



**Universidade Politécnica**  
**A POLITÉCNICA**

**INSTITUTO SUPERIOR DE GESTÃO, CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS**

**CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS E ENGENHARIAS**

**Engenharia Eléctrica**

**Adopção De Um Anel (Redundância) Para Garantir o Funcionamento Contínuo Da Rede De Média Tensão Nos Portos e Caminhos De Ferro De Moçambique**

**Discente:** Ernesto Artur Cumbana

**Supervisor:** MSc. José Bento Machiana

Maputo, Abril de 2025



# **Universidade Politécnica**

## **A POLITÉCNICA**

**INSTITUTO SUPERIOR DE GESTÃO, CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS**

**CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS E ENGENHARIAS**

**Engenharia Eléctrica**

### **Adopção De Um Anel (Redundância) Para Garantir Um Funcionamento Contínuo da Rede De Média Tensão Nos Portos e Caminhos De Ferro De Moçambique**

**Discente:** Ernesto Artur Cumbana

Monografia apresentada à Instituto Superior de Gestão, Ciências e Tecnologias - Universidade Politécnica, como parte dos requisitos para obtenção do grau de licenciatura em Engenharia Eléctrica.

**Supervisor:** MSc. José Bento Machiana

Maputo, Abril de 2025

## DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, Ernesto Artur Cumbana, declaro por minha honra que o presente trabalho é da minha autoria resultante de uma investigação feita por mim, as fontes recorridas estão incluídas no texto e na bibliografia final, o mesmo foi concebido para ser submetido como trabalho de fim de curso de Licenciatura em Engenharia Eléctrica na Escola Superior de Gestão, Ciências e Tecnologias - Universidade Politécnica, e é a primeira vez que o submeto para obtenção de um grau académico de licenciatura nesta instituição educacional.

O Autor

---

(Ernesto Artur Maria Cumbana)

Maputo, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ 2024

Maputo, Abril 2025

## **PARECER DO SUPERVISOR**

Eu, José Bento Machiana, supervisor da monografia "Adopção de um anel (redundância) para garantir um funcionamento contínuo da rede de Média Tensão nos Portos e Caminhos de Ferro de Moçambique" de autoria de Ernesto Artur Maria Cumbana, do curso de Licenciatura em Engenharia Eléctrica, declaro que o mesmo preenche os requisitos básicos da pesquisa científica que pode ser submetida a apreciação do júri.

**O supervisor**

---

(MSc. José Bento Machiana)

Maputo, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ 2024

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a minha família em particular aos meus pais Artur Cumbana e Maria Jorge Nhone (em memória) que mesmo diante de várias dificuldades da vida não deixaram faltar a educação e o pão na mesa, estiveram sempre ao meu lado durante o meu processo de formação, na escolha dos meus caminhos e do curso a seguir, incutiam na minha cabeça que a educação e a formação são ferramentas para o sucesso na vida.

## AGRADECIMENTOS

O dom da vida é uma vitória digna de toda gratidão. Por isso em primeiro lugar agradeço a Deus por me ter concedido esse dom e pelas maravilhas que ele operou em mim desde o início até ao fim da minha formação.

Agradecer ao meu Pai pelo apoio e suporte em que deu em todos momentos e principalmente neste percurso académico, pois, sempre esteve presente quando do seu apoio precisei.

Agradecer a minha esposa e aos meus filhos pelo conforto, pela confiança e esperança que depositaram em mim, incentivando-me a continuar firme mesmo nos momentos em que as dificuldades da vida obrigavam que parasse com os meus estudos, pois sempre que olhava para os seus rostos encontrava motivação e soava neles uma voz que dizia "pai não desiste".

Aos docentes que de forma incansável e incondicional transmitiam conhecimentos com excelência e de forma sábia, de modo que após a formação o estudante se tornasse reflexo das suas bem feitorias nomeadamente Eng<sup>o</sup> Eugénio Mandlate, Eng<sup>o</sup> Fernando Hausse Chaichai e o Prof. Doutor Gabriel Auziane.

Os meus agradecimentos se estendem à toda equipe técnica do SMREA de modo particular ao Eng<sup>o</sup> Mamady Correia, ao Sr. Joaquim Fernando e ao Ângelo Checo pelo apoio prestado, paciência, incentivo moral e na disponibilidade de documentos formais com os quais foram adquiridos conteúdos que serviram para o enriquecimento do presente trabalho.

Ao Eng<sup>o</sup> José Nelson Mapilele o qual durante a minha caminhada estudantil serviu de inspiração e deu seu apoio na escolha e definição do tema do trabalho de fim do curso muito obrigado.

## RESUMO

Esta monografia aborda os desafios enfrentados na rede eléctrica dos Portos e Caminhos de Ferro de Moçambique, propondo soluções para aprimorar sua confiabilidade e eficiência operacional. Por meio de uma abordagem multidisciplinar, foram aplicadas diversas metodologias, incluindo pesquisa bibliográfica, análise da infra-estrutura existente, simulações, consultas a especialistas e técnicos ou operadores da área. A implementação de um sistema de anel de backup revelou-se promissora na redução de cortes de energia causados por avarias nas linhas e nos cabos de Média Tensão, proporcionando uma reconfiguração eficaz do fornecimento de energia. A substituição de cabos por versões mais robustas, com bainhas de protecção mecânica, apresenta-se como uma medida eficaz para aumentar a confiabilidade, enquanto a criação de um anel de alimentação principal contribui para melhorar o fornecimento e a distribuição de energia. A análise focalizada dos pontos críticos na infra-estrutura da rede permitiu a identificação de áreas vulneráveis, orientando esforços para reduzir interrupções não planeadas. A colaboração contínua com a equipe técnica é crucial para a implementação bem-sucedida dessas melhorias. Este estudo não apenas propõe soluções práticas para desafios imediatos, mas também contribui para o avanço do conhecimento na gestão de redes eléctricas em contextos complexos. A implementação gradual dessas recomendações visa não apenas a resolução eficaz dos problemas identificados, mas também o aprimoramento sustentável da infra-estrutura eléctrica nos Portos e Caminhos de Ferro de Moçambique.

**Palavras-chave:** Redundância eléctrica, confiabilidade da rede eléctrica.

## ABSTRACT

This monograph addresses the challenges faced by the electrical network of the Ports and Railways of Mozambique, proposing solutions to improve its reliability and operational efficiency. Through a multidisciplinary approach, various methodologies were applied, including bibliographic research, analysis of the existing infrastructure, simulations, and consultations with experts and technical operators in the field. The implementation of a backup ring system has proven to be promising in reducing power outages caused by failures in medium-voltage lines and cables, providing an effective reconfiguration of power supply. The replacement of cables with more robust versions, featuring mechanical protection sheaths, emerges as an effective measure to enhance reliability, while the creation of a primary supply ring contributes to improving power distribution and supply. A focused analysis of critical points in the network infrastructure allowed the identification of vulnerable areas, guiding efforts to reduce unplanned interruptions. Continuous collaboration with the technical team is crucial for the successful implementation of these improvements. This study not only proposes practical solutions to immediate challenges but also contributes to advancing knowledge in the management of electrical networks in complex environments. The gradual implementation of these recommendations aims not only at effectively resolving identified issues but also at the sustainable enhancement of the electrical infrastructure in the Ports and Railways of Mozambique.

**Keywords:** Electrical redundancy, electrical network reliability.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFM Portos e Caminhos de Ferro de Moçambique

CTM Central Térmica de Maputo

AT Alta Tensão

MT Média Tensão

BT Baixa Tensão

BTN Baixa Tensão normal

BTE Baixa Tensão especial

CA Corrente Alternada

CC Corrente Contínua

EDM Electricidade de Moçambique

PTs Postos de Transformação

## LISTA DE FIGURAS E TABELAS

### Lista de Figuras

Figura 1: Configuração da Rede de distribuição de MT dos CFM.....	26
Figura 2: Caixas de junção mal manufacturada pelos técnicos.....	29
Figura 3: Cabo XLPE 1P 240 mm <sup>2</sup> de uma das linhas de 33 KV.....	70
Figura 4: caixas desfeitas onde se notou a falha técnica na Manufatura.....	70
Figura 5: condições criadas para manufatura de caixas de junção num dos pontos onde os cabos ficam submersos num dia chuvoso.....	71
Figura 6: Técnicos manufacturando uma caixa na L2 da linha EL 27.....	71
Figura 7: O Ponto onde a EL 26 e a EL 27 foram cruzadas (troca de posição).....	72
Figura 8: Escavação feita pelos técnicos na alma da linha férrea para identificar o ponto e a linha com defeito.....	72
Figura 9: Técnicos manufacturando caixa de junção na alma ou por baixo da linha férrea durante a noite.....	73
Figura 10: Proposta da trajectória da nova linha aérea.....	77

### Lista de Tabelas

Tabela 1: Características do cabo PARTRIDGE.....	33
Tabela 2: características do cabo de guarda.....	42

## ÍNDICE

DECLARAÇÃO DE HONRA .....	i
PARECER DO SUPERVISOR .....	ii
DEDICATÓRIA .....	iii
AGRADECIMENTOS .....	iv
RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	vii
LISTA DE FIGURAS E TABELAS .....	viii
CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO.....	1
1. Contextualização.....	1
1.1 Delimitação do Tema .....	2
1.2 Problema a pesquisar.....	2
1.3 Hipóteses da Pesquisa .....	3
1.3.1 Hipótese H+ .....	3
1.3.2 Hipótese H- .....	3
1.4 Objectivos do Trabalho .....	3
1.4.1 Objectivo Geral.....	3
1.4.2 Objectivos Específicos.....	3
1.5 Justificativa.....	3
1.6 Características ambientais .....	4
1.7 Estrutura do trabalho.....	4
CAPÍTULO II: REVISÃO DA LITERATURA .....	5
2. Revisão bibliográfica .....	5
2.1. Sistemas Eléctricos de Energia.....	5
2.2. Classificação de sistemas eléctricos.....	5
2.2.1. Produção .....	6
2.2.2. Transmissão .....	6
2.2.3. Distribuição.....	6
2.3. Níveis de tensão de sistemas eléctricos.....	7

2.3.1.	Média Tensão (MT) .....	7
1.4	Dimensionamento dos Apoios .....	9
1.5	Dimensionamento de Isoladores .....	11
1.6	Distâncias Regulamentares .....	12
1.6.1	Distâncias de Segurança em Relação a Edificações e Outras Estruturas .....	12
1.6.2	Distâncias Mínimas entre Condutores .....	13
1.6.3	Distâncias Mínimas entre Condutores e o Solo .....	13
1.7	Estrutura topológica da rede de distribuição .....	14
1.7.1	Rede radial .....	14
1.7.2	Rede malhada .....	15
1.7.3	Rede em anel com exploração radial .....	15
1.8	Cálculo eléctrico .....	15
1.8.1	Resistência eléctrica .....	16
1.8.2	Indutância .....	17
1.8.3	Reactância .....	17
1.8.4	Impedância .....	17
1.8.5	Queda de tensão .....	18
1.8.6	Perdas por efeito Joule .....	18
1.9	Cálculo Mecânico .....	18
1.9.1	Tensões mecânicas máximas .....	19
1.9.2	Força do vento .....	19
1.9.3	Coeficiente de sobrecarga .....	19
1.9.4	Vão e Vão Crítico .....	20
1.9.5	Estados atmosféricos .....	20
1.9.6	Tensão de montagem .....	20
CAPÍTULO III: METODOLOGIA .....		22
3.	Metodologia .....	22
3.1.	Tipo de pesquisa .....	22
3.2.	Tipo de abordagem .....	23
3.3.	Técnicas de colecta de dados .....	24
3.4.	Técnicas de análise de dados .....	25
CAPÍTULO IV: RESULTADOS .....		26

4.	Resultados .....	26
4.1.	Caracterização do sistema eléctrico de Média Tensão dos CFM.....	26
4.2.	Causas e consequências das avarias nos cabos eléctricos de média tensão.....	28
4.2.1.	Causas das Avarias nos Cabos Eléctricos de Média Tensão.....	28
4.2.2.	Consequências das Avarias nos Cabos de Média Tensão .....	29
4.3.	Proposta de adopção de um anel ideal .....	30
3.3.1	Dimensionamento dos isoladores.....	31
3.3.2	Cálculo eléctrico .....	32
3.3.3	Cálculo Mecânico .....	37
3.3.4	Cálculo mecânico do cabo de Guarda.....	41
3.3.5	Dimensionamento dos apoios .....	45
3.3.6	Distâncias regulamentares.....	48
CAPÍTULO V: DISCUSSÃO.....		50
5.	Discussão .....	50
CAPÍTULO VI: CONCLUSÃO .....		54
6.	CONCLUSÃO .....	54
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56
8.	APÊNDICES.....	61
8.1.	Guia de Entrevistas para Engenheiros e Técnicos .....	61
8.2.	Questionário para Engenheiros e Técnicos dos CFM.....	66
9.	ANEXOS .....	70
9.1.	Cabo XLPE 1P 240 mm <sup>2</sup> de uma das linhas de 33 KV .....	70
9.2.	Caixas desfeitas onde se notou a falha técnica na Manufactura.....	70
9.3.	Condições criadas para manufactura de caixas de junção num dos pontos onde os cabos ficam submersos num dia chuvoso .....	71
9.4.	Técnicos manufacturando uma caixa na L2 da linha EL 27.....	71
9.5.	O Ponto onde a EL 26 e a EL 27 foram cruzadas (troca de posição).....	72
9.6.	Escavação feita na alma da linha férrea para identificar o ponto e a linha com defeito .....	72
9.7.	Técnicos manufacturando caixa de junção na alma ou por baixo da linha férrea durante a noite	73
9.8.	Perfil e parâmetros (imagens tiradas pelo autor no PowerWorld simulator ) .....	74
9.9.	Proposta da trajetória da nova linha aérea .....	77



# CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO

## 1. Contextualização

A história dos Portos e Caminhos de Ferro de Moçambique (CFM) é um reflexo da evolução das infra-estruturas de transporte e energia em Moçambique. Desde o diploma legislativo nº 315, promulgado em 22 de agosto de 1931, que estabeleceu a criação e organização da Direcção dos Serviços dos Portos e Caminhos de Ferro da Colónia de Moçambique, até os desenvolvimentos recentes, os CFM desempenharam um papel fundamental na integração e desenvolvimento do país.

Recentemente, a estrutura organizacional dos CFM passou por mudanças significativas. Além dos órgãos estatutários, como o Conselho de Administração e o Conselho Fiscal, novas direcções executivas regionais foram estabelecidas, incluindo o CFM-Sul, CFM-Centro e CFM-Norte, juntamente com várias direcções por função e gabinetes de apoio à administração. Essa reorganização reflecte as transformações nas infra-estruturas dos CFM, como a expansão da capacidade produtiva e o aumento dos serviços prestados.

No entanto, com essas mudanças e melhorias nas infra-estruturas, também surgiram desafios, principalmente relacionados à demanda crescente por energia eléctrica. O aumento do consumo e as perdas técnicas têm afectado a confiabilidade da rede eléctrica. Para abordar esses desafios, o CFM-Sul buscou uma solução viável que visava reabilitar o sistema de transmissão e distribuição de energia eléctrica com o respectivo fornecimento e instalação de equipamentos (cabos de Baixa e Média Tensão de 33kV, 11k, de Baixa Tensão de 0,4 kV, Subestação principal de 33 kV/11 kV, Postos de Transformação de 11 kV/0,4 kV etc.), resultando em um donativo do Governo Alemão para a reabilitação e melhoria do sistema de fornecimento de energia eléctrica para os Portos de Maputo e Matola, por meio do Banco Alemão de Desenvolvimento.

Diante desse contexto, este estudo propõe-se a analisar a viabilidade e os benefícios da adopção do anel ideal nos CFM, com o objectivo de fornecer subsídios para a tomada de decisão dos gestores em relação à implementação de medidas para garantir a disponibilidade e a confiabilidade do fornecimento de energia eléctrica nessas instalações.

## **1.1 Delimitação do Tema**

O presente trabalho fará uma análise da infra-estrutura eléctrica dos CFM identificando a sua vulnerabilidade à avarias e interrupções indesejáveis num período compreendido entre 2018 a 2022, principalmente nos dois alimentadores dedicados EL 26 e EL 27 respectivamente, que partem da CTM (Central Térmica de Maputo) até a Subestação Principal 1.1. Também apresentará uma proposta fundamental para melhorar a eficiência interna e a qualidade dos serviços prestados aos clientes e usuários da rede eléctrica do Porto de Maputo.

## **1.2 Problema a pesquisar**

A empresa CFM tem enfrentado desafios significativos relacionados ao fornecimento de energia eléctrica. Esses desafios são uma resposta directa ao aumento substancial da demanda por energia eléctrica em Moçambique, que abrange áreas urbanas, rurais e instituições. Três problemas críticos emergem dessa situação: Avarias nos Cabos de Média Tensão (2018-2022), falta de sistemas alternativos robustos e aumento de carga ou da demanda industrial.

Quanto as avarias nos cabos de Média Tensão, entre 2018 e 2022, os CFM experimentaram repetidos cortes de energia causados por avarias nos cabos de Média Tensão dos dois alimentadores dedicados EL26 e EL27 respectivamente que partem da CTM até a Subestação Principal. Essas falhas, que são um componente fundamental do sistema de distribuição eléctrica, tiveram um impacto severo nas operações dos CFM, prejudicando a eficiência interna e a qualidade dos serviços prestados aos clientes e usuários dos Portos de Maputo.

No que diz respeito ao aumento de carga ou da demanda industrial, os CFM têm experimentado um notável aumento na demanda por energia eléctrica, uma consequência directa do crescimento da indústria e do desenvolvimento económico do país e da própria empresa.

E por fim, a falta de sistemas alternativos robustos, este problema é agravado pela ausência de sistemas alternativos confiáveis que garantam um fornecimento contínuo de energia eléctrica, pois embora existirem dois alimentadores principais que partem da CTM, os dois são alimentados pelo mesmo barramento, o que deixa de ser uma redundância. Essa falta, tornou os CFM vulneráveis a interrupções prolongadas, comprometendo a operação regular dos portos e ferrovias.

Diante desse contexto, surge a seguinte questão: Qual a viabilidade e quais os benefícios da adoção de um anel ideal para rápida reposição de energia na rede eléctrica dos Portos e Caminhos de Ferro de Moçambique em caso de avarias nos cabos eléctricos de média tensão?

### **1.3 Hipóteses da Pesquisa**

#### **1.3.1 Hipótese H+**

- A adoção de um anel na rede eléctrica dos CFM é viável técnica admissível, pois reduzirá a frequência de paralisações operacionais devido a avarias na rede.

#### **1.3.2 Hipótese H-**

- A adoção de um anel exigirá a reconfiguração do sistema existente devido as alterações técnicas necessárias para a sua adequação.

### **1.4 Objectivos do Trabalho**

#### **1.4.1 Objectivo Geral**

- Apresentar a proposta de um anel para garantir continuidade de serviços nos CFM.

#### **1.4.2 Objectivos Específicos**

- Identificar as causas e consequências das avarias nos cabos eléctricos de média tensão;
- Analisar as características da rede eléctrica dos CFM;
- Determinar o anel ideal para a rede eléctrica dos CFM.

