



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE  
FACULDADE DE ENGENHARIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA  
CURSO DE ENGENHARIA ELECTRÓNICA**

**Desenvolvimento de um Sistema  
Automático de Partilha e Balanceamento de  
Carga em Transformadores de Distribuição  
de Energia Eléctrica.**

**Relatório do Estágio Profissional**

**Laércio Clementina Marcelino Macome**

**Supervisor: Mestre Joaquim Paulo Branco. Eng<sup>o</sup>  
(UEM, Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Electrotécnica)**

Maputo, Julho 2024



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE  
FACULDADE DE ENGENHARIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA  
CURSO DE ENGENHARIA ELECTRÓNICA**

**Desenvolvimento de um Sistema Automático de  
Partilha e Balanceamento de Carga em  
Transformadores de Distribuição de Energia  
Eléctrica.**

**Relatório do Estágio Profissional**

**Laércio Clementina Marcelino Macome**

**Supervisor: Mestre Joaquim Paulo Branco. Eng<sup>o</sup>  
(UEM, Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Electrotécnica)**

Maputo, Julho 2024

LAÉRCIO CLEMENTINA MARCELINO MACOME

# **Desenvolvimento de um Sistema Automático de Partilha e Balanceamento de Carga em Transformadores de Distribuição de Energia Eléctrica.**

Relatório apresentado ao Departamento de Engenharia Electrotécnica da Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane – como requisito parcial para obtenção de grau de Licenciatura em Engenharia Electrónica.

Supervisor: Mestre Joaquim Paulo Branco.  
Eng<sup>o</sup>  
(UEM, Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Electrotécnica)

Maputo, Julho 2024

# TERMO DE ENTREGA DO RELATÓRIO DO EP



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE**

**FACULDADE DE ENGENHARIA**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA

## TERMO DE ENTREGA DE RELATÓRIO DO RELATÓRIO DO ESTÁGIO PROFISSIONAL

Declaro que o estudante Laércio Clementina Marcelino Macome  
entregou no dia \_\_\_\_/\_\_\_\_/20 \_\_\_\_ as \_\_\_\_ cópias do relatório do seu Relatório do  
Estágio Profissional com a referência: \_\_\_\_\_

intitulado: Desenvolvimento de um Sistema Automático de Partilha e Balanceamento de  
Carga em Transformadores de Distribuição de Energia Eléctrica.

Maputo, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 20\_\_\_\_\_

O Chefe de Secretaria

\_\_\_\_\_

## DECLARAÇÃO DE HONRA

*Declaro sobre palavra de honra que o trabalho apresentado neste relatório é original e foi por mim desenvolvido com base nos meus conhecimentos e com a ajuda dos recursos que ao longo do mesmo faço criteriosa referência.*



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE**

**FACULDADE DE ENGENHARIA**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA

**FICHA-RESUMO DO RELATÓRIO DO ESTÁGIO PROFISSIONAL**

Referência do tema: \_\_\_\_\_

Título do tema: Desenvolvimento de um Sistema Automático de Partilha e Balanceamento de Carga em Transformadores de Distribuição de Energia Eléctrica.

Nome do autor: Laércio Clementina Marcelino Macome

Supervisores: Mestre Joaquim Paulo Branco. Eng<sup>o</sup>

RESUMO

O estágio profissional decorreu na empresa Electricidade de Moçambique, concretamente na Divisão de Transporte Sul, tendo sido supervisionado pelo Eng<sup>o</sup> Hermenegildo Chavane. Nesta organização estive afecto ao departamento de telecomunicações e scada, onde o foco era o desenvolvimento de actividades de operação e manutenção da rede de transmissão de energia eléctrica. Durante o estágio sob apoio da equipe do departamento, desenvolvi habilidades valiosas em fundamentos de redes de telecomunicação, configuração e gerenciamento de equipamentos, diagnóstico de PLCs, fundamentos de funcionamento de subestações e muitos mais. E no presente relatório, encontra-se descrito o desenvolvimento de um sistema para fazer face a problemas de sobrecarga e desequilíbrio de fases em transformadores de distribuição de energia eléctrica.

# GUIA DE AVALIAÇÃO DA APRESENTAÇÃO ORAL E DEFESA (PELO JÚRI)



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE**

**FACULDADE DE ENGENHARIA**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA

## F2 – GUIA DE AVALIAÇÃO DA APRESENTAÇÃO ORAL E DEFESA

Nome do estudante Laércio Clementina Marcelino Macome

Referência do tema \_\_\_\_\_ Data \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

Titulo do tema: Desenvolvimento de um Sistema Automático de Partilha e Balanceamento de Carga em Transformadores de Distribuição de Energia Eléctrica.

<b>1. Introdução</b>										
1.1. Apresentação dos pontos chaves na introdução (Contexto e importância do trabalho)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Secção 1 subtotal(max: 10)</b>										

<b>2. Organização e explanação</b>										
2.1. Objectivos	1	2	3							
2.3. Metodologia	1	2	3	4						
2.4. Resultados, sua análise e discussão	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2.5. Conclusões e aplicação dos resultados (recomendações)	1	2	3	4	5	6	7	8		
<b>Secção 2 subtotal(max: 25)</b>										

<b>3. Estilo da apresentação</b>										
3.1. Uso efectivo do tempo	1	2	3	4	5					
3.2. Clareza, tom, vivacidade e entusiasmo	1	2	3	4	5					
3.3. Uso e qualidade dos audio-visuais	1	2	3	4	5					
<b>Secção 3 subtotal(max: 15)</b>										

<b>4. Defesa</b>										
4.1. Exactidão nas respostas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4.2. Domínio dos conceitos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4.3. Confiança e domínio do trabalho realizado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4.4. Domínio do significado e aplicação dos resultados	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4.5. Segurança nas intervenções	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Secção 3 subtotal(max: 50)</b>										

<b>Total de pontos (max: 100)</b>		<b>Nota (=Total*0,2)</b>	
-----------------------------------	--	--------------------------	--

# GUIA DE AVALIAÇÃO DO RELATÓRIO ESCRITO



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA

## F1 - GUIA DE AVALIAÇÃO DO RELATÓRIO ESCRITO

Nome do estudante Laércio Clementina Marcelino Macome

Referência do tema \_\_\_\_\_ Data \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

Titulo do tema: Desenvolvimento de um Sistema Automático de Partilha e Balanceamento de Carga em Transformadores de Distribuição de Energia Eléctrica.

<b>1. Resumo</b>					
1.1. Apresentação dos pontos chaves no resumo (clareza, organização, correlação com o apresentado)	1	2	3	4	5
<b>Secção 1 subtotal (max: 5)</b>					

<b>2. Organização (estrutura) e explanação</b>										
2.1. Objectivos	1	2	3	4	5					
2.2. Introdução, antecedentes e pesquisa bibliográfica	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2.3. Metodologias	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2.4. Resultados, sua análise e discussão	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2.5. Conclusões e aplicação dos resultados (recomendações)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Secção 2 subtotal(max: 45)</b>										

<b>3. Argumentação</b>										
3.1. Criatividade e originalidade	1	2	3	4	5					
3.2. Rigor	1	2	3	4	5					
3.3. Análise crítica, evidência e lógica	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3.4. Relação objectivos/ métodos/ resultados/conclusões	1	2	3	4	5					
3.5. Relevância	1	2	3	4	5					
<b>Secção 3 subtotal(max: 30)</b>										

<b>4. Apresentação e estilo da escrita</b>					
4.1. Legibilidade e organização	1	2	3	4	5
4.2. Ilustração e qualidade das figuras e tabelas	1	2	3	4	5
4.3. Estilo da escrita (fluência do texto, uso da língua e gramática)	1	2	3	4	5
4.4. Fontes bibliográficas (citação correcta, referências, etc)	1	2	3	4	5
<b>Secção 4 subtotal(max: 20)</b>					

<b>Total de pontos (max: 100)</b>		<b>Nota (=Total*0,2)</b>	
-----------------------------------	--	--------------------------	--

Nota: Quando exista a componente gráfica (desenhos técnicos), a nota acima é multiplicada por 0,8 cabendo os restantes 20% do peso à referida parte gráfica.

# FICHA DE AVALIAÇÃO DA ATITUDE DO ESTUDANTE (PELO SUPERVISOR)



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE**

**FACULDADE DE ENGENHARIA**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA

## FICHA DE AVALIAÇÃO DA ATITUDE DO ESTUDANTE

Nome do estudante Laércio Clementina Marcelino Macome

Referência do tema \_\_\_\_\_ Data \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

Titulo do tema: Desenvolvimento de um Sistema Automático de Partilha e Balanceamento de Carga em Transformadores de Distribuição de Energia Eléctrica.

<b>Indicador</b>	<b>Classificação</b>				
	1	2	3	4	5
<b>Atitude geral</b> (manteve uma disposição positiva e sentido de humor)					
<b>Dedicação e comprometimento</b> (Deu grande prioridade ao projecto e aceitou as responsabilidades prontamente)					
<b>Independência</b> (realizou as tarefas independentemente, como prometido e a tempo)					
<b>Iniciativa</b> (viu o que devia ter sido feito e fê-lo sem hesitar e sem pressões do supervisor)					
<b>Flexibilidade</b> (disponibilidade para se adaptar e estabelecer compromissos)					
<b>Sensibilidade</b> (ouviu e tentou compreender as opiniões dos outros)					
<b>Criatividade</b> (contribuiu com imaginação e novas ideias)					
<b>Total de pontos (max: 35)</b>					

Valor do classificador	Cotação obtida	Significado
	1	Não aceitável (0 a 9 valores)
	2	Suficiente (10 a 13 valores)
	3	Bom (14 a 16 valores)
	4	Muito Bom (17 a 18 valores)
	5	Excelente (19 a 20 valores)

**Total de pontos (max: 35)**

**Nota (=Total\*20/35)**

# FICHA DE AVALIAÇÃO GLOBAL



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE**

**FACULDADE DE ENGENHARIA**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA

## F3 - FICHA DE AVALIAÇÃO GLOBAL

Nome do estudante Laércio Clementina Marcelino Macome

Referência do tema \_\_\_\_\_ Data \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

Titulo do tema: Desenvolvimento de um Sistema Automático de Partilha e Balanceamento de Carga em Transformadores de Distribuição de Energia Eléctrica.

