



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE LICENCIATURA EM ENGENHARIA ELÉTRICA

***Estudo dos métodos de redução de perdas de energia
elétrica em redes de distribuição de Baixa Tensão no
Distrito Municipal de KaTembe***

Autor:

Titosse, Jennifer Rabecca

Supervisor:

Mestre Engº Fernando Chachaia

MAPUTO, Novembro de 2023



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA

CURSO DE LICENCIATURA EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Estudo dos métodos de redução de perdas de energia elétrica em redes de distribuição de Baixa Tensão no Distrito Municipal de KaTembe

Autor:

Titosse, Jennifer Rabecca

Supervisor:

Mestre Engº Fernando Chachaia

MAPUTO, Novembro de 2023

JENNIFER RABECCA TITOSSE

Estudo dos métodos de redução de perdas de energia elétrica em redes de distribuição de Baixa Tensão no Distrito Municipal de KaTembe

Projeto referente a cadeira de Projeto de Curso, como requisito de aprovação à mesma, enquadrada no Curso de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia, Universidade Eduardo Mondlane.

SUPERVISOR: Mestre Engº Fernando Chachaia

JENNIFER RABECCA TITOSSE

Estudo dos métodos de redução de perdas de energia elétrica em redes de distribuição de Baixa Tensão no Distrito Municipal de KaTembe

Este trabalho foi julgado como adequado para ser usado como requisito de culminação do curso de licenciatura em Engenharia Elétrica

Maputo, Novembro de 2023

_____ (__/ __/2023)

(Mestre Engº Fernando Chachaia)

O Supervisor

_____ (__/ __/2023)

(Engº. Zefanias Mabote)

O Diretor do Curso

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente à Deus, à minha família pelo suporte imensurável, ao meu supervisor e, primordialmente a mim pela resiliência que permitiu esta conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que sempre foi alicerce para a realização de todos os meus objetivos, a nível pessoal e acadêmico.

Agradeço especialmente aos meus pais Dinís José Titosse e Maria Rafael Matsimbe, pois, graças a inspiração, admiração que tenho por eles e, ao seu apoio incondicional, tomei a excelente decisão de engrenar no ramo da engenharia elétrica, permanecendo sempre firme em meio todas as adversidades.

Agradeço aos, aos meus docentes, e especialmente ao meu supervisor Mestre Eng° Fernando Chachaia cujo apoio, paciência, ensinamentos, inspiração e orientação moldaram a direção e o sucesso deste estudo. Sua dedicação ao meu crescimento acadêmico foi inestimável.

Agradeço por fim aos meus colegas de turma Anísio Saice, Karen Fernanda, Lurdes Samuel, Albino Nhabomba e Ernesto Mabecuane, agradeço pelas discussões envolventes e pela troca constante de ideias. Nossas abordagens enriqueceram a minha compreensão e abordagem à pesquisa.

RESUMO

Com o advento dos sistemas eléctricos de potência ao longo do tempo, tem se constatado um aumento significativo da camada consumidora e, por consequência, um aumento das perdas de energia eléctrica verificadas na rede de distribuição devido ao crescente índice de demanda de energia. Isso vem, no entanto, elucidar a indústria electrotécnica sobre a necessidade de se estudar estratégias e/ou métodos de redução das perdas de energia eléctrica com vista melhorar a eficiência energética e, consequentemente, a qualidade de energia fornecida aos consumidores. O presente projecto tem por objectivo partilhar as ilações de um estudo realizado para análise dos métodos de redução das perdas de energia eléctrica em rede de distribuição de baixa tensão, no que concerne à melhoria dos indicadores de qualidade de energia eléctrica. Propõe-se, assim, apresentar um estudo realizado do distrito municipal de KaTembe, no qual, por meio de levantamento de dados no campo, um PT com extensões longas foi identificado, analisado e constatou-se a existência de quedas de tensão elevadas, e por isso um elevado índice de perdas de energia, o que compromete a qualidade de energia daquela rede. Serão então, realizados os cálculos das perdas de energia devido as extensões longas e quedas de tensão na rede e definidos os métodos que melhor se adequam para a redução das perdas de energia eléctrica do caso analisado. Do qual constatou-se que a melhor solução para a problemática consiste na conjugação de dois dos métodos estudados.

Palavras-chave: perdas de energia; métodos de redução de perdas de energia; extensões longas; quedas de tensão.

ABSTRACT

With the advent of electrical energy systems over time, there has been a significant increase in the consumer base and, consequently, an increase in electrical energy losses in the distribution network due to the growing demand for energy. However, this highlights the need for the electrical industry to study strategies and/or methods to reduce electricity losses in order to improve energy efficiency and, consequently, the quality of energy supplied to consumers. The objective of this project is to share the findings of a study conducted to analyze methods for reducing electricity losses in a low-voltage distribution network, with a focus on improving electricity quality indicators. It is proposed, therefore, to present a study conducted in the municipal district of KaTembe, in which, through field data collection, a high-voltage power line with long extensions was identified, analyzed, and found to have significant voltage drops. As a result, there is a high level of energy losses, compromising the quality of energy in that network. Calculations will be performed to determine the energy losses due to the long extensions and voltage drops in the network, and the methods that best suit the reduction of electrical energy losses in the analyzed case will be defined. It was concluded that the best solution to the problem consists of combining two of the studied methods.

Keywords: energy losses; methods for reducing energy losses; long extensions; voltage drops.

Índice

DEDICATÓRIA.....	i
AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO.....	iii
Índice.....	v
LISTA DE SÍMBOLOS.....	vi
CAPÍTULO 1: Introdução.....	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Formulação do problema	2
1.3. Hipóteses	3
1.4. Justificativa.....	3
1.5. Objetivos	4
1.5.1. Objectivo geral.....	4
1.5.2. Objectivos específicos	4
1.6. Metodologia.....	4
CAPÍTULO 2: Revisão Literária.....	6
2.1. Rede de distribuição	6
2.1.1. Topologia das redes de distribuição	7
2.2. Análise das perdas de energia eléctrica em redes de distribuição de baixa tensão	10
2.2.1. Perdas técnicas.....	11
2.3. Análise dos métodos habitualmente usados para a redução de perdas de energia eléctrica em redes de distribuição de Baixa Tensão.....	14
2.3.1. Instalação de banco de capacitores	14
2.3.2. Equilíbrio de fase	19
2.3.3. Regulação de tensão.....	21
2.3.4. Aumento da secção condutora da rede secundária.....	21
2.3.5. Troca dos transformadores de distribuição.....	22
2.3.6. Divisão da rede.....	23
2.4. Cálculo de perdas eléctricas em redes de distribuição de Baixa Tensão 24	
2.4.1. Transformadores de distribuição	26
2.4.2. Rede de Baixa Tensão	27
2.4.3. Perdas nos ramais de ligação	27

2.4.4. Perdas nos contadores de energia	28
2.4.5. Quedas de tensão	29
CAPÍTULO 3: Análise dos Dados	31
3.1. Medições de cargas.....	33
3.2. Medição da tensão	34
3.2.1. Cálculo das quedas de tensão e perdas de energia da rede	36
3.3. Simulação da rede de distribuição de Baixa Tensão para verificação do comportamento de vários métodos na redução das perdas	37
3.3.1. Divisão da rede	37
3.3.2. Equilíbrio de fases.....	39
3.3.3. Regulação de tensão com tap-changes	42
3.3.4. Identificação do método mais viável para a redução de perdas de energia elétrica na rede de distribuição de baixa tensão	43
CAPÍTULO 4: Conclusões e Recomendações	45
4.1. Conclusões	45
4.2. Recomendações	46
4.3. Limitações	46
Referências Bibliográficas	47
Anexos	1
ANEXO 1. Medições de carga	1
ANEXO 2. Medições de tensão	1
ANEXO 3. Circuito simulado para o equilíbrio de tensões.....	1
ANEXO 4. Circuito simulado para o equilíbrio de correntes	1
ANEXO 5. Chapa de características dum transformador com tap-changer....	1
ANEXO 6. Circuito de autotransformador simulado.....	1
ANEXO 7. Impedância dos condutores em função da secção	1

LISTA DE SÍMBOLOS

AT Alta Tensão

BT	Baixa Tensão
$D_{\max}$	Demanda máxima
D_{faseA}	Demanda da fase A
D_{faseB}	Demanda da fase B
D_{faseC}	Demanda da fase C
EDM	Electricidade de Moçambique
e_m	Perda de energia nos contadores de energia [kWh]
i	Densidade de corrente, dado pela corrente máxima do circuito dividido por seu comprimento total [A/km]
i'	Valor instantâneo da corrente de linha (A)
i_1	Percentagem de medidores monofásicos
i_2	Percentagem de medidores bifásicos
i_3	Percentagem de medidores trifásicos
I_1	Modulo da corrente sem o banco de capacitores
I_2	Modulo da corrente com o banco de capacitores
I_B	Corrente de projecto [A]
I_c	Modulo da corrente injetada a rede pelo banco de capacitores
I_i	Corrente no ramal no período i do dia [A]
$i_{R,i}, i_{S,i}, i_{T,i}$	Correntes nos enrolamentos secundários do transformador, no instante i
I_j	Corrente total a jusante do trecho elementar [A]
I_{RMS}	Valor eficaz da corrente eléctrica
k	Número de condutores do ramal de ligação
l	Comprimento do trecho [km]

L	Comprimento médio do ramal [km]
MT	Media Tensão
N_{cp}	Número de condutores em paralelo por fase
N_m	Número total de medidores
N_t	Número de períodos do dia
$perdas_{fe}$	Perdas nominais no ferro
p_m	Perda média por elemento medidor de energia [W]
PT	Posto de Transformação
R	Resistência da linha no trecho entre a subestação e o banco de capacitores [$\Omega/fase$]
R'	Resistência do condutor [$m\Omega/m$]
r'	Resistência ou perda no cobre à plena carga do transformador
r	Resistência ôhmica por unidade de comprimento [Ω/km]
S_c	Secção [mm^2]
SEP	Sistema Eléctrico de Potência
S_N	Potência nominal do transformador
T	Intervalo de tempo considerado [h]
V_{ff}	Tensão de fase-fase [V]
V_{fn}	Tensão do circuito fase-neutro [V]
V_L	Modulo da tensão no primário do transformador de distribuição
X	Reatância do condutor [$m\Omega/m$]
Z	Impedância do condutor
ΔP	Redução das perdas de demanda [kW]
Δt	Duração do intervalo da curva de carga [h]

ΔV	Queda de tensão ao longo do condutor
ΔV_c	Queda de tensão máxima [%]
φ	Ângulo do fator de potência da carga.
ρ	Resistividade do material condutor (cobre = 1/56 [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$])
$\emptyset$	Defasagem angular entre a corrente e a tensão
$\emptyset_1$	Defasagem angular entre a corrente e a tensão sem o banco de capacitores
$\emptyset_2$	Defasagem angular entre a corrente e a tensão com o banco de capacitores

Lista de Figuras

Figura 1: Sistema eléctrico de Potência.	7
Figura 2: Esquemas de operação habitualmente utilizados em redes de distribuição.	9
Figura 3: Perdas nas linhas, que ocorrem predominantemente devido ao efeito Joule dos condutores.	12
Figura 4: Diagrama fasorial das correntes e das tensões com e sem a instalação de banco de capacitores.	15
Figura 5: Diagrama vectorial das tensões e correntes numa situação de desequilíbrio e respectivamente obtenção da corrente de neutro por soma vectorial das correntes de fases.	20
Figura 6: Segmentos do sistema de distribuição.	25
Figura 7: PT136R, no Distrito Municipal de KaTembe.	32
Figura 8: (a) Unidade de Comando e Protecção (UCP); (b) Fusível média tensão; (c) Fusível baixa tensão.	33
Figura 9: Aplicação do método de divisão da rede para o PT136R	39
Figura A3-3: Circuito simulado para o equilíbrio de tensões.	A3.3
Figura A4-4: Circuito simulado para o equilíbrio de correntes.	A4.4
Figura A5-5: Chapa de características dum transformador com tap-changer.	A5.5
Figura A6-6: Circuito simulado para o autotransformador.	A6.6

Lista de Tabelas

Tabela 1: Vantagens e desvantagens de cabos subterrâneos e linhas aéreas.	8
Tabela 2: Medições de tensão no consumidor final e intermédio.....	36
Tabela 3: Dados da rede.....	36
Tabela 4: Quedas de tensão e perdas de energia no consumidor intermédio.	36
Tabela 5: Quedas de tensão e perdas de energia no consumidor final.	36
Tabela A1-1: Dados de medição das correntes no alimentador e nas saídas do transformador.....	A1.1
Tabela A2-2: Dados de medição de tensão de fase-fase e fase-neutro.	A2.2
Tabela A7-7: Impedância dos condutores em função a secção.....	A7.7

Lista de Gráficos

Gráfico 1: Comportamento da corrente da fase R na saída do transformador.	33
Gráfico 2: Comportamento da corrente da fase S na saída do transformador.	34
Gráfico 3: Comportamento da corrente da fase T na saída do transformador.	34
Gráfico 4: Comportamento da tensão fase-fase.....	35
Gráfico 5: Comportamento da tensão fase-neutro.	35
Gráfico 6: Forma de onda das tensões de fase desequilibradas.....	40
Gráfico 7: Forma de onda das correntes de fase desequilibradas.	41
Gráfico 8: Forma de onda das tensões de fase equilibradas.	41
Gráfico 9: Forma de onda das correntes de fase equilibradas.	42
Gráfico 10: Simulação da regulação da tensão.....	43

CAPÍTULO 1: Introdução

1.1. Contextualização

A evolução das redes eléctricas ao longo dos anos tem sido notória. De modo que, nos dias actuais, aquando do dimensionamento dos sistemas eléctricos de potência, é imprescindível que se tenha em consideração uma grande diversidade de parâmetros, como dispositivos de protecção, comando, entre outros, a fim de que a rede opere dentro dos seus limites admissíveis de funcionamento, desta feita, a quantidade de energia gerada será aproximadamente igual a consumida. Esse padrão deve-se a necessidade de se garantir uma melhor qualidade de energia, principalmente aos consumidores finais. No entanto, em alguns casos, não são respeitados os valores normalizados, e por isso são verificadas perdas de energia em valores exorbitantes, devido a factores como: efeito joule, quedas de tensão, extensões longas, sobretensões de origem interna e externa (descargas atmosféricas), entre outros, que comprometem o bom desempenho da rede.

O foco deste projeto, dirige-se ao facto de que embora em termos ideais de funcionamento do sistema eléctrico, a potência gerada deve ser igual à potência consumida, em muitos casos, será sempre constatada a existência de perdas eléctricas na rede, que em alguns casos são derivadas de causas naturais e que não dependem do homem. Contudo, a grande quantidade de perdas de energia em redes de distribuição verificadas principalmente em Moçambique, derivam do não cumprimento das normas aquando do dimensionamento, melhoramento, expansão e estado de operação da rede eléctrica, condições tais, que podem ser acauteladas com vista a que se conserve a rede e o tempo de vida útil dos equipamentos e máquinas eléctricas a que ela são constituintes. Com isso, o presente projecto tem por objectivo a realização de um estudo dos métodos de redução das perdas de energia eléctrica em redes de distribuição de baixa tensão, que conta com a análise de um caso específico no distrito municipal de KaTembe.

