Tabelas e acessórios

Tabela A1-1: Especificação técnica do para-raios de linha de 110kV. [Fonte: Balestro]



### Características Elétricas

Modelo	Tensões Nominais Ur (kV)	Tensões de Operação Contínua MCOV Uc (kV)	Tensão Residual para Corrente de Descarga Nominal 8/20 $\mu$ s (kV)	Tensão Residual para Impulso de Corrente de Manobra 500A (kV)	Tensão Residual para Impulso Ingreme, 10kA (kV)	Invólucro		Peso (kg)
						Distância de Arco (mm)	Distância de escoamento (mm)	
PBPE 21/10/2/N/A-LT	21	17,0	54,8	44,2	63,0	280	535	4,5
PBPE 21/10/2/H/A-LT	21	17,0	54,8	44,2	63,0	280	800	4,9
PBPE 36/10/2/N/A-LT	36	29,0	94,0	75,9	108,1	380	750	5,0
PBPE 36/10/2/H/A-LT	36	29,0	94,0	75,9	108,1	380	1.140	5,7
PBPE 60/10/2/N/A-LT	60	48,0	156,6	126,4	180,1	660	1.295	9,5
PBPE 60/10/2/M/A-LT	60	48,0	156,6	126,4	180,1	660	1.940	10,5
PBPE 60/10/2/H/A-LT	60	48,0	156,6	126,4	180,1	750	2.280	11,3
PBPE 72/10/2/N/A-LT	72	58,0	187,9	151,7	216,1	750	1.480	10,0
PBPE 72/10/2/H/A-LT	72	58,0	187,9	151,7	216,1	750	2.280	11,5
PBPE 120/10/2/N/A-LT	120	98,0	320,0	258,2	368,0	1.120	2.595	18,0
PBPE 120/10/2/M/A-LT	120	98,0	320,0	258,2	368,0	1.120	3.880	20,5
PBPE 120/10/2/H/A-LT	120	98,0	320,0	258,2	368,0	1.330	4.450	24,0
PBPE 192/10/2/M/A-LT	192	154,0	520,0	427,0	598,0	1.827	6.585	55,0

Devido aos constantes desenvolvimentos de materiais e técnicas, as informações deste catálogo estão sujeitas a alterações sem prévio aviso. Outros modelos mediante consulta.

A

## Anexos 1: Tabelas e acessórios

Tabela A1-2: Características técnicas do para-raios de linha. [Fonte: Balestro]

### Características Principais

<b>Modelo</b> (Caracterização referente à resistência à flexão)	A
<b>Tensões Nominais Ur (kV)</b>	Entre 21 e 120
<b>Corrente de Descarga Nominal (kA)</b>	10
<b>Classe de Descarga de Linhas de Transmissão (IEC 60099-4)</b>	2
<b>Corrente suportável de impulso de alta intensidade, 4/10 <math>\mu</math>s (kA)</b>	100
<b>Corrente suportável de longa duração, 2000 <math>\mu</math>s (A)</b>	550
<b>Capacidade de absorção de energia conforme ensaio de ciclo de operação (injetada em duas descargas de longa duração classe 2) (kV de Uc)</b>	5,5 kJ/kV de Uc
<b>Classe de corrente de curto circuito (de falta) (kArms - s)</b>	40 - 0,2
<b>Resistência a tração/ compressão (N)</b>	1150
<b>Resistência a flexão (Nm)</b>	350
<b>Resistência a torção (Nm)</b>	70
<b>Sobretensões temporárias, com aplicação prévia de energia (como no ensaio de ciclo de operação)</b>	1,47 pu de Uc por 1s 1,37 pu de Uc por 10s 1,29 pu de Uc por 100s

### Condições de serviço:

Temperatura ambiente = -40° C a +40° C

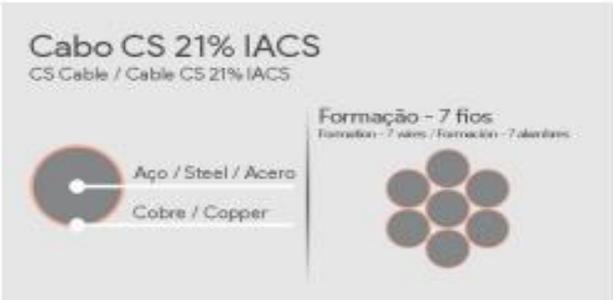
Altitude de projeto = máx. 1000 m (para altitudes maiores, consultar)

Frequência = entre 48 Hz e 62 Hz

## Anexos 1: Tabelas e acessórios

Tabela A1-3: Especificação técnica de aço cobreado para aterramento de torres. [Fonte: VII]

ABNT NBR 8121: Cabos de fios de aço revestidos de cobre, nus, para fins elétricos — Especificação.