<b>AVALIADOR</b>	<b>NOTA OBTIDA</b>	<b>PESO(%)</b>
Relatório escrito (F1)	N1=	A= 60
Apresentação e defesa do trabalho (F2)	N2=	B= 40

<b>CLASSIFICAÇÃO FINAL</b> $= (N1 * A + N2 * B) / 100$	
--	--

OS MEMBROS DO JURI:

O Presidente	
O Oponente	
Os Supervisores	

# TERMO DE ATRIBUIÇÃO DO TEMA DO EP



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE**

**FACULDADE DE ENGENHARIA**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA

## TERMO DE ATRIBUIÇÃO DE TEMA DE RELATÓRIO DO ESTÁGIO PROFISSIONAL

REFERÊNCIA DO TEMA:

DATA:

2024

### 1. TÍTULO DO TEMA

Desenvolvimento de um Sistema Automático de Partilha e Balanceamento de Carga em Transformadores de Distribuição de Energia Eléctrica.

### 2. DESCRIÇÃO SUMÁRIA DO TRABALHO A DESENVOLVER

#### 2.1. Definição do Problema

A electricidade de Moçambique, E.P é uma empresa pública de produção, transporte, distribuição e comercialização de energia eléctrica de Moçambique. Tal como em outras concessionárias a nível mundial, na Electricidade de Moçambique o transformador também é um componente vital no contexto da transmissão e distribuição de energia eléctrica. A crescente demanda pelos serviços de electrificação, colocam a organização em uma luta contra uma questão que impacta diretamente na eficiência e na confiabilidade do sistema, o desequilíbrio de cargas nos transformadores de distribuição. Este problema leva a sobrecarga dos transformadores, colocando o a operar acima daquilo é a sua capacidade ideal, trazendo consequências negativas tais como:

- Aumento das perdas de energia;
- Sobreaquecimento;
- Desgaste do isolamento do transformador.

Os factores acima mencionados por sua vez resultam na redução do tempo de vida útil do transformador, bem como na interrupção no fornecimento de energia e custos adicionais para a concessionária de energia. Sendo o transformador um activo valioso e de crucial importância no fornecimento de energia eléctrica, o qual vê o seu tempo de vida útil reduzido por sobrecarga, a questão de partida é: De que maneira se pode balancear as cargas em transformadores de distribuição, visando melhorar a eficiência global do sistema de distribuição de energia?

## **2.2. Relevância da pesquisa**

Em moçambique a taxa de electrificação segundo a Electricidade de Moçambique é de 28%, colocando a concessionária num exercício de garantir acesso universal de energia eléctrica até 2030, bem como o fornecimento eficiente, confiável e sustentável. Nesta ordem o balanceamento de cargas nos transformadores de distribuição é uma questão pertinente que afecta directamente os ideais da concessionária. A mitigação dos impactos negativos da sobrecarga dos transformadores é de extrema importância pois a uma percentagem de 28% de electrificação já contribui com prejuízos económicos significativos, o que com o aumento da percentagem de electrificação poderá crescer. A proposta de um sistema automático de balanceamento de cargas é uma solução promissora face ao problema em questão pois esta irá proporcionar benefícios como:

- Prolongamento do tempo de vida útil do transformador;
- Redução de prejuízos económicos para a concessionária;
- Fornecimento contínuo, eficiente, confiável e sustentável de energia eléctrica.

## **2.3. Objectivos**

### **2.3.1. Objectivos Gerais**

- a. Desenvolver um sistema de partilha e balanceamento de cargas em transformadores de distribuição de energia eléctrica para protecção contra sobrecarga.;

### **2.3.2. Objectivos Específicos**

- a) Avaliar o estado actual do sistema de distribuição através da análise de frequência de avaria dos transformadores afectados pelo desequilíbrio de cargas.
- b) Projectar e desenvolver algoritmos para o balanceamento remoto de cargas, tendo em conta factores como capacidade do transformador, demanda de carga actual e histórico de consumo.
- c) Identificar de forma generalizada os componentes necessários para o desenvolvimento e implementação do sistema;
- d) Apresentar resultados.

### **2.4. Metodologia**

De maneira a materializar a ideia de solução proposta neste projecto serão seguidas as seguintes etapas:

- Recolha de dados

A recolha de dados será feita com base em pesquisas exploratórias. Esta tem como intuito a aquisição de dados sobre situações passadas e actuais do funcionamento do sistema de distribuição de energia eléctrica.

- Pesquisa documental

A pesquisa documental foi realizada através da leitura de relatórios da Electricidade de Moçambique E.P, com a finalidade de adquirir informações sobre a frequência de avaria de transformadores no sistema de distribuição de energia eléctrica da concessionária.

- Pesquisa bibliográfica

A pesquisa bibliográfica tem como finalidade realizar colecta de informações bibliográficas (manuais, vídeos na internet, fóruns e stack overflow) publicadas por diversos autores, que discutem o assunto relacionado com o tema em estudo.

## **3. LOCAL DE REALIZAÇÃO**

--

#### 4. SUPERVISORES

	Nome	Assinatura
Da UEM	Mestre Joaquim Paulo Branco. Engº	
Da Instituição	Engº Hermenegildo Chavane	

#### 5. DATAS CHAVE

Entrega do tema	//2024	Previsão da conclusão	//2024
-----------------	--------	-----------------------	--------

Maputo, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 20\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Chefe da Comissão Científica

\_\_\_\_\_  
Visto do chefe do departamento

Declaro que recebi o tema do Relatório do Estágio Profissional na data acima indicada

Nome: \_\_\_\_\_

Assinatura: \_\_\_\_\_

# ACTA DE ENCONTROS REGULARES



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE**

**FACULDADE DE ENGENHARIA**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA

## ACTA DE ENCONTROS

REFERÊNCIA DO TEMA:

DATA:

06/05/2024

### 1. AGENDA:

1. Apresentação da proposta de tema de projeto da parte do estudante

### 2. PRESENÇAS:

Supervisor	Mestre Joaquim Paulo Branco. Eng <sup>o</sup>
Co-Supervisor	
Estudante	Laércio Clementina Marcelino Macome
Outros	

### 3. RESUMO DO ENCONTRO:

Neste encontro foi apresentado o problema que se pretendia resolver ao supervisor. Tendo este dado uma apreciação positiva sobre a ideia de buscar soluções para a solução do mesmo. Consequentemente foram sugeridas alterações que culminaram com a escolha do tema apresentado neste relatório

### 4. RECOMENDAÇÕES:

Definir de maneira concisa os objectivos a alcançar com a pesquisa

### 5. Observações

### 6. DATA DO PRÓXIMO ENCONTRO

10/05/2024

# ACTA DE ENCONTROS REGULARES



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE**

**FACULDADE DE ENGENHARIA**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA

## ACTA DE ENCONTROS

REFERÊNCIA DO TEMA:		DATA:	10/05/2024
---------------------	--	-------	------------

### 1. AGENDA:

Definição e correção dos objectivos específicos

### 2. PRESENÇAS:

Supervisor	Mestre Joaquim Paulo Branco. Eng <sup>o</sup>
Co-Supervisor	
Estudante	Laércio Clementina Marcelino Macome
Outros	

### 3. RESUMO DO ENCONTRO:

Foram discutidos os objectivos específicos do projecto e decidiu-se incluir neles um objectivo que consistia na análise do estado dos PTs de alguma ASC em relação ao histórico de avarias

### 4. RECOMENDAÇÕES:

--

### 5. Observações

--

### 6. DATA DO PRÓXIMO ENCONTRO

--

## EPÍGRAFE

*The struggle is what defines us. It is through our battles that we  
find our true selves.*

*Ragnar Lothbrok*

## DEDICATÓRIA

*Ao meu pai, Marcelino Adriano Macome; A minha mãe  
Clementina Média Eugênio Mandlate Macome; e a todos que  
desta pesquisa se vão beneficiar.*

*Balagao sokote - Mandlate*

*Mukambe - Macome*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela saúde e perseverança concedida ao longo desta jornada. Aos meus pais, por todo o apoio, incentivo, investimento e amor incondicional que me proporcionam.

A minha parceira de todos os momentos ( Cristina. P. M) vai o meu sentimento de gratidão, pois a sua presença e apoio traziam renovação de energias em períodos de exaustão.

Agradeço aos meus avós paternos e maternos, "Em memória", pelos valores por eles transmitidos em vida, pois estes foram cruciais para a formação dos meus ideais como pessoa.

Agradeço também ao meu supervisor Mestre Joaquim Paulo Branco. Eng<sup>o</sup>, pela orientação na elaboração deste projecto.

Aos meus caros Alums, com os quais convivi nesta jornada agradeço pelas experiências de produção compartilhada. Por fim, agradeço a comunidade académica da Faculdade de Engenharia, em especial ao corpo docente estrutura essencial no desenvolvimento da minha formação.

## RESUMO

Desenvolvimento de um Sistema Automático de Partilha e Balanceamento de Carga em Transformadores de Distribuição de Energia Eléctrica.

A sobrecarga e o desequilíbrio de fases em transformadores de distribuição de energia eléctrica são uma das principais causas de falhas e redução da vida útil destes equipamentos. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema para a comutação remota de consumidores pelas três fases do transformador de distribuição de energia eléctrica. Inicialmente, foi realizada uma avaliação do estado actual do sistema de distribuição de energia da Electricidade de Moçambique, concretamente a área do Infulene, com base na análise da frequência de falhas em transformadores da área em questão causados pela sobrecarga e desequilíbrio de cargas entre as fases. De seguida foram identificados os principais componentes necessários para a implementação do sistema. Por fim foram projectados e desenvolvidos algoritmos que permitissem o balanceamento remoto das cargas para o alívio imediato das condições de sobrecarga e desequilíbrio de cargas nos transformadores de distribuição. Os resultados obtidos dos ensaios feitos demonstram que o sistema proposto é capaz de ser uma ferramenta eficiente para realizar o fluxo de cargas, reduzindo significativamente falhas potencializadas pelas condições de sobrecarga e desequilíbrio de cargas.

**Palavras Chaves:** Redes inteligentes de distribuição de energia eléctrica, monitoramento de desequilíbrio de fases em transformadores de distribuição, detecção de sobrecarga em transformadores de distribuição

## ABSTRACT

Desenvolvimento de um Sistema Automático de Partilha e Balanceamento de Carga em Transformadores de Distribuição de Energia Eléctrica.

Overload and phase imbalance in electrical energy distribution transformers are one of the main causes of failures and reduced useful life of this equipment. This report presents the development of a system for the remote switching of consumers through the three phases of the electrical energy distribution transformer. Initially, an assessment was carried out of the current state of the EDM energy distribution system, specifically the Infulene area, based on the analysis of the frequency of failures in transformers in the area in question caused by overload and load imbalance between phases. The main components necessary for implementing the system were then identified. Finally, algorithms were designed and developed to allow remote balancing of loads to immediately alleviate overload and load imbalance conditions in distribution transformers. The results obtained from the tests carried out demonstrate that the proposed system is capable of being an efficient tool for carrying out load flow, significantly reducing failures caused by overload and load imbalance conditions.