1.2. Formulação do problema

Segundo o *Relatório e Custos 2020* da EDM, o aumento de tarifas aos clientes cativos ainda não reflete os custos de funcionamento da Empresa, pois, o mesmo não acompanhou o agravamento causado pelos custos de energia dos produtores independentes desde a sua entrada em funcionamento em 2013. Conforme ilustra o gráfico abaixo:

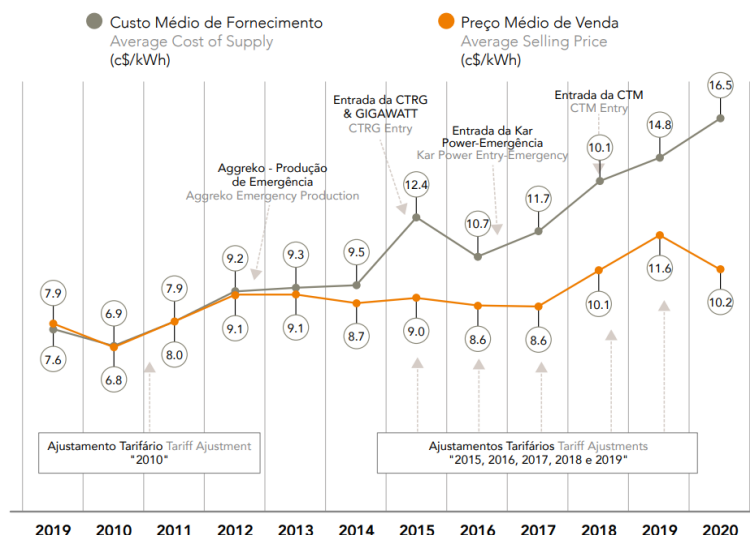


Gráfico 1: Custo médio de fornecimento e preço médio de venda.

Fonte: EDM, 2020.

Uma das maiores causas dessa discrepância consiste no aumento dos gastos financeiros, ligado ao aumento significativo das perdas de energia eléctrica na rede. Como se pode verificar na figura 1.

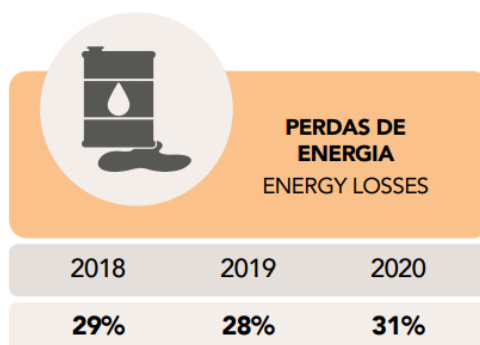


Figura 1: Aumento percentual de perdas de energia.

Fonte: EDM, 2020.

Autores como Merlin & Back (1975) citados por Vargas (2003) já identificaram dificuldades para encontrar uma configuração de perdas mínimas através de algoritmos exatos. De facto, as abordagens mais utilizadas conduzem a soluções aproximadas.

O combate às perdas de energia continua a constituir um enorme desafio para a EDM. Ciente dessa realidade, a Empresa levou a cabo diversas iniciativas, como: desenvolvimento de softwares, medidas de intervenção nos PTs, instalação de contadores, entre outros. Contudo, Oliveira (2016) afirma que o crescente aumento nos custos de distribuição devido ao aumento das perdas nos sistemas de distribuição, motiva os engenheiros a melhorarem os seus conhecimentos a respeito dos seus métodos de redução, do Sistema de Energia Elétrica e aplicá-los na operação destes.

E é nesta ordem de ideias que surge a questão de partida deste projecto:

- *Qual é o método mais eficaz para a redução de perdas técnicas de energia eléctrica na rede de distribuição de Baixa Tensão?*

1.3. Hipóteses

- i. **Hipótese Nula (H_0):** não há diferença significativa na eficácia dos métodos de redução de perdas técnicas de energia eléctrica em redes de distribuição de baixa tensão.
- ii. **Hipótese Alternativa (H_1):** existe diferença entre a eficácia dos métodos de redução de perdas de energia eléctrica em redes de distribuição de baixa tensão e pelo menos um método é mais eficaz do que os outros.

1.4. Justificativa

O tema justifica-se pelo facto de que, embora, felizmente, uma rede elétrica seja projetada para que opere em regime de funcionamento ideal e respeitando-se os limites de operação, estas características nem sempre são verificadas devido ao facto de que a rede estará sempre sujeita a perdas de energia resultantes do aumento significativo da camada consumidora e, por isso, da demanda de energia eléctrica ao longo do tempo acarretando com isso o aumento do custo de energia eléctrica. De acordo com o *Relatório e Contas*

2020 da EDM é constatado que a EDM busca reduzir o preço de energia no mercado regional, e opta pela introdução de medidas de aumento de investimento e os consumos dentro do país, para tal a EDM recorre ao combate às perdas de energia e adopção de medidas arrojadas de eficiência energética. Com isso, surge por consequência uma real necessidade de fazer-se um estudo dos métodos de redução de perdas de energia elétrica em redes de distribuição de Baixa Tensão (do qual neste trabalho tem-se ênfase nas perdas técnicas) com vista a que se identifique o método mais eficaz para que seja garantida a eficiência energética e, conseqüentemente, a qualidade de energia elétrica entregue aos consumidores de baixa tensão.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objectivo geral.

- Estudar os métodos de redução de perdas de energia elétrica em redes de distribuição de Baixa Tensão no Distrito Municipal de KaTembe.

1.5.2. Objectivos específicos

- Analisar as perdas de energia elétrica em redes de distribuição de Baixa Tensão;
- Analisar os métodos habitualmente usados para a redução de perdas de energia elétrica em redes de distribuição de Baixa Tensão;
- Calcular as perdas elétricas em redes de distribuição de Baixa Tensão;
- Simular uma rede de distribuição de Baixa Tensão para verificação do comportamento de vários métodos na redução das perdas;
- Identificar os métodos mais eficazes de redução de perdas de energia elétrica em redes de distribuição de Baixa Tensão.

1.6. Metodologia

A elaboração do trabalho, consistiu numa metodologia baseada em pesquisa descritiva e exploratória, que se baseou nos seguintes passos:

- I. Pesquisas por meio de revisões bibliográficas, desenvolvidas a partir de materiais já concluídos, composto por livros, revistas, artigos entre outros trabalhos acadêmicos, nos quais as informações que melhor se adequam ao tema foram analisadas e selecionadas;
- II. Pesquisa qualitativa, no qual recorreu-se a medições de carga e tensões de modo a obter resultados exatos das perdas de energia da rede de baixa tensão;
- III. Uso do método dedutivo, no qual realizou-se a análise das perdas de energia de modo geral e seguidamente analisado um caso específico no distrito municipal de KaTembe, que permitiu a identificação do método mais eficaz para a redução das perdas da rede de distribuição de baixa tensão;
- IV. Uso de simuladores, PSIM Simulate e AutoCad que permitiram uma apresentação gráfica dos diferentes métodos identificados.

CAPÍTULO 2: Revisão Literária

Neste capítulo, são descritas de modo amplo as características gerais de funcionamento duma rede de distribuição. São seguidamente apresentados alguns conceitos que regem o funcionamento dos seus elementos constituintes, considerando cada tipologia da rede. Ainda ao longo do capítulo, dar-se-ão a saber os tipos de perdas técnicas mais comuns em redes de distribuição, a fim de que sejam de seguida analisados os métodos habitualmente usados para a sua redução e/ou mitigação.

2.1. Rede de distribuição

Segundo Kundur, os Sistemas Elétricos de Energia, podem ser descritos como sistemas que convertem outras formas de energia em energia elétrica, transportando-a desde os locais de geração até aos pontos de consumo. E estes, deverão garantir:

- O controlo do equilíbrio entre potência ativa e reativa;
- O fornecimento de energia ao mais baixo custo, mas respeitando o ambiente;
- Satisfazer padrões mínimos de fiabilidade e estabilidade da tensão e frequência.

A rede de distribuição, constituindo uma das quatro etapas dos Sistemas Elétricos de Energia, segmentado em Produção, Transporte, Distribuição e Consumo é a que mais contribui para a deterioração do nível de Qualidade de Serviço.

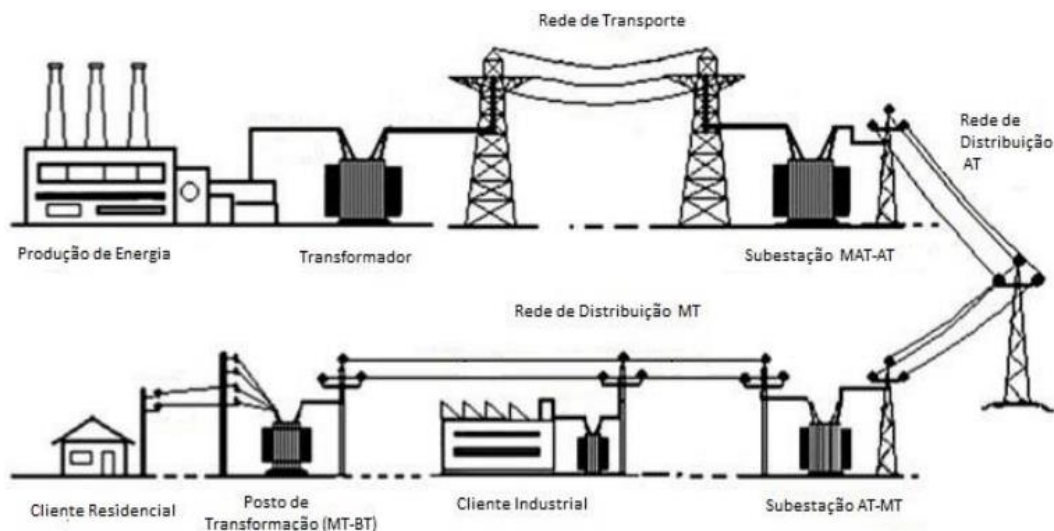


Figura 1: Sistema eléctrico de Potência.

Fonte: Canhoto, 2018.

Como já referido anteriormente, a função da rede eléctrica é transportar a energia dos centros de produção aos locais de consumo. Contudo, esse processo deve ser feito de maneira mais eficiente possível, isto é, minimizando as perdas de energia e os custos desse transporte.

Com isso, foram definidas escalas de tensão para transporte e distribuição de energia eléctrica. De acordo com a IEC, em Moçambique estas escalas estão definidas da seguinte forma:

- Baixa Tensão (BT) – 110, 220 e 400V;
- Média Tensão (MT) – 6.6, 11, 22 e 33 kV;
- Alta Tensão (AT) – 66, 110, 130 e 220 kV;
- Muito Alta Tensão – 275 kV;
- Extra-alta Tensão – 400 e 530 kV.

A rede de distribuição, é a rede que se situa mais próximo aos centros de consumo, como tal, por questões de segurança, o nível de tensão deste tipo de rede só se deve situar entre os valores de BT e de AT, e em certas zonas urbanas, a distribuição deve ser realizada por cabo subterrâneo.

2.1.1. Topologia das redes de distribuição

Construtivamente as redes de distribuição de energia eléctricas podem ser aéreas ou subterrâneas.

Estas soluções apresentam custos de instalação e asseguram níveis de qualidade de serviço bastante distintos pelo que de acordo com Lehtonen et al, as subterrâneas são implementadas em ambientes urbanos, apresentando comprimentos entre os 3 e 10 km, ao contrário das aéreas que se encontram maioritariamente em zonas rurais e apresentam comprimentos médios entre os 10 e 35 km. (Coelho, 2012)

Tabela 1: Vantagens e desvantagens de cabos subterrâneos e linhas aéreas.

Fonte: Coelho, 2012.

	Vantagens	Desvantagens
Linhas aéreas	• Capacidade de poder transportar grande quantidade de energia (50-60 MW); • Interrupções de pequena duração; • Facilidade na identificação e reparação dos defeitos.	• Pouco estético, o que pode criar problemas em zonas urbanas; • Maior frequência de defeitos em comparação com os cabos subterrâneos; • Perdas de energia mais elevadas.
Redes subterrâneas	• Muito estético e assegura uma maior segurança para as pessoas; • Menor frequência de defeitos em comparação com as linhas aéreas; • As perdas de energia tendem a ser menores do que nas linhas aéreas.	• Têm pouca capacidade para transporte de energia (25-30 MW por circuito); • Interrupções de maior duração devido à dificuldade em localizar e reparar a avaria; • Dificuldade na escavação em regiões rochosas.

A topologia duma rede de distribuição é apresentada conforme o nível de tensão e o tipo residencial envolvente. Assim, destacam-se quatro tipos de topografia: anel fechado, anel aberto, radial e dupla derivação. Destes, os mais utilizados são o radial e o anel aberto.

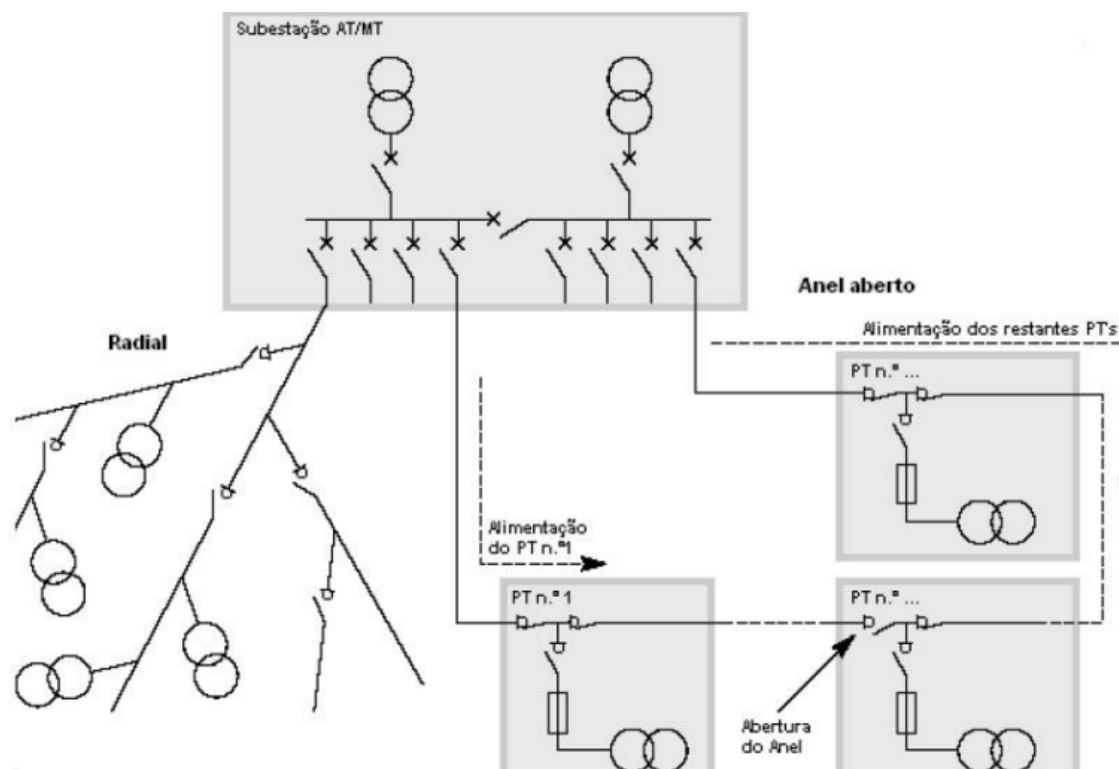


Figura 2: Esquemas de operação habitualmente utilizados em redes de distribuição.

Fonte: Coelho, 2012.

Autores como Coelho (2012) caracterizam distintamente estas duas topologias da rede, deste modo: as **redes radiais**, caracterizam-se por possuírem uma única linha para a alimentação dos consumidores, condicionando, desta forma, a realimentação dos mesmos na ocorrência dos defeitos. Este tipo de exploração apresenta baixo custo de instalação, sendo particularmente utilizadas na distribuição aérea e em zonas rurais, com baixa densidade de consumo. Por outro lado, as **redes em anel aberto** são dotadas de duas linhas de alimentação, o que possibilita a alimentação dos consumidores através de dois caminhos elétricos distintos. Em condições normais de alimentação, apenas um dos caminhos é utilizado, constituindo o outro caminho para alimentação dos consumidores em situações de defeito. Neste tipo de exploração verifica-se uma maior continuidade de serviço, sendo particularmente utilizadas na distribuição subterrânea e em zonas urbanas

2.2. Análise das perdas de energia eléctrica em redes de distribuição de baixa tensão

A rede eléctrica é composta por vários componentes que quando energizados estão sujeitos a perdas. Portanto, a energia é gerada e depois transportada através da rede, contudo parte dessa energia é perdida antes mesmo de ser entregue aos consumidores finais.