**Cabo CS 21% IACS**  
CS Cable / Cable CS 21% IACS

Formação - 7 fios  
Formação - 7 fios / Formação - 7 alambres

Aço / Steel / Acero  
Cobre / Copper

**Características**

Seção Nominal (mm <sup>2</sup> )	95
Seção Efetiva (mm <sup>2</sup> )	93,30
<b>Características do Condutor</b>	
Qtd. De Fios	7
Diâmetro dos Fios (mm)	4,12
Diâmetro do Cabo (mm)	12,36
Seção (AWG/MCM)	3/0
<b>Parâmetros Físicos</b>	
Área do Cobre (%)	14
Área do Aço (%)	86
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	7,96
<b>Características Mecânicas</b>	
Peso Nominal (kg/km)	754,00
Módulo de Elasticidade (GPa)	190
Coef. de Dilatação Linear (1/°C)	1,77 E-05
Carga de Ruptura - LCA (daN)	2730
<b>Características Elétricas</b>	
Coef. de Variação de Resistência (1/°C)	0,00378
Reatância Indutiva - 60Hz (ohms/km)	-
Reatância Capacitiva - 60Hz (ohms/km)	-
Capacidade de Corrente em Regime Permanente - 75°C (A)	-
Capacidade de Corrente em CC - 50ms (A)	-
Capacidade de Corrente em CC - 100ms (A)	-
Capacidade de Corrente em CC - 0,5s (A)	-
Resistência Máxima à 20°C em CC (ohms/km)	0,880



Figura A1-3. Acessórios de aterramento. [Fonte: IX]