**Keywords:** Smart grid, Load balance in power distribution transformers, overload detection in distribution transformers

# Índice de Conteúdo

<b>Índice</b>	<b>xix</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>xxi</b>
<b>Lista de Acrónimos</b>	<b>xxv</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Formulação do problema . . . . .	1
1.2 Pergunta de pesquisa . . . . .	2
1.3 Delimitação . . . . .	2
1.3.1 Temporal . . . . .	2
1.4 Justificativa . . . . .	2
1.5 Objectivos . . . . .	2
1.5.1 Objectivos Gerais . . . . .	2
1.5.2 Objectivos Específicos . . . . .	2
1.6 Metodologia de investigação . . . . .	3
1.7 Estrutura do trabalho . . . . .	3
<b>2 Electricidade de Moçambique ( EDM)</b>	<b>5</b>
2.1 Histórico . . . . .	5
2.2 Organograma da Divisão de Transporte Sul (DTSU) . . . . .	8
2.2.1 Sector de telecomunicações & Scada . . . . .	9
2.2.1.1 Telecomunicações . . . . .	9
2.2.1.2 Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados - <i>Supervi-</i> <i>sory Control and Data Acquisition (SCADA)</i> . . . . .	10
2.3 Lista de actividades . . . . .	11
2.4 Considerações finais sobre o estágio . . . . .	12

<b>3</b>	<b>Resumo teórico</b>	<b>13</b>
3.1	Transformadores . . . . .	13
3.1.1	Tipos de transformadores . . . . .	13
3.1.1.1	Quanto a finalidade . . . . .	14
3.1.1.2	Quanto ao número de fases . . . . .	15
3.1.2	Aspectos construtivos . . . . .	16
3.1.3	Transformador ideal . . . . .	17
3.1.4	Transformador monofásico real . . . . .	19
3.1.4.1	Corrente de magnetização em um transformador real . . . . .	22
3.1.4.2	Perdas em transformadores reais . . . . .	25
3.1.5	Transformadores trifásicos . . . . .	26
3.1.5.1	ligações de um transformador trifásico . . . . .	27
3.2	Desequilíbrio de fases . . . . .	30
3.2.1	Consequências do desequilíbrio de fases . . . . .	31
3.3	Perda de vida útil em transformadores . . . . .	33
3.3.1	Efeito do tempo de operação na perda de vida dos transformadores . . . . .	34
3.3.2	Sobrecargas e envelhecimento dos transformadores . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Desenho e implementação do protótipo</b>	<b>42</b>
4.1	Visão geral . . . . .	42
4.1.1	Configuração geral do sistema . . . . .	42
4.2	Descrição funcional do sistema . . . . .	44
4.2.1	Requisitos do sistema . . . . .	44
4.2.1.1	Requisitos de hardware . . . . .	45
4.2.1.2	Requisitos de software . . . . .	45
4.2.2	Descrição do Hardware . . . . .	45
4.2.2.1	Placa microcontroladora ESP32 . . . . .	45
4.2.2.2	Sensor de corrente ACS721 . . . . .	47
4.2.2.3	Módulo relé de 3 canais . . . . .	49
4.2.2.4	Módulo SIM800L . . . . .	50
4.2.3	Descrição do software . . . . .	51
4.2.3.1	Tela de login . . . . .	51
4.2.3.2	Tela principal . . . . .	52
4.2.3.3	Menu Dashboard . . . . .	53

4.2.3.4	Menu clientes . . . . .	53
4.2.3.5	Menu Postos de transformação . . . . .	54
4.2.3.6	Menu Alarmes . . . . .	55
<b>5</b>	<b>Ensaio e resultados</b>	<b>57</b>
5.1	Teste de conexão . . . . .	57
5.2	Teste de envio de comandos e leitura das correntes . . . . .	58
5.3	Teste de disparo de alarmes . . . . .	58
5.4	Custos do projecto . . . . .	59
<b>6</b>	<b>Conclusões e recomendações</b>	<b>60</b>
6.1	Conclusão . . . . .	60
6.2	Recomendações . . . . .	61
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>62</b>
	<b>Anexos</b>	<b>64</b>
<b>1</b>	<b>Transformadores avariados 2024</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Esquemas eléctricos</b>	<b>2</b>

# Lista de Figuras

2.1	Logotipo da EDM. Fonte: <a href="https://seeklogo.com/images/E/electricidade-de-mocambique-edm-logo-A6FAC89485-seeklogo.com.png">https://seeklogo.com/images/E/electricidade-de-mocambique-edm-logo-A6FAC89485-seeklogo.com.png</a> . . . . .	6
2.2	Organograma da DTSU. Fonte: <a href="https://www.edm.co.mz/pt/website/page/estrutura-org%C3%A2nica">https://www.edm.co.mz/pt/website/page/estrutura-org%C3%A2nica</a> . . . . .	8
3.1	Diagrama de um transformador de corrente. Fonte: [2] . . . . .	15
3.2	Construção do transformador do tipo nucleo envolvido. Fonte: [2] . . . . .	16
3.3	Construção do transformador do tipo nucleo envolvente. Fonte: [2] . . . . .	16
3.4	Transformador ideal. Fonte: [2] . . . . .	17
3.5	Diagrama esquemático de um transformador real sem nenhuma carga aplicada ao secundário. Fonte: [2] . . . . .	19
3.6	Fluxos concatenado e mútuo em um núcleo de transformador. Fonte: [2] . . . . .	20
3.7	a) Curva de magnetização do núcleo do transformador. b) Corrente de magnetização causada pelo fluxo no núcleo do transformador. Fonte: [2] . . . . .	24
3.8	Corrente de excitação total em um transformador. Fonte: [2] . . . . .	25
3.9	Banco de transformadores trifásicos composto de transformadores independentes. Fonte: [2] . . . . .	27
3.10	Banco de transformadores trifásicos enrolado em único núcleo de três pernas. Fonte: [2] . . . . .	27
3.11	Diagrama de fiação Y-Y. Fonte: [2] . . . . .	28
3.12	Diagrama de fiação Y- $\Delta$ . Fonte: [2] . . . . .	28
3.13	Diagrama de fiação $\Delta$ -Y. Fonte: [2] . . . . .	29
3.14	Diagrama de fiação $\Delta$ - $\Delta$ . Fonte: [2] . . . . .	29
3.15	Desfasagem angular vetorial equilibrada ( a ) e desequilibrada ( b ): Fonte: [3] . . . . .	31
3.16	Taxa de envelhecimento do transformador x temperatura do enrolamento em % . . . . .	41

4.1	Configuração geral da proposta de solução. Fonte: Autor, 2024 . . . . .	43
4.2	Princípio geral de funcionamento do sistema. Fonte: Autor, 2024 . . . . .	43
4.3	Descrição de pinos do ESP32. Fonte: [9] . . . . .	46
4.4	Descrição de pinos do sensor de corrente ACS712. Fonte: [10] . . . . .	48
4.5	Descrição de pinos do módulo relé de 3 canais. Fonte: [11] . . . . .	49
4.6	Descrição de pinos do módulo SIM800L. Fonte: [12] . . . . .	50
4.7	Tela de login. Fonte:Autor, 2024 . . . . .	52
4.8	Tela inicial. Fonte:Autor, 2024 . . . . .	52
4.9	Menu dashboard. Fonte:Autor, 2024 . . . . .	53
4.10	Menu clientes. Fonte:Autor, 2024 . . . . .	54
4.11	Menu postos de transformação. Fonte:Autor, 2024 . . . . .	55
4.12	Menu alarmes. Fonte:Autor, 2024 . . . . .	56
5.1	Resultado do teste de conexão. Fonte:Autor, 2024 . . . . .	57
5.2	Resultado do teste de envio de comando e leitura das correntes. Fonte:Autor, 2024 . . . . .	58
5.3	Resultado do teste de disparo de alarmes. Fonte:Autor, 2024 . . . . .	59
1.1	Lista de transformadores avariados ASC Infulene. Fonte: ASC Infulene . .	1
2.1	Circuito do hardware de coleta do lado do transformador. Fonte: Autor,2024	3
2.2	Circuito do hardware de coleta do lado do consumidor. Fonte: Autor,2024 .	4

# Lista de Tabelas

2.1	Lista de actividades realizadas durante o estágio . . . . .	11
3.1	Dados dos ensaios sobre a perda de vida do transformador com carregamentos a temperatura ambiente de 30°. Fonte: [5] . . . . .	36
3.2	Vida útil estimada do transformador em função da temperatura do ponto mais quente do enrolamento. Fonte: [4] . . . . .	39
3.3	Vida útil estimada do transformador em função da temperatura do ponto mais quente do enrolamento. Fonte: [4] . . . . .	40
3.4	Vida útil estimada do transformador em anos. Fonte: [4] . . . . .	41
4.1	Especificações técnicas do ESP32. Fonte:DATASHEET ESP32-WROOM-32D . . . . .	46
4.2	Especificações técnicas do sensor de corrente ACS712. Fonte:DATASHEET do ACS712 . . . . .	48
4.3	Especificações técnicas do módulo relé de 3 canais. Fonte:DATASHEET do módulo relé . . . . .	50
4.4	Especificações técnicas do módulo SIM800L. Fonte:DATASHEET do SIM800L	51
5.1	Levantamento dos custos para a realização do projecto Fonte: Autor, 2024	59

# Lista de Acrónimos

- ADC** Conversor Analógico-Digital. 45
- ANSI** *American National Standards Institute*. 35
- API** *Application Programming Interface*. 53
- ASC** Área de Serviço ao Cliente. 1
- CA** Corrente Alternada. 13
- CPU** Unidade Central de Processamento. 10
- CT** Transformadores de corrente. 10
- DAC** Conversor Digital-Analógico. 45
- DC** Corrente Contínua. 47
- DTSU** Divisão de Transporte Sul. xix
- EDM** Electricidade de Moçambique. 5
- GPIO** *General Purpose Input/Output*. 45
- GPRS** General Packet Radio Service. 50
- HMI** Interface Homem-Máquina. 10
- HTTP** Protocolo de Transferência de HiperTexto - *HyperText Transfer Protocol*. 50
- I2C** Circuitos Interintegrados - *Inter-Integrated Circuits*. 45
- IEEE** *Institute of Electrical and Electronics Engineers*. 35
- IP** Protocolo de *Internet* - *Internet Protocol*. 50
- LM** *Load Manager*. 42