Embora as redes eléctricas sejam projectadas tendo em consideração certos limites de perdas admissíveis, à medida que vêm evoluindo ao longo do tempo, as dimensões da rede, as novas gerações e o aumento da demanda, é gerado um crescimento significativo das perdas, e por isso, verifica-se a necessidade de se realizar novas medições de modo a controlar essas perdas no sistema. Desta feita, é importante compreender que as perdas podem correr por fenómenos característicos da rede ou ainda por fenómenos externos a ela, por isso os tipos ou características dessas perdas são tidas como divergentes dependendo do tipo de processo no qual ocorrem. Contudo, quando o fluxo de corrente que atravessa um determinado equipamento eléctrico (como: transformadores, comutadores, cabos, entre outros) a energia eléctrica é perdida em forma de calor.

Com vista a obter-se o máximo rendimento possível da rede, é necessário que seja realizado um estudo exaustivo dela, de modo a obter-se um conhecimento abrangente e completo dos esforços e fenómenos a que está sujeita.

Uma grande parcela de energia desperdiçada que não é fornecida surge devido as perdas de energia eléctrica, que acarretam um prejuízo não só para o funcionamento da rede, mas também para o operador. Com isso, é justificada a necessidade de neste capítulo, estabelecer-se uma análise das perdas de energia eléctrica na rede de distribuição.

As perdas de energia eléctrica são divididas em dois tipos distintos, nomeadamente perdas técnicas e não técnicas. De modo geral, tem-se que as perdas técnicas são inerentes ao processo de transporte de energia eléctrica e podem ocorrer na própria rede ou nos equipamentos; as perdas não técnicas

são de origem externa a rede e podem ser devido a furto, erros de medição, entre outros. (Braz, 2019)

Neste trabalho serão abordados os métodos referentes às perdas técnicas.

2.2.1. Perdas técnicas

De acordo Strachan (2010) a com energia de um campo eletromagnético é transmitida desde a fonte de potência até as cargas por meio do espaço dielétrico do campo eletromagnético, sendo que os cabos são responsáveis pela manutenção de tal campo. Porém, sabe-se que durante a transmissão e a distribuição da energia, uma certa quantidade é perdida em todos os elementos da rede elétrica.

Por serem fisicamente intrínsecas à distribuição da energia elétrica, tais perdas são reconhecidas integralmente na composição das tarifas de energia elétrica das distribuidoras. Deste modo, o consumidor paga tanto pela energia consumida por ele quanto pelo rateio das perdas necessárias para o seu transporte. Os principais tipos de perdas técnicas na distribuição são as perdas por efeito Joule, que ocorrem nos cabos das linhas de distribuição e nos enrolamentos dos transformadores, e as perdas no núcleo dos transformadores, que são devidas ao efeito de Histerese e Foucault. (Strachan, 2010)

2.2.1.1. Perdas nos transformadores

Os transformadores são o elo entre as linhas de transmissão e distribuição de energia com os centros de produção e os locais de consumo. Neste processo são usados transformadores de energia, quer na produção, com a elevação de energia para níveis de muita alta tensão (MAT), quer na distribuição para consumidores. É ao nível da transformação de energia nas subestações, nomeadamente nos transformadores, que há as maiores perdas de energia elétrica no sistema. (Eusébio, 2017)

As perdas nos transformadores ocorrem principalmente em seus enrolamentos, devido ao efeito Joule e no núcleo, devido às suas características construtivas e do material ferromagnético. As perdas no núcleo são classificadas em perdas por Histerese, que ocorrem devido à saturação do material ferromagnético,

e perdas por Foucault, ou perdas por correntes parasitas, que ocorrem devido à circulação de correntes no material ferromagnético do núcleo, gerando aquecimento. As correntes parasitas surgem no núcleo devido à diferença de potencial magnético existente por todo seu material, devido ao fluxo magnético ser variável. Como essas perdas são próprias dos transformadores, de modo que é impossível um transformador operar sem que tenha perdas de energia, tais perdas são incluídas na parcela de perdas técnicas da distribuição. (Braz, 2019)

As perdas no cobre dependem do fator de carga. Assim, quanto maior a carga no transformador, maiores serão as perdas por efeito de *Joule*, que resulta em perdas na rede eléctrica.

2.2.1.2. Perdas por efeito joule

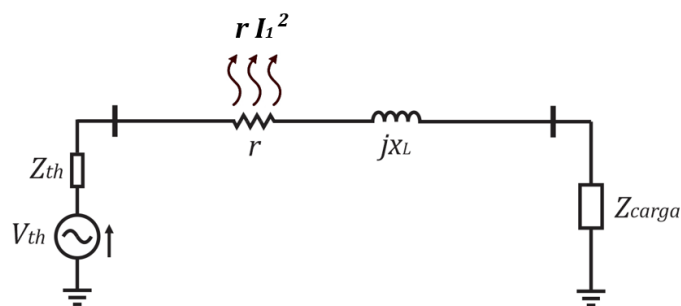


Figura 3: Perdas nas linhas, que ocorrem predominantemente devido ao efeito Joule dos condutores.

Fonte: Braz, 2019.

De acordo com Eusebio (2017) as perdas por efeito Joule estão presentes em todos os condutores eléctricos, pois dizem respeito a perdas em resistores. Mais expressamente, é a energia convertida em calor quando uma corrente eléctrica passa por um resistor.

Braz (2019) realiza a análise este efeito, do qual são primeiramente analisadas as formulações de potência instantânea em condições senoidais. Para tal, considera-se uma resistência alimentado diretamente por uma fonte de tensão senoidal, cuja forma de onda é dada por:

$$v_1(t) = V_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1) \quad 2.1$$

Deste modo, a corrente instantânea e dada por:

$$i_1(t) = I_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1) \quad 2.2$$

Visto que a potência total é dada pelo produto dos valores instantâneos da tensão e da corrente, temos:

$$p(t) = v(t) \times i(t) \quad 2.3$$

Substituindo pelas equações correspondentes, temos:

$$p_1(t) = V_{1m} I_{1m} \sin^2(\omega t + \varphi_1) \quad 2.4$$

$$p_1(t) = V_1 I_1 (1 - \cos(2\omega t + \varphi_2)) \quad 2.5$$

Com a expressão acima, nota-se que é apresentada uma forma de onda cossenoidal de amplitude $V_1 I_1$, com o dobro da frequência fundamental, não sendo constante no tempo. Contudo, o seu valor médio é dado como a potência activa fundamental, como demonstrado abaixo:

$$P_1 = \frac{1}{T} \int_0^T v_1 i_1 dt \quad 2.6$$

$$P_1 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{1m} I_{1m} \sin^2(\omega t + \varphi_1) dt \quad 2.7$$

$$P_1 = V_1 I_1 \quad 2.8$$

Substituindo na equação obtida para potência total temos:

$$p_1 = P_1 - P_1 \cos(2\omega t + \varphi_2) \quad 2.9$$

De acordo com a lei de Ohm, a expressão da potência activa pode ainda ser descrita por:

$$P_1 = R I_1^2 \quad 2.10$$

Esta expressão determina a potência activa dissipada por uma resistência, que é convertida em calor, gerando deste modo o efeito Joule. Como os condutores eléctricos presentes nas linhas de transmissão e distribuição possuem uma composição resistiva, durante a transmissão de potência da fonte do sistema até a carga, ao passar a corrente eléctrica pelos condutores, estes dissipam potência activa em forma de calor. Deste modo, surgem as perdas nas linhas, que ocorrem predominantemente devido ao efeito Joule dos condutores, conforme ilustra a Figura 3.

2.3. Análise dos métodos habitualmente usados para a redução de perdas de energia eléctrica em redes de distribuição de Baixa Tensão

Em 2.2. foi feita a análise das perdas mais comuns nos sistemas de distribuição de baixa tensão, nomeadamente perdas por efeito Joule e no transformados.

Neste capítulo, pretende-se primordialmente dar a conhecer os métodos comumente usados para a redução destas perdas de energia eléctrica na rede de distribuição de baixa tensão, que afinal, comprometem o funcionamento correcto da rede.

Segundo autores como Bulhões (2011) e Santos (2013), algumas ações podem reduzir as perdas de energia no sistema de distribuição de baixa tensão, estas, podem ser definidas como métodos caracterizados como:

1. Instalação de banco de capacitores;
2. Equilíbrio de fases;
3. Regulação de tensão na baixa tensão;
4. Aumento da secção condutora da rede secundaria;
5. Troca dos transformadores de distribuição;
6. Divisão da rede;
7. Fechamento em anel da rede secundaria;

2.3.1. Instalação de banco de capacitores

De acordo com Bulhões (2011) a injeção de energia reativa no Sistema de Distribuição através da instalação de banco de capacitores promove algumas variações das grandezas eléctricas existentes na rede. Basicamente, três efeitos são ocasionados:

- Redução da corrente da linha em um circuito indutivo
- Elevação dos níveis de tensão
- Redução das perdas, que envolve redução de energia e de demanda.

2.3.1.1. Redução da corrente da linha num circuito indutivo

A redução do modulo da corrente elétrica no horário indutivo com a instalação de um banco de capacitores e ilustrada pelo diagrama fasorial, conforme a figura abaixo:

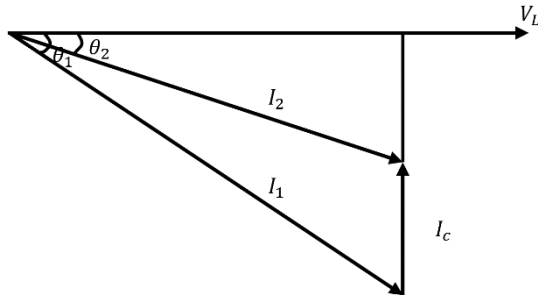


Figura 4: Diagrama fasorial das correntes e das tensões com e sem a instalação de banco de capacitores.

Fonte: Bulhões, 2011.

Em que:

V_L : Modulo da tensão no primário do transformador de distribuição

I_1 : Modulo da corrente sem o banco de capacitores

I_2 : Modulo da corrente com o banco de capacitores

I_c : Modulo da corrente injetada a rede pelo banco de capacitores

ϕ_1 : Defasagem angular entre a corrente e a tensão sem o banco de capacitores

ϕ_2 : Defasagem angular entre a corrente e a tensão com o banco de capacitores

Percebe-se que a nova defasagem angular (ϕ_2) entre a corrente e a tensão é menor do que a primeira (ϕ_1). Em outras palavras, o fator de potência aumentou, com a instalação do banco de capacitores.

O fasor $\hat{I}_1$ pode ser escrito conforme a equação seguir:

$$\hat{I}_1 = I_1 \cos \phi_1 - jI_1 \sin \phi_1 \quad 2.111$$

Enquanto, o fasor $\hat{I}_2$ é expresso por:

$$\hat{I}_2 = I_1 \cos \phi_1 - j(I_1 \sin \phi_1 - I_c) \quad 2.112$$

Com isso, o modulo da redução de corrente (RC) em relação a I_1 e em valores percentuais é:

$$RC_{\%} = \left| \frac{I_1 - I_2}{I_1} \right| \times 100 \quad 2.113$$

Fazendo as devidas manipulações algébricas, obtém-se:

$$RC_{\%} = 1 - \sqrt{\left[\cos^2 \phi_1 + \left(\sin \phi_1 - \frac{I_C}{I_1} \right)^2 \right]} \times 100 \quad 2.114$$

2.3.1.1. Redução da queda de tensão

Com a redução da corrente, ocorre a redução da queda de tensão e, como consequência, elevação dos níveis de tensão da rede primaria. A formula a seguir apresenta a queda de tensão ao longo do alimentador, sem o banco de capacitores:

$$V_L = V_S - I_L \cdot (R \cos \phi_1 + X \sin \phi_1) - jI_L (X \cos \phi_1 - R \sin \phi_1) \quad 2.115$$

Onde:

V_L : Tensão de linha no primário do secundário de distribuição

V_S : Tensão de linha no secundário do secundário da subestação

I_L : Corrente de linha no trecho entre o transformador de distribuição e o consumidor

R : Resistência por fase do alimentador primário

X : Reatância por fase do alimentador primário

ϕ_1 : Defasagem angular entre a corrente e a tensão

A reatância X e, na verdade o resultado da soma entre X_{SE} e X_{a1} , na qual X_{SE} e a reatância de sequência positiva na barra da subestação e X_{a1} e a reatância de sequência positiva do trecho que liga a subestação ao banco de capacitores. E possível, em determinados casos, desprezar a reatância X_{SE} .

A adição do banco de capacitores implica em:

$$V_L = V_S - [I_L \cdot (R \cos \phi_1 + X \sin \phi_1) - jI_L (X \cos \phi_1 - R \sin \phi_1) - RI_C] \quad 2.116$$

Em aplicações práticas, é comum usar a fórmula da equação 2.15, mostrada logo abaixo:

$$V_L = V_S - I_L \cdot (R \cos \phi_1 + X \sin \phi_1) \quad 2.117$$

Com isso, a equação 4.6, pode ser escrita como:

$$V_L = V_S - [I_L \cdot (R \cos \phi_1 + X \sin \phi_1) - RI_C] \quad 2.118$$

Desta feita, a queda de tensão percentual sem o banco de capacitores, utilizando a equação simplificada, em relação a tensão de saída do transformador da subestação, e expressa a seguir:

$$\Delta V_{1\%} = \left(\frac{V_S - V_L}{V_S} \right) \times 100 = \frac{I_L \cdot (R \cos \phi_1 + X \sin \phi_1)}{V_S} \times 100 \quad 2.119$$

Quando o banco de capacitores é acrescido, a equação simplificada torna-se:

$$\Delta V_{2\%} = \left(\frac{V_S - V_{L2}}{V_S} \right) \times 100 = \frac{I_L \cdot (R \cos \phi_1 + X \sin \phi_1) - XI_C}{V_S} \times 100 \quad 2.20$$

Logo, a redução da queda de tensão percentual, que é a diferença entre as duas quedas de tensão com e sem o banco de capacitores – em relação a tensão na saída do transformador, e expressa por:

$$\Delta V_{ganho\%} = \Delta V_{1\%} - \Delta V_{2\%} = \frac{XI_C}{V_S} \times 100 \quad 2.21$$

Como $i = \frac{S}{\sqrt{3}V}$ e $I_C = \frac{Q}{\sqrt{3}V}$, temos:

$$\Delta V_{ganho\%} = \frac{X \cdot Q}{\sqrt{3}V^2}, \quad 2.22$$

Esta última equação representa o aumento percentual da tensão no ponto onde estão instalados os capacitores.

2.3.1.2. Redução das perdas de demanda ΔP

Matematicamente, a redução das perdas de demanda pode ser escrita da seguinte forma:

$$\Delta P = 3R \left\{ (i^2 \cos^2 \phi + i^2 \sin^2 \phi) - \left(i^2 \cdot \cos^2 \phi + (i \sin \phi - I_C^2) \right) \right\} \quad 2.23$$

Onde:

ΔP : redução das perdas de demanda (kW);

i : valor instantâneo da corrente de linha (A);

R : resistência da linha no trecho entre a subestação e o banco de capacitores (Ω/fase);

I_C : corrente injetada à rede pelo banco de capacitores;

ϕ : defasagem angular entre a corrente e a tensão.

Deduzindo matematicamente a equação acima, tem-se:

$$\Delta P = 3RI_C(2i \sin \phi - I_C) \quad 2.24$$

Como $i = \frac{S}{\sqrt{3}V}$ e $I_C = \frac{Q}{\sqrt{3}V}$, temos:

$$\Delta P = \frac{R(2S \sin \phi - Q)}{V^2} [\text{kW}] \quad 2.25$$

Onde:

V : tensão da linha;

S : potência aparente;

Q : potência reativa dos capacitores fixos ou automáticos.