## Anexos 2: Configurações de estrutura de torres e aterramento

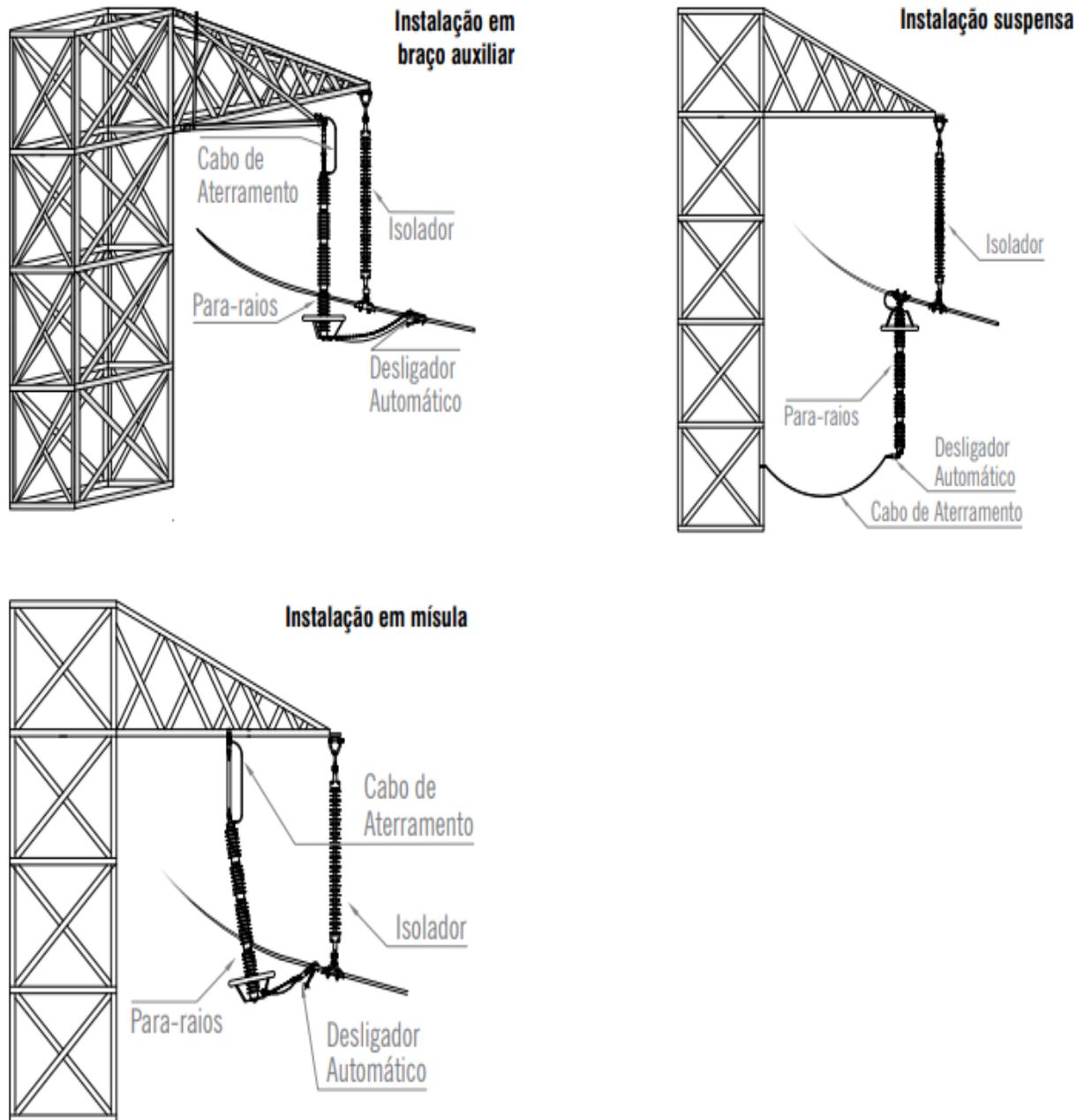


Figura A2-4: Formas de instalação de para-raios em torres de transmissão. [Fonte: VII]