**PDH** Hierarquia Digital pleiosicrônica. 9

**PLC** *Power Line Carrier*. 9

**PT** Posto de Transformação. 45

**PWM** Modulação por Largura de Pulso. 45

**RTU** Unidades Terminais Remotas. 10

**SCADA** Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados - *Supervisory Control and Data Acquisition*. xix

**SDH** Hierarquia Digital Síncrona. 9

**SPI** *Serial Peripheral Interface*. 45

**TCP** Protocolo de Controle da Transmissão - *Transmission Control Protocol*. 50

**UART** *Universal Asynchronous Receiver Transmitter*. 45

**VT** Transformadores de tensão. 10

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Formulação do problema

O fornecimento de energia eléctrica é um dos pilares fundamentais para o desenvolvimento económico e social de qualquer sociedade moderna. A electricidade é essencial para uma vasta gama de actividades diárias, desde as tarefas domésticas básicas até as operações industriais complexas. A Infraestrutura de fornecimento de electricidade é vasta e complexa, envolvendo várias etapas e tecnologias. Uma destas etapas é a distribuição, ela visa entregar electricidade diretamente aos consumidores, sejam eles residenciais, comerciais ou industriais. No entanto, este processo enfrenta um recorrente problema que é o envelhecimento precoce dos transformadores de distribuição de energia eléctrica. Segundo dados colhidos na lista de transformadores avariados da Área de Serviço ao Cliente (ASC) Infulene anexa a este relatório como anexo 1, até Maio do ano corrente, já possuía 6 transformadores avariados, sendo 4 deles com curto-circuito interno como provável causa da avaria. Segundo profissionais do departamento de projectos de electrificação este fenómeno é causado pela sobrecarga deste equipamento e o desequilíbrio de cargas entre as fases. A falta de dispositivos próprios para a deteção precoce das condições de sobrecarga e desequilíbrio de carga nas fases dificultam o processo de solução destes problemas, culminando com o envelhecimento precoce deste activo muito importante para a concessionária de energia eléctrica. Desta forma é necessário um dispositivo capaz de detectar automaticamente as condições de sobrecarga e desequilíbrio de fases, bem como permitir a comutação remota das cargas entre as fases de maneira a equilibra-las.

## **1.2 Pergunta de pesquisa**

De que maneira se pode controlar remotamente as cargas ( consumidores), de maneira a mitigar as condições de sobrecarga e desequilíbrio de carga entre as fases?

## **1.3 Delimitação**

### **1.3.1 Temporal**

Este projecto decorreu desde o dia 1 de abril até 8 de setembro do ano de 2024, o período para o desenvolvimento do sistema automático de partilha e balanceamento de carga em transformadores de distribuição de energia eléctrica.

## **1.4 Justificativa**

A proposta de um sistema automático de balanceamento de cargas é uma solução promissora face ao problema em questão pois esta irá proporcionar benefícios como: prolongamento do tempo de vida útil do transformador, redução de prejuízos económicos para a concessionária, fornecimento contínuo, eficiente, confiável e sustentável de energia eléctrica.

## **1.5 Objectivos**

### **1.5.1 Objectivos Gerais**

- a) Desenvolver um sistema de partilha e balanceamento de cargas em transformadores de distribuição de energia eléctrica para proteção contra sobrecarga.

### **1.5.2 Objectivos Específicos**

- a) Avaliar o estado actual do sistema de distribuição através da análise de frequência de avaria dos transformadores afectados pelo desequilíbrio de cargas;
- b) Projectar e desenvolver algoritmos para o balanceamento remoto de cargas, tendo em conta factores como capacidade do transformador, demanda de carga actual e

histórico de consumo;

- c) Identificar de forma generalizada os componentes necessários para o desenvolvimento e implementação do sistema;
- d) Apresentar resultados.

## 1.6 Metodologia de investigação

De maneira a materializar a ideia de solução proposta neste projecto serão seguidas as seguintes etapas:

- Recolha de dados

A recolha de dados será feita com base em pesquisas exploratórias. Esta tem como intuito a aquisição de dados sobre situações passadas e actuais do funcionamento do sistema de distribuição de energia eléctrica.

- Pesquisa documental

A pesquisa documental foi realizada através da leitura de relatórios da Electricidade de Moçambique E.P, com a finalidade de adquirir informações sobre a frequência de avaria de transformadores no sistema de distribuição de energia eléctrica da concessionária.

- Pesquisa bibliográfica

A pesquisa bibliográfica tem como finalidade realizar colecta de informações bibliográficas ( manuais, vídeos na internet, fóruns e stack overflow) publicadas por diversos autores, que discutem o assunto relacionado com o tema em estudo.

## 1.7 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está dividido em 6 capítulos de desenvolvimento do texto, apresentados a seguir:

CAPÍTULO 1 - Neste capítulo é feita a apresentação geral do trabalho, o que inclui: a formulação e delimitação do problema, a justificativa de pesquisa, os objectivos que se pretendem alcançar, a metodologia a ser utilizada para o alcance dos mesmos, bem como a estrutura do trabalho.

CAPÍTULO 2 - Neste capítulo é feito um resumo sobre o estágio, onde são apresentados aspectos como: historial da empresa concedente do estágio, o seu organograma, a lista das actividades desenvolvidas e algumas considerações sobre o estágio.

CAPÍTULO 3 - Neste capítulo é apresentada a revisão das principais teorias que justificam a realização da pesquisa e servirão de alicerce para sustentação da proposta de solução.

CAPÍTULO 4 - Neste capítulo é apresentada a proposta de solução, o que consistirá em dissertar sobre: os requisitos do sistema e a descrição dos componentes necessários para a implementação da proposta de solução.

CAPÍTULO 5 - Neste capítulo é realizada a apresentação dos resultados obtidos nos ensaios realizados com o protótipo, bem como os custos despendidos para a concepção do mesmo.

CAPÍTULO 6 - Neste capítulo são dadas as considerações finais sobre o trabalho.

# Capítulo 2

## Electricidade de Moçambique ( EDM)

### 2.1 Histórico

A Electricidade de Moçambique (EDM) foi criada a 27 de agosto de 1977, com o objetivo de estabelecer e explorar o serviço público de produção, transporte e distribuição de energia eléctrica. Face ao desafio de atender às necessidades energéticas para o desenvolvimento de actividades agrícolas, industriais, outros serviços e consumo doméstico, a EDM embarcou na tarefa de agregar todos os centros de produção em um único corpo. A EDM herdou um património composto por equipamentos de diversas origens, modelos e tipos, em condições precárias e muitas delas sem peças sobressalentes adequadas. Além das condições adversas dos equipamentos, a competência e capacidade profissional eram limitadas, encontrando-se numa situação em que a pouca mão de obra técnica qualificada estava deixando a empresa.

Como forma de fazer face a estes desafios, as acções imediatas da EDM foram as seguintes:

- Reposição adequada de aprovisionamento;
- Recrutamento interno e externo de técnicos qualificados;
- Promoção de acções de formação profissional com apoio externo;
- Execução de formações básicas nas várias centrais, coordenada pelo serviço de formação da EDM;
- Mobilização de apoio técnico e financeiro externo.

Visando reduzir o uso de gásóleo e estabelecer uma rede nacional de transporte de energia, a EDM começou a explorar alternativas de produção de energia eléctrica baseada em recursos hídricos, mas este projecto veio a ser inviabilizado pela instabilidade sócio – política da época.

Entre avanços e retrocessos a EDM concentrou seus recursos na reparação e manutenção das infraestruturas, garantindo o fornecimento de energia eléctrica com baixa fiabilidade, devido as políticas tarifarias mantidas pelo estado, que não refletiam os custos reais.

### **Nova Gestão da empresa**

Em 1995, no contexto da reestruturação económica do país, a EDM foi transformada em empresa pública ( EDM – E.P) pelo Decreto 28/95, herdando dividas associadas a investimentos anteriores. A nova gestão passou a focar-se na melhoria da qualidade dos serviços ao cliente e na utilização eficiente de energia, promovendo uma nova imagem.



## **ELECTRICIDADE DE MOÇAMBIQUE, E.P.**

**Figura 2.1: Logotipo da EDM. Fonte: <https://seeklogo.com/images/E/electricidade-de-mocambique-edm-logo-A6FAC89485-seeklogo.com.png>**

A estrutura organizacional foi reformulada para assegurar autonomia e descentralização operacional, permitindo que os administradores se concentrassem em questões estratégicas. A empresa iniciou uma reorganização para enfrentar problemas e desafios do setor eléctrico, conforme o plano quinquenal do governo.

### **Objectivos estratégicos e modernização**

Os objectivos estratégicos eram os seguintes:

- Melhoria da qualidade dos serviços aos clientes;
- Expansão da rede eléctrica doméstica e regional;
- Desenvolvimento institucional, focado na criação de uma força de trabalho motivada;
- Participação na exploração do potencial hídrico do país.

De forma a alcançar esses objectivos, a EDM lançou bases para a viabilização e modernização que consistiram nos seguintes pontos:

- Reestruturação institucional promovendo competência e melhoria de gestão;
- Criação de direcções regionais e áreas operacionais com maior autonomia;
- Estabelecimento de departamentos comerciais e expansão do sistema de faturação;
- Tornar a EDM comercialmente viável e reduzir perdas de energia.

O propósito, aspirações e princípios da EDM são norteados pelos seguintes elementos:

### **Missão**

- Produzir, transportar, distribuir e comercializar energia eléctrica de boa qualidade, de forma sustentável, para iluminar e potencializar a industrialização do país.

### **Visão**

- Transformar-se em uma Utilidade Inteligente e Sustentável, que dá acesso à energia eléctrica de qualidade a cada moçambicano e exerce liderança no Mercado Regional.

### **Valores**

- Integridade;
- Transparência;
- Igualdade;
- Competitividade;
- Espírito de equipe.