### **1.5 Justificativa**

Os CFM desempenham um papel crucial na economia do país, sendo responsáveis pelo transporte de mercadorias e passageiros. Para garantir a eficiência e a segurança dessas operações, é essencial que haja um fornecimento contínuo e confiável de energia eléctrica. No entanto, a infra-estrutura eléctrica dos CFM enfrenta desafios, como a ocorrência frequente de avarias nos cabos eléctricos de média tensão, que podem resultar em interrupções no fornecimento de energia. A adoção de um sistema de redundância na rede eléctrica dos CFM, é uma solução eficaz para minimizar os impactos das avarias nos cabos eléctricos, garantir a continuidade do fornecimento de energia e reduzir o tempo de interrupção e aumentando a confiabilidade do sistema.

Outrossim, a implementação do anel ideal pode trazer benefícios económicos significativos para os CFM, ao reduzir os custos associados às interrupções no fornecimento de energia e melhorar a eficiência operacional das instalações. Ademais, a segurança dos trabalhadores e passageiros também será beneficiada, uma vez que a disponibilidade contínua de energia é essencial para garantir um ambiente de trabalho seguro e confiável.

## **1.6 Características ambientais**

Embora a prioridade para a empresa CFM seja cuidar do ambiente e da biodiversidade por serem factores fundamentais que contribuem para o desenvolvimento sustentável não só da própria empresa assim como do país em geral por explorarem os oceanos assim como a terra firme, a empresa movimenta diversos minérios a granel que durante o seu manuseio com máquinas ou equipamentos de grande porte danificam por vezes a rede assim como as estruturas eléctricas e produzem também poeira mineral que de certa forma é nociva a saúde humana.

## **1.7 Estrutura do trabalho**

O trabalho encontra-se dividido em três capítulos, discriminados a seguir:

- Capítulo I – Introdução, neste capítulo, foi feito o enquadramento da monografia, onde o tema é apresentado juntamente com seus problemas de pesquisa, hipóteses, a justificação e seus devidos objectivos;
- Capítulo II – Revisão Bibliográfica, neste capítulo, foram apresentados os marcos teóricos e conceptuais da monografia, onde tem o referencial teórico que define os conceitos da pesquisa, as relações entre esses conceitos;
- Capítulo III – Metodologia, neste capítulo, tem todos os métodos utilizados para elaboração do trabalho, bem como o tipo de pesquisa desde o início até a sua conclusão;
- Capítulo IV – Apresentação e Análise de dados, neste capítulo tem a caracterização da rede eléctrica e a proposta do anel ideal;
- Capítulo V – Conclusão, neste ponto, foi em linhas gerais apresentado as principais constatações de forma sumária. O trabalho conta ainda com referências bibliográficas, anexos e apêndices.

## **CAPÍTULO II: REVISÃO DA LITERATURA**

### **2. Revisão bibliográfica**

Neste capítulo, foi abordada a revisão da literatura relacionada aos sistemas eléctricos de energia. Foram discutidos os sistemas eléctricos em geral, foram apresentados os diferentes tipos de sistemas de geração de energia eléctrica, foi também discutida a classificação dos sistemas eléctricos e Por fim, foi apresentada a estrutura topológica da rede de distribuição.

#### **2.1.Sistemas Eléctricos de Energia**

Segundo Gomes e Deotti (2018), para fornecer electricidade de forma eficiente e económica, atendendo às necessidades dos consumidores residenciais, comerciais, de serviços e industriais, é essencial contar com um sistema complexo que envolve a produção, transmissão e distribuição de energia eléctrica. Além disso, é fundamental minimizar os distúrbios e impactos ambientais e sociais, visando alcançar um equilíbrio ideal entre a produção de energia, o consumo e a sustentabilidade.

Segundo Bichels (2018), um sistema eléctrico bem projectado deve atender a três aspectos fundamentais: Em primeiro lugar, deve operar adequadamente em condições normais, garantindo que não ocorram interrupções no fornecimento, curtos-circuitos ou desligamentos. Em segundo lugar, é essencial prevenir falhas, o que requer uma boa manutenção de equipamentos e instalações, bem como a substituição de equipamentos danificados e desgastados. Em terceiro lugar, é necessário mitigar os efeitos das falhas para que suas consequências sejam mínimas ou nulas, evitando assim que se espalhem pelo sistema e causem grandes interrupções (apagões) com consequências graves.

#### **2.2.Classificação de sistemas eléctricos**

Os sistemas eléctricos de energia segundo Carvalho (2022), consistem em unidades de *produção*, onde a energia primária é convertida em energia eléctrica, nas redes de *transmissão* e *distribuição*, que transportam a energia eléctrica até aos locais de consumo, e nos equipamentos dos consumidores, onde a energia é utilizada.

### **2.2.1. Produção**

A geração ou produção é responsável por converter a energia vinda de uma fonte primária em energia eléctrica (Gomes e Deotti, 2018). A energia eléctrica, de acordo com Carvalho (2022), é gerada em centrais eléctricas por meio de unidades geradoras que convertem energia primária em energia eléctrica. Essa energia primária provém de diversas fontes, como combustíveis fósseis, energia nuclear, hidreléctrica, eólica e solar. O processo de conversão dessa energia primária em energia eléctrica depende da concepção da unidade geradora, a qual é parcialmente determinada pela fonte de energia primária.

### **2.2.2. Transmissão**

O sistema de transmissão eléctrica é responsável por transportar energia a longas distâncias, desde as grandes centrais de produção até o sistema de distribuição. O transporte da electricidade se dá através das linhas de transmissão de alta tensão por meio de cabos aéreos fixados em grandes torres de metal.

A rede de transmissão é composta por linhas de energia e estações ou subestações (Carvalho, 2022). Além disso, o sistema de transmissão inclui subestações transformadoras, equipamentos de manobra, instrumentação de medição e equipamentos de comunicação (Carvalho, 2022).

Segundo Silva (2019), ainda é comum subdividir esse sistema em transmissão e subtransmissão. Nesse caso, a transmissão tem a função de conectar a geração centralizada em um sistema organizado em malhas, geralmente em tensões de 230 kV ou superiores. Já a subtransmissão conecta os centros de carga à malha principal de transmissão em tensões de 138 kV e 69 kV, geralmente.

### **2.2.3. Distribuição**

De acordo com Carvalho (2022), as redes de distribuição são responsáveis por transportar a energia eléctrica da rede de subtransmissão para os consumidores. A potência é transmitida nessas redes através de condutores instalados em postes ou, em muitas áreas urbanas, por meio de cabos subterrâneos.

As redes de distribuição se diferenciam das redes de transmissão pela sua topologia e pelo nível de tensão utilizado. Tensões mais baixas são empregadas nas redes de distribuição, exigindo menos

isolamento e, conseqüentemente, permitindo menor distância entre os condutores (Carvalho, 2022).

Silva (2019) destaca que a interface entre transmissão e distribuição é realizada pelas subestações primárias de distribuição, que recebem energia das linhas de transmissão/subtransmissão em alta ou média tensão, através de transformadores de potência, convertendo a tensão para um valor menor, ainda em média tensão.

### **2.3. Níveis de tensão de sistemas eléctricos**

Os sistemas eléctricos são compostos por diversos componentes que operam em diferentes níveis de tensão. A escolha da tensão adequada é crucial para garantir a segurança, confiabilidade e eficiência do sistema como um todo.

Os sistemas eléctricos podem ser classificados de acordo com o nível de tensão em que operam:

- Alta Tensão (AT): tensões acima de 1 kV, geralmente utilizadas para transmissão de energia em longas distâncias. A AT oferece a vantagem de reduzir as perdas de energia durante a transmissão;
- Média Tensão (MT): tensões entre 1 kV e 33 kV, geralmente utilizadas para distribuição de energia em áreas urbanas e industriais. A MT permite a conexão entre a AT e a Baixa Tensão;
- Baixa Tensão (BT): tensões até 1 kV, geralmente utilizadas para fornecimento de energia directamente aos consumidores finais, como residências e comércios. A BT é a parte final da rede eléctrica, com foco na segurança dos usuários.

#### **2.3.1. Média Tensão (MT)**

As linhas aéreas de Média e Baixa Tensão são constituídas pelos seguintes elementos (Ferreira, 2018):

- Condutores;
- Apoios;
- Isoladores;
- Cabos de guarda (linhas aéreas de MT).

### **2.3.1.1. Condutores**

Os condutores definem-se como sendo elementos cuja função é conduzir a energia eléctrica, podendo ser constituídos por um fio, ou por um conjunto de fios que podem ser de cobre, alumínio e alumínio/aço. No entanto, existem diferentes tipos de condutores sendo eles (EDP, 2011):

- Condutor isolado: condutor revestido por uma ou várias camadas isolantes;
- Condutor nu: condutor sem isolamento exterior;
- Condutor unifilar: condutor constituído por um só fio;
- Condutor multifilar: condutor constituído por vários fios não isolados entre si.

### **2.3.1.2. Apoios**

Os apoios definem-se como sendo elementos cuja função é suportar os condutores, podendo ser metálicos, de betão armado, ou em certos casos para linhas de BT ser de madeira. Regra geral, os apoios de BT são de betão ou em madeira. Um outro aspecto importante é a altura dos apoios sendo esta variável, dependendo da topografia do terreno e dos obstáculos que a linha tenha a atravessar. Para isto, numa linha eléctrica, durante todo o seu percurso existem diferentes tipos de apoios com funções diferentes (EDP, 2011):

- Apoio de derivação (A): apoio onde se estabelecem uma ou mais derivações de linha;
- Apoio de alinhamento (B): apoio onde se estabelece que os dois vãos adjacentes estão no prolongamento um do outro;
- Apoio de ângulo (C): apoio situado num ângulo de linha originado por dois alinhamentos diferentes;
- Apoio de fim de linha (D): apoio capaz de suportar o esforço total dos condutores e cabos de guarda (linhas de MT) de um só lado da linha;
- Apoio de reforço: apoio que suporta esforços capaz de reduzir as consequências negativas, em caso de ruptura de um cabo ou condutor;
- Apoio de travessia ou de cruzamento: apoio que limita um vão ou cruzamento. Apoios utilizados para fazer cruzamentos de linhas.

Em geral, as alturas dos apoios são as seguintes (EDP, 2011):

- Baixa Tensão: de 8 a 12 m;
- Média Tensão: de 14 a 26 m.

### **2.3.1.3. Isoladores**

Os isoladores definem-se como sendo elementos cuja função é evitar a passagem de corrente eléctrica do condutor para o apoio. Nas linhas de MT são aplicados dois a três isoladores (campânulas), enquanto nas linhas de BT é aplicado um isolador (campânula). Os isoladores podem ser inseridos em cadeia de amarração, ou ser inseridos em cadeia de suspensão (EDP, 2011).

### **2.3.1.4. Cabos de guarda**

Os cabos de guarda definem-se como sendo elementos cuja função é proteger e blindar os condutores às descargas atmosféricas (as quais deverão resistir), ao permitir transportar a maior parte da corrente, em caso de contacto accidental, reduzindo a corrente escoada para o solo através dos apoios. Os cabos de guarda são colocados acima dos condutores de uma linha aérea de MT e ligados à terra nos apoios (circuito de terra de protecção), terminando nas subestações extremas. Os cabos de guarda são igualmente utilizados para comunicações e telecomando, sendo para esse efeito utilizados condutores de alumínio, com fibra óptica no seu interior (FEUP, 2017).

Para as linhas de MT são considerados os seguintes tipos de linhas (EDP, 2011):

- Linhas de dois ternos: linha aérea com dois grupos de três condutores montados nos mesmos apoios e ligados electricamente formando um circuito trifásico;
- Linha dupla: linha aérea compreendendo dois circuitos, eventualmente de tensões e frequências diferentes, instalados no mesmo apoio;
- Linha múltipla: linha aérea compreendendo vários circuitos utilizando os mesmos apoios, eventualmente de tensões ou frequências diferentes.

## **1.4 Dimensionamento dos Apoios**

O dimensionamento dos apoios é um processo fundamental na engenharia estrutural e mecânica, responsável por garantir a estabilidade, segurança e eficiência de uma estrutura ao longo de sua vida útil. Os apoios são os elementos que transmitem as cargas das estruturas para suas fundações

ou outros elementos de suporte, sendo essenciais em pontes, edifícios, torres de transmissão, tubulações, máquinas industriais e equipamentos mecânicos (Gere & Goodno, 2017).

O correcto dimensionamento dos apoios envolve a consideração de esforços mecânicos, cargas dinâmicas, deslocamentos térmicos e efeitos ambientais. Além disso, a escolha do tipo de apoio influencia directamente no comportamento estrutural, na capacidade de absorção de esforços e na durabilidade da construção (Beer, Johnston & DeWolf, 2017).

Os apoios podem ser classificados de acordo com o tipo de restrição que impõem ao movimento da estrutura e com os tipos de carregamentos que suportam:

- a) Apoios Fixos: Os apoios fixos restringem tanto o movimento de translação quanto de rotação em uma ou mais direcções. São usados em estruturas que precisam de alta rigidez e resistência a cargas elevadas.
- b) Apoios Articulados: Os apoios articulados permitem rotação, mas restringem deslocamentos. São usados em estruturas sujeitas a cargas variáveis e que necessitam de flexibilidade.
- c) Apoios Elastoméricos e Deslizantes: Esses apoios são projectados para absorver deslocamentos e vibrações, sendo amplamente utilizados em pontes e estruturas industriais.

Os apoios em sistemas estruturais e linhas de transmissão podem também ser classificados conforme sua função dentro da estrutura:

#### **a) Apoios de Fim de Linha**

Os apoios de fim de linha, também chamados de apoios de ancoragem, têm a função de sustentar as forças de tracção exercidas pelos condutores nas extremidades de um trecho de linha ou em pontos de interrupção de continuidade. Eles devem ser dimensionados para suportar cargas assimétricas, evitando deslocamentos excessivos ou colapsos estruturais (Glover, Sarma & Overbye, 2012).

## **b) Apoios de Alinhamento**

Os apoios de alinhamento são utilizados para sustentar os condutores ao longo do percurso da linha, garantindo estabilidade e continuidade na transmissão de esforços. São projectados para suportar cargas predominantemente verticais e cargas laterais reduzidas, permitindo flexibilidade em determinadas condições de carregamento (Timoshenko & Goodier, 1970).

## **1.5 Dimensionamento de Isoladores**

O dimensionamento dos isoladores é o processo de cálculo e especificação dos isoladores eléctricos utilizados em linhas de transmissão, subestações e sistemas de distribuição de energia eléctrica. Os isoladores têm a função de suportar condutores energizados, evitando a fuga de corrente para estruturas aterradas e garantindo a segurança e a eficiência do sistema eléctrico (Glover, Sarma & Overbye, 2012).

O correto dimensionamento dos isoladores leva em consideração factores eléctricos, mecânicos e ambientais, como a tensão de operação, esforços mecânicos devido ao peso dos condutores e impactos de intempéries, como chuva, poluição e ventos (Checa, 1988).

Os isoladores podem ser classificados de acordo com sua aplicação e material. Os principais tipos incluem:

### **a) Isoladores de Suspensão**

São utilizados em linhas de transmissão de alta tensão. Consistem em unidades modulares conectadas em série, formando cadeias isolantes. O número de unidades depende da tensão da linha e das condições ambientais (Checa, 1988).

### **b) Isoladores de Pino**

Fixados directamente nas estruturas de suporte, são comuns em redes de média e baixa tensão. Devem ser dimensionados para suportar esforços eléctricos e mecânicos sem comprometer a segurança do sistema (Glover, Sarma & Overbye, 2012).

### **c) Isoladores de Poste**

Empregados em subestações e linhas de distribuição, suportam grandes esforços mecânicos e eléctricos, sendo projetados para resistir a descargas atmosféricas e contaminação ambiental (Kuffel, Zaengl & Kuffel, 2000).

### **d) Isoladores de Passagem**

Utilizados em painéis e transformadores para permitir a conexão de condutores energizados através de barreiras isolantes. Seu dimensionamento leva em conta a rigidez dielétrica e a capacidade térmica do material isolante (Alston, 1968).

## **1.6 Distâncias Regulamentares**

As distâncias regulamentares em linhas de transmissão e redes eléctricas são fundamentais para garantir a segurança, eficiência e confiabilidade no fornecimento de energia eléctrica. Essas distâncias são estabelecidas por normas técnicas que consideram factores como nível de tensão, condições ambientais, segurança pública e integridade das infra-estruturas.

### **1.6.1 Distâncias de Segurança em Relação a Edificações e Outras Estruturas**

As normas estabelecem distâncias mínimas que devem ser mantidas entre os condutores das linhas eléctricas e edificações ou outras estruturas, visando prevenir acidentes e garantir a segurança pública:

- Portugal: De acordo com o Decreto Regulamentar n.º 1/92, os condutores desencapados das linhas, nas condições de flecha máxima, desviados ou não pelo vento, devem manter uma distância mínima de 5 metros em relação a edifícios não relacionados com a exploração das instalações eléctricas;
- Moçambique: O Regulamento de Segurança das Linhas Eléctricas de Alta Tensão, aprovado pelo Decreto n.º 57/2011, estabelece que os condutores desencapados devem manter uma distância mínima de 5 metros em relação a edificações não destinadas ao serviço de instalações eléctricas;
- Normas Internacionais: A IEC 61936-1 recomenda que as distâncias mínimas entre condutores e edificações sejam determinadas com base na tensão nominal e nas condições

específicas de cada instalação, garantindo a segurança e a conformidade com as regulamentações locais.

### **1.6.2 Distâncias Mínimas entre Condutores**

O espaçamento entre condutores é projectado para evitar descargas eléctricas e minimizar os efeitos do efeito corona, que pode causar perdas de energia e interferências electromagnéticas:

- Portugal: O Decreto Regulamentar n.º 1/92 define que a distância mínima entre condutores deve ser adequada para evitar contactos acidentais e garantir a segurança operacional, considerando o nível de tensão e as condições ambientais;
- Moçambique: O regulamento moçambicano alinha-se às práticas internacionais, estabelecendo distâncias mínimas entre condutores que variam conforme o nível de tensão e as condições específicas de cada instalação;
- Normas Internacionais: A IEC 60071 trata da coordenação de isolamento em sistemas de alta tensão, fornecendo orientações sobre distâncias mínimas entre condutores para evitar sobretensões e garantir a integridade do sistema.

### **1.6.3 Distâncias Mínimas entre Condutores e o Solo**

A distância mínima entre os condutores e o solo é essencial para assegurar a segurança de pessoas, veículos e edificações próximas às linhas eléctricas:

- Portugal: Conforme o Decreto Regulamentar n.º 1/92, entre os cabos isolados das linhas, nas condições de flecha máxima, desviados ou não pelo vento, e o solo, deve manter-se uma distância não inferior a 6 metros;
- Moçambique: O regulamento moçambicano determina que a distância mínima entre os condutores e o solo deve ser de 7,5 metros, considerando as condições de flecha máxima e desvios causados pelo vento;
- Normas Internacionais: A IEC 60826 fornece directrizes para o projecto de linhas aéreas de alta tensão, incluindo recomendações sobre distâncias mínimas ao solo, levando em conta factores como tensão nominal e condições ambientais.