As expressões acima exprimem a redução das perdas elétricas de demanda, em valores instantâneos, de um sistema trifásico, em função da potência do banco de condensadores para uma carga concentrada no final do alimentador.

Para uma carga uniformemente distribuída, em função da potência do banco de capacitores, obtém-se:

$$\Delta P = \frac{2}{3} \frac{R}{V^2} \left(\frac{4}{3} S \sin \phi - Q \right) [\text{kW}] \quad 2.26$$

2.3.1.3. Redução das perdas de energia ΔP_E

As perdas de energia, são derivadas das perdas de demanda e representadas matematicamente da seguinte forma:

$$\Delta P_E = 3R \int_{T_1}^{T_2} \left\{ (i^2 \cos^2 \phi + i^2 \sin^2 \phi) - (i^2 \cdot \cos^2 \phi + (i \sin \phi - I_C^2)) \right\} dt \quad 2.27$$

Onde T_1 e T_2 são os tempos inicial e final da medição, respectivamente.

Deduzindo matematicamente a equação acima, tem-se:

$$\Delta P_E = 3RI_C \int_{T_1}^{T_2} (2i \sin \phi - I_C) dt \quad 2.28$$

Assim sendo, temos:

$$\Delta P_E = \frac{3RQ}{V^2} \left[2 \sin \phi \int_{T_1}^{T_2} S dt - Q(T_1 - T_2) \right] [kWh] \quad 2.29$$

$$\Delta P_E = \frac{3RQ}{V^2} [2 \sin \phi \cdot FC \cdot S_{max}(T_1 - T_2) - Q(T_1 - T_2)] \quad 2.30$$

$$\Delta P_E = \frac{3RQ}{V^2} (T_1 - T_2) [2 \sin \phi \cdot FC \cdot S_{max} - Q] [kWh] \quad 2.31$$

Esta expressão é válida para qualquer período e aplica-se a carga concentrada no final do alimentador.

Para uma carga uniformemente distribuída obtém-se a equação:

$$\Delta P_E = \frac{3RQ}{V^2} \cdot \frac{2}{3} \cdot (T_1 - T_2) \left[\frac{4}{3} \sin \phi \cdot FC \cdot S_{max} - Q \right] [kWh] \quad 2.32$$

2.3.2. Equilíbrio de fase

Fernandes (2010) afirma que, as redes de BT são alimentadas por um sistema trifásico de tensões, de igual amplitude e desfasadas de $\pm 120^\circ$, tal que:

$$V_1 + V_2 + V_3 = 0 \quad 2.33$$

No entanto, a carga eléctrica destas redes é inerentemente desequilibrada porque esta é constituída maioritariamente por cargas monofásicas a alimentar. Assim, as tensões e correntes das redes de BT são também desequilibradas, ou seja, as amplitudes são diferentes, e/ou desfasamento é diferente de 120° . Isto leva ao aparecimento de uma corrente no condutor de neutro. Na figura abaixo, é apresentado um exemplo de um desequilíbrio nas amplitudes das correntes e a respectiva corrente de neutro gerada pelo desequilíbrio.

$$I_0 = I_1 + I_2 + I_3$$

2.34

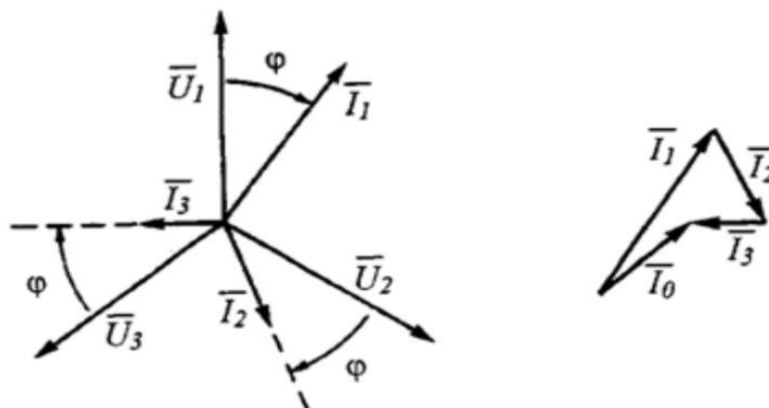


Figura 5: Diagrama vectorial das tensões e correntes numa situação de desequilíbrio e respectivamente obtenção da corrente de neutro por soma vectorial das correntes de fases.

Fonte: Fernandes, 2010.

Como referido, a carga é normalmente desequilibrada, mas não é comum a diferença entre a maior amplitude e a menor amplitude das correntes seja superior a 50%. No entanto, o grau de desequilíbrio varia ao longo da extensão da rede. (Fernandes, 2010)

Com o objetivo de reduzir as perdas totais de energia e diminuir as quedas de tensão em determinadas fases, busca-se fazer o equilíbrio entre fases, devendo-se tolerar um desbalanceamento máximo de 15%. (Araujo, 2011)

Para a redução do equilíbrio de fase é necessário:

1. Identificar a demanda máxima $D_{\max}$ na curva do transformados
2. No primeiro poste, identificar a demanda por fase de cada consumidor no momento de demanda máxima $D_{\max}$
3. Somar a potência por fase de todos os consumidores trifásicos para se ter D_{faseA} , D_{faseB} , D_{faseC} ,
4. Identificar o consumo bifásico de maior demanda e locá-los nas duas fases menos carregada
5. Executa a mesma tarefa para todos os consumidores bifásicos, em ordem decrescente de demanda
6. Identificar o consumidor monofásico de maior demanda e locá-los na fase menos carregada

7. Executar a mesma tarefa para todos os consumidores monofásicos, em ordem decrescente de demanda
8. Repetir o processo nos outros postes
9. Listar todos os consumidores que mudam de fase, sabendo-se da fase em que estavam e da fase em que estão
10. Multiplicar as mudanças de fase realizadas pelo custo médio da mão-de-obra.

2.3.3. Regulação de tensão

Os reguladores de tensão são autotransformadores com *taps* ou derivações em seus enrolamentos. A utilização destes equipamentos nos sistemas de distribuição tem por objectivo manter a tensão constante em determinados pontos da rede secundária (Usida, 2007).

Normalmente os reguladores possuem uma faixa de regulação de -10% a 10% podendo ser operado no modo automático ou manual e, geralmente, estes dispositivos são aplicados em pontos ao longo do alimentador em que a tensão não consegue ser regulada através da subestação.

2.3.4. Aumento da secção condutora da rede secundária

Segundo Oliveira (2009) o aumento da secção condutora consiste na substituição de condutores com o objetivo de reduzir as perdas no Sistema de Distribuição. As perdas de demanda nos condutores da rede eléctrica são calculadas através da seguinte expressão:

$$\Delta P = R \cdot I_{RMS}^2 \quad 2.35$$

Na medida em que é aumentada a secção transversal do condutor, diminui-se a resistência e a reatância deste. Dessa forma, pode-se inferir que menores serão as suas perdas por efeito Joule. Como consequência, a substituição de um condutor por um de bitola maior provoca uma redução na queda de tensão.

A expressão para o cálculo da queda de tensão ao longo do condutor é dada a seguir:

$$|\Delta V| = |Z| \cdot I_{RMS}^2 = \sqrt{R^2 + X^2} \cdot I_{RMS}^2 \quad 2.36$$

Onde:

ΔV : Queda de tensão ao longo do condutor

I_{RMS} : Valor eficaz da corrente eléctrica

Z: Impedância do condutor

R: Resistência do condutor

X: Reatância do condutor

Normalmente, o condutor não é utilizado com o objetivo de corrigir níveis de tensão. Este efeito acontece como consequência. O método que é tipicamente utilizado para este fim, e o uso de reguladores de tensão, sendo este último mais vantajoso economicamente do que o primeiro para este propósito.

Embora seja evidente que quanto maior é a secção transversal do condutor, menores são as perdas de linha, o custo associado ao aumento da secção condutora é frequentemente demasiado. Geralmente, o aumento da secção condutora é justificado em redes mais antigas, que operam aproximadamente a capacidade do sistema. (Sárfi et al., 1995)

2.3.5. Troca dos transformadores de distribuição

Fernandes (2010) afirma que a implementação de novas subestações está relacionada, em alguns casos a Planos de Expansão do setor eléctrico, os visam atender ao crescimento da demanda ao longo dos anos, levando-se em consideração a:

- Substituição de condutores;
- Instalação de equipamentos correctivos;
- Ampliação de subestações existentes;
- Instalação de novos transformadores.

A construção de uma nova subestação também pode ser utilizada pelo sector de planeamento de distribuição, com o objetivo de reduzir as perdas em um Sistema de Distribuição e diminuir as quedas de tensão ao longo dos alimentadores.

De acordo com Cipoli (1993), a necessidade de implementação de novos transformadores pode ser justificada por

a) Localidade onde já existe um transformador:

- Carregamento de 100% da capacidade nominal do transformador
- Carga da área a ser atendida pelo novo transformador
- Quedas de tensões superiores a 5%
- Perda de potência superior a 10%

2.3.6. Divisão da rede

A divisão da rede secundária é usada nas situações em que os componentes da rede, em especial, transformadores e os condutores, estão sobrecarregados. Além deste caso, existe também a necessidade de se fazer o seccionamento da rede secundária quando, devido a sua extensão, há uma queda acentuada da tensão a níveis não permitidos. (Araújo, 2011)

Em suma, a execução deste método tem como objetivo a diminuição das perdas das quedas de tensão, levando-se em conta as perdas por efeito Joule e as perdas devido ao carregamento dos transformadores de distribuição. Como consequência, este método traz o aumento da vida útil e a redução do risco de queima destes equipamentos.

Antes que a divisão da rede secundária seja efetivamente executada, deve-se simular o fluxo de potência e verificar como se comporta a rede quando esta é dividida em duas. Vale ressaltar que os dois transformadores devem ser colocados no centro de cargas destas duas novas redes e que deve ser feito o recondutoramento adequado no barramento do transformador, assim como equilíbrio entre as fases sempre que houver necessidade. (Bulhões, 2011)

Bulhões (2011) afirma ainda que, se mesmo após essa divisão, as simulações com todos os tap's testados mostrarem que ainda há tensões fora do limite e condutores sobrecarregados, deve-se estudar a viabilidade de dividir a rede em três partes. Caso o seccionamento da rede em três partes não atenda, deve-se pensar na possibilidade de dividi-la em quatro e assim sucessivamente, lembrando-se de comparar com outros métodos e observar qual o mais viável sob ponto de vista técnico-econômico.

2.4. Cálculo de perdas eléctricas em redes de distribuição de Baixa Tensão

De acordo com Dortolina e Nadira (2005), os métodos para o cálculo das perdas técnicas que requerem uma base de dados detalhada do sistema tendem a obter resultados mais satisfatórios; porém o problema encontrado pelas distribuidoras de energia é a obtenção dessa qualidade de dados, e qual a sua consistência com relação à realidade. Assim, torna-se importante a busca por métodos consistentes para serem usados nas diferentes realidades. Os métodos podem ser mais detalhados e exatos em função dos dados disponíveis, mas em geral podem ser divididos em: *Bottom-Up*, *Top-Down* e híbrida *Top-Down/ Bottom-Up*.

Bottom-Up – quando se tem conhecimento completo e detalhado do sistema: curvas de carga de consumidores, alimentadores, dados de rede de média tensão, transformadores, redes de baixa tensão, ramais de ligação, medidores, etc. Neste caso, os cálculos eléctricos podem ser feitos com mais precisão a partir de simulação da operação ou cálculo de fluxo de potência, para os diferentes níveis de carga, partindo dos consumidores para a subestação.

Top-Down – esta abordagem consiste no cálculo das perdas, em geral, pela estimação partindo da subestação e chegando aos consumidores. Estes métodos são utilizados quando poucos dados do sistema estão disponíveis.

Geralmente é feita uma estimação global das perdas do sistema a partir de comparação com sistemas similares, ou também calculadas em alguns segmentos da rede.

Híbrida Top-Down / Bottom-Up – Quando se tem dados detalhados de apenas uma parte da rede, e poucos dados de outras zonas.

Aquando do cálculo das perdas técnicas, outro factor que é necessário ter-se em conta é a forma como o sistema é representado e analisado. A quantificação das perdas técnicas por segmento do sistema permite identificar as áreas e/ou componentes que apresentam maior contribuição e, consequentemente, priorizar ações para sua redução. Desta feita, estes

métodos realizam os cálculos das perdas técnicas por segmentos. Oliveira (2000) afirma que estes segmentos podem ser:

- Subestação De Distribuição;
- Rede De Média Tensão;
- Transformadores De Distribuição;
- Rede De Baixa Tensão;
- Ramal De Ligação;
- Medidor de Energia;
- Entre Outros.

Na Figura 6 é apresentado um sistema de distribuição típico dividido pelos segmentos descritos acima. Na figura são mostrados os principais dados de cada um dos segmentos para os cálculos das perdas técnicas, em especial para os métodos *Bottom-Up*.

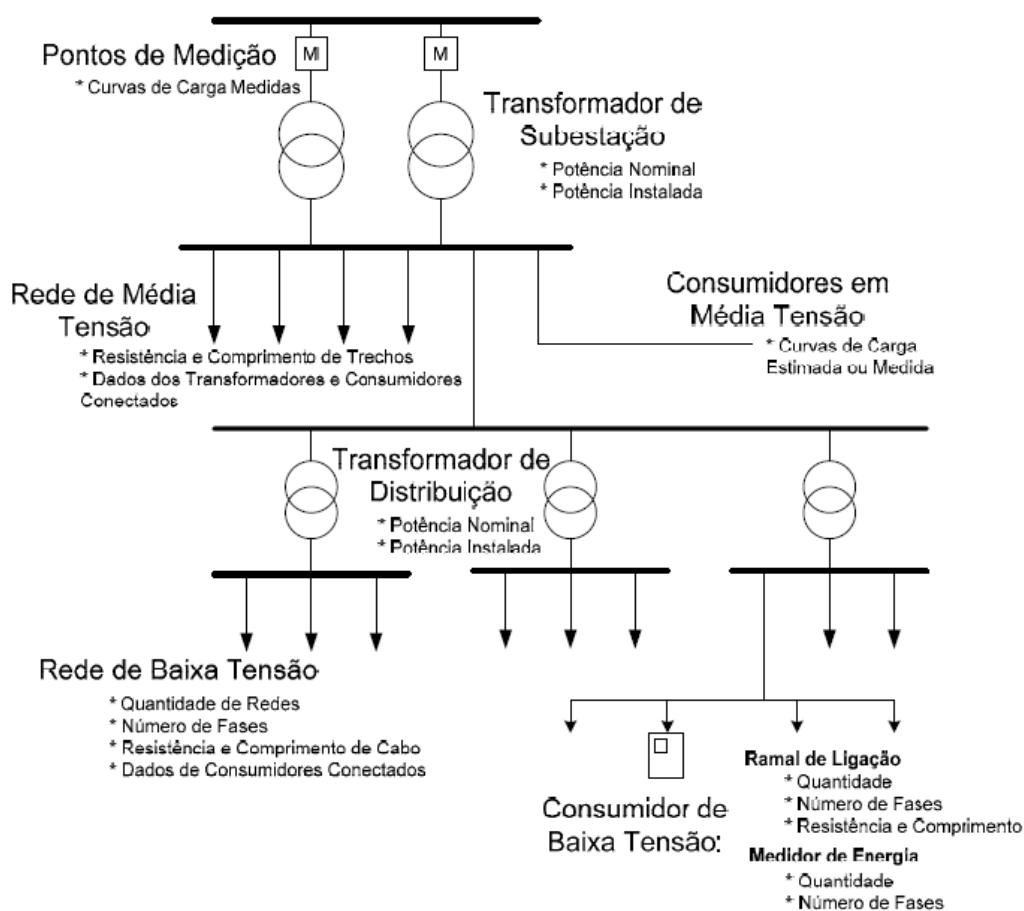


Figura 6: Segmentos do sistema de distribuição.