## Lema

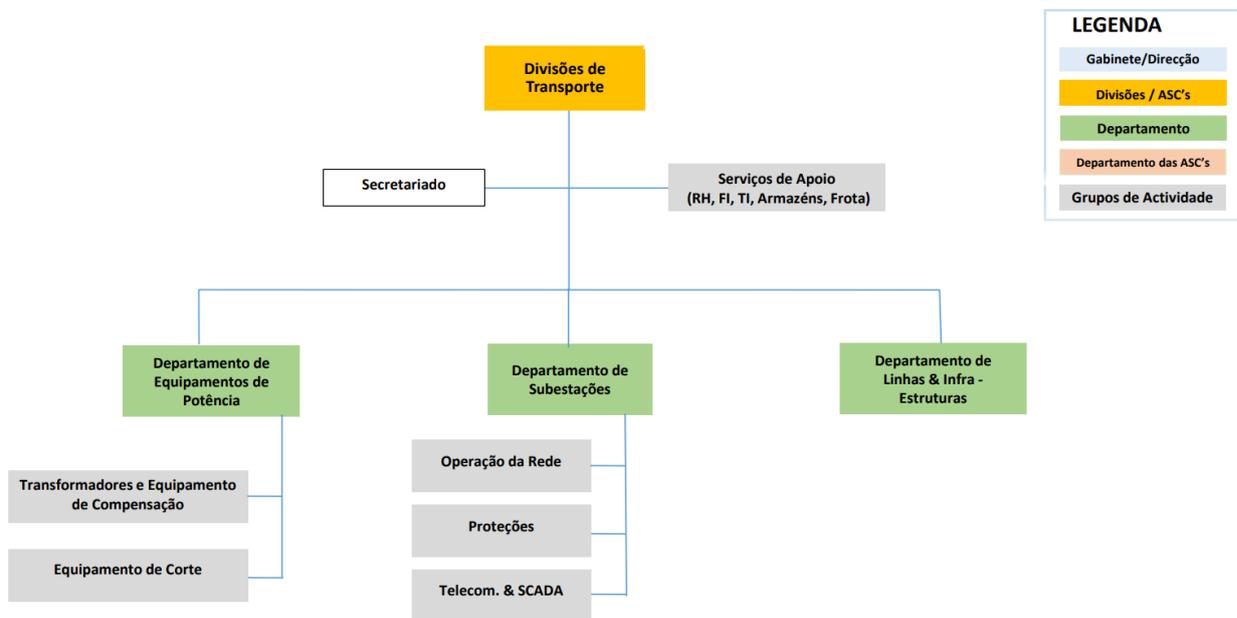
Iluminando a transformação de Moçambique;

## Objectivos estratégicos até 2030

- Alcançar o acesso universal à energia eléctrica;
- Transformar Moçambique num pólo regional de energia eléctrica;
- Alcançar a igualdade de género

## 2.2 Organograma da DTSU

A EDM está dividida em diversos gabinetes e pelouros, para o presente relatório falaremos somente do pelouro de produção e transporte, especificamente a divisão de transporte que foi o local do estágio. A estrutura organizacional da DTSU pode ser vista na figura 2.2



**Figura 2.2: Organograma da DTSU. Fonte:**<https://www.edm.co.mz/pt/website/page/estrutura-org%C3%A2nica>

A DTSU é responsável pela gestão eficiente e eficaz das actividades de Operação e Manutenção da Rede de Transmissão da região sul de Moçambique. A rede compreende instalações de interconexão para produtores de energia e importações, infraestruturas de transporte de energia eléctrica para fornecer energia para exportação, consumidores de

grande porte e redes de distribuição conectadas à rede de transmissão da região sob sua responsabilidade.

## 2.2.1 Sector de telecomunicações & Scada

O sector de telecomunicações e SCADA opera dentro do departamento de subestações conjuntamente com os restantes dois sectores no respectivo departamento com o fundamental papel de garantir a eficiência, confiabilidade, monitoria e segurança das operações de transmissão de energia.

### 2.2.1.1 Telecomunicações

As Telecomunicações desempenham um papel crucial na coordenação e monitoramento das actividades de transmissão de energia eléctrica.

Elas garantem que as informações vitais sobre o estado e desempenho do sistema eléctrico sejam transmitidas de maneira eficiente e em tempo real. Além disso, permitem a realização de operações remotas, monitoramento contínuo e resposta rápida a eventos e falhas, assegurando a estabilidade e a confiabilidade da rede eléctrica. A integração dessas tecnologias de comunicação é fundamental para a eficiência operacional e a segurança do sistema de transmissão de energia. Essas tecnologias devem ser capazes de suportar a transmissão de dados e comunicação de voz entre subestações, centros de controle e outras infraestruturas essenciais. A DTSU dispõe das seguintes tecnologias:

- **Power Line Carrier (PLC):** esta é uma tecnologia de comunicação que consiste em transmitir dados e voz em banda larga usando como meio físico de comunicação as próprias linhas de transmissão;
- **Hierarquia Digital pleiosicrônica (PDH) e Hierarquia Digital Síncrona (SDH):** são tecnologias de multiplexação digital utilizadas nas subestações para transmitir múltiplos sinais de dados digitais simultaneamente;
- **Redes de fibra óptica:** são meios físicos de comunicação de rápida e alta capacidade utilizados entre diferentes pontos da rede de transporte;
- **Sistemas de rádio:** são utilizados para comunicação de voz em áreas onde outras formas de comunicação são inviáveis: Este sistema é composto por Torres, repetidoras, rádios fixos e móveis.

## 2.2.1.2 SCADA

O SCADA desempenha um papel vital na gestão eficiente e segura das subestações, Ele integra tecnologias para oferecer uma visão abrangente e em tempo real do sistema de transporte de energia, permitindo uma operação otimizada e confiável. Este sistema é composto pelos seguintes componentes:

- **Dispositivos de campo**

Estes dispositivos efectuam a medição de parâmetros eléctricos como tensão, corrente, potencia, frequência e outros dados operacionais. Fazem parte do leque destes dispositivos: Transformadores de corrente (CT), Transformadores de tensão (VT), relés de protecção e dispositivos de medição.

- **Unidades Terminais Remotas (RTU)**

As RTU são dispositivos de controle, estes dispositivos têm como principal objectivo monitorar e controlar os dispositivos de campo. Estes são componentes essenciais do sistema SCADA, estabelecendo interfaces entre o controle SCADA e os processos físicos. Uma RTU consiste em Unidade Central de Processamento (CPU), fonte de alimentação, portas de comunicação e de entradas/saídas físicas.

- **Centro Nacional de Despacho**

O centro de nacional de despacho é o núcleo do sistema, onde os dados são centralizados, processados e analisados. Ele é composto por servidores, estações de trabalho, bancos de dados e Interface Homem-Máquina (HMI). Este último fornece aos operadores visualizações gráficas das subestações, permitindo o monitoramento dos estados operacionais, alarmes, eventos e execução de comandos de controle.

As componentes acima mencionadas coadunam de forma a desempenhar as seguintes principais funções:

- **Monitoria em tempo real:** colecta de dados por meio de dispositivos de campo nas subestações e ao longo da rede de transmissão para fornecer informações actualizadas sobre o estado do sistema;
- **Controle Remoto:** permite aos operadores ajustarem remotamente e localmente parâmetros operacionais tais como ajustar transformadores, configurar sistemas de protecção, abrir e fechar disjuntores, etc. bem como responder a eventos (Falhas, sobrecargas);

- **Aquisição de dados:** após a colecta dos dados eles são armazenados em bancos de dados históricos para posterior geração de relatórios, análise de tendências e diagnóstico de falhas;
- **Segurança:** através do processamento de alarmes e eventos, possibilita a detecção de condições anormais, disponibilizando detalhes para acções correctivas, identificação de pontos de melhoria na eficiência energética e na resposta a acidentes.

## 2.3 Lista de actividades

**Tabela 2.1: Lista de actividades realizadas durante o estágio**

Data	Actividades
01-04	Apresentação das instalações e do grupo de trabalho
02-04	Visita ao parque da SE Infulene
03-04 à 12-04	Integração com equipamentos e ferramentas dos sistemas de Telecomunicações e SCADA
15-04 à 19-04	Diagnóstico e reparação da avaria de internet na SE Indulene
20-04	Manutenção preventiva da SE Matola Rio
22-04 à 24-04	Manutenção correctiva do banco de baterias de 48VDC na SE Matola-Gare
25-04 à 26-06	Reposição da hotline CND - Motraco e CND - CTRG
29-04	Manutenção correctiva do rádio móvel na ASC Kamubukwana
30-04 à 01-05	Manutenção preventiva das repetidoras da Olof Palme e Boane
02-05 à 14-05	Comissionamento nas SEs 1, 2, 5, 8 e Marracuene
21-05 à 31-05	Manutenção preventiva do banco de baterias de 48VDC nas SEs 6, Matola 275 e Infulene
03-06 à 10-06	Lançamento de cabo coaxial do LMU para o PLC na SE Matola 275
11-06 à 14-06	Integração de novos equipamentos do parque da SE Boane no SCADA
17-06 à 19-06	Reposição da comunicação da RTU e os painéis na SE Matola-Gare

## 2.4 Considerações finais sobre o estágio

No decorrer do meu estágio na EDM - DTSU, tive a oportunidade de me envolver em diversas actividades relacionadas ao monitoramento da rede de transporte de energia. Cada uma das actividades desenvolvidas contribuíram para o meu desenvolvimento profissional.

Durante o estágio, adquiri conhecimentos técnicos valiosos, como:

### **No sector de telecomunicações:**

1. Fundamentos de redes de telecomunicações;
2. Configuração e gerenciamento de equipamentos;
3. Manutenção e diagnóstico de tecnologias de fibra óptica.

### **No sector de SCADA:**

1. Fundamentos da arquitectura do sistema SCADA;
2. Monitoramento e controle remoto;
3. Diagnóstico e instalação de PLC;
4. Familiarização com protocolos de comunicação SCADA.

Esta experiência também me permitiu compreender melhor os desafios e as complexidades do setor de transporte de energia.

Gostaria de expressar a minha gratidão ao Eng<sup>o</sup> Hermenegildo Chavane e a toda equipe da EDM - DTSU pelo suporte e orientação ao longo do estágio. Estou confiante de que as habilidades e conhecimentos adquiridos serão de grande valor para minha carreira futura.

Em resumo, o estágio na EDM - DTSU me proporcionou uma visão prática essencial no setor de transporte de energia. Estou ansioso para continuar crescendo profissionalmente nessa área.

# Capítulo 3

## Resumo teórico

### 3.1 Transformadores

Um transformador é um dispositivo que converte, por meio da ação de um campo magnético, a energia elétrica Corrente Alternada (CA) de uma dada frequência e nível de tensão em energia elétrica CA de mesma frequência, mas outro nível de tensão. Ele consiste em duas ou mais bobinas de fio enroladas em torno de um núcleo ferromagnético comum. Essas bobinas ( usualmente) não estão conectadas diretamente entre si. A única conexão entre as bobinas é o fluxo magnético comum presente dentro do núcleo. [2]

Um dos enrolamentos do transformador é ligado a uma fonte de energia elétrica CA e o segundo enrolamento do transformador fornece energia às cargas. O enrolamento do transformador ligado à fonte de energia é denominado enrolamento primário ou enrolamento de entrada e o enrolamento conectado às cargas é denominado enrolamento secundário ou enrolamento de saída. [2]

A invenção do transformador constituiu um feito tecnológico que contribuiu significativamente para a expansão de energia elétrica e criou condições para novas invenções.