É importante ressaltar que essas distâncias podem variar conforme as especificidades de cada projecto e as condições locais. Portanto, é fundamental consultar as normas técnicas aplicáveis e realizar análises detalhadas para garantir a conformidade e a segurança das instalações eléctricas.

Factores ambientais, como temperatura, humidade, poluição e altitude, influenciam as distâncias regulamentares. Por exemplo, em áreas com alta poluição ou altitudes elevadas, pode ser necessário aumentar as distâncias para garantir a rigidez dielétrica do ar e evitar descargas eléctricas.

## **1.7 Estrutura topológica da rede de distribuição**

A estrutura da rede é das principais características de uma rede de distribuição, isto porque numa situação de defeito, a rede de distribuição pode ter de ser configurada, com o propósito da interrupção de fornecimento de energia afectar o menor número de clientes, pelo menor tempo possível. A estrutura da rede deve elementos (Ferreira, 2018):

- Assegurar a segurança das pessoas e bens;
- Atingir um nível satisfatório de qualidade de serviço.

O aspecto mais importante numa rede de distribuição para a exploração de um sistema eléctrico de energia é a sua fiabilidade. Como os elementos das redes estão sujeitos a avarias, algumas imprevisíveis a qualquer momento, estas provocam interrupções no fornecimento de energia eléctrica.

Como estruturas topológicas comuns em sistema eléctrico de energia usam-se as seguintes (Paiva, 2007): Rede radial, Rede malhada e Rede em anel com exploração radial.

### **1.7.1 Rede radial**

A rede radial baseia-se a partir de um ponto de alimentação e por linhas que vão-se ramificando, sem jamais se encontrarem num ponto comum. Esta estrutura topológica apresenta a menor fiabilidade e também o menor custo inicial, sendo aplicada na distribuição. Se não houver produção de energia eléctrica por parte do cliente/consumidor, o sentido do trânsito de energia é do ponto de produção para a carga/consumo, ou seja, apenas num único sentido (Paiva, 2007).

As protecções apresentam uma maior simplicidade de implementação, sendo o defeito alimentado e propagando-se apenas num único sentido e a partir de um único ponto, havendo deste modo maior facilidade de exploração.

### **1.7.2 Rede malhada**

A rede malhada permite a alimentação de um mesmo ponto de rede, por mais que dois caminhos diferentes. A rede malhada apresenta uma topologia de maior fiabilidade em relação à rede radial, por apresentar várias configurações, que deverá tomar em caso de contingências dos equipamentos, com maior necessidade de investimento e manutenção, para as linhas devidamente dimensionadas. Este tipo de topologia é aplicado em redes de transporte. A sua principal característica baseia-se no facto de ter uma protecção associada nos extremos de cada linha (Ferreira, 2018).

Com este tipo de rede todos os consumidores podem ser alimentados por várias linhas, sendo ligadas com o objectivo de constituírem malhas fechadas.

### **1.7.3 Rede em anel com exploração radial**

A rede em anel com exploração radial permite a alimentação de um mesmo ponto de rede por dois caminhos diferentes, podendo ser explorada em regime de anel aberto. Este tipo de topologia apresenta maior fiabilidade em relação à rede malhada e à rede radial, tendo um grande custo inicial e elevado custo de manutenção, para além de cuidados adicionais de protecções (Ferreira, 2018).

Esta é a estrutura topológica da rede de distribuição de MT mais comum em áreas urbanas com elevada densidade de carga, pelo que se utilizam interruptores normalmente abertos, os quais podem ser fechados em caso de indisponibilidade de um troço de linha, com o objectivo de garantir a continuidade de serviço (Paiva, 2007).

## **1.8 Cálculo eléctrico**

O cálculo eléctrico é um ramo da engenharia eléctrica que se dedica à análise, dimensionamento e optimização de circuitos e sistemas eléctricos, abrangendo desde redes de baixa tensão até complexas infra-estruturas de transmissão de energia. Ele envolve a aplicação de conceitos fundamentais como resistência, indutância, capacitância e impedância para determinar variáveis como corrente, tensão e potência ao longo de um sistema eléctrico (Checa, 1988).

A base teórica do cálculo eléctrico remonta às leis fundamentais da electricidade, como a Lei de Ohm, que estabelece a relação entre tensão, corrente e resistência em um circuito eléctrico, e as

Leis de Kirchhoff, que descrevem a conservação da carga e da energia nos circuitos (Hayt & Kemmerly, 2008). Além disso, a teoria das redes eléctricas utiliza métodos analíticos como o das malhas e o dos nós para resolver sistemas complexos de equações diferenciais que regem o comportamento das correntes e tensões em circuitos de corrente contínua (CC) e alternada (CA) (Alexander & Sadiku, 2016).

No contexto da transmissão de energia eléctrica, o cálculo eléctrico se torna ainda mais sofisticado, incorporando modelos matemáticos para a análise da propagação das ondas eléctricas ao longo de condutores, levando em consideração efeitos como a reactância e a susceptância, que influenciam directamente a estabilidade e a eficiência do transporte de energia (Grainger & Stevenson, 1994). Um dos fenómenos analisados no cálculo eléctrico de linhas de transmissão é o efeito corona, que resulta na ionização do ar ao redor dos condutores quando a tensão ultrapassa um certo limiar, causando perdas energéticas e ruído electromagnético (Checa, 1988).

Outro aspecto fundamental é a determinação das constantes eléctricas das linhas de transmissão, como resistência, indutância e capacitância por quilómetro de linha, essenciais para prever quedas de tensão, perdas de potência e desempenho operacional das redes eléctricas (Glover, Sarma & Overbye, 2012). O dimensionamento correto das linhas, levando em consideração os efeitos de cargas distribuídas e transitórios electromagnéticos, é essencial para garantir a confiabilidade e segurança do sistema eléctrico (Kundur, 1994).

Com a evolução da tecnologia e o aumento da complexidade dos sistemas eléctricos, o cálculo eléctrico passou a se apoiar em simulações computacionais, utilizando *softwares* como MATLAB, ETAP e PSS/E para a modelagem e análise de redes de potência. Esses programas permitem a aplicação de métodos numéricos avançados para a solução de equações diferenciais e o estudo de fenómenos como transitórios electromagnéticos e estabilidade dinâmica do sistema (Stagg & El-Abiad, 1968).

### **1.8.1 Resistência eléctrica**

A resistência eléctrica é uma grandeza física fundamental no estudo da electricidade, sendo definida como a oposição que um material oferece à passagem da corrente eléctrica. Esse fenómeno ocorre devido à interacção entre os electrões livres e os átomos da estrutura cristalina do condutor, o que gera dissipação de energia sob a forma de calor (Serway & Jewett, 2012).

### **1.8.2 Indutância**

A indutância é uma propriedade fundamental dos circuitos eléctricos e magnéticos que quantifica a capacidade de um condutor ou circuito de armazenar energia na forma de um campo magnético quando uma corrente eléctrica passa por ele. Esse fenómeno ocorre devido à Lei de Faraday da Indução Electromagnética, que estabelece que uma corrente variável no tempo gera um fluxo magnético associado, e qualquer variação desse fluxo induz uma força electromotriz (f.e.m.) oposta à variação da corrente (Faraday, 1831). A indutância é expressa pela Lei de Lenz, que formaliza a oposição de um circuito à variação da corrente.

### **1.8.3 Reactância**

A reactância é a oposição que um componente eléctrico oferece à passagem da corrente alternada (CA) devido à presença de elementos indutivos e capacitivos no circuito. Diferentemente da resistência, que dissipa energia na forma de calor, a reactância não causa perdas energéticas, mas sim o armazenamento e a liberação cíclica de energia em campos magnéticos e eléctricos (Hayt & Kemmerly, 2008).

A reactância surge devido à dependência da corrente com a frequência da fonte de alimentação. Enquanto em corrente contínua (CC) a resistência é o único factor de oposição ao fluxo de carga, em corrente alternada a variação da corrente no tempo provoca efeitos de auto-indução em indutores e acúmulo de carga em capacitores, alterando a relação entre tensão e corrente (Alexander & Sadiku, 2016).

### **1.8.4 Impedância**

A impedância é uma grandeza eléctrica fundamental que representa a oposição total que um circuito oferece à passagem da corrente alternada (CA). Diferente da resistência, que atua tanto em corrente contínua (CC) quanto em corrente alternada dissipando energia na forma de calor, a impedância incorpora os efeitos da reactância indutiva e da reactância capacitiva, tornando-se uma quantidade complexa que descreve a relação entre tensão e corrente em circuitos CA (Hayt & Kemmerly, 2008).

O conceito de impedância foi introduzido por Oliver Heaviside no final do século XIX para descrever a generalização da Lei de Ohm para circuitos de corrente alternada.

### **1.8.5 Queda de tensão**

A queda de tensão é um fenómeno eléctrico que ocorre quando há uma diferença de potencial ao longo de um condutor devido à resistência e reactância do circuito. Esse efeito resulta na diminuição da tensão disponível nos terminais da carga em relação à tensão de fornecimento, impactando a eficiência e o desempenho de sistemas eléctricos e electrónicos (Hayt & Kemmerly, 2008).

A queda de tensão é uma consequência directa da Lei de Ohm, que estabelece que a tensão ao longo de um condutor resistivo é proporcional à corrente que o percorre e à resistência do material.

### **1.8.6 Perdas por efeito Joule**

As perdas por efeito Joule, também conhecidas como perdas ôhmicas, referem-se à dissipação de energia eléctrica na forma de calor quando a corrente eléctrica percorre um condutor com resistência eléctrica. Esse fenómeno é consequência directa da interacção entre os electrões em movimento e os átomos do material condutor, que resulta na conversão de parte da energia eléctrica em energia térmica (Hayt & Kemmerly, 2008).

O efeito Joule ocorre porque os electrões livres em um condutor sofrem colisões com os íons da rede cristalina do material à medida que se movem sob a acção de um campo eléctrico aplicado. Essas colisões resultam em uma transferência de energia dos electrões para a estrutura atómica do condutor, aumentando sua energia térmica e elevando a temperatura do material (Dorf & Svoboda, 2020).

## **1.9 Cálculo Mecânico**

O cálculo mecânico é um ramo da engenharia que se dedica à análise, dimensionamento e verificação de elementos estruturais e componentes mecânicos, garantindo sua resistência, durabilidade e funcionalidade sob diversas condições de carga e operação. Esse estudo envolve a aplicação de princípios da mecânica dos sólidos, resistência dos materiais e dinâmica para prever o comportamento de estruturas e sistemas mecânicos (Beer, Johnston & DeWolf, 2017).

A base teórica do cálculo mecânico se apoia na mecânica dos materiais, que estuda a relação entre forças aplicadas e as deformações resultantes em diferentes tipos de materiais. A tensão mecânica

( $\sigma$ ) e a deformação ( $\epsilon$ ) são grandezas fundamentais nessa análise, sendo determinadas pela Lei de Hooke.

### **1.9.1 Tensões mecânicas máximas**

As tensões mecânicas máximas referem-se aos estados extremos de tensão em um material ou estrutura quando submetidos a diferentes tipos de carregamento. Essas tensões são cruciais para a análise de resistência dos materiais, pois determinam os limites de segurança e falha dos componentes estruturais e mecânicos. A correta avaliação das tensões máximas permite projectar elementos que suportem cargas sem falhar por escoamento, ruptura ou fadiga mecânica (Beer, Johnston & DeWolf, 2017).

### **1.9.2 Força do vento**

A força do vento é o efeito dinâmico resultante da interacção do escoamento do ar com superfícies expostas, gerando pressões e esforços que podem influenciar a estabilidade e o desempenho de estruturas e objectos. Esse fenómeno é um dos principais factores a serem considerados no projecto de edifícios, pontes, torres, aeronaves e sistemas de geração de energia eólica, pois sua acção pode causar vibrações, deslocamentos e, em casos extremos, falhas estruturais (Holmes, 2015).

### **1.9.3 Coeficiente de sobrecarga**

O coeficiente de sobrecarga é um factor de segurança utilizado na engenharia estrutural e mecânica para considerar os efeitos adicionais de cargas variáveis, impactos e condições excepcionais que podem actuar sobre uma estrutura ou componente mecânico. Esse coeficiente é fundamental para garantir que as edificações, máquinas e sistemas de transporte possam suportar variações imprevistas nas cargas aplicadas, evitando falhas estruturais e assegurando a segurança operacional (Gere & Goodno, 2017).

O conceito de coeficiente de sobrecarga está intimamente ligado à engenharia de factores de segurança, sendo empregado na normatização de projectos estruturais e mecânicos. O valor do coeficiente é geralmente determinado por normas técnicas e códigos de engenharia, dependendo do tipo de estrutura e das condições de operação.

#### **1.9.4 Vão e Vão Crítico**

O vão é a distância livre entre dois apoios consecutivos de uma estrutura ou componente mecânico, sem a presença de suportes intermediários. Esse conceito é amplamente utilizado na engenharia estrutural e mecânica para descrever a extensão de vigas, pontes, lajes, cabos de transmissão e outros elementos sujeitos a esforços mecânicos. O vão influencia directamente a resistência, estabilidade e comportamento dinâmico da estrutura, sendo um dos principais factores no dimensionamento e cálculo de carga admissível (Beer, Johnston & DeWolf, 2017).

Já o vão crítico é a configuração de vão na qual uma estrutura atinge uma condição limite de estabilidade ou resistência, podendo sofrer flambagem, colapso estrutural ou oscilações excessivas. O vão crítico é determinado por meio de análises de resistência dos materiais, mecânica estrutural e critérios de estabilidade, sendo um parâmetro fundamental para a segurança estrutural (Timoshenko & Goodier, 1970).

#### **1.9.5 Estados atmosféricos**

Os estados atmosféricos referem-se às condições físicas momentâneas da atmosfera terrestre, caracterizadas por variáveis meteorológicas como temperatura, pressão atmosférica, humidade, velocidade e direcção do vento, nebulosidade e precipitação. Essas condições resultam da complexa interacção entre os sistemas atmosféricos globais, as trocas de energia com a superfície terrestre e os efeitos das massas de ar e frentes meteorológicas (Wallace & Hobbs, 2006).

O estudo dos estados atmosféricos é essencial para a previsão do tempo, o monitoramento climático e a compreensão dos fenómenos meteorológicos que afectam actividades humanas, como agricultura, transporte e geração de energia (Barry & Chorley, 2010).

Os estados atmosféricos representam a condição momentânea da atmosfera, sendo definidos por variáveis meteorológicas como temperatura, pressão, humidade e ventos. A interacção desses factores determina os padrões climáticos e influencia directamente a vida na Terra.

#### **1.9.6 Tensão de montagem**

A tensão de montagem é a tensão mecânica introduzida em um componente ou estrutura durante sua instalação ou montagem. Essa tensão pode resultar da aplicação de forças externas, como o aperto de parafusos, encaixes forçados, pré-carga em elementos estruturais ou processos de

soldagem. A tensão de montagem desempenha um papel crucial na engenharia mecânica e estrutural, influenciando a resistência, a durabilidade e o comportamento dos materiais sob cargas operacionais (Budynas & Nisbett, 2020).

A análise da tensão de montagem é essencial para evitar falhas prematuras por escoamento, fadiga ou fractura. Dependendo da aplicação, essa tensão pode ser benéfica, como no caso da pré-carga em parafusos e da compressão induzida em concreto protendido, ou prejudicial, como no caso de tensões residuais indesejadas geradas por processos de fabricação (Gere & Goodno, 2017).

A tensão de montagem é um factor essencial no projecto e na análise de sistemas mecânicos e estruturais. Quando bem controlada, melhora a resistência e a confiabilidade dos componentes; porém, se aplicada incorrectamente, pode levar a falhas prematuras. O estudo dessa tensão permite otimizar processos de fixação, montagem e fabricação, garantindo maior eficiência e segurança.

## **CAPÍTULO III: METODOLOGIA**

### **3. Metodologia**

No Capítulo III, foi abordada a metodologia da pesquisa, que inclui o tipo de pesquisa, o tipo de abordagem, as técnicas de colecta de dados e as técnicas de análise de dados. O tipo de pesquisa proposto é a pesquisa aplicada e o estudo de caso. A abordagem da pesquisa combina qualitativa e quantitativa. As técnicas de colecta de dados incluem observação directa, entrevistas e análise documental. As técnicas de análise de dados incluem análise descritiva, análise de custos-benefícios e análise qualitativa de dados.

#### **3.1. Tipo de pesquisa**

O tipo de pesquisa proposto para este estudo é a pesquisa aplicada e estudo de caso. A pesquisa aplicada é um tipo de pesquisa que tem como objectivo gerar conhecimentos para a solução de problemas práticos e a aplicação desses conhecimentos para melhorar a qualidade de vida das pessoas, a eficiência das organizações ou o desenvolvimento de novas tecnologias. Segundo Babbie (2016), a pesquisa aplicada busca produzir resultados concretos e aplicáveis, muitas vezes em colaboração com empresas, organizações governamentais ou não governamentais.

A pesquisa aplicada neste estudo envolverá a análise da situação actual dos CFM em relação ao fornecimento de energia eléctrica e avarias nos cabos eléctricos de média tensão, bem como a realização de simulações computacionais para verificar o desempenho do sistema de energia com a implementação do anel ideal. Os resultados obtidos poderão ser directamente aplicados na tomada de decisão dos gestores dos CFM em relação à melhoria da infra-estrutura eléctrica das instalações.

O estudo de caso é uma metodologia de pesquisa que se caracteriza pela investigação detalhada e aprofundada de um caso específico, seja ele uma pessoa, um grupo, uma organização ou um evento, com o objectivo de compreender um fenómeno complexo em seu contexto real (Yin, 2018). Essa abordagem permite uma análise holística e contextualizada do objecto de estudo, possibilitando a identificação de padrões, relações de causa e efeito, e a geração de conhecimento para a prática ou teoria (Stake, 2006).

No contexto do presente tema, o estudo de caso foi utilizado para analisar a situação dos CFM em relação ao fornecimento de energia eléctrica e avarias nos cabos eléctricos de média tensão. Por meio de entrevistas, observações e análise documental, foi possível obter informações detalhadas sobre as condições da infra-estrutura eléctrica dos CFM e os impactos das avarias nas operações das instalações.

### **3.2. Tipo de abordagem**

A combinação de abordagens qualitativa e quantitativa permitirá uma análise abrangente e fundamentada da viabilidade e dos benefícios da adopção do anel ideal nos CFM, fornecendo subsídios para a tomada de decisão dos gestores e contribuindo para o avanço do conhecimento na área de sistemas de energia eléctrica.

A abordagem qualitativa é uma metodologia de pesquisa que busca compreender e interpretar os fenómenos sociais a partir da perspectiva dos participantes, valorizando a subjectividade e a complexidade dos contextos estudados. Segundo Denzin e Lincoln (2018), a abordagem qualitativa é caracterizada pela colecta e análise de dados descritivos, não numéricos, que permitem uma compreensão mais profunda e rica dos fenómenos estudados.