Fonte: Oliveira, 2009.

Para o cálculo das perdas de energia na rede de distribuição, subentende-se a existência de diversos métodos, dos quais a implementação e/ou escolha de cada um deles depende do objectivo da análise, da quantidade de dados necessários e do tempo disponível para a recolha e processamento dos cálculos. Sendo ainda importante frisar que o cálculo de perdas técnicas nos sistemas de distribuição é realizado por segmento e com recurso aos métodos *Bottom-Up* (CODI-MOD) e *Top-Down*.

Neste trabalho, adotou-se o método *top-down*, em uma proposta apresentada em Aneel-prodist (2008) cujo objectivo é definir indicadores para avaliação das perdas nos segmentos de distribuição de energia eléctrica e então, estabelecer o método e os procedimentos para apuração das perdas dos sistemas de distribuição de energia eléctrica. Este método tem por base algumas hipóteses simplificadoras:

- Quando o factor de potência típico da rede for menor que o valor do factor de potência de referência, é adotado este último;
- As cargas são consideradas distribuídas de forma equilibrada nas fases das redes trifásicas das redes de media tensão;
- Nas redes de baixa tensão considera-se perdas adicionais de 15% sobre o total das perdas técnicas calculadas, devido ao desequilíbrio da carga e o posicionamento assimétrico do transformador de distribuição;
- Considera-se os níveis de tensão nominal de tensão das empresas;
- Para o cálculo das perdas nos transformadores são utilizados valores normalizados.

2.4.1. Transformadores de distribuição

Segundo Oliveira (2008), de acordo com o método *Top-down*, para um posto de transformação com um transformador na ligação delta-estrela, as suas perdas são dadas por:

$$e_t = S_N \left[\frac{r}{3} (i_{R,i}^2 + i_{S,i}^2 + i_{T,i}^2) + perdas_{fe} \right] \quad 2.37$$

Onde:

S_N : Potência nominal do transformador;

r : Resistência ou perda no cobre à plena carga do transformador;

$perdas_{fe}$: Perdas nominais no ferro;

$i_{R,i}, i_{S,i}, i_{T,i}$: Correntes nos enrolamentos secundários do transformador, no instante i .

2.4.2. Rede de Baixa Tensão

Em Méffe et al (2002) o procedimento de cálculo das correntes nos trechos é realizado dos trechos finais até a estação transformadora. Uma vez determinadas as correntes em todos os trechos (fase e neutro), pode-se então calcular as perdas na rede de BT. Para cada trecho da rede as perdas de energia na rede primária (e_{rp}) podem ser calculadas por:

$$e_{rp} = \frac{r}{1000} \left[\frac{i^2 l^2}{3} + i(I_j)l + I_j^2 \right] \quad 2.38$$

Onde:

r : Resistência ôhmica por unidade de comprimento [Ω/km];

i : Densidade de corrente, dado pela corrente máxima do circuito dividido por seu comprimento total [A/km];

l : Comprimento do trecho, dado pelo comprimento total do circuito dividido pelo número de trechos elementares referentes a respectiva tipologia [km];

I_j : Corrente total a jusante do trecho elementar [A].

2.4.3. Perdas nos ramais de ligação

Segundo Oliveira (2009) para o cálculo das perdas nos ramais de ligação, foi definido um ramal típico por classe de consumo, com comprimento e resistência ohmica dos condutores pré-fixados. Desta forma, a perda de energia diária no ramal de ligação de um consumidor será obtida por:

$$e_r = \frac{k \cdot R \cdot L \cdot \Delta t \cdot \sum_{i=1}^{N_t} I_i^2}{1000} \quad 2.39$$

Onde:

k : é o número de condutores do ramal de ligação em que flui corrente ($k = 2$ para consumidores

monofásicos e bifásicos e $k = 3$ para consumidores trifásicos);

R : é a resistência ôhmica dos condutores [Ω/km];

L : é o comprimento médio do ramal [km];

I_i : é a corrente no ramal no período i do dia [A];

Δt : é a duração do intervalo da curva de carga [h];

N_t : é o número de períodos do dia.

2.4.4. Perdas nos contadores de energia

De acordo com Oliveira (2009), as perdas nos contadores de energia são basicamente devido as perdas no ferro das bobinas de potencial, e podem ser consideradas aproximadamente constantes, pois independem da carga. Desta forma, a perda de energia nos contadores (e_m) será obtida por:

$$e_m = \frac{p_m \cdot N_m \cdot (i_1 + 2i_2 + 3i_3) \cdot T}{1000} \quad 2.40$$

Onde:

e_m : perda de energia nos contadores de energia [kWh];

p_m : é a perda média por elemento medidor de energia [W];

N_m : é o número total de medidores;

i_1 : é a percentagem de medidores monofásicos;

i_2 : é a percentagem de medidores bifásicos;

i_3 : é a percentagem de medidores trifásicos;

T : é o intervalo de tempo considerado [h].

Oliveira (2009) afirma que o valor da perda de demanda média por elemento medidor para os medidores electromecânicos e obtido em laboratório, e encontra-se normalmente entre 1,2 e 1,5 W. A grande maioria dos medidores utiliza o valor de 1,2 W nos cálculos de perdas.

2.4.5. Quedas de tensão

De acordo com Mamede Filho (2017) a resistência do condutor é o indicador responsável pela relação entre a queda de tensão e as perdas de energia num sistema eléctrico. Com isso, para se minimizar as perdas numa rede eléctrica, é importante dimensionar adequadamente os condutores e manter as quedas de tensão nos limites aceitáveis. Essas quedas de tensão do sistema podem ser obtidas pela relação entre a tensão de entrada e tensão de carga, conforme 2.42.

$$\Delta V_c = \frac{V_{entrada} - V_{carga}}{V_{entrada}} \quad 2.42$$

Sendo as perdas eléctricas no condutor dadas por:

$$\Delta P = R \cdot I_B^2 \quad 2.43$$

Dado que: $R = \frac{\rho \cdot l}{S_c}$

Nota-se que é imprescindível que sejam conhecidos os dados do condutor, com vista a que se determine as suas quedas de tensão por secção. Este cálculo deve ser realizado para circuitos monofásicos e trifásicos, conforme 2.44 e 5.11.

2.4.5.1. Circuitos monofásicos

$$\Delta V_c = \frac{200 \rho \sum l \cdot I_B}{S_c \cdot V_{fn}} \quad 2.44$$

Onde:

S_c : Secção [mm²]

ΔV_c : Queda de tensão máxima [%]

V_{fn} : Tensão do circuito fase-neutro [V]

l : Comprimento do circuito [m]

I_B : Corrente de projecto [A]

ρ : resistividade do material condutor

Da expressão 2.44, por meio de simplificações tem-se que as perdas eléctricas para circuitos monofásicos são dadas por:

$$\Delta P = \frac{\Delta V_C \cdot V_{fn} \cdot I_B}{200} \quad 2.45$$

2.4.5.1. Circuitos trifásicos

$$S_C = \frac{100 \cdot \sqrt{3} \cdot \rho \sum l \cdot I_B}{\Delta V_C \cdot V_{ff}} \quad 2.46$$

$$\Delta V_C = \frac{\sqrt{3} \cdot l \cdot I_B (R \cdot \cos \varphi + X \sin \varphi)}{10 \cdot N_{cp} \cdot V_{ff}} \quad 2.47$$

Onde:

V_{ff} : Tensão de fase-fase [V];

N_{cp} : Número de condutores em paralelo por fase;

R: Resistência do condutor [mΩ/m];

X: Reactância do condutor [mΩ/m];

φ : angulo do fator de potência da carga.

Da expressão 2.46, por meio de simplificações tem-se que as perdas eléctricas para circuitos trifásicos são:

$$\Delta P = \frac{\Delta V_C \cdot V_{ff} \cdot I_B}{100\sqrt{3}} \quad 2.48$$

CAPÍTULO 3: Análise dos Dados

O caso em análise consiste do levantamento completo dos dados de um Posto de Transformação de distribuição (PT), com vista a se fazer a análise das perdas técnicas que são verificadas na rede de Baixa Tensão.

Os dados completos do sistema foram obtidos através de uma pesquisa de dados e medições no campo que foram feitos em KaTembe em coordenação com a EDM. Porém, a dificuldade na obtenção desses dados justifica a implementação e análise de métodos que utilizam base de dados reduzida.

Da rede eléctrica, foi primeiramente identificado um PT cujos dados da chapa característica foram verificados, seguidamente foram analisadas as condições nas quais o PT está a operar, de modo que se constatou a existência de extensões longas e/ou redes precárias. Foram ainda realizadas medições das quedas de tensão fase-fase e fase-neutro de seguida medições de carga na saída e alimentador do PT.

Desta feita, foi-se à base de dados da EDM para que se fizesse o levantamento de todos outros dados existentes no sistema, e necessários para a aplicação dos métodos.

A figura abaixo, obtida com recurso ao sistema para gestão dos ativos da rede onde se conhece todo PT da rede e suas especificações usado pela EDM designado *dpPower*, ilustra o PT136R e suas extensões, no Distrito Municipal de KaTembe.

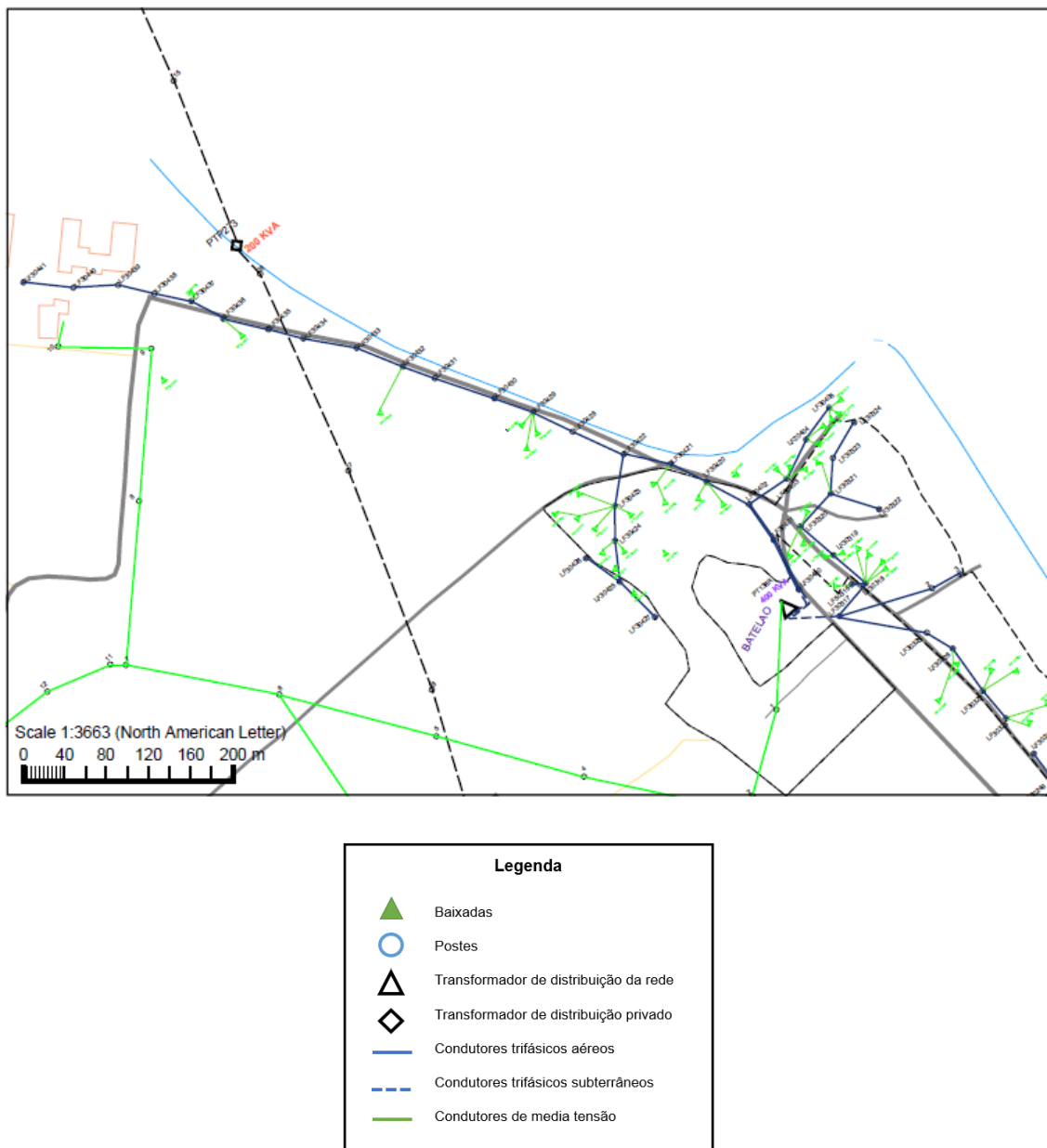


Figura 7: PT136R, no Distrito Municipal de KaTembe.

Fonte: EDM.

São agora apresentados os dados resultantes das medições de carga e medições de tensão fase-neutro e fase-fase. Estas medições foram realizadas em dias diferentes, com vista a que se aproximasse da realidade da região.

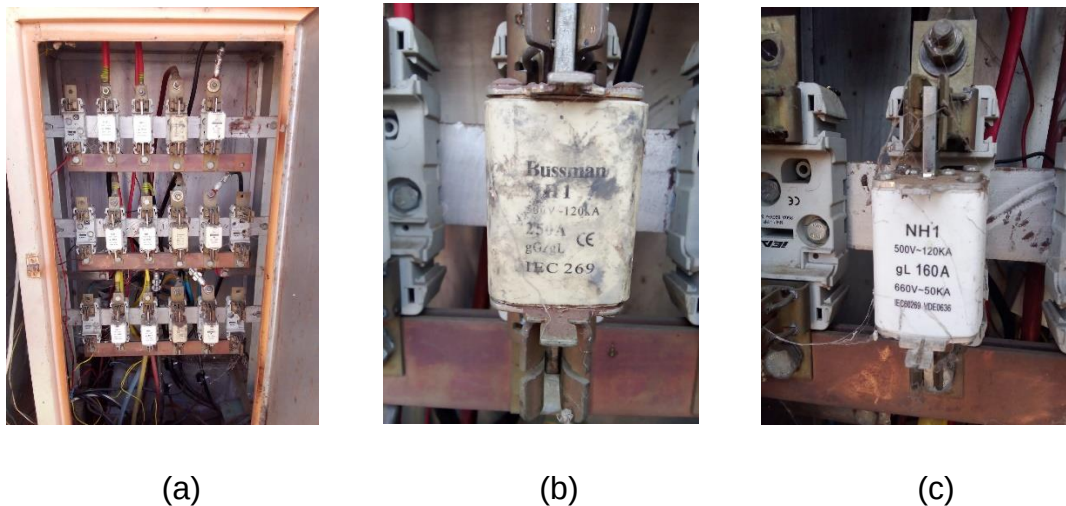


Figura 8: (a) Unidade de Comando e Protecção (UCP); (b) Fusível média tensão; (c) Fusível baixa tensão.

3.1. Medições de cargas

Com vista a se averiguar as perdas da rede, realizou-se um trabalho que consistiu em medição de correntes e tensões, até se identificar o PT mais apropriado para a análise.

A tabela 6 apresenta os dados resultantes da medição de carga no PT. (Vide anexo 1)

Para que se compreenda melhor o comportamento das correntes em cada uma das fases, são abaixo representadas graficamente as correntes de saída em função da hora de medição.