## Anexos 2: Configurações de estrutura de torres e aterramento

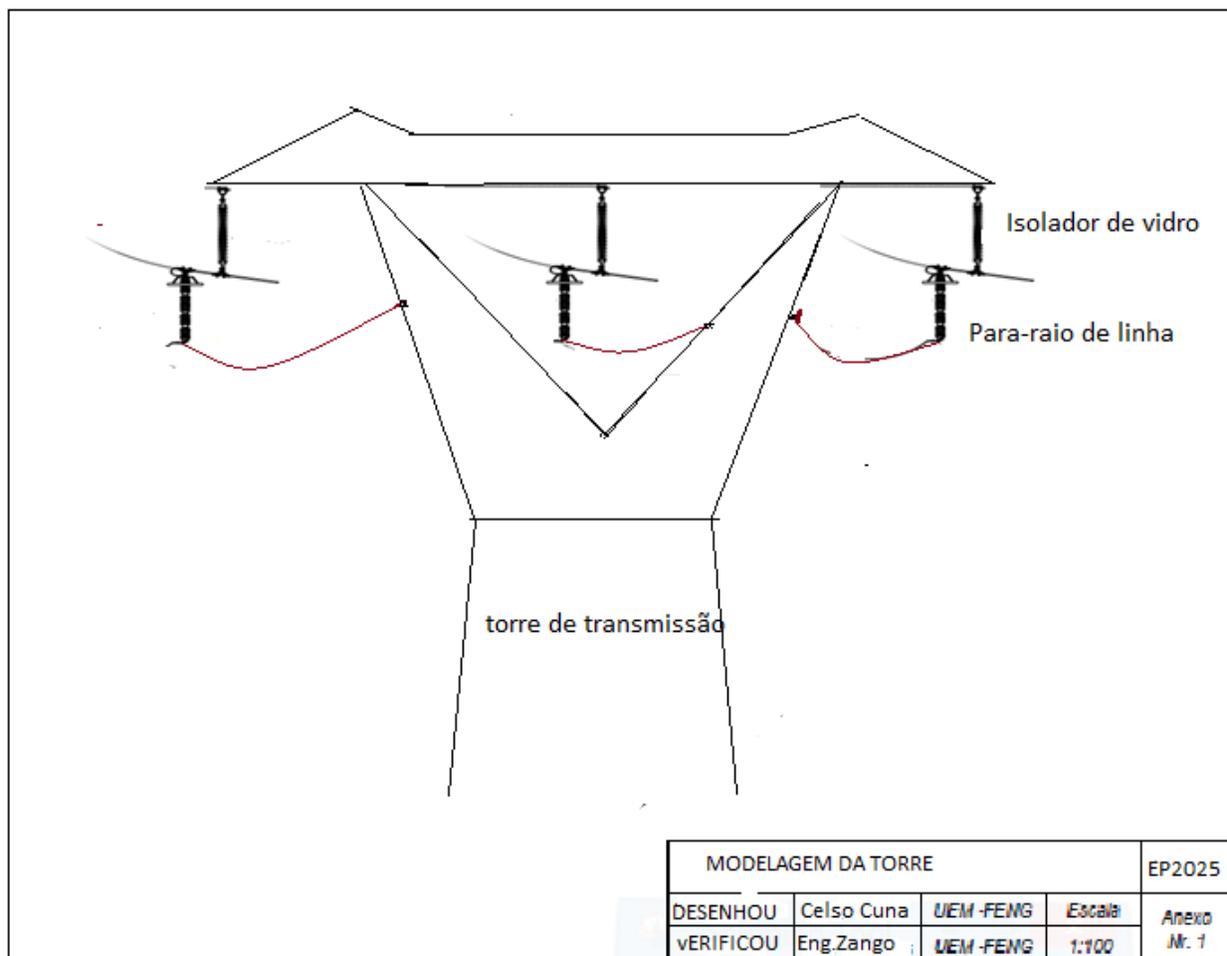


Figura A2-5. Modelagem de torre com instalação de para-raios de linha. [Fonte: Autor]

## Anexos 2: Configurações de estrutura de torres e aterramento

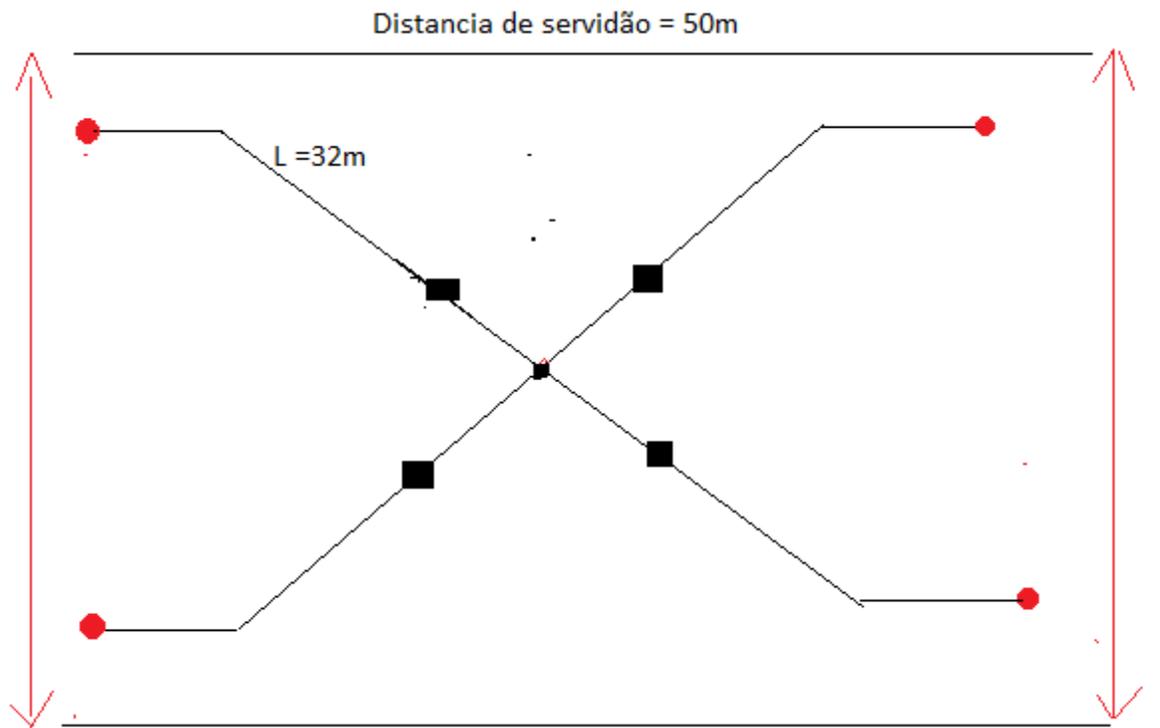


Figura A2-6. Modelagem de aterramento da torre. (Fonte: Autor)



UNIVERSIDADE  
EDUARDO  
MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA  
Curso de Engenharia Eléctrica

**TERMO DE ATRIBUIÇÃO DE TEMA DE ESTÁGIO PROFISSIONAL**

REFERÊNCIA DO TEMA: 2025ELEPPL04

Data 17.02.2025

**1. TÍTULO DO TEMA**

Melhoramento de desempenho face às descargas atmosféricas, de uma linha de transmissão de energia eléctrica de 110KV e 49 Km, que interliga a subestações de Macia e Chicumbane.