No contexto do presente tema, a abordagem qualitativa foi utilizada para analisar a situação actual dos CFM em relação ao fornecimento de energia eléctrica e avarias nos cabos eléctricos de média tensão. Por meio de entrevistas, observações e análise documental, foi possível obter informações detalhadas sobre as condições da infra-estrutura eléctrica dos CFM e os impactos das avarias nas operações das instalações.

A abordagem quantitativa é uma metodologia de pesquisa que se baseia na colecta e análise de dados numéricos para descrever, explicar ou prever fenómenos sociais. Segundo Creswell e Creswell (2017), a abordagem quantitativa é caracterizada pelo uso de instrumentos padronizados de colecta de dados, como questionários e escalas de avaliação, e pela análise estatística dos dados colectados.

No contexto do presente tema, a abordagem quantitativa foi utilizada para analisar a viabilidade da adopção do anel ideal nos Portos e Caminhos de Ferro de Moçambique (CFM) em caso de avarias nos cabos eléctricos de média tensão. Por meio de simulações computacionais e análises

estatísticas, foi possível avaliar os custos, benefícios e impactos da implementação do sistema de redundância nas redes eléctricas dos CFM.

### **3.3.Técnicas de colecta de dados**

As técnicas de colecta de dados referem-se aos métodos e procedimentos utilizados para obter informações relevantes e confiáveis para uma pesquisa. Segundo Creswell (2014), as técnicas de colecta de dados são essenciais para obter dados empíricos que fundamentem a pesquisa e ajudem a responder às questões de investigação de forma adequada.

A observação directa é uma técnica de colecta de dados amplamente utilizada em pesquisas qualitativas e quantitativas. No contexto do presente trabalho, a observação directa foi aplicada para colectar dados sobre a infra-estrutura eléctrica dos CFM, os cabos eléctricos de média tensão e os equipamentos relacionados.

As entrevistas são uma técnica de colecta de dados essencial para obter informações detalhadas e sobre o tema em estudo. No contexto do presente trabalho, as entrevistas foram aplicadas para colectar dados sobre a infra-estrutura eléctrica dos CFM, as avarias nos cabos eléctricos de média tensão e os impactos dessas avarias nas operações.

Para realizar as entrevistas, o pesquisador seleccionou os responsáveis pela infra-estrutura eléctrica dos CFM, como engenheiros e técnicos responsáveis pela operação e manutenção dos sistemas eléctricos. As entrevistas foram semiestruturadas, o que significa que o pesquisador tinha uma lista de perguntas principais, mas também teve flexibilidade para explorar temas adicionais que surjam durante a conversa.

Para realizar a análise documental, foram colectados documentos relevantes relacionados à infra-estrutura eléctrica dos CFM, como relatórios de manutenção, registos de avarias, projectos eléctricos e normas técnicas. Esses documentos fornecerão informações adicionais sobre o funcionamento e a condição dos sistemas eléctricos dos CFM, bem como sobre as medidas adoptadas para garantir a eficiência e a confiabilidade do fornecimento de energia eléctrica.

A análise documental permitiu aos pesquisadores obter uma visão mais ampla e aprofundada da situação dos CFM em relação ao fornecimento de energia eléctrica, complementando as informações obtidas por meio de outras técnicas de colecta de dados, como observação directa e

entrevistas. Além disso, a análise documental também pode fornecer dados sobre a evolução da infra-estrutura eléctrica dos CFM ao longo do tempo, contribuindo para uma análise histórica e contextualizada do tema em estudo.

No entanto, é importante ressaltar que a análise documental pode apresentar algumas limitações, como a possibilidade de documentos incompletos, imprecisos ou tendenciosos. Por isso, é essencial realizar uma análise crítica e cuidadosa dos documentos seleccionados, garantindo a validade e a confiabilidade dos dados obtidos.

### **3.4. Técnicas de análise de dados**

As técnicas de análise de dados referem-se aos métodos e procedimentos utilizados para analisar e interpretar os dados colectados em uma pesquisa. Segundo Creswell (2014), as técnicas de análise de dados são fundamentais para transformar os dados brutos em conhecimento útil e aplicável.

No contexto do presente tema, diversas técnicas de análise de dados serão aplicadas para analisar os dados colectados sobre a infra-estrutura eléctrica dos CFM, as avarias nos cabos eléctricos de média tensão e os impactos dessas avarias nas operações. Algumas das técnicas de análise de dados que serão utilizadas incluem:

- **Análise Descritiva:** Os dados quantitativos foram analisados utilizando métodos estatísticos para comparar a performance da rede eléctrica antes e após a implementação do Anel Ideal. A redução no tempo de reposição de energia e a frequência das interrupções foram indicadores chave de desempenho;
- **Análise de Custos-Benefícios:** Foram realizadas análises de custos-benefícios para avaliar a viabilidade económica da adopção do anel ideal nos CFM, considerando os custos de implementação e os benefícios esperados;
- **Análise Qualitativa de Dados:** Além das técnicas quantitativas, serão utilizadas técnicas de análise qualitativa de dados, como a análise de conteúdo, para analisar as entrevistas e outras informações qualitativas colectadas durante a pesquisa.

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS

### 4. Resultados

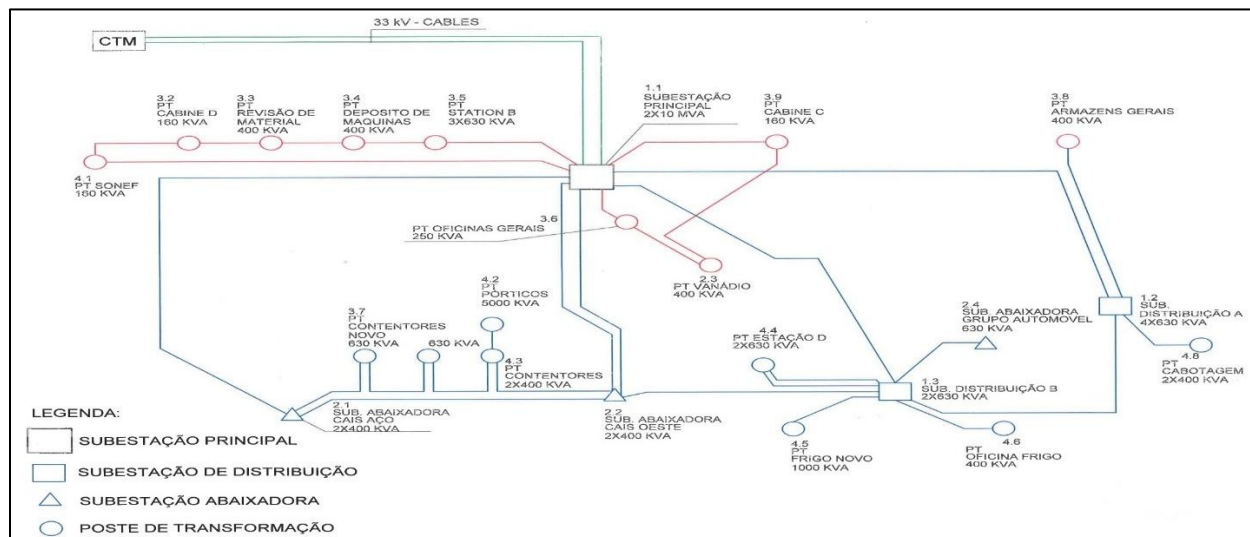
Neste capítulo foi feita a caracterização da rede eléctrica de Média Tensão dos CFM, foram apresentadas as causas e consequências das avarias nos cabos eléctricos de média tensão, foi feita uma proposta do anel ideal

#### 4.1. Caracterização do sistema eléctrico de Média Tensão dos CFM

O fornecimento de energia eléctrica para o Porto de Maputo é uma operação essencial que garante a continuidade das actividades portuárias, fundamentais para o desenvolvimento económico da região. Essa infra-estrutura eléctrica é composta por um sistema de média tensão, operando em níveis de 33 kV e 11 kV, atendendo às demandas das várias áreas operacionais do porto, incluindo a área dos CFM.

A rede de distribuição do Porto de Maputo é feita em Média Tensão e é subterrânea com cabos (XLPE 3x95 mm<sup>2</sup> e 1x240mm<sup>2</sup> respectivamente) sem protecção mecânica instalados nas canalizações enterradas, que alimentam cinco (5) subestações parciais (PTS) que formam cinco (5) anéis, além do anel principal. Estas, por sua vez fornecem energia eléctrica a vinte (20) postos de transformação e ou de seccionamento (Figura 1).

Figura 1: Configuração da Rede de distribuição de MT dos CFM



Fonte: Autor (2024)

A infra-estrutura eléctrica de MT do Porto de Maputo é organizada em torno de uma subestação que desempenha um papel crucial na transformação e distribuição de energia eléctrica. A subestação recebe uma tensão de entrada de 33 kV, proveniente da rede de transmissão que parte da Central Térmica de Maputo (CTM). A SE, transforma essa tensão para 11 kV, que é distribuída para mais de 20 Postos de Transformação (PTs) organizados em um anel aberto, o que significa que, em condições normais, o sistema opera com um ponto aberto, permitindo a flexibilidade de redistribuir a carga em caso de falha ou manutenção.

O quadro de distribuição de 33 kV, localizado na CTM, e a Estação Principal de 11 kV no Porto de Maputo, são elementos críticos para garantir que a energia seja distribuída de maneira eficiente e segura. A Estação Principal de 11 kV, em particular, coordena a distribuição interna de energia para todas as áreas do porto. Ela recebe energia da subestação de 33 kV e a distribui para os diferentes Postos de Transformação em 11 kV, que, por sua vez, alimentam directamente os equipamentos e instalações portuárias.

O quadro de 33 kV revestido de metal oferece maior protecção contra curtos-circuitos e outros problemas eléctricos. A sua configuração com disjuntores individuais por cabo permite intervenções mais rápidas em caso de falha, minimizando o tempo de inactividade das operações. O uso de disjuntores também facilita o isolamento de falhas, evitando que problemas em uma parte do sistema afectem toda a rede eléctrica do porto.

Foi considerado o uso de uma estação transformadora do tipo "cell", com casa de concreto, para abrigar os equipamentos responsáveis pela transformação e distribuição da energia eléctrica. Este tipo de instalação é comum em ambientes industriais e portuários, devido à sua robustez, resistência a condições climáticas adversas e a capacidade de fornecer protecção adequada aos equipamentos internos.

Componentes da Estação Transformadora:

- *Chave Seccionadora de Isolamento de Três Pólos (33 kV – 400 Amps)*: A célula com a chave seccionadora de três pólos é responsável por isolar o sistema de MT (33 kV). A capacidade de 400 amperes garante que a chave suporte correntes elevadas sem sofrer danos, assegurando a continuidade do fornecimento de energia;

- *Célula com Transformadores de Potencial (VT) e Corrente (CTs)*: O transformador de potencial (VT) e os transformadores de corrente (CTs) têm um papel crucial na medição e proteção do sistema eléctrico;
- *Célula com Chave de Fusão e Disjuntor de Carga (Load Break Switch)*: Esta célula contém uma chave de fusível associada a um disjuntor de carga e um porta-fusível adequado para fusíveis com pino de accionamento (*striker pin*);
- *Célula do Transformador (500 kVA, 33/0,4 kV, 50 Hz, ONAN)*: O coração da estação é o transformador trifásico de 500 kVA, que converte a tensão de 33 kV para 0,4 kV, adequado para uso nas instalações internas do porto.

## **4.2.Causas e consequências das avarias nos cabos eléctricos de média tensão**

As avarias nos cabos eléctricos de média tensão podem resultar de uma combinação de factores técnicos, operacionais e humanos. Esses cabos são vitais para a distribuição de energia em ambientes industriais complexos, como os portos e ferrovias, e qualquer falha nesse sistema pode causar sérios transtornos, interrompendo operações críticas.

### **4.2.1. Causas das Avarias nos Cabos Eléctricos de Média Tensão**

A rede eléctrica da empresa CFM foi concebida a partir de um donativo alemão e a mesma foi construída e entregue em 2000 contando assim com 24 anos de operacionalidade.

Com tudo, para os dois alimentadores principais EL 26 e EL27 respectivamente que partem da CTM até a SE 1.1 nos CFM a uma distância compreendida de 3 Km foram usados cabos XLPE monopolares de 240 mm<sup>2</sup> de secção dos quais cada bobina tinha 500 metros, assim, cada linha conta com 3 cabos monopolares e 15 caixas de junções, desta forma, totalizam-se 30 caixas de junção para as duas linhas.

Portanto, de acordo com as informações recolhidas nas entrevistas feitas aos técnicos responsáveis pelas manutenções e gestores da rede eléctrica ferro-portuária pois a empresa não dispõem de mecanismos ou política de registo de ocorrências, referem que embora os cabos XLPE tenham alta resistência à águas e boa condutibilidade, a maior parte das avarias no período em análise (2018 – 2022), surgiram nas uniões ou junções entre os cabos, pois para além do desgaste do nível de isolamento das mangas isolantes, outros factores externos como acções do homem (escavações

feitas no âmbito do desenvolvimento e expansão da área ferro portuária, vibração dos solos) e a temperatura (calor e chuvas intensas) contribuíram para a fragilidade do sistema de transmissão.

Outro factor também importante que contribuiu para a frequência de interrupções foi a qualidade das correções feitas pelos técnicos pois, por falta de treinamento adequado para a Manufactura de caixas de junção em cabos subterrâneos de MT levava os mesmos a cometerem erros que fragilizavam a vedação dos cabos permitindo a entrada de humidade que provoca a deterioração interna, conhecida como efeito árvore d'água.

**Figura 2: Caixas de junção mal manufacturada pelos técnicos**



Fonte: autor (2024)

Outro factor crítico é a sobrecarga dos cabos devido a demandas energéticas maiores do que o sistema foi projectado para suportar. Nos períodos de pico de operação, os cabos de XLPE podem ser sobrecarregados, o que provoca acúmulo de calor, gerando degradação do material e subsequente falha no isolamento.

#### **4.2.2. Consequências das Avarias nos Cabos de Média Tensão**

A falha no fornecimento de energia para os Caminhos de Ferro de Moçambique causa inviabiliza a circulação normal da rede ferroviária, cria interrupções do movimento de locomotivas devido ao mau funcionamento de sistemas de sinalização e comunicação, que são pontos vitais para a segurança operacional. O que afecta directamente a movimentação de mercadorias e passageiros, resultando em atrasos e perdas económicas significativas.

Interrupções prolongadas causam o aumento dos custos operacionais, seja pela necessidade de activar sistemas de *backup*, como geradores, seja pelo aumento nos custos de manutenção

emergencial para restabelecer o serviço. Além disso, atrasos na entrega de mercadorias podem resultar em multas contratuais e danos à reputação dos CFM como um provedor de transporte confiável.

Nos portos, as avarias afectam directamente os equipamentos de movimentação de carga, como guindastes, esteiras transportadoras e viradores de vagões. Sem electricidade, o carregamento e descarregamento de navios fica comprometido, causando atrasos nas operações portuárias devido a buscas de meios ou soluções alternativas que também podem ter custos avultados. O que compromete os cronogramas logísticos, prejudica as cadeias de suprimento e aumenta o tempo de permanência dos navios no porto.

As interrupções no porto têm consequências directas para importadores e exportadores, que sofrem com o aumento dos custos de armazenamento, frete adicional e perda de prazos de entrega. Isso, por sua vez, reduz a competitividade de um dos principais pontos de escoamento de mercadorias de Moçambique.

A falha no fornecimento de energia eléctrica pode comprometer também sistemas de segurança e monitoramento, como câmaras de vigilância, sistemas de controlo de acesso e iluminação externa. Isso expõe o porto a riscos de segurança, tanto no que diz respeito ao controle de mercadorias quanto à integridade dos trabalhadores.

#### **4.3.Proposta de adopção de um anel ideal**

O dimensionamento do anel ideal da linha de 33 kV para o Porto de Maputo foi realizado com rigor técnico, considerando aspectos eléctricos, mecânicos e ambientais para garantir uma infraestrutura eficiente e confiável. A escolha dos condutores, isoladores e apoios foi feita de forma criteriosa, permitindo mínimas perdas eléctricas, rápida reposição de energia e alta resistência mecânica.

O projecto contemplou o dimensionamento dos isoladores, cuja função é suportar a tensão eléctrica e evitar correntes de fuga, garantindo a segurança e eficiência do sistema. Para isso, foi levada em consideração a poluição forte da região, o que exigiu uma linha de fuga adequada para evitar descargas superficiais. Foram utilizados isoladores do tipo U100BS, feitos de vidro, com comprimento de linha de fuga de 295 mm, e as cadeias foram compostas por três isoladores.

No cálculo eléctrico, a escolha do condutor foi baseada na corrente de serviço, que foi determinada considerando a potência nominal do transformador de 10 MVA e a tensão de 33 kV. O condutor escolhido foi o ACSR PARTRIDGE, que possui uma corrente nominal de 420A e uma secção total de 156,87 mm<sup>2</sup>, garantindo menor queda de tensão e perdas eléctricas reduzidas. O projecto também incluiu o cálculo da resistência eléctrica, coeficiente de auto-indução, reactância e impedância da linha, assegurando que a queda de tensão estivesse dentro dos limites normativos de 5%.

No cálculo mecânico, foram determinadas as tensões máximas e de serviço dos condutores, considerando factores como força do vento, coeficiente de sobrecarga e flecha máxima. O vão da linha foi definido em 200 m, com um total de 15 vãos e 16 apoios, garantindo estabilidade e resistência estrutural. O dimensionamento do cabo de guarda seguiu a mesma metodologia dos condutores, sendo utilizado o ACSR QUAIL, com capacidade de condução de 270A.

Os apoios da linha foram dimensionados para suportar os esforços mecânicos calculados, levando em consideração as condições atmosféricas mais desfavoráveis. Foram consideradas as forças ao longo dos eixos X, Y e Z para definir a melhor estrutura de suporte. Os apoios de fim-de-linha e de alinhamento foram projectados conforme as normas de estabilidade e resistência.

O projecto também atendeu às distâncias regulamentares, como a distância mínima entre condutores, condutores ao solo, condutores aos apoios e condutores às árvores, garantindo segurança e conformidade com as normas técnicas. A implementação desse anel ideal proporcionará maior confiabilidade e continuidade nas operações portuárias e ferroviárias do Porto de Maputo, reduzindo tempos de inactividade e custos de manutenção.

### **3.3.1 Dimensionamento dos isoladores**

A função dos isoladores é suportar a tensão eléctrica e evitar correntes de fuga que podem comprometer a segurança e eficiência do sistema.

#### **a) Linha de fuga necessário**

A linha de fuga é um dos parâmetros mais importantes para a seleção dos isoladores. No caso do projecto, foi considerada uma zona com poluição forte, o que exige uma linha de fuga maior para evitar descargas superficiais indesejadas.

A equação utilizada relaciona a linha de fuga necessária com a tensão de transporte de 33 kV.