#### 3.1.1 Tipos de transformadores

Os transformadores podem ser classificados de acordo com os seguintes critérios: finalidade e ao número de fases.

### 3.1.1.1 Quanto a finalidade

#### 1. Transformador de potencia

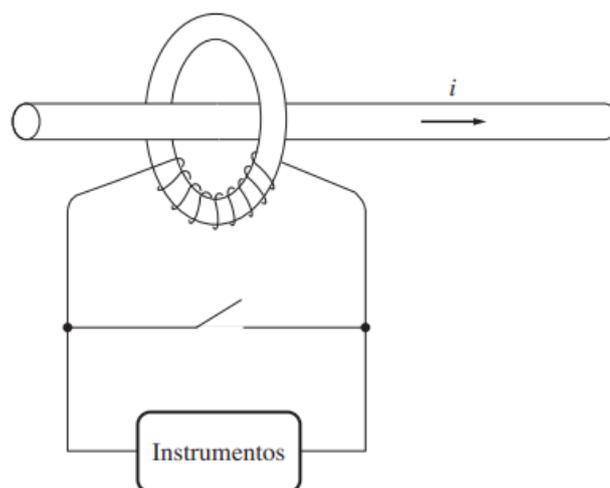
São transformadores destinados a transmitir potencias consideráveis alimentados por tensão e frequência fixas. Estes são utilizados para a geração e distribuição de energia por concessionárias, usinas e subestações de distribuição de energia eléctrica. [2]

#### 2. Transformador de potencial ( TP/TT)

É um transformador especialmente enrolado com um primário de alta tensão e um secundário de baixa tensão. Ele apresenta uma potência nominal muito baixa e sua única finalidade é fornecer uma amostra da tensão do sistema de potência aos instrumentos que o monitoram. Como o propósito principal do transformador é a amostragem de tensão, ele deve ser muito exato para não distorcer seriamente os valores verdadeiros de tensão. Transformadores de potencial de diversas classes de exatidão podem ser adquiridos, dependendo de quão exatas devem ser as leituras das medidas para uma dada aplicação.

#### 3. Transformador de corrente ( TC/TI)

Toma uma amostra da corrente que flui em uma linha e a reduz a um nível seguro e mensurável. Um diagrama de transformador de corrente típico é apresentado na figura 3.1. O transformador de corrente consiste em um enrolamento secundário enrolado em torno de um anel ferromagnético, com o primário constituído simplesmente pela linha que passa através do centro do anel. O anel ferromagnético retém e concentra uma pequena amostra do fluxo oriundo da linha do primário. A seguir, esse fluxo induz uma tensão e uma corrente no enrolamento secundário. Um transformador de corrente é diferente dos outros transformadores descritos nesta secção, porque seus enrolamentos são fracamente acoplados. Diferentemente de todos os outros transformadores, o fluxo mútuo  $\phi_M$  no transformador de corrente é menor do que o fluxo de dispersão  $\phi_M$ . Devido ao acoplamento fraco, as razões de tensão e de corrente do transformador ideal não se aplicam a um transformador de corrente.



**Figura 3.1: Diagrama de um transformador de corrente. Fonte: [2]**

No entanto, a corrente no secundário de um transformador de corrente é directamente proporcional à corrente muito maior do primário e desse modo, o dispositivo poderá fornecer uma amostra exata da corrente de linha para propósitos de mensuração. As especificações nominais de um transformador de corrente são dadas como razões de correntes entre o primário e o secundário. Uma razão típica para um transformador de corrente poderia ser 600:5800:5 ou 1000:5. Uma especificação de 5 A é um valor usado como padrão para o secundário de um transformador de corrente. É importante que o transformador de corrente esteja permanentemente em curto circuito, porque tensões extremamente elevadas poderão surgir se os terminais do enrolamento secundário estiverem abertos. De fato, a maioria dos relés e outros dispositivos que fazem uso da corrente de um transformador de corrente tem um intertravamento de curto circuito que deve ser fechado antes que o relé possa ser removido para inspeção ou ajustes. Sem esse intertravamento, surgirão tensões elevadas muito perigosas nos terminais do secundário quando o relé for removido de seu soquete.

### **3.1.1.2 Quanto ao número de fases**

#### **1. Monofásico**

É um transformador que opera com uma única fase de corrente, é geralmente usado para alimentar circuitos de comando.

#### **2. trifásico**

É um transformador que opera com três fases de corrente, estes podem ser construídos de duas maneiras: banco trifásico, que consiste basicamente de 3 transformadores monofásicos e núcleo trifásico, que é composto por um único núcleo – mononuclear.

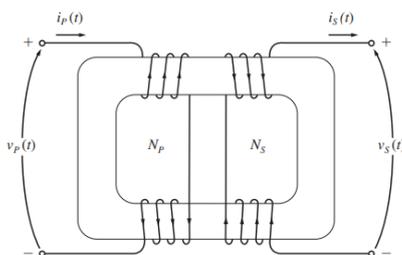
### 3. Polifásico

É um transformador com alimentação trifásica no primário, para obter no secundário uma elevação do número de fases ( ex: 4, 6, 12, etc).

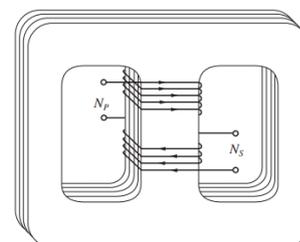
#### 3.1.2 Aspectos construtivos

Os transformadores de potencia são construídos de dois tipos principais: tipo de núcleo envolvido e o tipo de núcleo envolvente. O tipo de núcleo envolvido, consiste em um bloco retangular laminado simples de aço com os enrolamentos do transformador envolvendo dois lados do rectângulo, este tipo de construção está ilustrado na figura 3.2. O outro tipo de construção é conhecido como núcleo envolvente consiste em um núcleo laminado de três pernas com os enrolamentos envolvendo a perna central, esta está ilustrada na figura 3.3. Em ambos os casos, o núcleo é construído com laminas ou chapas delgadas, electricamente insuladas entre si para minimizar as correntes parasitas. Em um transformador real, os enrolamentos primário e secundário envolvem um o outro, sendo o enrolamento de baixa tensão o mais interno. Essa disposição visa atender dois propósitos: [2]

- 1 - Simplificar o problema de isolar o enrolamento de alta tensão do núcleo;
- 2 - Garantir menor fluxo de dispersão do que seria o caso se os dois enrolamentos estivessem separados de uma distancia no núcleo.



**Figura 3.2: Construção do transformador do tipo nucleo envolvido. Fonte: [2]**



**Figura 3.3: Construção do transformador do tipo nucleo envolvente. Fonte: [2]**

### 3.1.3 Transformador ideal

Um transformador ideal é um dispositivo sem perdas com um enrolamento de entrada e um enrolamento de saída. As relações entre a tensão de entrada e a tensão de saída e entre a corrente de entrada e a corrente de saída são dadas por duas equações simples. A figura 3.4 mostra um transformador ideal. O transformador mostrado na Figura 3.4 tem  $N_P$  espiras de fio no lado do enrolamento primário e  $N_S$  espiras de fio no lado do secundário. A relação entre a tensão  $v_p(t)$  aplicada no lado do enrolamento primário do transformador e a tensão  $v_s(t)$  produzida no lado do secundário é dada pela equação 3.1.

$$\frac{v_p(t)}{v_s(t)} = \frac{N_p(t)}{N_s(t)} = a \quad (3.1)$$

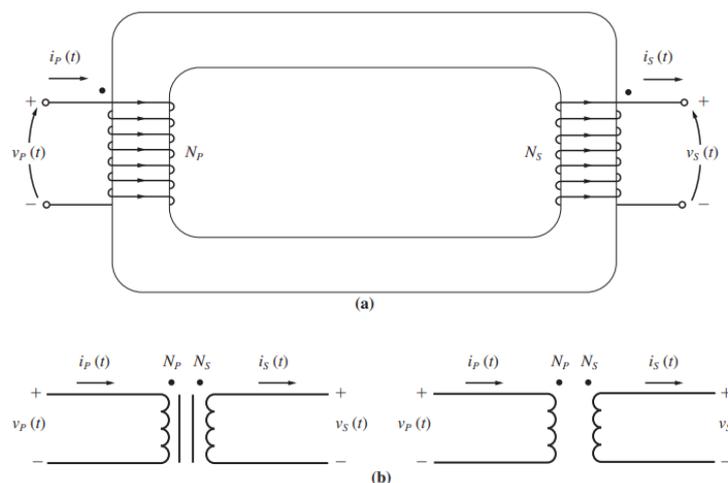
Onde  $a$  é definido como a relação de espiras ou de transformação do transformador.

A relação entre a corrente  $i_p(t)$  que entra no lado primário do transformador e a corrente  $i_s(t)$  que sai do lado secundário do transformador é dada pela equação:

$$N_P * i_P(t) = N_S * i_S(t) \quad (3.2)$$

Ou

$$\frac{i_p(t)}{i_s(t)} = \frac{1}{a} \quad (3.3)$$



**Figura 3.4: Transformador ideal. Fonte: [2]**

Em termos de grandezas fasoriais, as equações 3.4 e 3.5, são descritas como:

$$\frac{V_P}{V_S} = a \quad (3.4)$$

$$\frac{I_P}{I_S} = \frac{1}{a} \quad (3.5)$$

A potencia activa de entrada  $P_{entrada}$  fornecida ao transformador pelo circuito primário é dada pela equação 3.6

$$P_{entrada} = V_p I_p \cos \theta_p \quad (3.6)$$

Em que  $\theta_p$  é o ângulo entre a tensão primária e a corrente primária. A potência ativa  $P_{sada}$  fornecida pelo circuito secundário do transformador à sua carga é dada pela equação 3.7

$$P_{sada} = V_S I_S \cos \theta_S \quad (3.7)$$

Em que  $\theta_S$  é o ângulo entre a tensão secundária e a corrente secundária. Como em um transformador ideal os ângulos entre tensão e corrente não são afetados, então temos  $\theta_p = \theta_S = \theta$ . Os enrolamentos primário e secundário de um transformador ideal têm o mesmo fator de potência. Isso pode ser obtido através de uma aplicação simples das equações de tensão e corrente 3.1 e 3.3. A potência de saída é:

$$P_{sada} = V_S I_S \cos \theta \quad (3.8)$$

Aplicando as equações que envolvem a relação de espiras, obtemos  $V_S = V_p/a$  e  $I_S = aI_p$  de modo que:

$$P_{sada} = \frac{V_p}{a} (aI_p) \cos \theta \quad (3.9)$$

$$P_{sada} = \frac{V_p}{a} (aI_p) \cos \theta \quad (3.10)$$

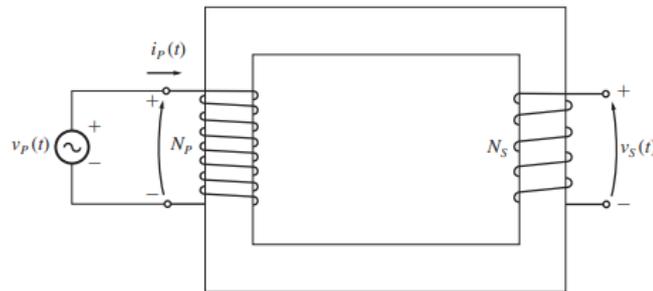
Portanto, a potencia de saída de um transformador ideal é igual à sua potencia de entrada. A mesma relação aplica-se à potencia reactiva Q e à potencia aparente S:

$$Q_{entrada} = V_p I_p \sin \theta = Q_{saida} \quad (3.11)$$

$$S_{entrada} = V_p I_p = V_S I_S = S_{saida} \quad (3.12)$$

### 3.1.4 Transformador monofásico real

As características de um transformador real se aproximam das características de um transformador ideal, mas somente até um certo grau. Nesta seção tratar-se-á do comportamento dos transformadores reais. A figura 3.5 mostra a ilustração gráfica de um transformador real, esta consiste em duas bobinas de fio enroladas em torno de um núcleo de transformador. O lado do primário está conectado a uma fonte de potência CA e o secundário está em circuito aberto.



**Figura 3.5: Diagrama esquemático de um transformador real sem nenhuma carga aplicada ao secundário. Fonte: [2]**

A fundamentação do funcionamento do transformador pode ser obtida a partir da lei de Faraday:

$$e_{ind} = \frac{d\lambda}{dt} \quad (3.13)$$

Onde:  $\lambda$  é o fluxo concatenado na bobina na qual a tensão está sendo induzida.

O fluxo concatenado  $\lambda$  resulta da soma do fluxo que passa através de cada espira da bobina adicionado ao de todas as demais espiras da bobina:

$$\lambda = \sum_{i=1}^N \phi_i \quad (3.14)$$

O fluxo concatenado total através de uma bobina não é simplesmente  $N\phi$ , em que  $N$  é o número de espiras da bobina, porque o fluxo que passa através de cada espira de uma bobina é ligeiramente diferente do fluxo que atravessa as outras espiras, dependendo da posição da espira dentro da bobina. Entretanto, é possível definir um fluxo médio por espira em uma bobina. Se o fluxo concatenado de todas as espiras da bobina for  $\lambda$  e se houver  $N$  espiras, o fluxo médio por espira será dado por:

$$\bar{\phi} = \frac{\lambda}{N} \quad (3.15)$$

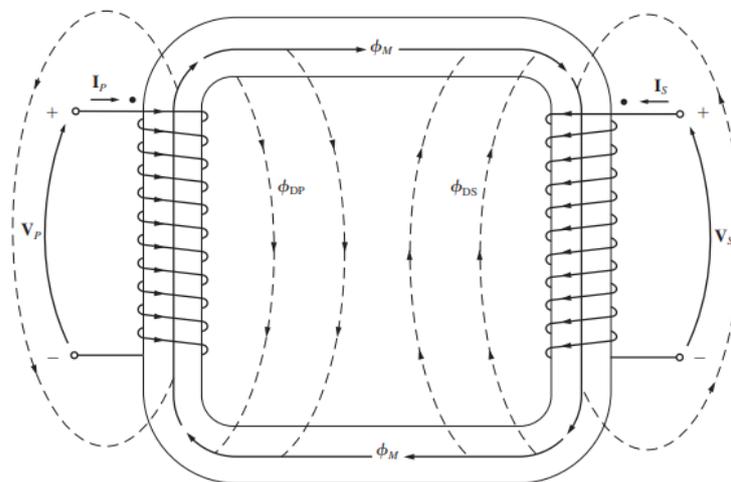
E a lei de Faraday poderá ser escrita da seguinte forma:

$$e_{ind} = N \frac{d\bar{\phi}}{dt} \quad (3.16)$$

Na figura 3.5, se a tensão da fonte  $v_p(t)$ , então ela será aplicada directamente à bobina do enrolamento primário do transformador. Quando o fluxo médio presente no enrolamento primário do transformador é isolado na equação 3.16, ignorando a resistência do enrolamento. Obtemos o resultado:

$$\bar{\phi}_p = \frac{1}{N_p} \int v_p(t) dt \quad (3.17)$$

Esta equação diz que o fluxo médio no enrolamento é proporcional à integral da tensão aplicada ao enrolamento e que a constante de proporcionalidade é o recíproco do número de espiras do enrolamento primário  $1/N_p$ . O efeito do fluxo presente no primário depende de quanto fluxo atinge a bobina secundária. Nem todo o fluxo produzido na bobina primária passa através da bobina secundária, isto porque algumas das linhas de fluxo deixam o núcleo de ferro passando através do ar, como mostra a figura 3.6.



**Figura 3.6: Fluxos concatenado e mútuo em um núcleo de transformador. Fonte: [2]**

Deste modo a parte do fluxo que passa através de uma das bobinas, mas não através da outra, é denominada fluxo de dispersão. O fluxo na bobina primária do transformador pode ser dividido em duas componentes: fluxo mútuo, o que permanece no núcleo e con-

catena ambos os enrolamentos e um pequeno fluxo de dispersão, que passa através do enrolamento primário, mas retorna através do ar, contornando o enrolamento secundário:

$$\bar{\phi}_p = \phi_M + \phi_{DP} \quad (3.18)$$

Onde:  $\bar{\phi}_p$  = fluxo primário (P) médio total

$\phi_M$  = Componente do fluxo que concatena mutuamente as bobinas primária e secundária

$\phi_{DP}$  = fluxo de dispersão primária (DP)

Esta divisão ocorre similarmente no enrolamento secundário entre o fluxo mútuo e o fluxo de dispersão, o qual passa através do enrolamento secundário e retorna através do ar, contornado o enrolamento primário:

$$\bar{\phi}_s = \phi_M + \phi_{DS} \quad (3.19)$$

Onde:  $\bar{\phi}_s$  = fluxo secundário (S) médio total

$\phi_M$  = Componente do fluxo que concatena mutuamente as bobinas primária e secundária

$\phi_{DS}$  = fluxo de dispersão primária (DS)

Com a divisão do fluxo do primário médio em componentes de fluxos mútuo e de dispersão, a lei de Faraday para o circuito primário pode ser expressa de outro modo como:

$$v_p(t) = N_p \frac{d\phi_M}{dt} + N_p \frac{d\phi_{DP}}{dt} \quad (3.20)$$

O primeiro termo dessa expressão pode ser denominado  $e_p(t)$  e o segundo termo pode ser denominado  $e_{DP}(t)$ . Substituindo a equação pelos termos, a equação acima pode ser escrita como:

$$v_p(t) = e_p(t) + e_{DP}(t) \quad (3.21)$$

O mesmo pode ser escrito para o lado do secundário e relação entre os dois lados pode ser escrita como:

$$\frac{e_p(t)}{N_p} = \frac{d\phi_M}{dt} = \frac{e_s(t)}{N_s} \quad (3.22)$$

Portanto,

$$\frac{e_p(t)}{e_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} = a \quad (3.23)$$

O significado físico desta equação é que a razão entre a tensão primária e a tensão secundária, ambas causadas pelo fluxo mútuo, é igual à relação de espiras do transformador. Como em um transformador bem projectado, temos  $\phi_M \gg \phi_{DP}$  e  $\phi_M \gg \phi_{DS}$ , então a razão entre a tensão total do primário de um transformador e a tensão total no secundário de um transformador é aproximadamente:

$$\frac{v_p(t)}{v_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} = a \quad (3.24)$$

Como isso pode se afirmar que quanto menores forem os fluxos de dispersão de um transformador, mais próxima estará a razão entre as tensões totais desse transformador da do transformador ideal.

### 3.1.4.1 Corrente de magnetização em um transformador real

Quando uma fonte de energia eléctrica CA é conectada a um transformador, uma corrente flui no circuito primário, mesmo quando o circuito secundário está aberto. Essa é a corrente requerida para produzir fluxo em núcleo ferromagnético real. Ela consiste em duas componentes:

1. A corrente de magnetização  $i_M$ , que é a corrente necessária para produzir o fluxo no núcleo do transformador e
2. A corrente de perdas no núcleo  $i_{h+p}$ , que é a corrente responsável pelas perdas por histerese e por corrente parasita no núcleo.

A figura 3.7 mostra a curva de magnetização de um típico núcleo de transformador. Se o fluxo no núcleo do transformador for conhecido, a magnitude da corrente de magnetização poderá ser encontrada diretamente na figura 3.7.