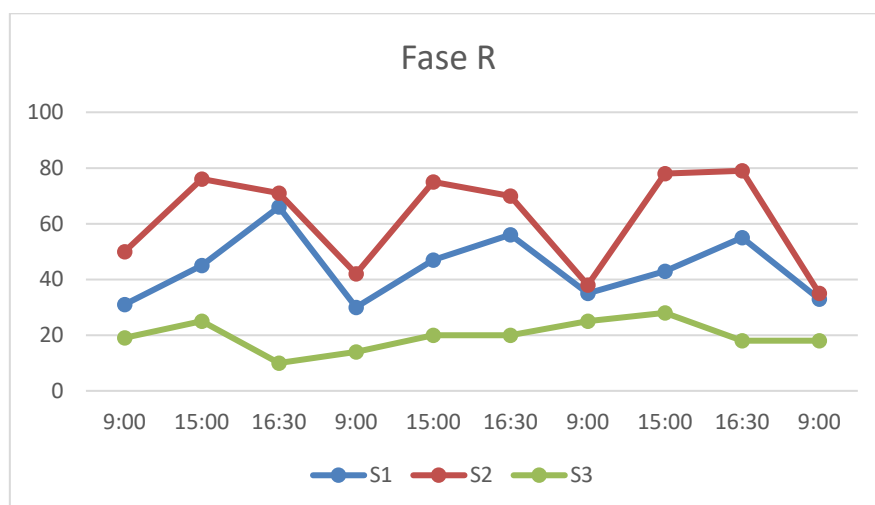


Gráfico 1: Comportamento da corrente da fase R na saída do transformador.

Fonte: Autor, 2023.

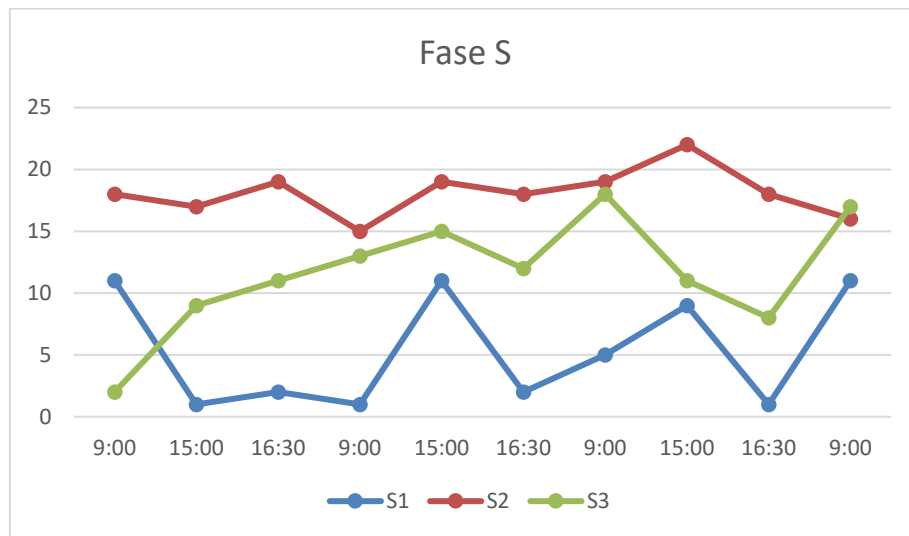


Gráfico 2: Comportamento da corrente da fase S na saída do transformador.

Fonte: Autor, 2023.

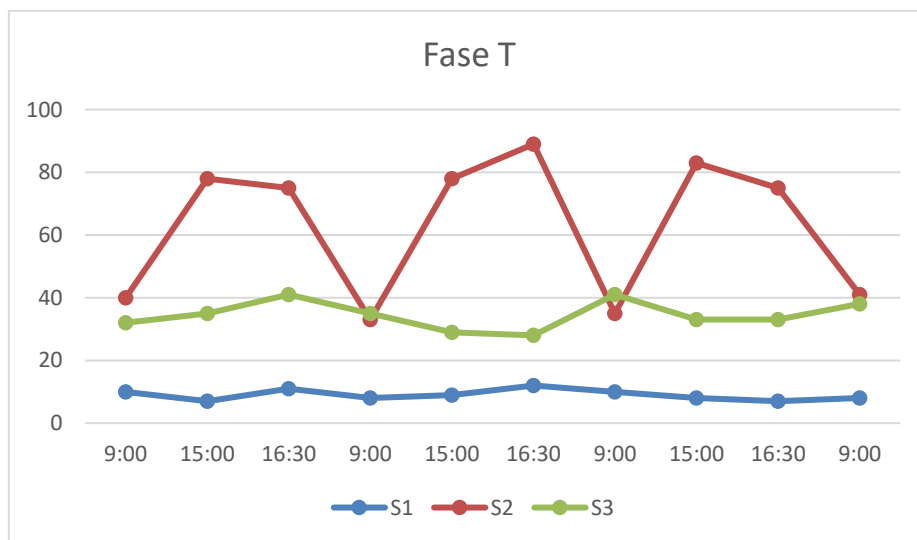


Gráfico 3: Comportamento da corrente da fase T na saída do transformador.

Fonte: Autor, 2023.

3.2. Medição da tensão

Após a medição da carga, com recurso ao multímetro, foi possível a obtenção dos valores de tensão fase-fase e fase-neutro da rede (vide anexo 2).

Com vista que se visualize melhor o comportamento dos dados, são apresentados nos gráficos abaixo, o comportamento das tensões em função da hora.

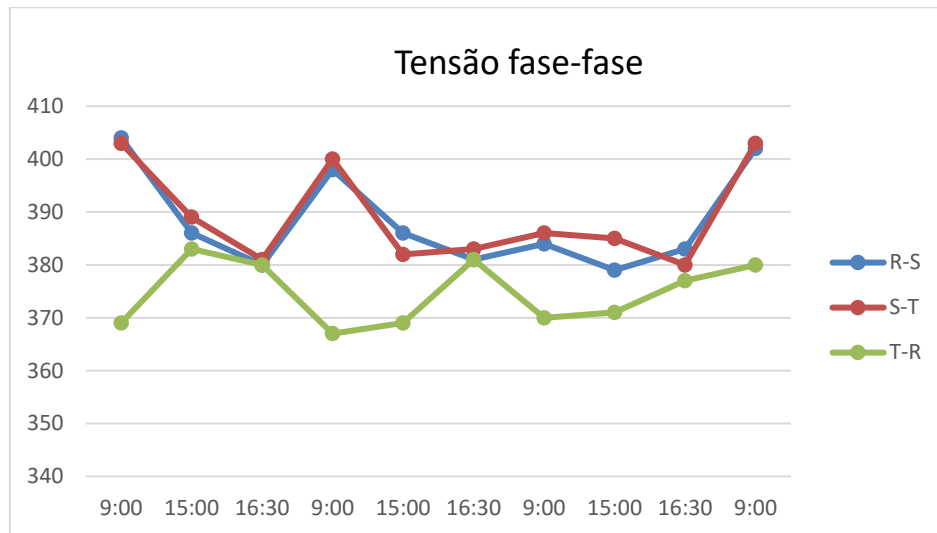


Gráfico 4: Comportamento da tensão fase-fase.

Fonte: Autor, 2023.

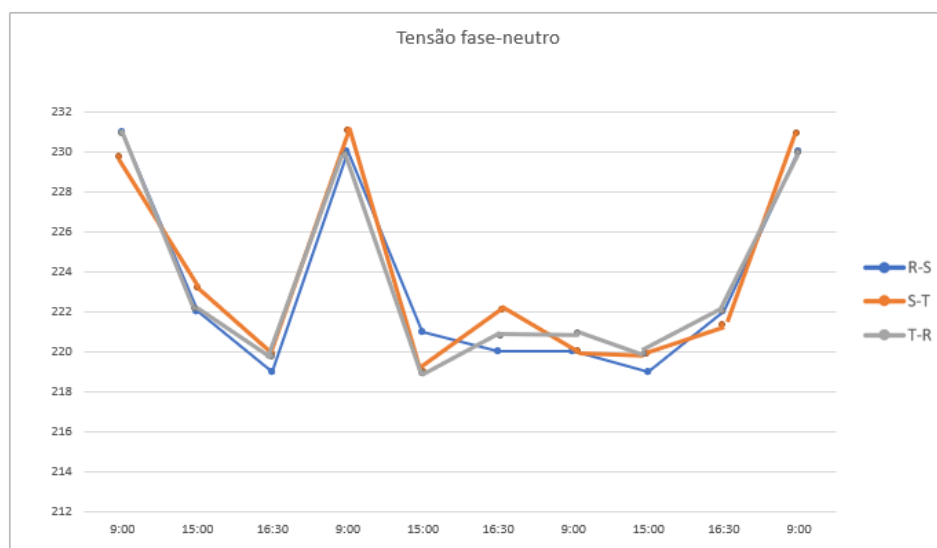


Gráfico 5: Comportamento da tensão fase-neutro.

Fonte: Autor, 2023.

Na mesma ordem de ideias, foram também realizadas medições no consumidor final e o consumidor intermédio da maior extensão, com vista a que se verificasse os níveis de tensão lá existentes no horário de pico (16:30).

Tabela 2: Medições de tensão no consumidor final e intermédio.

N	$V_{(final)}$	$V_{(intermédia)}$
1	175	206
2	175	206
3	176	204
4	175	205
5	175	206

Destas medições, é possível deduzir numa primeira fase que nesse horário as quedas de tensão e consequentemente as perdas de energia são exageradamente excessivas, visto que a tensão no consumidor final está muito abaixo dos limites de $\pm 10\%$ estabelecidos para cargas monofásicas e trifásicas.

3.2.1. Cálculo das quedas de tensão e perdas de energia da rede

De modo a averiguar as quedas de tensão na extensão mais longa da rede, é efectuado o cálculo de quedas de tensão e perdas de energia da rede, conforme as expressões 2.42 e 2.45.

Tabela 3: Dados da rede.

Símbolo	Valor
S_C	50 (mm ²)
$\overline{V_{fn}}_{(intermédio)}$	205,4 (V)
$\overline{V_{fn}}_{(final)}$	175,2 (V)
I_B	140 (A)
$l_{(intermédio)}$	770 (m)
$l_{(final)}$	1540 (m)
$\rho_{(Alumínio)}$	$2,65 \times 10^{-8}$ (Ω/m)

Tabela 4: Quedas de tensão e perdas de energia no consumidor intermédio.

ΔV_C (V)	ΔV_C %	ΔP (W)	ΔP %
14,6	6,65	2099,2	6,62

Tabela 5: Quedas de tensão e perdas de energia no consumidor final.

ΔV_C (V)	ΔV_C %	ΔP (W)	ΔP %
44,8	20,4	5494,27	17,84

Dos cálculos apresentados nas tabelas 4 e 5 compreende-se o agravamento das quedas de tensão ao longo do sistema, de modo que apenas na extensão

mais longa são verificadas quedas de tensão e perdas de até 20,4% e 17,84% respectivamente.

Esse fenômeno compromete em grande medida a eficiência da rede e consequentemente a qualidade de energia da mesma, pelo facto de os valores obtidos estares muito acima dos limites admissíveis.

3.3. Simulação da rede de distribuição de Baixa Tensão para verificação do comportamento de vários métodos na redução das perdas

Neste capítulo, pretende-se dar a simulação das possíveis soluções mais implementadas como medida de mitigação das perdas de energia eléctrica na rede de distribuição de baixa tensão. Desta feita, tem-se ainda o foco na avaliação do comportamento destes métodos com vista a que dentre eles, seja identificado o mais viável para o caso em análise.

Como já abordado nos capítulos precedentes, as perdas existentes nas redes de baixa tensão podem ser mitigadas com recurso a vários métodos, contudo parte destes métodos são de difícil implementação, pois acarretam custos elevados e nem sempre são os mais viáveis.

Aquando do levantamento de dados da rede, pôde-se constatar que naquela localidade, as redes de distribuição de baixa tensão apresentam um padrão que resulta em perdas técnicas que ocorrem principalmente devido a **redes precárias** e **extensões longas**. Desta feita, com vista a mitigar-se essas perdas, constata-se que os métodos de redução de perdas de energia que melhor se ajustam a esta dinâmica actual das redes de baixa tensão são: ***divisão da rede; equilíbrio de fases e a regulação de tensão com tap-changes***.

3.3.1. Divisão da rede

Após a identificação da potência do Posto de transformação (PT), aquando da sua instalação, é crucial que se faça a averiguação da distância de cada uma das extensões das saídas do PT (a EDM estabelece uma distância máxima de 600m por saída). Este parâmetro é muito importante, pelo facto de que quanto

maior for a distância, maior será a queda de tensão no último poste, em outras palavras, os consumidores finais dessa extensão sofrerão quedas de tensão elevadas.

Para o caso do PT136R, foi realizado um trabalho de medição da distância de cada uma das suas extensões onde, por conseguinte, constatou-se que as suas extensões excedem drasticamente os 600 metros estabelecidos pela concessionária, atingindo a faixa de mais de 1000 metros, os seus valores são aproximadamente: 1540; 450 e 840 metros.

A figura abaixo, ilustra uma simulação da implementação da divisão da rede, na qual a rede foi dividida em duas partes, acautelando-se o facto de os dois transformadores serem instalados nos seus respectivos centros de carga.

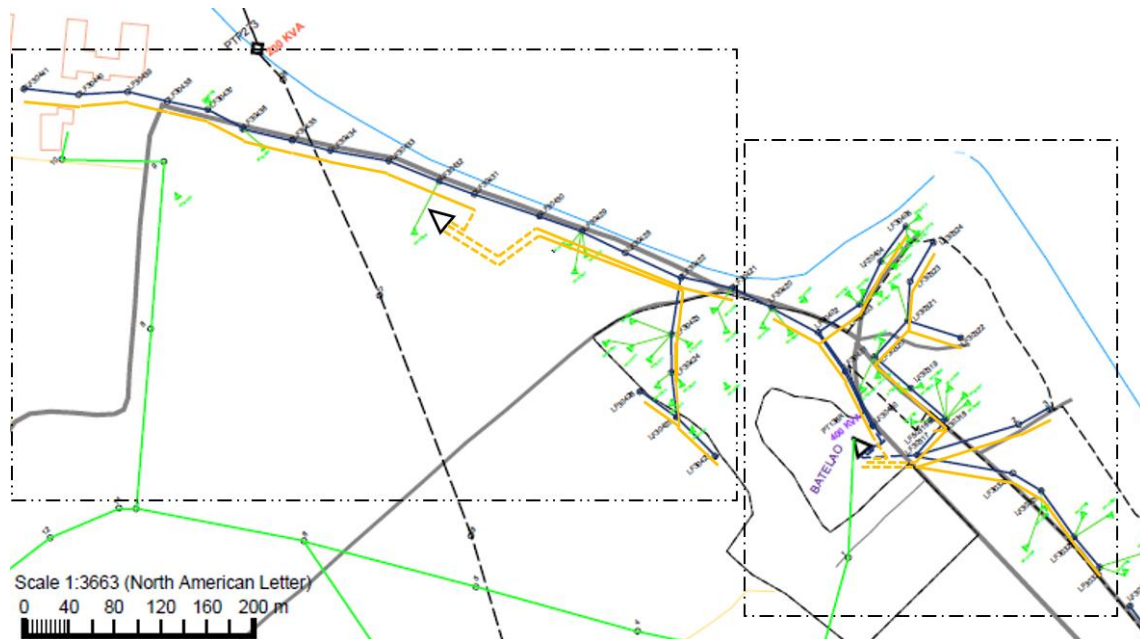




Figura 9: Aplicação do método de divisão da rede para o PT136R

Fonte: Autor, 2023.