A linha de fuga,  $I_f$ , necessária:

$$I_f = I_{fe} \cdot U \text{ [mm]}$$

Considerando uma zona com poluição forte, a linha de fuga específica é de  $I_{fe} = 25 \text{ mm/kV}$ . E como a tensão de transporte é de 33 kV, a linha de fuga total será:

$$I_f = 25 \text{ mm/kV} \cdot 33 \text{ kV} = 825 \text{ mm}$$

### **b) Escolha dos isoladores em função da linha de fuga.**

Tratando-se de isoladores em cadeia, acopladas em série, sabendo qual a linha de fuga necessária, pode se determinar a quantidade total de isoladores de cadeia necessários pela seguinte expressão:

$$N^{\circ}_{\text{isoladores}} = \frac{I_f}{\text{Comprimento da linha de fuga do isolador}}$$

Os isoladores utilizados são do tipo U100BS, com um comprimento de linha de fuga de 295mm, feitos de vidro.

O número de isoladores na cadeia será:

$$N^{\circ}_{\text{isoladores}} = \frac{825}{295} = 3 \text{ isoladores}$$

Deste modo, foram utilizadas cadeias constituídas por 3 isoladores.

### **3.3.2 Cálculo eléctrico**

O cálculo eléctrico envolve a seleção do condutor ideal, análise da queda de tensão e perdas eléctricas ao longo da linha.

Para a escolha do condutor é necessário o cálculo da corrente de serviço dada pela seguinte expressão:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \times U}$$

Onde:

S – Potência aparente;

U – Tensão nominal

A potência nominal do transformador é de 10 MVA, tendo em conta que a tensão nominal é de 33 kV, então, a corrente de serviço será:

$$I = \frac{10 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 33 \times 10^6} = 175A$$

Com base no catálogo, escolhe-se normalmente um condutor com uma corrente igual ou superior a corrente calculada. Neste caso, devido aos custos elevados dos condutores de elevada capacidade na maior parte dos casos, escolhe-se um condutor com uma corrente imediatamente superior a corrente calculada. Neste projecto devia-se escolher o condutor do tipo ACSR com nome SPARROW, com uma corrente nominal de 180A.

Com tudo, este condutor tem uma secção muito reduzida, abaixo da secção mínima permitida que é de 60 mm<sup>2</sup>. Neste caso escolheu-se um condutor ACSR com nome PARTRIDGE, com uma corrente nominal de 420A e uma secção total de 156,87mm<sup>2</sup>.

A tabela a seguir, mostra as características do cabo PARTRIDGE

**Tabela 1: Características do cabo PARTRIDGE**

Designação	Unidade	Valor
Secção total do cabo	mm <sup>2</sup>	156,87
Diâmetro do fio de aço	Mm	6,0
Diâmetro do fio de alumínio	Mm	-
Diâmetro total do cabo	Mm	16,28
Secção total de aço	mm <sup>2</sup>	21,99
Secção total de alumínio	mm <sup>2</sup>	134,88
Carga de roptura mínima	N	49,800
Módulo de Young final	MPa	77,100
Coefficiente de dilatação linear	10 <sup>-6</sup> /°C	19,37
Resistência eléctrica, em cc, 20°C	Ω/Km	0,2140
Peso do cabo	Kg/Km	547

Fonte: Fonte: overhead aluminium Conductores (ABERDARE)

Para o cálculo eléctrico, é necessário a determinação de alguns parâmetros eléctricos. Esses parâmetros são úteis para o cálculo da queda de tensão e das perdas de potência pelo efeito Joule.

#### a) Resistência eléctrica

A resistência eléctrica dos condutores é dada na folha de dados. Normalmente é dada em corrente contínua, contudo, a resistência em corrente contínua se define da resistência de corrente alternada devido à alguns efeitos como, efeito pelicular. Neste caso, é necessário fazer algumas correções. No projecto não foram feitas essas correções pois no final de tudo as resistências em cc e ca são muito próximas.

A resistência eléctrica por unidade de comprimento é  $R_K = 0,2140 \Omega/\text{Km}$ .

Como o comprimento total é 3 Km, a resistência total da linha por fase é de:

$$R = K_K \times l$$
$$R = 0,2140\Omega/\text{Km} \times 3\text{Km} = 0,642\Omega$$

#### b) Coeficiente de auto-indução

Para o condutor de uma linha eléctrica de fases simples pode ser calculado por:

$$L_K = \left[ 0,5 + 2Ln\left(\frac{D}{r}\right) \right] \times 10^{-4} H/\text{Km}$$

Onde:

r- Raio do condutor;

D- Diâmetro médio geométrico.

O diâmetro médio geométrico é dado por:

$$D = d \times \sqrt[3]{2}$$

Onde  $d$  é a distância entre duas fases próximas. (esta relação é válida quando a disposição entre os condutores é esteira).

Para uma linha de 33 kV, pode se escolher uma distância entre 2,0 – 3,0m. Neste projecto escolheu-se  $d = 2m$ .

Deste modo o diâmetro médio geométrico será:

$$D = 2 \times \sqrt[3]{2}$$

$$D = 2,52m = 2520mm$$

Substituindo os valores na expressão do coeficiente de auto-indução, temos:

$$L_K = \left[ 0,5 + 2 \ln \left( \frac{2520}{8,14} \right) \right] \times 10^{-4} H/Km = 0,001197 H/Km$$

### c) Reactância

A reactância por unidade de comprimento é dada por:

$$X_K = 2\pi f \times L_K, \text{ onde } f = 50Hz$$

$$X_K = 2\pi \times 50 \times 0,001197 = 0,376\Omega/Km$$

Tendo em conta o comprimento total da linha, a reactância total será:

$$X = X_K \times l$$

$$X = 0,376\Omega/Km \times 3Km = 1,128\Omega$$

### d) Capacitância

Para linhas trifásicas, a reactância de linhas simples pode ser calculada pela expressão:

$$C_K = \frac{24,2}{\log \left( \frac{D}{r} \right)} \times 10^{-9} F/Km$$

Substituindo os valores na expressão da capacidade, temos:

$$C_K = \frac{24,2}{\log \left( \frac{2520}{8,14} \right)} \times 10^{-9} F/Km = 9,72 \times 10^{-9} F/Km$$

### e) Impedância

A impedância complexa de uma linha aérea é dada por:

$$\bar{Z}_K = R_K + jX_K \Omega/km$$

$$\bar{Z}_K = 0,2140 + j0,376 \Omega/km$$

A impedância total é calculada multiplicando a impedância por unidade de comprimento, pelo comprimento total da linha.

$$\bar{Z} = \bar{Z}_K + l$$

$$\bar{Z}_K = (0,2140 + j0,376) \Omega/km \times 3Km = (0,642 + j1,128), \Omega$$

Na forma polar, a impedância pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\bar{Z} = 1,298 \angle 1,05^\circ, \Omega$$

#### f) Queda de tensão

$$\Delta U = \sqrt{3} \times I(R \cos \varphi + X \sin \varphi)$$

$$\cos \varphi = 0,8$$

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = \sqrt{1 - 0,8^2} = 0,6$$

Logo:

$$\Delta U = \sqrt{3} \times 175 \times (0,214 \times 0,8 + 1,128 \times 0,6)$$

$$\Delta U = 257,04V$$

A queda de tensão em percentagem é dada por:

$$\Delta U(\%) = \frac{\Delta U}{U} \times 100\%$$

$$\Delta U(\%) = \frac{257,04}{33000} \times 100\% = 0,78\%$$

O valor da queda de tensão encontrado está dentro dos limites da queda estabelecida pelas normas, que é de 5 %.

#### g) Perdas de potência

As perdas de potência devido ao efeito de Joule, no caso de um sistema trifásico é dada por:

$$P = 3 \times I^2 \times R$$

$$P = 3 \times 175^2 \times 0,642 = 58983,75W$$

O valor percentual dessas perdas em relação a potência nominal é dado por:

$$P(\%) = \frac{P \cos \varphi}{S} \times 100\%$$

$$P(\%) = \frac{58983,75 \times 0,8}{10 \times 10^6} \times 100\% = 0,472\%$$

### h) Potência máxima da linha

O condutor escolhido tem uma capacidade de condução de 420A, considerando uma queda de tensão máxima permitida de 5%, pode-se determinar a potência máxima de transmissão pela seguinte expressão:

$$S_{max} = 0,95 \times \sqrt{3} \times U \times I$$

$$S_{max} = 0,95 \times \sqrt{3} \times 33000 \times 420 = 22805912,98VA$$

$$S_{max} = 22MVA$$

### 3.3.3 Cálculo Mecânico

#### a) Cálculo Mecânico dos condutores

Tensão mecânica máxima

$$t_{max} = \frac{T_R}{2,5 \times \sigma}$$

Onde:

$T_R$  – Tensão de ruptura mínima;

$\sigma$  – Secção dos condutores.

$$t_{max} = \frac{4980}{2,5 \times 156,87} = 12,7 daN/mm^2$$

Como a tensão de serviço de condutores deve ser abaixo da tensão máxima, pode-se escolher uma tensão de serviço de 10 daN/mm<sup>2</sup>. As normas sugerem que a tensão de serviço esteja entre 7 a 12 daN/mm<sup>2</sup> para os condutores.

#### b) Força do vento sobre os condutores

$$F_V = \alpha c q d [daN/m]$$

Onde:

$\alpha$  – Coeficiente de redução;

$c$  – Coeficiente de forma;

$q$  – Pressão dinâmica do vento; e

$d$  – Diâmetro do condutor.

Para os condutores:

$$\alpha = 0,6$$

$c = 1,0$  para condutores com diâmetro acima de 15,8mm.

$q = 36$  daPa no estado de vento reduzido (estado de inverno) e  $q = 90$  daPa no estado de vento máximo habitual (estado de primavera).

$$F_{V1} = 0,6 \times 1 \times 36 \times 0,011628 = 0,351648 \text{ daN/m}$$

$$F_{V2} = 0,6 \times 1 \times 90 \times 0,011628 = 0,87912 \text{ daN/m}$$

Em que  $F_{V1}$  e  $F_{V2}$  são forças do vento sobre os condutores, nos estados de inverno e primavera respectivamente. No estado de verão (estado de flecha máxima) considera-se que não há vento, isto é, não actua nenhuma força do vento sobre os condutores.

### c) Coeficiente de sobrecarga

A expressão abaixo permite-nos a determinação do coeficiente de sobrecarga.

$$m = \frac{\sqrt{W_C^2 + F_V^2}}{W_C}$$

Onde:

$W_C$  – é o peso do condutor; e

$F_V$  – força do vento.

Substituindo os valores na expressão do coeficiente de sobrecarga, temos:

$$m_1 = \frac{\sqrt{W_C^2 + F_{V1}^2}}{W_C} = \frac{\sqrt{0,547^2 + 0,351648^2}}{0,541} = 1,189$$

$$m_2 = \frac{\sqrt{W_C^2 + F_{V2}^2}}{W_C} = \frac{\sqrt{0,547^2 + 0,87912^2}}{0,541} = 1,893$$

Onde:  $m_1$  e  $m_2$  são os coeficientes de sobrecarga dos condutores nos estados de inverno e primavera respectivamente.

#### d) Vão e vão crítico

A linha a ser projectada tem um comprimento total de 3Km e para uma tensão nominal de 33kV escolheu-se um vão  $L=200m$ . deste modo o numero total de vãos será de 15 vãos e um total de 16 apoios.

O vão critico é dado pela expressão:

$$L_{cri} = \frac{\sigma \times t_{serviço}}{W_C} \times \sqrt{\frac{24 \alpha (\theta_2 - \theta_1)}{m_2^2 - m_1^2}}$$

$\theta_1$  e  $\theta_2$  são as temperaturas nos estados de inverno e primavera respectivamente.

Substituindo os valores, temos:

$$L_{cri} = \frac{156,87 \cdot 10}{0,547} \times \sqrt{\frac{24 \cdot 19,37 \cdot 10^{-6} \cdot (15 + 5)}{1,893^2 \cdot 1,189^2}} = 187,73$$

#### e) Vão equivalente

O vão equivalente é calculado no caso da linha ter vários cantões e é calculado pela expressão:

$$L_{eq} = \sqrt{\frac{\sum L^3 i}{\sum L i}}$$

Onde  $L_i$  é o vão  $i$  no cantão.

No caso da linha a ser projectada, temos um único cantão pois somente os apoios de fim-de-linha têm cadeias de isoladores de amarração. Deste modo, o vão equivalente é igual ao vão, isto é,  $L_{eq} = 200m$ .

### f) Definição do estado do atmosférico mais desfavorável

Como visto anteriormente, o estado atmosférico mais desfavorável define-se através da árvore de decisão. Para este caso,  $m_2 > m_1$  e  $L > L_{cri}$ , então o estado atmosférico mais desfavorável é a primavera.

### g) Tensão de montagem

A tensão de montagem dos condutores é calculada com base na equação dos estados. A expressão a seguir representa a equação dos estados:

$$\theta_i + \frac{t_i}{\alpha E} - \frac{m_i^2 \times W_c^2 \times L^2}{24\alpha\sigma^2 t_i} = \theta_K + \frac{t_K}{\alpha E} - \frac{m_K^2 \times w_K^2 \times L^2}{24\alpha\sigma^2 t_i}$$

Onde:  $\theta_i$  e  $\theta_K$  representam as temperaturas dos estados  $i$  e  $k$  respectivamente.

$t_i$  e  $t_K$  representam as tensões dos estados  $i$  e  $k$  respectivamente.

Neste projecto, considerou-se que o estado  $k$  é o estado de verão (flecha máxima) e o estado  $i$  estado atmosférico mais desfavorável.

- Estado de verão

$$\begin{aligned}m_K &= 1 \\ \theta_K &= 50^\circ c \\ t_K &=?\end{aligned}$$

- Estado de primavera

$$\begin{aligned}m_i &= m_2 = 1,893 \\ \theta_i &= 15^\circ c \\ t_i &= 10 \text{ daN/mm}^2\end{aligned}$$

Substituindo os valores na equação dos estados, temos:

$$\begin{aligned}15 + \frac{10}{19,37 \times 10^{-6} \times 7710} - \frac{1,893^2 \times 0,547^2 \times 200^2}{24 \times 19,37 \times 10^2 \times 156,87^2 \times 10^2} = \\ 50 + \frac{t_K}{19,37 \times 10^{-6} \times 7710} - \frac{1^2 \times 0,547^2 \times 200^2}{24 \times 19,37 \times 10^{-6} \times 156,87^2 \times t_K^2}\end{aligned}$$

Organizando a expressão temos:

$$6,696t_k^3 + 5,529895 - 1046,1983 = 0$$

Resolvendo a equação do 3º grau, temos:

$$t_k = 5,12 \text{ daN/mm}^2$$

Isto significa que a tensão de montagem dos condutores deve ser de  $5,12 \text{ daN/mm}^2$ .

- **Equação da parábola**

Para o cálculo da equação da parábola, deve-se determinar primeiro o parâmetro da catenária. O parâmetro da catenária é dada por:

$$P_C = \frac{t_k \cdot \sigma}{W_C} = \frac{5,12 \cdot 156,87}{0,547} = 1468,33m$$

A equação da parábola é:

$$y = \frac{X^2}{2 \cdot P_C} = \frac{X^2}{2 \cdot 1468,33} = \frac{X^2}{2936,66}$$

- **Flecha máxima**

A flecha máxima correndo ao valor  $y$  na equação da parábola quando  $x$  for igual a metade do vão.

Considerando:

$$X = \frac{L}{2} = \frac{200}{2} = 100 \text{ m}$$

Então

$$F = \frac{100^2}{2936,66} = 3,4m$$

Onde:  $F$  é a flecha máxima

### 3.3.4 Cálculo mecânico do cabo de Guarda

o cálculo mecânico do cabo de guarda é idêntico ao cálculo mecânico dos condutores. Contudo, no caso do cabo de guarda, considera-se que a tensão de serviço está entre 10 a  $17 \text{ daN/mm}^2$ .

A tabela a seguir mostra as características do cabo de guarda

**Tabela 2: características do cabo de guarda**

<b>Designação</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
Secção do cabo	$mm^2$	75,55
Diâmetro do fio de aço	$mm$	3,78
Diâmetro total do cabo	$mm$	11,34
Secção total de aço	$mm^2$	11,22
Secção total de alumínio	$mm^2$	67,33
Carga de roptura minima	$N$	23300
Módulo de Young final	$MPa$	80400
Coefficiente de dilatação linear	$10^{-6}/^{\circ}C$	19,31
Resistência cc, $20^{\circ}C$	$\Omega/Km$	0,4261
Peso do cabo	$Kg/Km$	273

Fonte: overhead aluminium Conductores (ABERDARE)

Nota: O cabo de guarda usado é um condutor do tipo ACSR com nome QUAIL, com uma capacidade de condução de 270 A.

### Tensão mecânica máxima

$$t_{max} = \frac{T_R}{2,5 \times \sigma} = \frac{2330}{25 \times 78,55} = 11,87 \text{ daN/mm}^2$$

Com base nas normas, pode-se escolher uma tensão de  $11 \text{ daN/mm}^2$  para o serviço.

### Força do vento sobre o cabo de guarda

$$F_V = acqd$$

$$\alpha = 0,6$$

$$c = 1,2$$

$$F_{V1} = 0,6 \times 1,2 \times 36 \times 0,01134 = 0,2939 \text{ daN/m}$$

$$F_{V2} = 0,6 \times 1,2 \times 90 \times 0,01134 = 0,7348 \text{ daN/m}$$

### Coefficiente de sobrecarga

$$m = \frac{\sqrt{W_C^2 + F_V^2}}{W_C}$$
$$m_1 = \frac{\sqrt{0,273^2 + 0,2939^2}}{0,273} = 1,469$$
$$m_2 = \frac{\sqrt{0,2737^2 + 0,7348^2}}{0,273} = 2,871$$

### Vão e vão equivalente

O vão e o vão equivalente foram definidos no cálculo mecânico dos condutores.

### Vão crítico

$$L_{cri} = \frac{\sigma \times t_{serviço}}{W_C} \sqrt{\frac{24\alpha(\theta_2 - \theta_1)}{m_2^2 - m_1^2}}$$
$$L_{cri} = \frac{78,55 \times 11}{0,73} \sqrt{\frac{24 \times 19,31 \times 10^{-6} \times (15 + 5)}{2,871^2 - 1,469^2}} = 129,04m$$

### Definição do estado atmosférico

A partir da árvore da decisão, sendo  $L > L_{cri}$  e  $m_2 > m_1$ , o estado atmosférico mais desfavorável é a primavera.