**2. DESCRIÇÃO SUMÁRIA DO TRABALHO A DESENVOLVER**

**2.1. Introdução**

Os Sistemas de Potência (SEPs) desempenham um papel crucial na sociedade moderna, sendo responsáveis pela produção, transmissão e distribuição eficiente da energia eléctrica até o consumidor final. No entanto, esses sistemas são caracterizados por redes complexas, compostas por uma variedade de elementos que devem operar de forma confiável para atender à demanda energética.

Um desafio inerente à operação dos SEPs é a imprevisibilidade de fenômenos naturais, como as descargas atmosféricas. A incidência de raios pode desencadear sobretensões e falhas induzidas, como flashovers (descargas disruptivas) e backflashovers (descargas de retorno) em linhas aéreas de transmissão, comprometendo a integridade do sistema eléctrico. As falhas em linhas de transmissão representam um risco significativo, podendo gerar oscilações e instabilidades no sistema de potência, com o potencial de causar blecautes de grande magnitude.

Para mitigar esses riscos e garantir a confiabilidade esperada, é imperativo adotar medidas preventivas e corretivas eficazes. O desempenho das linhas aéreas, um componente vital dos SEPs, é frequentemente avaliado pela taxa de desligamentos por 100 km. Portanto, a implementação de ações que aprimorem esse desempenho é fundamental. As principais estratégias comumente empregadas incluem:

- Instalação de cabos de guarda nas linhas
- Redução da resistência de aterramento das torres
- Aumento do nível de isolamento das linhas
- Instalação de para-raios de linha nas torres

## 2.2. Formulação do problema

A linha de transmissão de energia elétrica em questão desempenha um papel estratégico, assegurando a interligação vital entre as subestações de Macia e Chicumbane, na província de Gaza, e suprindo a demanda energética da província de Inhambane. Contudo, essa infraestrutura crítica apresenta vulnerabilidades significativas:

Ausência de cabo de guarda: O projeto original da linha não incluiu a instalação de cabos de guarda, um componente essencial para a proteção contra descargas atmosféricas.

Aterramento comprometido: Os cabos de aterramento das torres apresentam interrupções decorrentes de corrosão galvânica, comprometendo a eficácia do sistema de proteção contra surtos de tensão.

Histórico de desligamentos: Nos últimos cinco anos, e com um aumento preocupante em 2024, a linha tem sofrido inúmeros desligamentos durante períodos de mau tempo, indicando uma alta susceptibilidade a falhas induzidas por descargas atmosféricas.

Diante desse cenário, surge a necessidade premente de reduzir a frequência de desligamentos da linha, visando alcançar um desempenho aceitável. Isso requer a implementação de medidas corretivas eficazes e em conformidade com as normas técnicas vigentes, a fim de garantir a confiabilidade e a estabilidade do sistema de transmissão.

### **2.3. Pergunta de pesquisa**

Como proteger a linha de transmissão de 110KV, face as descargas atmosféricas, para reduzir os índices de desligamentos, de modo a garantir a confiabilidade do sistema eléctrico, através de implementação e avaliação de métodos eficazes?

### **2.3. Justificativa**

A melhoria do desempenho da linha de transmissão é uma medida de carácter estratégico e prioritário, justificada pelos seguintes aspectos:

- Garantia da Confiabilidade do Fornecimento de Energia Elétrica:
- Minimização de Danos à Infraestrutura da Linha:
- Redução de Perdas Económicas:
- Otimização da Operação do Sistema Elétrico:

### **2.4. Objectivo**

#### **2.4.1. Objectivos geral**

O objetivo é de reduzir os índices de desligamentos e garantir a confiabilidade do sistema elétrico.