3.3.2. Equilíbrio de fases

As redes de baixa tensão em Moçambique são constituídas pelas fases R, S, T e Neutro. Desta feita, é essencial que se garanta o equilíbrio de fases, que de modo geral, refere-se à distribuição equitativa da carga eléctrica e da potência entre as fases do sistema eléctrico. É de salientar que para que o sistema eléctrico funcione eficientemente e com segurança, é importante que as três fases estejam equilibradas.

A maior parte das instalações residenciais e comerciais do caso em análise são monofásicas. Com isso, a falta do equilíbrio de fases leva a vários problemas, como sobrecarga de uma ou mais fases, perdas de energia, desequilíbrio de tensão e maior desgaste de equipamentos eléctricos.

Sabe-se que para garantir o equilíbrio de fases, em rede de baixa tensão, é importante dimensionar correctamente os circuitos e os dispositivos eléctricos, distribuir a carga de maneira uniforme e monitorar a operação do sistema. Contudo, para as instalações monofásicas o equilíbrio é garantido fazendo-se o levantamento e distribuição uniforme de todas as cargas/baixas da região.

Devido a grande expansão do bairro e ao crescimento da populacional de KaTembe, aquando da alimentação das novas cargas não se tem acautelado o equilíbrio de fases. Desta feita, para a alimentação das cargas monofásicas é comum que uma fase seja escolhida aleatoriamente, sem que se analise o

equilíbrio de tensão, corrente e potência de todo o sistema, criando assim o desequilíbrio de fases.

Quando ocorre o desequilíbrio de fases, é importante tomar medidas para corrigi-lo e evitar problemas mais graves no sistema. Contudo, a identificação deste problema consiste num trabalho de campo, no qual com recurso a um multímetro, os parâmetros (potência, corrente e tensão) são medidos por fase, por conseguinte restabelecidos aos seus padrões visando garantir assim o seu equilíbrio para a minimização de perdas, pois correntes desequilibradas são uma das principais causas para o aquecimento excessivo nos condutores e nos dispositivos eléctricos, o que pode levar a falhas prematuras.

A simulações abaixo, resultantes dos circuitos em 10 e 11 respectivamente, ilustram o caso específico de desequilíbrio de tensão e corrente. No qual pode-se constatar o desfasamento evidente das suas formas de onda. (Vide anexos C e D)

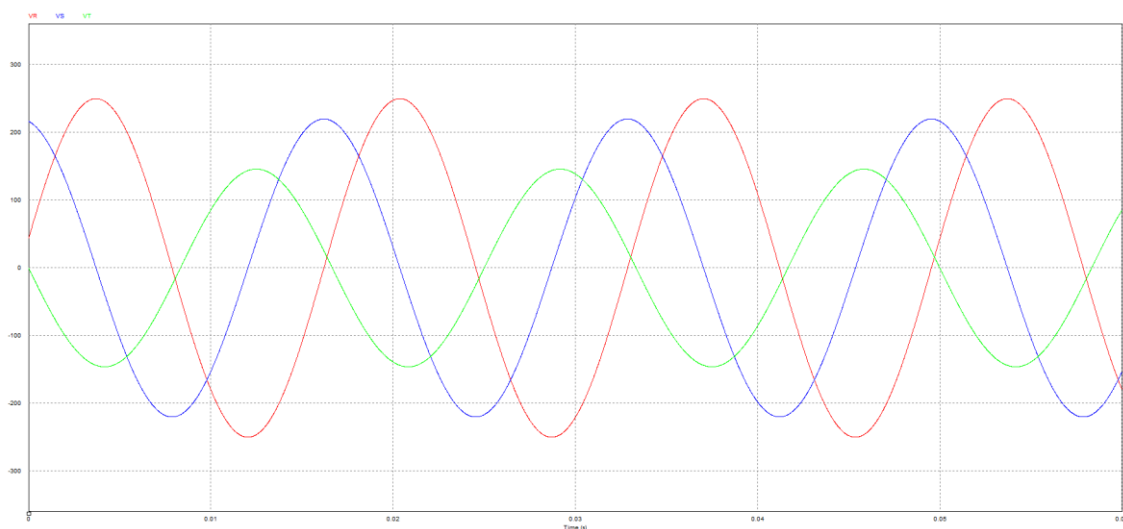


Gráfico 6: Forma de onda das tensões de fase desequilibradas.

Fonte: Autor, 2023.

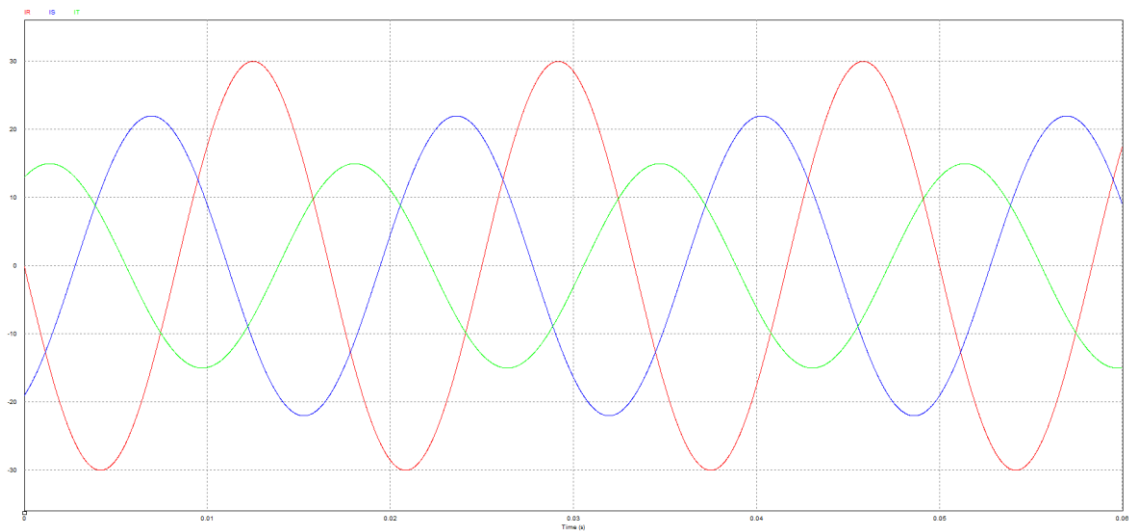


Gráfico 7: Forma de onda das correntes de fase desequilibradas.

Fonte: Autor, 2023.

As representações gráficas abaixo apresentadas, ilustram o comportamento das formas de onda das tensões e correntes quando o sistema é equilibrado apresentando o desfasamento entre eles de 120° e módulos iguais.

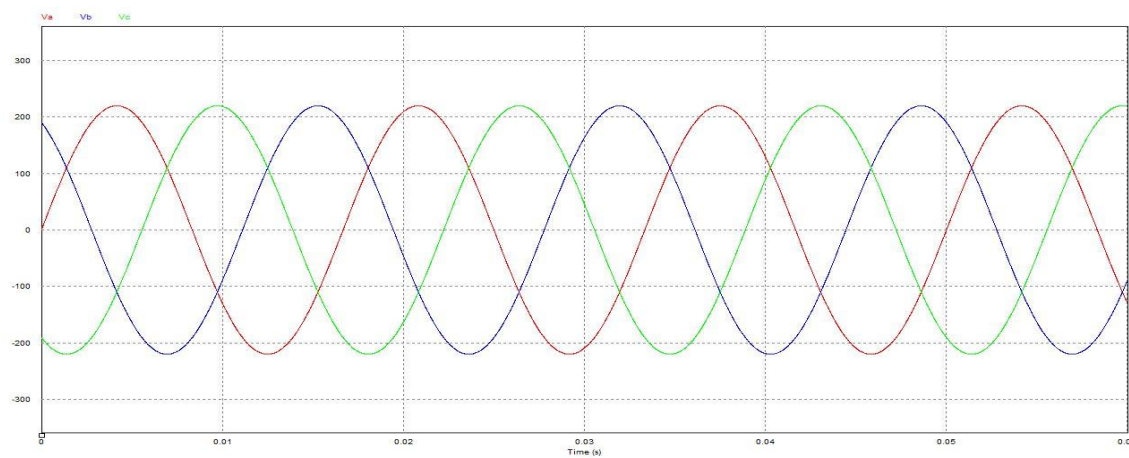


Gráfico 8: Forma de onda das tensões de fase equilibradas.

Fonte: Autor, 2023.

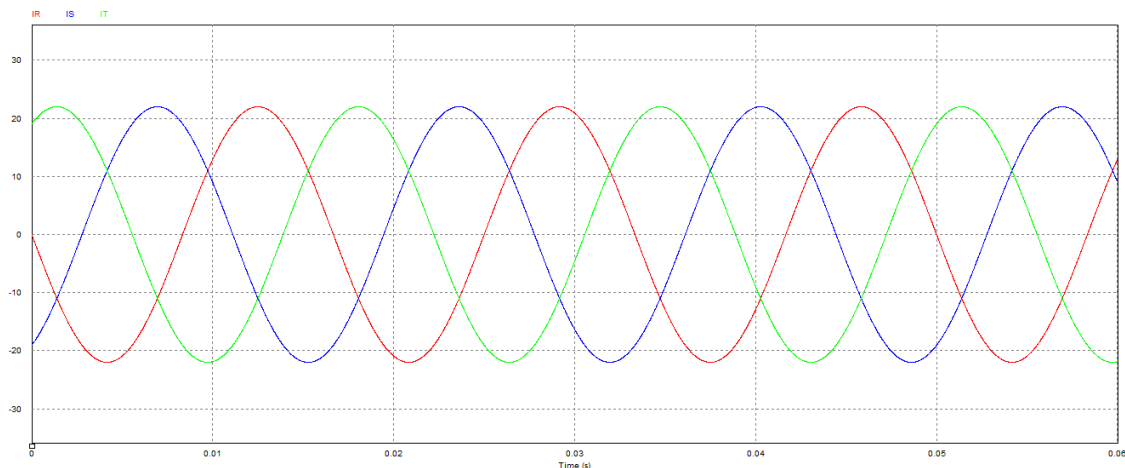


Gráfico 9: Forma de onda das correntes de fase equilibradas.

Fonte: Autor, 2023.

3.3.3. Regulação de tensão com *tap-changes*

A regulação da tensão com *tap-changes* é uma das estratégias usadas pela EDM para manter a tensão de saída do sistema eléctrico dentro dos limites especificados, mesmo quando há flutuações na carga ou nas condições de operação. Esta medida consiste no uso de transformadores de distribuição com regulação dos *taps* que podem ser alterados com vista a variar a relação de transformação e, assim, regular a tensão no secundário. Desta forma, os *taps* são regulados conforme necessário para manter a tensão dentro dos limites aceitáveis, melhorando assim, a eficiência da rede eléctrica.

Para melhor ilustração deste fenómeno, foi simulado o circuito do autotransformador (vide anexo 6), no qual ao valor da tensão será regulado mediante a variação do número de enrolamentos do lado secundário, de modo que devido as quedas de tensão que ocorrem ao longo da rede, as cargas não operem em regime de subtensão.

O gráfico abaixo, ilustra as curvas das formas de onda da tensão quando muito abaixo do limite e quando o seu valor é regulado por meio do regulador de tensão com recurso ao autotransformador, representados por VP4 e VP5 respectivamente.

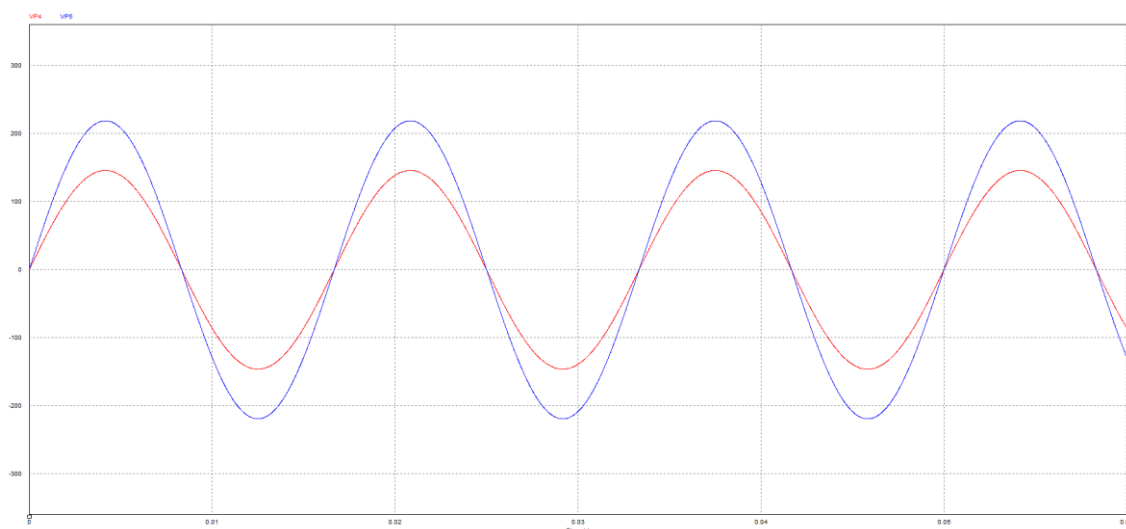


Gráfico 10: Simulação da regulação da tensão.

Fonte: Autor, 2023.

3.3.4. Identificação do método mais viável para a redução de perdas de energia elétrica na rede de distribuição de baixa tensão

Dada a rede e os dados das medições de carga e de tensão fase-fase e fase-neutro, apresentados nas tabelas 6 e 7 (vide anexos 1 e 2), compreende-se que:

Com foco na melhoria de qualidade de energia nas redes de distribuição de baixa tensão, são verificados três métodos que melhor se adequam ao solucionamento das perdas técnicas de energia que ocorrem no país, essas são: divisão de rede; equilíbrio de fases e regulação de tensão.

Do estudo realizado com a averiguação da aplicabilidade de cada um dos métodos, constata-se que o uso de cada um deles para a redução de perdas de energia, depende diretamente das causas das perdas nessa mesma rede. Com isso, para o caso analisado constata-se o uso *híbrido de divisão de rede e reguladores de tensão com tap-changer* como **métodos mais eficazes**, pelo facto de:

- a. A rede apresentar baixos níveis de tensão na saída dos transformadores, o que compromete a qualidade de energia entregue aos consumidores e eleva em grande escala os níveis de perdas de

energia eléctrica, principalmente devido as suas extensões longas, conforme os cálculos em 6.2.1.

- b. Ainda devido as extensões longas, a regulação de tensão com *tap-changer* não seria suficiente para compensar as quedas de tensão verificadas na rede, de modo que, existe a necessidade de se efectuar a divisão de rede, acautelando-se a necessidade de os transformadores apresentarem-se nos seus respectivos centros de carga.
- c. Embora as correntes medidas na rede não sejam iguais, pelo facto de a demanda por saída não ser uniforme, a rede apresenta todas as suas fases devidamente equilibradas, de modo que, a solução de equilíbrio de fases não é aplicável neste instante. Contudo, é de extrema pertinência que se dedique a devida atenção a este factor aquando da expansão da rede, pelo facto de a zona apresentar um elevado índice de crescimento populacional, o que significa o aumento da demanda de carga da região e um possível desequilíbrio de fases futuro.

CAPÍTULO 4: Conclusões e Recomendações

4.1. Conclusões

No decorrer do presente projecto, com ênfase na melhoria de indicadores de qualidade de energia, foi realizado um estudo mais profundo e detalhado dos métodos de redução de perdas técnicas de energia eléctrica em redes de baixa tensão, que consistiu na análise individual deles e seguidamente na avaliação da sua aplicabilidade para um caso específico do Distrito Municipal de KaTembe.

Findo projecto, afirma-se a prior que, da análise das perdas eléctricas da rede, que consistiu na medição de cargas e tensões no início, centro e fim da extensão, conclui-se que a rede apresenta valores de tensão muito abaixo do esperado devido as suas extensões excessivamente longas.