### Tensão de montagem

Estado de verão

$$m_K = 1$$
$$\theta_K = 50^\circ\text{C}$$
$$t_K = ?$$

Estado de primavera

$$m_i = m_2 = 2,871$$
$$\theta_i = 15^\circ\text{C}$$
$$t_i = 11 \text{ daN/mm}^2$$

Substituindo esses valores na equação dos estados, temos:

$$15 + \frac{11}{19,31 \times 10^{-6} \times 8040} - \frac{2,871^2 \times 0,273^2 \times 200^2}{24 \times 19,31 \times 10^{-6} \times 78,55^2 \times 11^2}$$
$$50 + \frac{t_K}{19,31 \times 10^{-6} \times 8040} - \frac{1^2 \times 0,273^2 \times 200^2}{24 \times 19,31 \times 10^{-6} \times 78,55^2 \times t_K^2}$$

Organizando a equação, temos:

$$6,44112t_K^3 + 35,16759t_K^2 - 1042,556 = 0$$

Resolvendo a equação do 3º grau temos:

$$t_K = 4,11 \text{ daN/mm}^2$$

### Equação da parábola

A equação da parábola do cabo de guarda é:

$$y = \frac{x^2}{2P_C}$$

Em que:

$$P_C = \frac{t_K \times \sigma}{W_C} = \frac{4,11 \times 78,55}{0,273} = 1182,57m$$

Substituindo os valores na expressão da parábola, temos:

$$y = \frac{x^2}{2P_C} = \frac{x^2}{2 \times 1182,57} = \frac{x^2}{2365,14}$$

A flexa máxima será igual ao valor de y quando  $x = \frac{L}{2} = \frac{200}{2} = 100m$

Logo,

$$f = \frac{100^2}{3665,14} = 4,23m$$

### 3.3.5 Dimensionamento dos apoios

#### a) Apoios de fim-de-linha

##### Hipótese 1

Eixo x:

$$T_{CD-x} = \sigma \times t_{serviço}$$
$$T_{CD-x} = 156,87 \times 10 = 1568,7 \text{ daN}$$

Onde:  $T_{CD-x}$  é a tensão dos condutores ao longo do eixo X.

$$T_{CG-x} = \sigma \times t_{serviço}$$
$$T_{CG-x} = 78,55 \times 11 = 864,05 \text{ daN}$$

Onde:  $T_{CD-x}$  é a tensão do cabo de guarda ao longo do eixo X.

A força resultante ao longo do eixo X será:

$$F_x = n \times T_{CD-x} + T_{CG-x}$$
$$F_x = 3 \times 1568,7 + 864,05 = 5570,15 \text{ daN}$$

Eixo y:

$$F_{V-CD-y} = \alpha c q d \left( \frac{L}{2} \right)$$
$$F_{V-CD-y} = 0,6 \times 1 \times 90 \times 0,01628 \times \left( \frac{200}{2} \right) = 87,91 \text{ daN}$$

Onde:  $F_{V-CD-y}$  é a força do vento sobre o condutor ao longo do y.

$$F_{v-CG-y} = \alpha c q d \left( \frac{L}{2} \right)$$
$$F_{V-CG-y} = 0,6 \times 1,2 \times 90 \times 0,01134 \times \left( \frac{200}{2} \right) = 73,48 \text{ daN}$$

Onde:  $F_{V-CG-y}$  é a força do vento sobre o cabo de guarda ao longo do eixo y.

$$F_{V-isol} = \alpha c q s$$
$$F_{V-isol} = 1 \times 1 \times 90 \times 3 \times 0,127 \times 0,255 = 8,74 \text{ daN}$$

Onde:  $F_{V-isol}$  é a força do vento sobre a cadeia de isoladores.

A força resultante ao longo do eixo  $y$ .

$$Fy = 3 \times F_{V-CD-y} + F_{V-CG-y} + 3 \times F_{V-isol}$$
$$Fy = 3 \times 87,91 + 73,48 + 3 \times 8,74 = 363,43 \text{ daN}$$

Eixo  $Z$ :

$$P_{CD} = W_e \times \left(\frac{L}{2}\right)$$
$$P_{CD} = 0,547 \times \left(\frac{200}{2}\right) = 54,7 \text{ daN}$$

Onde:  $P_{CD}$  – é o peso do condutor.

$$P_{CG} = W_e \times \left(\frac{L}{2}\right)$$
$$P_{CG} = 0,273 \times \left(\frac{200}{2}\right) = 27,3 \text{ daN}$$

Onde:  $P_{CG}$  – é o peso do cabo de guarda.

$$P_{isol} = 3 \times 4 = 12 \text{ daN}$$

Onde  $P_{isol}$  – é o peso total da cadeia de isoladores.

A força resultante ao longo do eixo  $Z$ , será:

$$Fz = 3 \times P_{CD} + P_{CG} + 3 \times P_{isol}$$
$$Fz = 3 \times 54,7 + 27,3 + 3 \times 12 = 227,4 \text{ daN}$$

## Hipótese 2

Eixo  $x$ :

$$Fx = \frac{1}{5} (n \times F_{V-CD-y} + F_{V-CG-y})$$
$$Fx = \frac{1}{5} (3 \times 87,91 + 73,48) = 67,44 \text{ daN}$$

Eixo  $y$ :  $Fy = 0 \text{ daN}$

Eixo  $z$ :

Ao longo do eixo  $z$ , a força resultante é igual a  $Fz$  calculada na hipótese 1.

Logo  $F_z = 227,4 daN$ .

A pior hipótese é a hipótese 1, com uma força horizontal de

$F_H = F_x + F_y = 5570,15 + 363,43$  que resulta em  $F_H = 5933,58 daN$  e uma força vertical

$$F_V = F_Z = 227,4 daN$$

## b) Apoios de alinhamento

### Hipótese 1

Eixo x:

$$T_{CD-x} = \sigma \times |t_{ser1} - t_{ser2}| = 156,87 \times |10 - 10| = 0 daN$$

$$T_{CG-x} = \sigma \times |t_{ser1} - t_{ser2}| = 78,55 \times |11 - 11| = 0 daN$$

A força resultante ao longo do eixo X será:

$$F_x = 0 daN$$

Eixo y:

$$F_{V-CD-y} = \alpha c q d \left( \frac{L_1 + L_2}{2} \right)$$

$$F_{V-CD-y} = 0,6 \times 1 \times 90 \times 0,01628 \left( \frac{200 + 200}{2} \right) = 175,82 daN$$

Onde:  $L_1$  e  $L_2$  são vãos adjacentes ao apoio.

$$F_{V-CG-y} = \alpha c q d \left( \frac{L_1 + L_2}{2} \right)$$

$$F_{V-CG-y} = 0,6 \times 1,2 \times 90 \times 0,01134 \left( \frac{200 + 200}{2} \right) = 146,96 daN$$

A força resultante ao longo do eixo y

$$F_y = 3 \times F_{V-CD-y} + F_{V-CG-y} + 3 \times F_{V-isol}$$

$$F_y = 3 \times 175,82 + 146,96 + 3 \times 8,74 = 700,64 daN$$

Eixo Z:

$$P_{CD} = W_e \times \left( \frac{L_1 + L_2}{2} \right) = 0,547 \times \left( \frac{200 + 200}{2} \right) = 109,4 daN$$

$$P_{CG} = W_e \times \left( \frac{L_1 + L_2}{2} \right) = 0,273 \times \left( \frac{200 + 200}{2} \right) = 54,6 \text{ daN}$$

Força resultante ao longo eixo Z

$$F_z = 3 \times P_{CD} + P_{CG} + 3 \times P_{isol}$$

$$F_z = 3 \times 109,4 + 54,6 + 3 \times 12 = 418,8 \text{ daN}$$

### Hipótese 2

Eixo x:  $F_x = \frac{1}{5} (n \times F_{V-CD-y} + F_{V-CG-y})$

$$F_x = \frac{1}{5} (3 \times 175,82 + 146,96) = 134,88 \text{ daN}$$

Eixo y:  $F_y = 0 \text{ daN}$

Eixo z:  $F_z = 418,8 \text{ daN}$

A pior hipótese é a hipótese 1, com:

$$F_H = F_x + F_y$$

$$F_H = 0 + 700,64 = 700,64 \text{ daN}$$

$$F_V = F_z = 418,8 \text{ daN}$$

### c) Condições de estabilidade

Para uma tensão de 33 kV, usam-se apoios de betão que devem suportar os esforços mecânicos calculados na hipótese mais desfavorável ou pior hipótese.

Nota: Os tipos e as alturas dos apoios são dados nos catálogos dos fabricantes.

### 3.3.6 Distâncias regulamentares

#### a) Distância entre os condutores

Para linhas da segunda classe (linhas com uma tensão nominal baixa de 40 kV), a distancia entre os condutores é dada por:

$$D = 0,75K\sqrt{f + d} + \frac{U}{200}$$

Onde:  $f$  – é flecha máxima dos condutores.

$d$  – é o comportamento da cadeia de isoladores susceptíveis a oscilarem transversalmente a linha.

(Com  $d = 0$  para cadeias de amarração).

$k = 0,6$  para ligas de alumínio e aço;

$U$  – tensão nominal em kV;

Substituindo os valores, temos:

$$D = 0,75 \times 0,6 \sqrt{3,4 + 0} + \frac{33}{200} = 1m$$

#### **b) Distância dos condutores ao solo**

A distância mínima dos condutores ao solo é dada pela expressão:

$$D = 6,0 + 0,005 \times U$$

$U$  –Tensão nominal, em kV

$$D = 6,0 + 0,005 \times 33 = 6,17m$$

#### **c) Distância dos condutores aos apoios**

Distancia dos condutores aos apoios é dada pela expressão:

$$D = 0,0065 \times U$$

$U$  –Tensão nominal, em kV

$$U = 0,0065 \times 33 = 0,22 m$$

#### **d) Distância dos condutores às árvores**

A distância mínima dos condutores às árvores é dada pela expressão:

$$D = 2,0 + 0,0075 \times U$$

Onde:  $U$  –Tensao nominal em kV.

$$D = 2,0 + 0,0075 \times 33 = 2,25m$$

## CAPÍTULO V: DISCUSSÃO

### 5. Discussão

A adoção de um anel na rede eléctrica dos CFM representa uma aplicação prática de princípios fundamentais da engenharia de sistemas eléctricos e de confiabilidade de infra-estrutura crítica. A teoria que sustenta esta proposta parte da compreensão de que um sistema de fornecimento de energia deve garantir, em primeiro lugar, continuidade de serviço e, em segundo, resiliência diante de falhas eventuais. Não basta que a rede funcione em condições ideais: ela deve ser capaz de resistir a avarias parciais sem colapsar completamente.

A implementação de redes de distribuição em configuração de anel aberto com exploração radial permite uma operação segura, com a vantagem de poder transferir cargas em caso de falha de um segmento. Essa configuração evita a dependência total de um único alimentador e cria caminhos alternativos para a energia alcançar os pontos de consumo. É uma manifestação prática do conceito de redundância activa, onde a duplicidade de caminhos eléctricos reduz drasticamente o tempo de indisponibilidade.

Outra consideração teórica importante é a necessidade de balanceamento adequado da carga entre os alimentadores. Em sistemas redundantes, a configuração deve permitir que a carga normal seja distribuída de maneira eficiente e que, em situações de falha, o sistema alternativo seja capaz de suportar temporariamente toda a carga redistribuída sem ultrapassar seus limites operacionais.

Na teoria, quanto maior a resiliência de uma rede, menor o impacto cumulativo de falhas isoladas sobre o sistema como um todo. Assim, a adoção de um anel melhora não apenas a confiabilidade imediata, mas também a capacidade do sistema de resistir a eventos extremos, como picos de carga imprevistos ou desastres naturais localizados.

A construção de um sistema baseado em redundância reflecte um entendimento profundo de que falhas são inevitáveis, mas que seus impactos podem e devem ser mitigados por um *design* inteligente, proactivo e preventivo. Portanto, a decisão de redesenhar a distribuição de média tensão nos CFM para incluir um anel ideal é teórica e estrategicamente justificada como alinhada aos princípios mais avançados de engenharia de sistemas eléctricos críticos.

A análise técnica apresentada no trabalho revela uma atenção cuidadosa a todos os elementos necessários para garantir o sucesso do projecto de anel ideal.

A escolha do condutor ACSR PARTRIDGE, com corrente nominal adequada e secção transversal superior ao mínimo regulamentar, demonstra um compromisso claro com a qualidade do transporte de energia. A correcta determinação da resistência eléctrica, reactância, impedância e queda de tensão confirma que o novo circuito funcionará dentro dos limites normativos, assegurando eficiência e estabilidade.

O cálculo mecânico também merece destaque: ao considerar a tensão de serviço, a força do vento, os vãos críticos e a tensão de montagem, o projecto antecipa as solicitações físicas reais que os componentes da linha enfrentarão. A selecção de isoladores do tipo U100BS para ambientes de forte poluição e o respeito às distâncias regulamentares reforçam a robustez técnica da proposta.

Importante ressaltar que a criação de um anel não é simplesmente a instalação de cabos adicionais; envolve a integração harmoniosa entre os novos e antigos segmentos da rede, a actualização dos sistemas de proteção e a adaptação da lógica de operação dos quadros de distribuição. Assim, do ponto de vista técnico, a proposta foi desenhada com rigor metodológico e excelência em engenharia aplicada.

Sob o prisma económico, a adopção de um anel pode representar um investimento inicial considerável, mas que se justifica plenamente pelas economias a médio e longo prazo.

As interrupções energéticas nos CFM causam perdas operacionais imensas: atrasos no transporte ferroviário, inactividade em operações portuárias, multas por não cumprimento de prazos contratuais, aumento dos custos de manutenção emergencial e deterioração da confiança dos parceiros comerciais. Cada hora de paralisação pode traduzir-se em milhares de dólares de prejuízo, sem considerar os efeitos colaterais na imagem institucional e na economia nacional.

Com a instalação do anel, esses prejuízos seriam drasticamente reduzidos. O sistema redundante possibilitaria o isolamento rápido de falhas e a manutenção do fornecimento energético nas áreas não afectadas. A redução de interrupções e a melhoria da confiabilidade energética aumentariam também a produtividade geral dos CFM, gerando receitas adicionais pela capacidade de movimentar mais mercadorias em menos tempo.

Em relação ao meio ambiente, a adopção do anel aéreo é uma solução inteligente, pois, ao invés de escavar novos canais subterrâneos, que causariam grandes perturbações ao solo e aos ecossistemas, opta-se por uma instalação aérea controlada, com corredores previamente definidos e de baixo impacto.

Ao minimizar intervenções no solo e nas áreas de cobertura vegetal, reduz-se o risco de erosão, destruição de habitats e contaminação de aquíferos subterrâneos. A escolha de isoladores com maior resistência à poluição atmosférica também contribui para a durabilidade dos componentes, reduzindo a necessidade de manutenção frequente e o consequente impacto ambiental associado a deslocamentos de técnicos e uso de maquinaria pesada.

Ao garantir a continuidade do fornecimento de energia, o anel também evita a utilização excessiva de geradores a diesel, que, em caso de falha prolongada da rede, seriam a alternativa para manter as operações dos CFM. Dessa forma, a adopção do anel contribui para a redução de emissões de gases poluentes e para a promoção de práticas sustentáveis dentro da infra-estrutura portuária e ferroviária.

Portanto, a implantação do anel é ambientalmente responsável e alinha-se às melhores práticas de desenvolvimento sustentável, conciliando crescimento económico, proteção ambiental e responsabilidade social.

Do ponto de vista operacional, a adopção do anel trará melhorias substanciais na eficiência e na confiabilidade dos serviços oferecidos pelos CFM.

A capacidade de isolar segmentos avariados da rede e de reconfigurar rapidamente os fluxos de energia permitirá respostas ágeis às falhas, minimizando a duração das interrupções e o número de usuários afectados. As operações ferroviárias e portuárias extremamente sensíveis a atrasos beneficiar-se-ão de uma infra-estrutura energética que se ajusta dinamicamente às condições operacionais.

O novo sistema exigirá uma modernização dos procedimentos de operação e manutenção. A implementação do anel forçará uma elevação no padrão de qualificação dos técnicos, que deverão ser treinados em protocolos de operação em redes redundantes, análise de falhas em tempo real e práticas avançadas de manutenção preditiva.

Essa profissionalização da operação contribuirá para a consolidação dos CFM como uma organização moderna, eficiente e preparada para enfrentar os desafios de um mercado logístico global cada vez mais competitivo e exigente.

O anel proposto não deve ser visto apenas como uma solução para os problemas actuais, mas como a fundação para o crescimento sustentável futuro dos CFM.

Com a infra-estrutura básica de redundância estabelecida, os CFM estarão melhor posicionados para expandir suas operações, integrando novas subestações, novos terminais logísticos e eventuais ampliações do porto e da rede ferroviária. A modularidade e flexibilidade do sistema em anel permitirão a expansão da capacidade energética com investimentos incrementais e controlados, sem a necessidade de remodelar toda a rede a cada novo crescimento.

A infra-estrutura em anel poderá ser integrada a futuras iniciativas de modernização energética, como a adopção de fontes renováveis (solar, eólica) em *microgrids* locais, e sistemas de armazenamento de energia (baterias de grande porte), ampliando ainda mais a autonomia e a resiliência energética dos CFM.

A longo prazo, a experiência acumulada com a operação e manutenção da rede em anel poderá servir de base para a criação de um modelo de gestão energética portuária de referência em Moçambique e em toda a região austral de África, consolidando os CFM como líderes em inovação, eficiência e sustentabilidade no sector dos transportes.

## CAPÍTULO VI: CONCLUSÃO

### 6. CONCLUSÃO

A presente pesquisa teve como objectivo analisar a viabilidade técnica da adopção de um anel ideal (redundância) para rápida reposição de energia na rede eléctrica dos Portos e Caminhos de Ferro de Moçambique (CFM), em caso de avarias nos cabos eléctricos de média tensão. Ao longo do estudo, constatou-se que a infra-estrutura eléctrica actual dos CFM apresenta vulnerabilidades significativas, particularmente no que diz respeito à recorrência de falhas nos alimentadores principais e à inexistência de um sistema de redundância eficaz, resultando em frequentes interrupções no fornecimento de energia e comprometendo a eficiência das operações portuárias e ferroviárias.

A análise teórica e prática realizada demonstrou que a implementação de um anel ideal representa uma solução viável e altamente vantajosa para mitigar esses desafios. A partir do levantamento de dados e da modelagem proposta, verificou-se que a introdução de um sistema em anel permitiria uma redistribuição mais eficiente da energia eléctrica em caso de falhas, reduzindo significativamente o tempo de inactividade das operações e aumentando a resiliência da rede.

O dimensionamento do anel ideal da linha de 33 kV para o Porto de Maputo foi realizado com rigor técnico, considerando aspectos eléctricos, mecânicos e ambientais para garantir uma infra-estrutura eficiente e confiável. A escolha dos condutores, isoladores e apoios foi feita de forma criteriosa, permitindo mínimas perdas eléctricas, rápida reposição de energia e alta resistência mecânica. O projecto contemplou o dimensionamento dos isoladores, levando em consideração a forte poluição da região, com a utilização de isoladores do tipo U100BS, de vidro, e comprimento de linha de fuga de 295 mm. No cálculo eléctrico, a seleção do condutor baseou-se na corrente de serviço, sendo escolhido o ACSR PARTRIDGE, com secção total de 156,87 mm<sup>2</sup> e corrente nominal de 420A, garantindo menor queda de tensão e eficiência energética. Já no cálculo mecânico, foram determinadas as tensões máximas e de serviço dos condutores, considerando factores como força do vento, coeficiente de sobrecarga e flecha máxima, além da definição de um vão de 200 m, com 15 vãos e 16 apoios dimensionados para garantir estabilidade estrutural. A adequação às distâncias regulamentares também foi assegurada, reforçando a conformidade com as normas técnicas.