#### **2.4.2. Objectivos específicos**

- Identificar e analisar os métodos propostos para melhoramento de desempenho das linhas de transmissão, com foco em técnicas de proteção contra descargas atmosféricas.
- Caracterizar a linha de transmissão e propor soluções para reduzir desligamentos causados por descargas atmosféricas.
- Desenvolver algoritmos para análise de dados (como taxas de desligamento, correntes de surto e tensões induzidas) dos métodos propostos para resolução do problema.
- Realizar ensaios com programas computacionais para avaliação da aplicabilidade do método escolhido.
- Demonstrar a viabilidade económica das soluções, considerando custos de implementação, manutenção e benefícios a longo prazo.

## **2.5. Metodologia**

Para elaboração do relatório de estágio serão considerados os seguintes passos:

### **2.5.1. Revisão bibliográfica**

Consistirá na pesquisa e leituras de livros, catálogos, publicações científicas, conteúdos da internet e consulta de técnicos da especialidade.

### **2.5.2. Pesquisa de campo**

Serão feitas visitas em alguns pontos do objecto do projecto.

### **2.5.3. Modelação computacional:**

Será usado o softwares para a simulação do desempenho do metodo considerado, e demonstração de resultados.

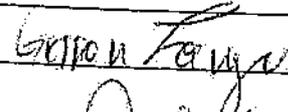
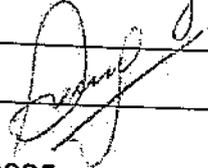
### **2.5.4. Elaboração do relatório**

Será apresentada de forma resumida a informação adquirida na literatura, apresentados os resultados de pesquisa, dos cálculos, simulações, bem como a discussão dos mesmos.

## **3. LOCAL DE REALIZAÇÃO**

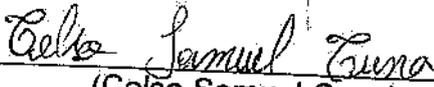
Província de Gaza, Distrito de Bilene, Posto administrativo de Macia

#### 4. SUPERVISORES

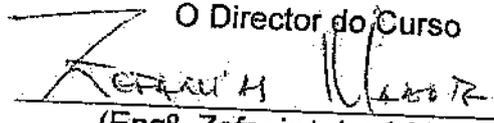
	Nome	Assinatura
Da UEM	Engº. Gerson Zango	
Co-Supervisor		
Da Instituição	Engº. Deulário Mabecua	

Maputo, 13 de Maio de 2025

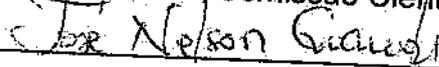
O estudante

  
(Ceiso Samuel Cuna)

O Director do Curso

  
(Engº. Zefanias José Mabote)  
26/05/25

O Chefe da Comissão Científica



(Mestre José Nelson Guambe.)



UNIVERSIDADE  
EDUARDO  
MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA

Curso de Licenciatura em Engenharia Eléctrica

**PLANO DE ACTIVIDADES DE TRABALHO DE ESTÁGIO PROFISSIONAL**

REFERÊNCIA DO TEMA: 2025ELEPPL04

Data: 17/02/2025

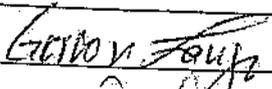
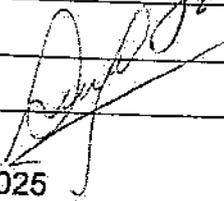
**TÍTULO DO TEMA**

Melhoramento de desempenho face às descargas atmosféricas, de uma linha de transmissão de energia eléctrica de 110KV e 49 Km, que interliga a subestações de Macia e Chicumbane.

#	Actividade	Fev	Mar	Abri	Mai	OBS
1	Escolha e pesquisa do tema	█				
2	Levantamento bibliográfico	█				
3	Escolha de instrumentos de recolha de dados	█	█			
4	Pesquisa de campo		█	█		
5	Redacção da revisão bibliográfica		█	█		
6	Análise e dados			█	█	
7	Discussão de resultados			█	█	
8	Redacção da análise de dados e discussão dos resultados			█	█	
9	Redacção das conclusões e referências bibliográficas				█	
10	Revisão e redacção final				█	
11	Submissão do relatório final				█	

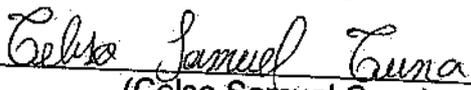
*[Handwritten signature]*

## 2. SUPERVISORES

	Nome	Assinatura
Da UEM	Engº. Gerson Zango	
Co-Supervisor		
Da Instituição	Engº. Deulário Mabecua	

Maputo 13 de Maio de 2025

O estudante

  
(Celso Samuel Cuna)