Com isso, do cálculo de perdas eléctricas realizado, foram obtidos valores de quedas de tensão e perdas de energia na extensão mais longa que atingem a margem de até 6.62% e 6.65% no consumidor intermédio e 20,4% e 17,84% no consumidor final respectivamente. Esses são resultados muito acima do valor normalizado e comprometem, em grande medida, o desempenho e a qualidade de energia da rede.

Do caso analisado, concluiu-se ainda que a escolha do método de redução de perdas depende directamente das características e do desempenho da rede, portanto, foram identificados a divisão de rede e a regulação de tensão com *tap-changer* como os métodos mais eficazes para a redução de perdas de energia eléctrica da rede de distribuição de baixa tensão de KaTembe. Que comprova, por consequência, a aplicabilidade da hipótese alternativa (H_1) do projecto.

4.2. Recomendações

Como abordado nos capítulos anteriores, a análise dos métodos de redução de perdas de energia eléctrica na rede de distribuição de baixa tensão é de crucial importância aquando da melhoria e/ou dimensionamento duma rede eléctrica.

Desta feita, algumas recomendações são oferecidas para orientar a implementação bem-sucedida e a operação contínua do sistema:

- ❖ Aquando do dimensionamento e/ou expansão da rede, seja sempre considerado o uso de extensões normalizadas (de 600 metros na EDM), pois com este estudo constatou-se que esse é um dos principais factores que influencia em grande medida na quantidade de perdas de energia eléctrica, devido as quedas de tensão verificadas ao longo da extensão;
- ❖ Nas zonas em expansão, sejam sempre implementados transformadores com reguladores de tensão com *tap-changer* como forma de prevenção as perdas de energia devido a quedas de tensão na rede;
- ❖ Aquando do dimensionamento dos transformadores e redes eléctricas, sejam sempre realizados estudos de campo, com vista que se tenha em conta a expansão populacional da região, de modo que, a divisão de rede seja realizada de modo que os transformadores estejam nos seus respectivos centros de carga, com vista a que os níveis de queda de tensão ou perdas de energia não sejam agravados.

4.3. Limitações

No decorrer da elaboração do trabalho, houve limitações concernentes à:

- Dificuldade no acesso dos dados da rede para o cálculo das perdas eléctricas;
- Dificuldade na identificação e localização do PT mais apropriado para a análise;
- Dificuldade no acesso ao PT para realização das medições, devido a sua localização e horários estabelecidos para o trabalho.

Referências Bibliográficas

1. Agencia Nacional De Energia Eléctrica – ANEEL, 2008 - Procedimentos de distribuição de energía eléctrica no sistema nacional – Prodist, Brasília, ANEEL.
2. Araújo, A. C., 2007 - Perdas e Inadimplência na Actividade de Distribuição de Energia Eléctrica no Brasil, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
3. Bulhões, R. L.; 2011 - Métodos de redução de perdas eléctricas em sistemas de distribuição, Monografia, Universidade Federal da Bahia.
4. Braz, L. L., 2019 - Qualificação das perdas técnicas da distribuição em condições distorcidas, Dissertação, Faculdade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
5. Canhoto, B. A., 2018 - Cálculo das perdas de redes de distribuição com as medidas dos smart-meters, Dissertação. Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto.
6. Cipoli, J. A., 1993 - Engenharia de Distribuição, Qualitumark, Rio de Janeiro.
7. Coelho, B. M. M., 2012 - Classificação de Tipologia de rede da EDP Distribuição, Dissertação; Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
8. Dortolina, C., Nadira, R., 2001 - *The loss that is unknown is no loss at all: a top-down/bottom approach for estimating distribution losses*; IEEE Transactions Power Systems, New York, V.2, p. 1002-1006.
9. Eusébio, A. S., 2017 - Estudos de perdas na rede de Baixa Tensão e possibilidade da sua redução, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Politécnico do porto.
10. Fernandes, C. M., 2010 - Desequilíbrio entre fases e perdas na rede de Baixa Tensão, Dissertação, Universidade Técnica de Lisboa.
11. Kundur, P., 1994 - *Power System Stability and Control*, Mc Graw Hill.
12. Mamede Filho, J., 2017 - Instalações Eléctricas Industriais; 7ª Edição.
13. Méffe, A., Oliveira, C., Kagan, N., Jonathan, S., Caparroz, S., Cavaretti, J., 2002 - *Technical and economic analysis for the reduction of losses in distribution systems*; São Paulo.

14. Moritz, V. F., 2016 - Estudo das perdas Técnicas de energia eléctrica em sistemas de distribuição, Monografia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
15. Oliveira, M., Padilha-Feltrin, A., 2008 - A statistical analysis of loss factor to determine the energy losses, Bogotá.
16. Santos, D. A., 2013 - Alternativas para redução das perdas técnicas em redes de distribuição de energia eléctrica: Instalação de Banco de Capacitores, Recondutoramento e Reconfiguração do Sistema, Faculdade independente do Nordeste.
17. Strachan, S. M., Bell, K. R. W., Ding, J., 2010 - *Study of Low Voltage System Losses*, University of Strathclyde.
18. Usida, W. F., 2007 - Controle Fuzzy para Melhoria do perfil de Tensão em Sistemas de Distribuição de Energia Eléctrica, Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, Dissertação.

Anexos

ANEXO 1. Medições de carga

Tabela A1-1: Dados de medição das correntes no alimentador e nas saídas do transformador.

	Fase	Alimentador	Saída		
			S1	S2	S3
1 09:00	R	101	31	50	19
	S	46	11	18	2
	T	83	10	40	32
2 15:00	R	146	45	76	25
	S	38	1	17	9
	T	119	7	78	35
3 16:30	R	147	66	71	10
	S	49	2	19	11
	T	126	11	75	41
4 09:00	R	86	30	42	14
	S	30	1	15	13
	T	75	8	33	35
5 15:00	R	142	47	75	20
	S	49	11	19	15
	T	117	9	78	29
6 16:30	R	146	56	70	20
	S	46	2	18	12
	T	129	12	89	28
7 09:00	R	98	35	38	25
	S	51	5	19	18
	T	85	10	35	41
8 15:00	R	148	43	78	28
	S	53	9	22	11
	T	125	8	83	33
9 16:30	R	151	55	79	18
	S	32	1	18	8
	T	115	7	75	33
10 09:00	R	86	33	35	18
	S	52	11	16	17
	T	87	8	41	38

ANEXO 2. Medições de tensão

Tabela A2-2: Dados de medição de tensão de fase-fase e fase-neutro.

Medição	Tensão fase-fase		Tensão fase-neutro	
1 09:00	R-S	404	R-N	231
	S-T	403	S-N	230
	T-R	369	T-N	231
2 15:00	R-S	386	R-N	222
	S-T	389	S-N	223
	T-R	383	T-N	222
3 16:30	R-S	380	R-N	219
	S-T	381	S-N	220
	T-R	380	T-N	220
4 09:00	R-S	398	R-N	230
	S-T	400	S-N	231
	T-R	367	T-N	230
5 15:00	R-S	386	R-N	221
	S-T	382	S-N	219
	T-R	369	T-N	219
6 16:30	R-S	381	R-N	220
	S-T	383	S-N	222
	T-R	381	T-N	221
7 09:00	R-S	384	R-N	220
	S-T	386	S-N	220
	T-R	370	T-N	221
8 15:00	R-S	379	R-N	219
	S-T	385	S-N	220
	T-R	371	T-N	220
9 16:30	R-S	383	R-N	222
	S-T	380	S-N	221
	T-R	377	T-N	222
10 09:00	R-S	402	R-N	230
	S-T	403	S-N	231
	T-R	380	T-N	230

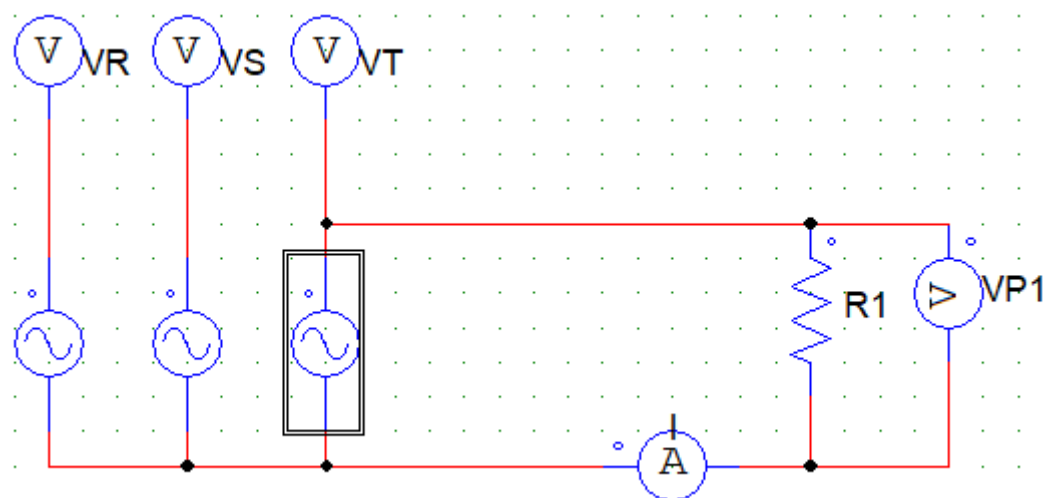
ANEXO 3. Circuito simulado para o equilíbrio de tensões

Figura A3-3: Circuito simulado para o equilíbrio de tensões.

Fonte: Autor, 2023.

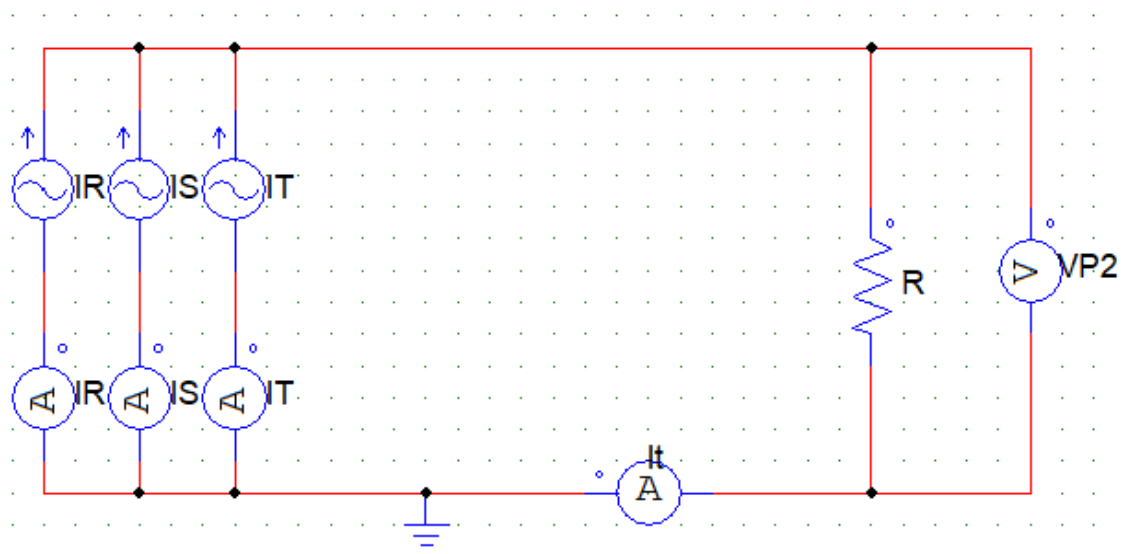
ANEXO 4. Circuito simulado para o equilíbrio de correntes

Figura A4-4: Circuito simulado para o equilíbrio de correntes.

Fonte: Autor, 2023.

ANEXO 5. Chapa de características dum transformador com tap-changer

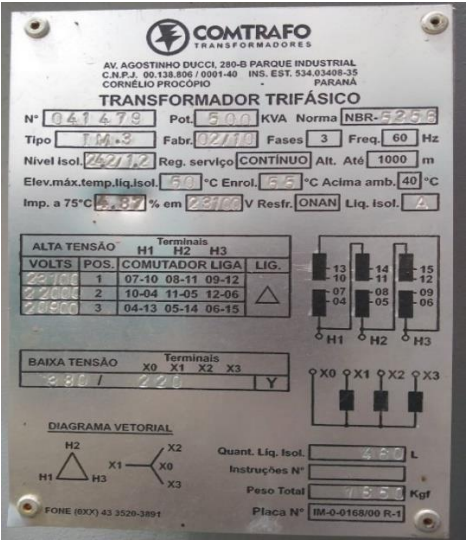


Figura A5-5: Chapa de características dum transformador com tap-changer.

Fonte: Autor, 2023.

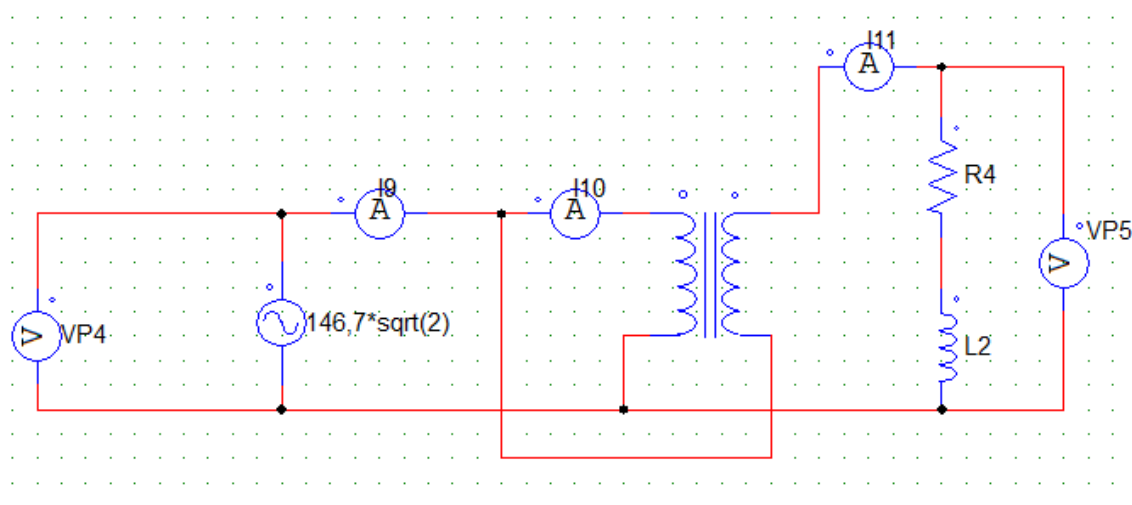
ANEXO 6. Circuito de autotransformador simulado

Figura A6-6: Circuito simulado para o autotransformador.

Fonte: Autor, 2023.

ANEXO 7. Impedância dos condutores em função da secção

Tabela A7-7: Impedância dos condutores em função a secção.

Fonte: Momedes Filho, 2017.

Seção	Impedância de sequência positiva (mΩhm/m)		Impedância de sequência zero (mΩhm/m)	
	Resistência	Reatância	Resistência	Reatância
1,5	14,8137	0,1378	16,6137	2,9262
2,5	8,8882	0,1345	10,6882	2,8755
4	5,5518	0,1279	7,3552	2,8349
6	3,7035	0,1225	5,5035	2,8000
10	2,2221	0,1207	4,0222	2,7639
16	1,3899	0,1173	3,1890	2,7173
25	0,8891	0,1164	2,6891	2,6692
35	0,6353	0,1128	2,4355	2,6382
50	0,4450	0,1127	2,2450	2,5991
70	0,3184	0,1096	2,1184	2,5681
95	0,2352	0,1090	2,0352	2,5325
120	0,1868	0,1076	1,9868	2,5104
150	0,1502	0,1074	1,9502	2,4843
185	0,1226	0,1073	1,9226	2,4594
240	0,0958	0,1070	1,8958	2,4312
300	0,0781	0,1068	1,8781	2,4067
400	0,0608	0,1058	1,8608	2,3757
500	0,0507	0,1051	1,8550	2,3491
630	0,0292	0,1042	1,8376	2,3001