Diante das constatações mencionadas no ponto 5, a pesquisa reforça a importância da modernização da rede eléctrica dos CFM como uma estratégia fundamental para garantir a sustentabilidade e a eficiência das operações portuárias e ferroviárias em Moçambique. A adopção do anel ideal representa uma inovação necessária para o sector eléctrico da empresa, garantindo maior estabilidade e segurança no fornecimento de energia e permitindo a continuidade das operações mesmo diante de falhas no sistema.

Por fim, recomenda-se que futuros estudos aprofundem a análise dos impactos económicos e operacionais da implementação da redundância anelar, considerando variáveis como a evolução da demanda energética, o crescimento das actividades portuárias e a incorporação de novas tecnologias de automação e monitoramento da rede eléctrica. Ademais, sugere-se que a empresa adote uma abordagem integrada de gestão da energia, incorporando políticas de manutenção preditiva e preventiva para garantir a máxima eficiência e longevidade da infra-estrutura eléctrica dos CFM.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alexander, C. K., & Sadiku, M. N. O. (2016). *Fundamentals of Electric Circuits*. McGraw-Hill.
- Almeida, F. (2020). *Redes de Distribuição Elétrica: Conceitos e Aplicações*. São Paulo: Editora Técnica.
- Alston, L. L. (1968). *High-Voltage Technology*. Oxford University Press.
- Asche, F., G. M. McMahon, R. J. M. Andrews, and A. W. Smith. (2000). *Economic Evaluation of Electric Power Projects*. *Journal of Energy Economics*, 22(3), 233-245.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 5422: Redes Aéreas de Distribuição de Energia Elétrica. Rio de Janeiro: ABNT.
- Babbie, E. (2016). *The Practice of Social Research* (14<sup>th</sup> Edition). Cengage Learning: Belmont.
- Barry, R. G., & Chorley, R. J. (2010). *Atmosphere, Weather and Climate*. Routledge.
- Batchelor, G. K. (2000). *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge University Press.
- Beer, F. P., Johnston, E. R., & DeWolf, J. T. (2017). *Mechanics of Materials*. McGraw-Hill.
- Blevins, R. D. (1990). *Flow-Induced Vibration*. Van Nostrand Reinhold.
- Boylestad, R., & Nashelsky, L. (2015). *Electronic Devices and Circuit Theory*. Pearson.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2020). *Shigley's Mechanical Engineering Design*. McGraw-Hill.
- Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., & Bossanyi, E. (2011). *Wind Energy Handbook*. John Wiley & Sons.
- Carvalho, J. A. B. (2022). Estrutura, Organização e Funcionamento dos Sistemas Elétricos de Energia. *Neutro à Terra*, (28), 5–16.
- Castro, M. (2019). *Análise de Custos em Infraestruturas Elétricas de Média Tensão*. Rio de Janeiro: Editora de Engenharia.
- Checa, L. M. (1988). *Lineas de Transporte de Energía*. Marcombo.

Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2017). *Designing and conducting mixed methods research*. Sage publications.

Decreto n.º 57/2011. Aprova o Regulamento de Segurança das Linhas Elétricas de Alta Tensão. Boletim da República, I Série, Número 45, 11 de novembro de 2011.

Decreto Regulamentar n.º 1/92. Diário da República, Série I-A, n.º 9, 11 de janeiro de 1992. Disponível em:

Denzin, N. K., & Lincoln, Y. S. (2018). *The Sage Handbook of Qualitative Research*. Sage Publications.

Dorf, R. C., & Svoboda, J. A. (2020). *Introduction to Electric Circuits*. Wiley.

EDP (2011). *Guia de boas práticas para a integração paisagística de infraestruturas eléctricas* (Volume 2). PPDA 2009 – 2011. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.

EDP. (2018). *Manual de Ligações à rede eléctrica de serviço público: Guia técnico e logístico de boas práticas* (9ª edição).

Faraday, M. (1831). *Experimental Researches in Electricity*. Royal Society of London.

Ferreira, J. T. V. (2018). *Redes de Distribuição de Energia Elétrica de Média e Baixa Tensão – Estágio na Helenos, S.A.* Relatório de Estágio apresentado para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica Especialização em Automação e Comunicações em Sistemas de Energia. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. Coimbra.

FEUP. (2017). *Dados acerca de cabos de guarda*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto.

Gere, J. M., & Goodno, B. J. (2017). *Mechanics of Materials*. Cengage Learning.

Glover, J. D., Sarma, M. S., & Overbye, T. J. (2012). *Power System Analysis and Design*. Cengage Learning.

Gomes, F. V. & Deotti, L. M. P. *Sistemas eléctricos de potência* (1ª edição). Brasília: NT Editora.

Grainger, J. J., & Stevenson, W. D. (1994). *Power System Analysis*. McGraw-Hill.

- Grainger, J. J., & Stevenson, W. D. (1994). *Power System Analysis*. McGraw-Hill.
- Hayt, W. H., & Kemmerly, J. E. (2008). *Engineering Circuit Analysis*. McGraw-Hill.
- Holmes, J. D. (2015). *Wind Loading of Structures*. CRC Press.
- Holton, J. R. (2004). *An Introduction to Dynamic Meteorology*. Elsevier.
- Houze, R. A. (1993). *Cloud Dynamics*. Academic Press.
- IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). (2004). *IEEE Standard for SCADA Systems*. IEEE Standards Association.
- International Electrotechnical Commission (IEC). IEC 60071: Insulation Coordination. Geneva: IEC.
- International Electrotechnical Commission (IEC). IEC 60826: Design Criteria of Overhead Transmission Lines. Geneva: IEC.
- International Electrotechnical Commission (IEC). IEC 61936-1: Power Installations Exceeding 1 kV AC – Part 1: General Requirements. Geneva: IEC.
- Joule, J. P. (1841). *On the Production of Heat by Voltaic Electricity*. Philosophical Magazine.
- Juvinall, R. C., & Marshek, K. M. (2012). *Fundamentals of Machine Component Design*. Wiley.
- Kraus, J. D., & Fleisch, D. A. (1999). *Electromagnetics with Applications*. McGraw-Hill.
- Kuffel, E., Zaengl, W. S., & Kuffel, J. (2000). *High Voltage Engineering Fundamentals*. Elsevier.
- Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill.
- Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill.
- Lima, P. (2021). *Manutenção Preventiva e Corretiva em Sistemas Elétricos*. Belo Horizonte: Editora de Tecnologia.
- Merriam, S. B. (2009). *Qualitative Research: A Guide to Design and Implementation*. Jossey-Bass.

- Moura, J. (2015). *Redes Elétricas Inteligentes: Implementação e Benefícios*. Porto: Editora de Engenharia Elétrica.
- Ohm, G. S. (1827). *Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet* (A corrente galvânica tratada matematicamente). T. H. Riemann.
- Oliveira, T. (2012). *Distribuição Elétrica: Teoria e Prática*. São Paulo: Editora de Tecnologia Elétrica.
- Paiva, J. P. S. (2007). *Redes de Energia Elétrica – Uma análise sistêmica* (2ª Edição). Instituto Superior Técnico (IST) Press.
- Peixoto, J. P., & Oort, A. H. (1992). *Physics of Climate*. Springer.
- Pereira, L. (2016). *Gestão da Energia e Sustentabilidade*. Lisboa: Editora de Sustentabilidade Energética.
- Santos, A. (2020). *Redes de Distribuição Elétrica e Gestão de Cargas*. São Paulo: Editora Técnica.
- Sedra, A. S., & Smith, K. C. (2018). *Microelectronic Circuits*. Oxford University Press.
- Shigley, J. E., & Mischke, C. R. (2008). *Mechanical Engineering Design*. McGraw-Hill.
- Silva, J. (2019). *Eficiência Energética e Sustentabilidade em Portos*. Rio de Janeiro: Editora de Tecnologia Sustentável.
- Silva, R. S. (2019). *Sistemas elétricos de potência I*. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A.
- Simiu, E., & Scanlan, R. H. (1996). *Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design*. John Wiley & Sons.
- Smith, R., & Aydin, K. (2008). *Cost-Benefit Analysis of Power Grid Investments*. *Energy Economics*, 30(2), 431-444.
- Stagg, G. W., & El-Abiad, A. H. (1968). *Computer Methods in Power System Analysis*. McGraw-Hill.

- Stake, R. E. (2006). *Multiple case study analysis*. Guilford Press.
- Stoll, R. L. (1989). *The Analysis of Eddy Currents*. Clarendon Press.
- Streetman, B. G., & Banerjee, S. (2015). *Solid State Electronic Devices*. Pearson.
- Stull, R. B. (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Springer.
- Suresh, S. (1998). *Fatigue of Materials*. Cambridge University Press.
- Timoshenko, S. P., & Goodier, J. N. (1970). *Theory of Elasticity*. McGraw-Hill.
- von Mises, R. (1913). *Mechanik der festen Körper im plastisch-deformablen Zustand*. Göttingen University Press.
- Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric Science: An Introductory Survey*. Elsevier.
- Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods*. Sage publications.
- Young, T. (1807). *A Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts*. J. Johnson.

## 8. APÊNDICES

### 8.1. Guia de Entrevistas para Engenheiros e Técnicos

#### Introdução

##### 1. Abertura

Estamos a conduzir uma pesquisa sobre a adopção de um anel ideal para rápida reposição de energia na rede eléctrica dos Portos e Caminhos de Ferro de Moçambique em caso de avarias nos cabos eléctricos de média tensão.

##### 2. Dados Demográficos

- Nome:
- Cargo:
- Anos de experiência na área:
- Formação Académica:

#### Seção 1: Caracterização da Infra-estrutura Actual

##### 1. Descrição Geral

Poderia descrever a infra-estrutura actual de média tensão nos CFM?

---

---

---

---

---

Quais são os principais componentes e equipamentos utilizados?

---

---

---

---

---

##### 2. Desempenho e Manutenção

Qual é a frequência das manutenções preventivas realizadas nas infra-estruturas eléctricas de média tensão?

---

---

---

---

---

Existem registos de falhas ou interrupções no fornecimento de energia? Com que frequência ocorrem?

---

---

---

Quais são as principais causas das falhas observadas?

---

---

---

## **Secção 2: Problemas Recorrentes**

### **1. Identificação de Problemas**

Quais são os problemas mais recorrentes enfrentados na operação das infra-estruturas eléctricas de média tensão?

---

---

---

---

---

Como esses problemas impactam a operação dos CFM?

---

---

---

---

---

### **2. Soluções Implementadas**

Quais medidas têm sido adoptadas para resolver esses problemas?

---

---

---

---

---

Essas medidas têm sido eficazes? Por quê?

---

---

---

---

---

### **Seção 3: Práticas de Manutenção**

#### **1. Manutenção Preventiva**

Poderia descrever as práticas de manutenção preventiva actualmente em uso?

---

---

---

---

Quais são os principais desafios na implementação da manutenção preventiva?

---

---

---

---

#### **2. Manutenção Correctiva**

Como é gerido o processo de manutenção correctiva em caso de falha ou avaria?

---

---

---

---

Qual é o tempo médio de resposta para resolver uma avaria?

---

---

---

---

### **Seção 4: Adopção de um Anel Ideal (Redundância)**

#### **1. Conhecimento e Opinião**

Está familiarizado com o conceito de anel ideal para redundância em redes eléctricas?

---

---

---

---

Qual é a sua opinião sobre a adopção dessa tecnologia nas infra-estruturas dos CFM?

---

---

---

---

---

## 2. Implementação

Quais seriam os principais benefícios da implementação de um anel ideal nas infra-estruturas eléctricas de média tensão?

---

---

---

---

---

Quais desafios técnicos e operacionais antecipa na implementação de um anel ideal?

---

---

---

---

---

## 3. Planeamento e Custos

Existe um plano actual ou em desenvolvimento para a adopção de um anel ideal? Poderia detalhá-lo?

---

---

---

---

---

Quais são os custos estimados para a implementação de um anel ideal?

---

---

---

---

---

## **Secção 5: Sugestões e Recomendações**

### **1. Melhorias**

Que melhorias sugere para aumentar a eficiência e a confiabilidade das infra-estruturas eléctricas de média tensão nos CFM?

---

---

---

---

---

### **2. Formação e Capacitação**

Existe necessidade de mais formação ou capacitação para a equipa responsável pela operação e manutenção? Em que áreas?

---

---

---

---

---

## 8.2. Questionário para Engenheiros e Técnicos dos CFM

### Introdução

#### Instruções:

- O objectivo deste questionário é colectar informações detalhadas sobre as infra-estruturas eléctricas de média tensão dos Portos e Caminhos de Ferro de Moçambique, com foco na adopção de um anel ideal (redundância) para rápida reposição de energia em caso de avarias.
- Por favor, responda a todas as perguntas com a maior precisão possível.
- As respostas serão mantidas confidenciais e usadas apenas para fins de pesquisa.

#### Seção 1: Informações Pessoais

1. Nome:
2. Cargo:
3. Anos de experiência na área:
4. Formação Acadêmica:

#### Secção 2: Caracterização da Infraestrutura Actual

5. Descreva a infra-estrutura eléctrica de média tensão actual dos CFM.

---

---

---

---

---

6. Quais são os principais componentes e equipamentos utilizados?

---

---

---

---

---

7. Qual é a frequência das manutenções preventivas realizadas?

- Mensal
- Trimestral
- Semestral
- Anual
- Outra:

---

---

-

8. Existem registos de falhas ou interrupções no fornecimento de energia?
- Sim
  - Não
  - Se sim, com que frequência ocorrem?

---

---

### Secção 3: Problemas Recorrentes

9. Quais são os problemas mais recorrentes enfrentados na operação das infra-estruturas eléctricas de média tensão?
- Sobrecarga
  - Falhas de equipamento
  - Problemas de cablagem
  - Outros:

---

---

10. Como esses problemas impactam a operação dos CFM?
- Interrupções frequentes
  - Redução da eficiência
  - Aumento dos custos de manutenção
  - Outros: \_\_\_\_\_

### Secção 4: Práticas de Manutenção

11. Quais práticas de manutenção preventiva são actualmente utilizadas?
- Inspeções regulares
  - Substituição programada de componentes
  - Monitoramento remoto
  - Outros: \_\_\_\_\_

12. Quais são os principais desafios na implementação da manutenção preventiva?
- Falta de recursos
  - Falta de pessoal qualificado
  - Problemas logísticos
  - Outros:

---

---

13. Como é gerido o processo de manutenção correctiva em caso de falha ou avaria?
- () Equipas de emergência
  - () Contratação de serviços externos
  - () Outros:

---

---

14. Qual é o tempo médio de resposta para resolver uma avaria?
- () Menos de 1 hora
  - () 1-3 horas
  - () 3-6 horas
  - () Mais de 6 horas

### **Seção 5: Adopção de um Anel Ideal (Redundância)**

15. Está familiarizado com o conceito de anel ideal para redundância em redes eléctricas?
- () Sim
  - () Não
  - ()

16. Qual é a sua opinião sobre a adopção dessa tecnologia nas infra-estruturas dos CFM?
- () Muito favorável
  - () Favorável
  - () Neutro
  - () Desfavorável
  - () Muito desfavorável

17. Quais seriam os principais benefícios da implementação de um anel ideal nas infra-estruturas eléctricas de média tensão?
- () Aumento da confiabilidade
  - () Redução do tempo de inatividade
  - () Melhor gestão de falhas
  - () Outros: \_\_\_\_\_

18. Quais desafios técnicos e operacionais você antecipa na implementação de um anel ideal?
- () Custos elevados
  - () Complexidade técnica
  - () Necessidade de formação adicional
  - () Outros:

---

---

19. Existe um plano actual ou em desenvolvimento para a adopção de um anel ideal?

- () Sim
- () Não
- Se sim, poderia detalhá-lo?

---

---

---

○

20. Quais são os custos estimados para a implementação de um anel ideal?

- () Menos de 1,000,000 MT
- () 100,000 – 5,000,000 MT
- () 500,000 - 10,000,000 MT
- () Mais de 100,000,000 MT

### **Secção 6: Sugestões e Recomendações**

21. Que melhorias sugere para aumentar a eficiência e a confiabilidade das infra-estruturas eléctricas de média tensão nos CFM?

---

---

---

---

22. Existe necessidade de mais formação ou capacitação para a equipa responsável pela operação e manutenção?

- () Sim
- () Não
- Se sim, em que áreas?

---

### **Agradecimento:**

- Agradecemos o seu tempo e colaboração.
- Suas respostas são muito valiosas para a nossa pesquisa.

## 9. ANEXOS

### 9.1.Cabo XLPE 1P 240 mm<sup>2</sup> de uma das linhas de 33 KV

**Figura 3: Cabo XLPE 1P 240 mm<sup>2</sup> de uma das linhas de 33 KV**



Fonte: autor (2024)

### 9.2.Caixas desfeitas onde se notou a falha técnica na Manufatura

**Figura 4: caixas desfeitas onde se notou a falha técnica na Manufatura**



Fonte: autor (2024)

### 9.3. Condições criadas para manufatura de caixas de junção num dos pontos onde os cabos ficam submersos num dia chuvoso

Figura 5: condições criadas para manufatura de caixas de junção num dos pontos onde os cabos ficam submersos num dia chuvoso



Fonte: autor (2022)

### 9.4. Técnicos manufacturando uma caixa na L2 da linha EL 27

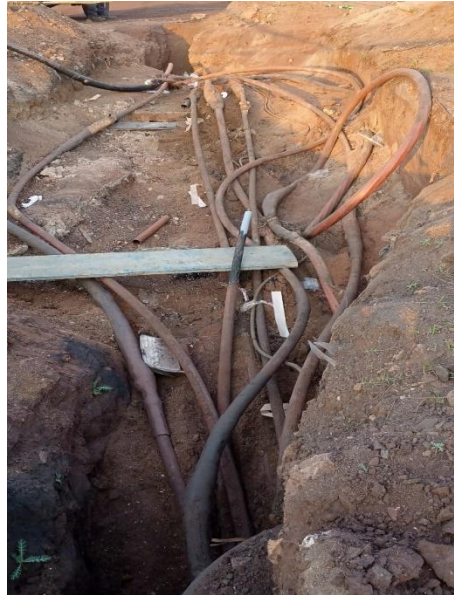
Figura 6: Técnicos manufacturando uma caixa na L2 da linha EL 27



Fonte: autor (2020)

### 9.5.O Ponto onde a EL 26 e a EL 27 foram cruzadas (troca de posição)

**Figura 7: O Ponto onde a EL 26 e a EL 27 foram cruzadas (troca de posição)**



Fonte: autor (2022)

### 9.6.Escavação feita na alma da linha férrea para identificar o ponto e a linha com defeito

**Figura 8: Escavação feita na alma da linha férrea para identificar o ponto e a linha com defeito**



Fonte: autor (2020)

**9.7. Técnicos manufacturando caixa de junção na alma ou por baixo da linha férrea durante a noite**

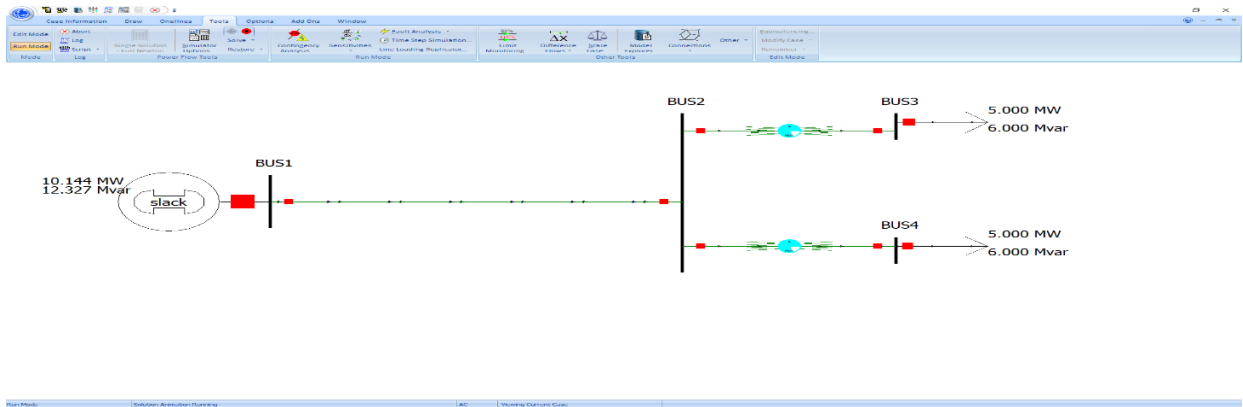
**Figura 9: Técnicos manufacturando caixa de junção na alma ou por baixo da linha férrea durante a noite**



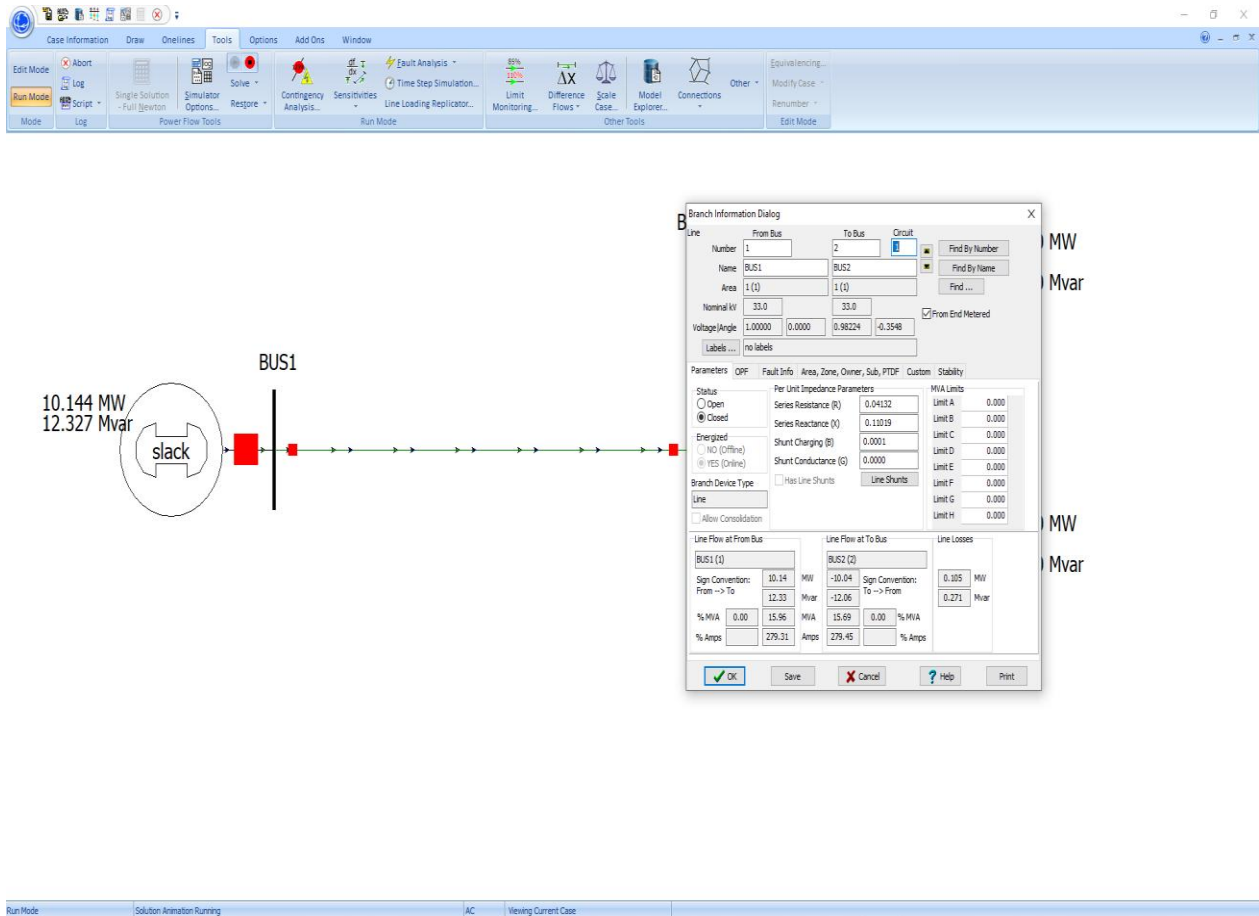
Fonte: autor (2024)

## 9.8. Perfil e parâmetros (imagens tiradas pelo autor no PowerWorld simulator)

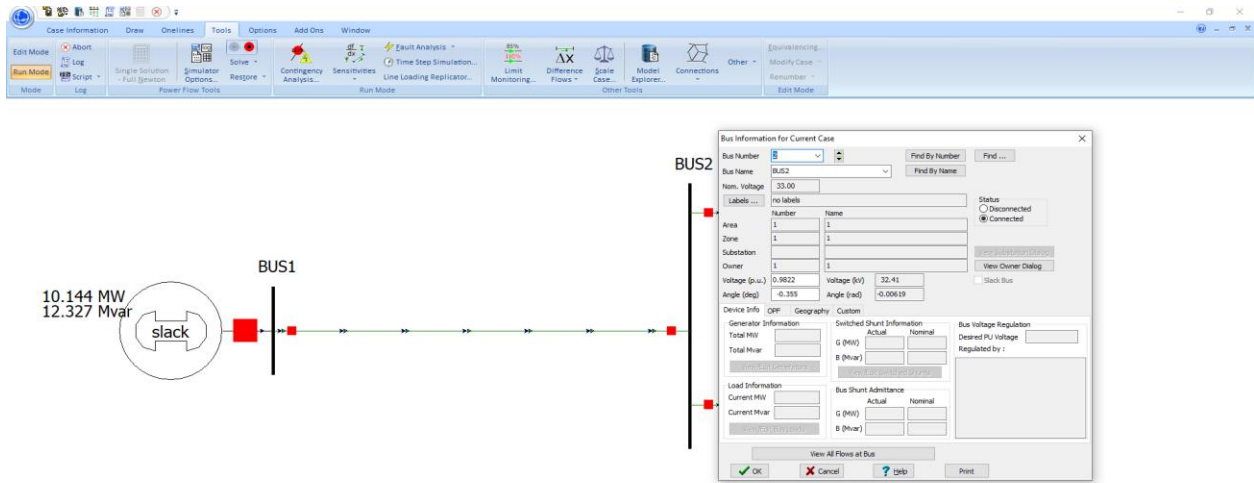
### Fig. 10 perfil da linha



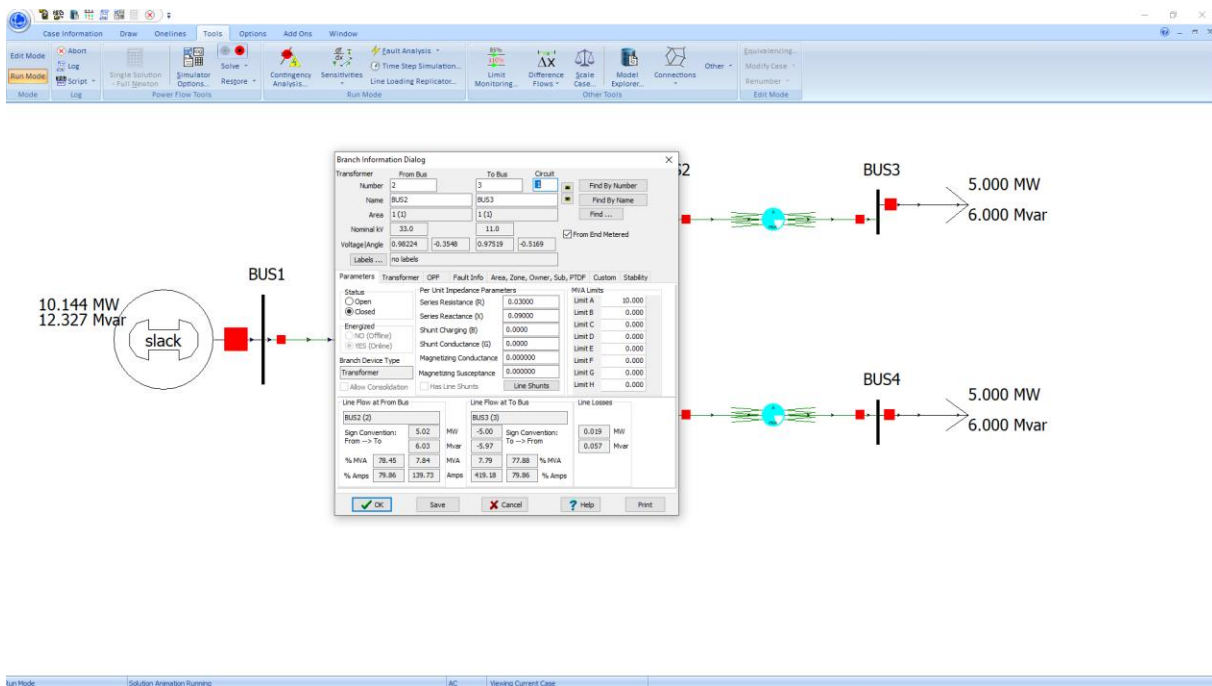
### Fig. 11 parâmetros da rede



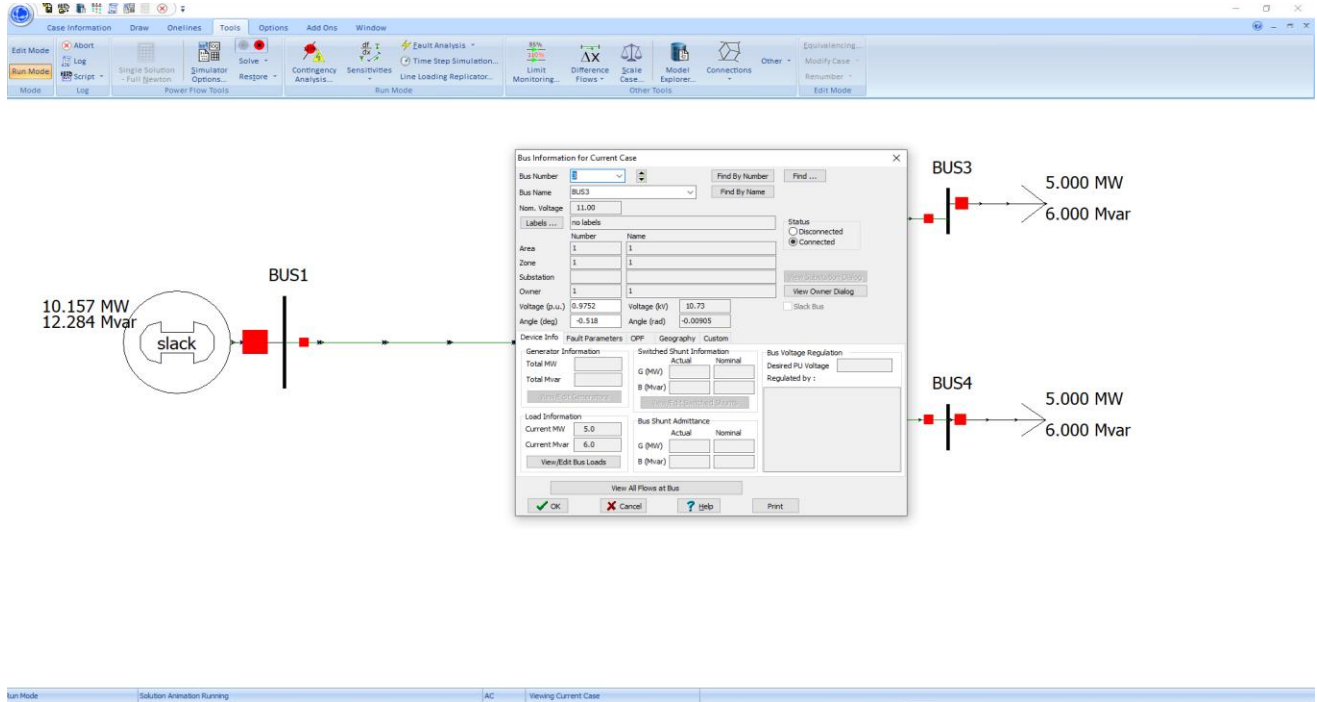
**Fig. 12** parâmetros do barramento de 33 kV



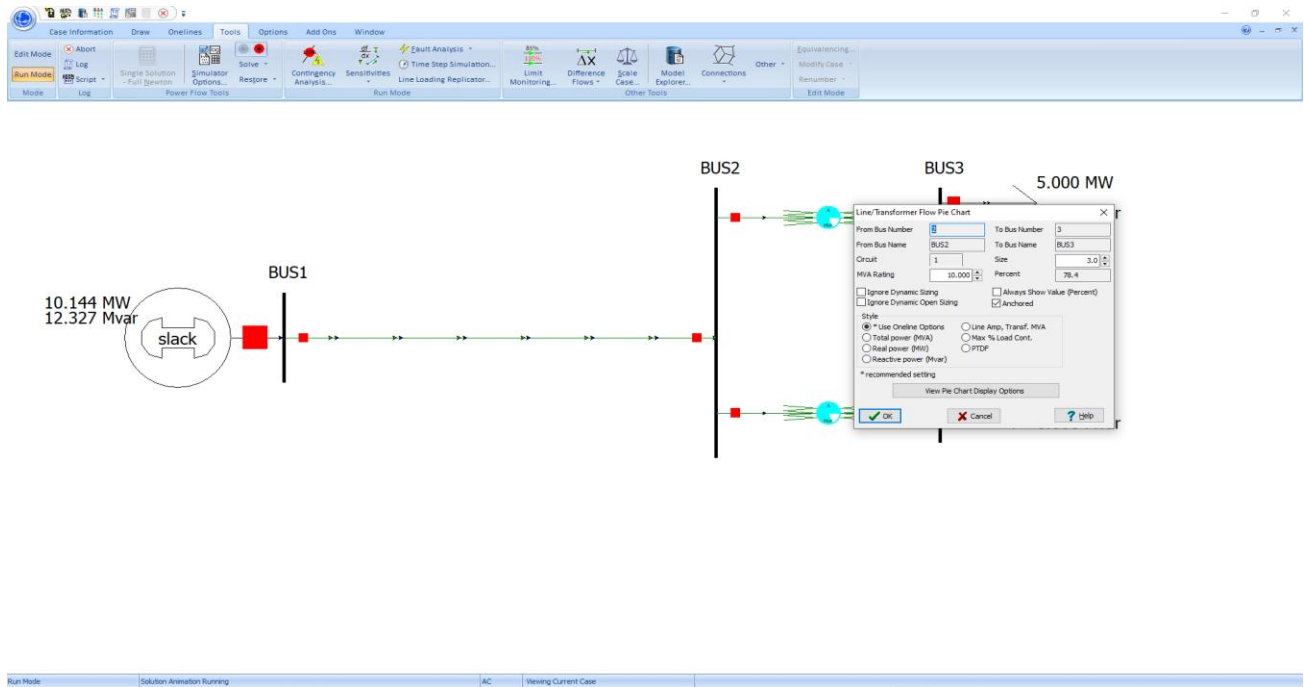
**Fig. 13** parâmetros dos transformadores



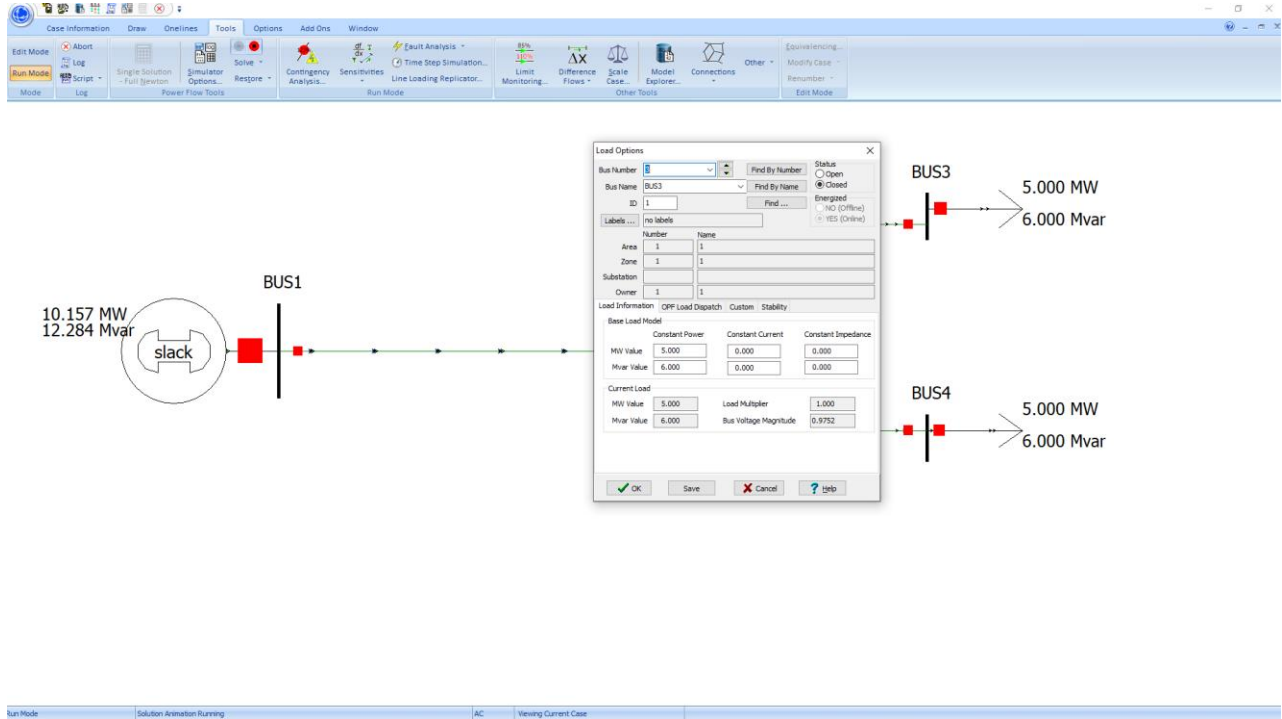
**Fig. 14** parâmetros do barramento de 11kV



**Fig. 15** carregamento dos transformadores



**Fig. 16** parâmetros de carga



## 9.9. Proposta da trajetória da nova linha aérea

**Figura 10:** Proposta da trajetória da nova linha aérea



Fonte: autor (2025 ) imagem tirada do Google Earth 2025