Ignorando momentaneamente os efeitos do fluxo de dispersão, vemos que o fluxo médio no núcleo é dado por:

$$\text{bar}\phi_p = \frac{1}{N_p} \int v_p(t) dt \quad (3.25)$$

Se a tensão primária for dada pela expressão  $v_p(t) = V_M \cos \omega t$ , o fluxo resultante deverá ser:

$$\bar{\phi}_p = \frac{1}{N_p} \int V_M \cos \omega t dt = \frac{V_M}{\omega N_p} \sin \omega t \quad Wb \quad (3.26)$$

Se os valores da corrente, que é necessária para produzir um dado fluxo (figura 3.7a), forem comparados com o fluxo no núcleo, para diversos valores, poderemos construir um gráfico simples da corrente de magnetização que circula no enrolamento do núcleo. Esse gráfico está mostrado na figura 3.7b. Observe os seguintes pontos a respeito da corrente de magnetização:

1. A corrente de magnetização no transformador não é senoidal. As componentes de frequência mais elevadas da corrente de magnetização são devido à saturação magnética do núcleo do transformador.
2. Uma vez que o fluxo de pico tenha atingido o ponto de saturação do núcleo, um pequeno aumento no fluxo de pico exigirá um aumento muito grande na corrente de magnetização de pico.
3. A componente fundamental da corrente de magnetização está atrasada em relação à tensão aplicada em  $90^\circ$ .
4. As componentes de frequências mais elevadas da corrente de magnetização podem ser bem grandes quando comparadas com a componente fundamental. Em geral, quanto mais um transformador for colocado em saturação, maiores se tornarão as componentes harmônicas

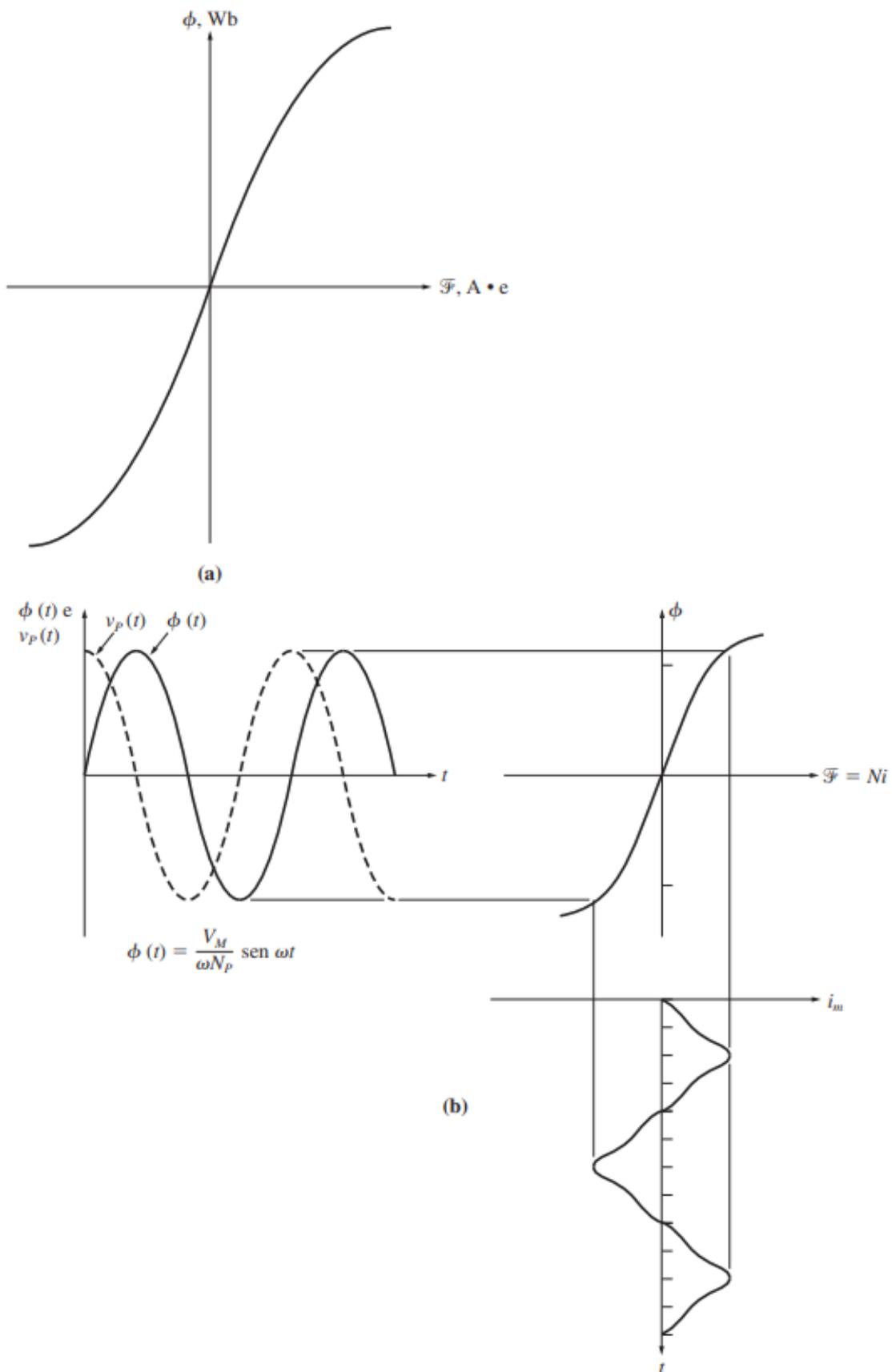


Figura 3.7: a) Curva de magnetização do núcleo do transformador. b) Corrente de magnetização causada pelo fluxo no núcleo do transformador. Fonte: [2]

A corrente total sem carga no núcleo é denominada corrente de excitação do transformador. É simplesmente a soma da corrente de magnetização e a corrente de perdas no núcleo:

$$i_{ex} = i_m + I_{h+p} \quad (3.27)$$

A corrente total de excitação em um núcleo típico de transformador está mostrada na 3.8. em um transformador de potencia bem projectado, a corrente de excitação é muito menor do que a corrente a plena carga do transformador.

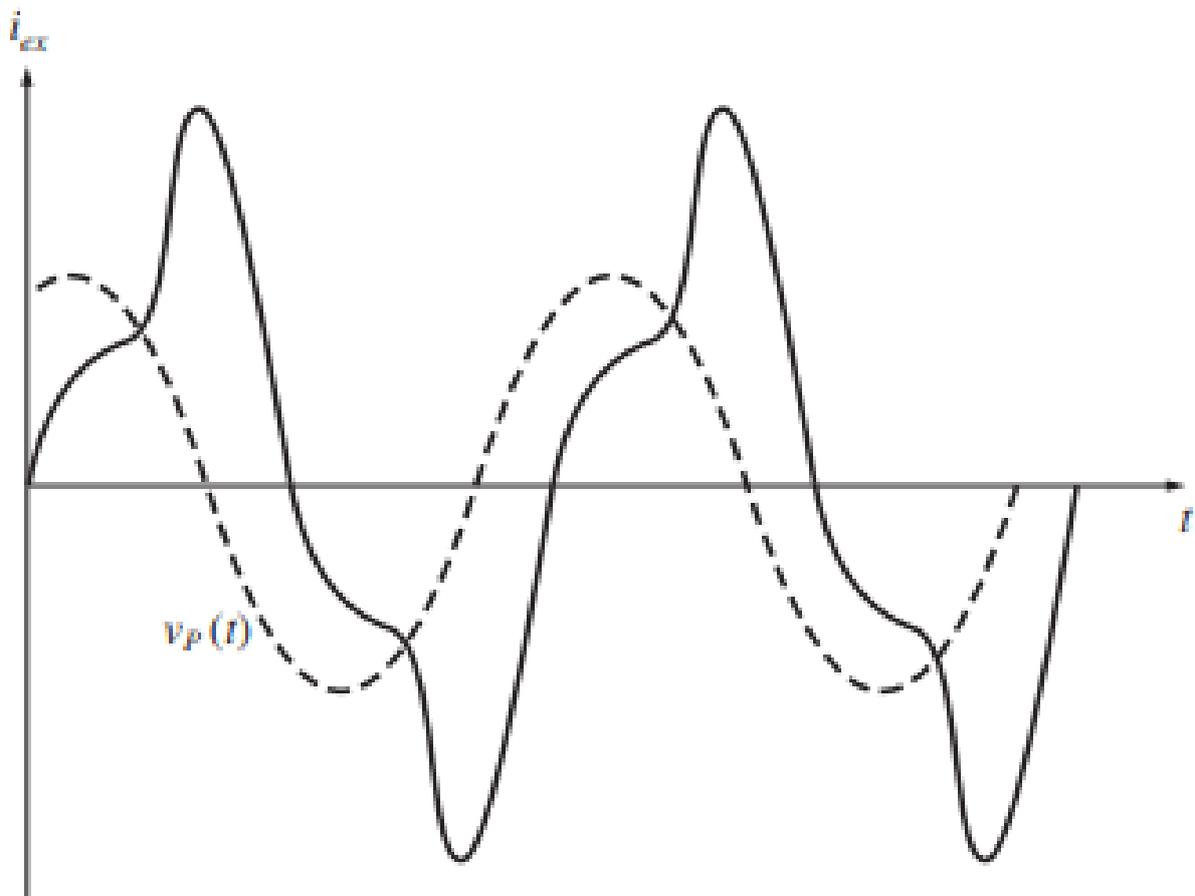


Figura 3.8: Corrente de excitação total em um transformador. Fonte: [2]

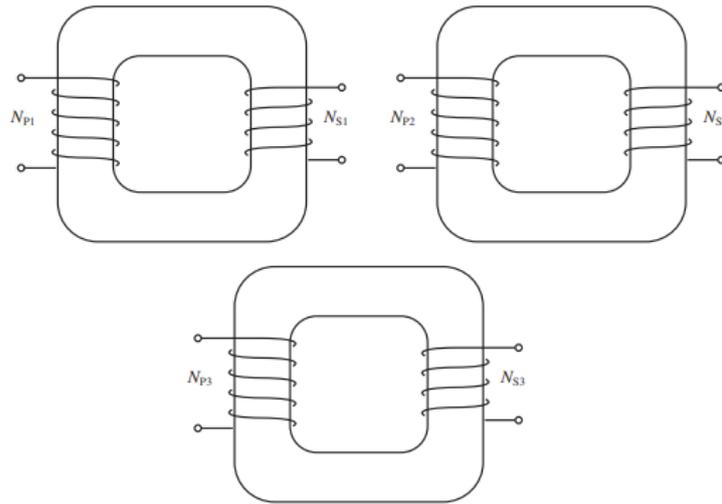
#### 3.1.4.2 Perdas em transformadores reais

Qualquer modelo exato do comportamento de um transformador deve ser capaz de levar em consideração as perdas que ocorrem nos transformadores reais. Os itens principais que devem ser incluídos na construção do modelo são:

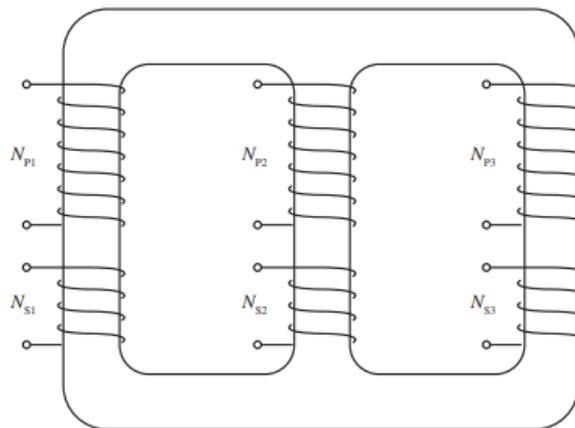
1. **Perdas no cobre ( $I^2R$ ):** As perdas no cobre são as perdas devido ao aquecimento resistivo nos enrolamentos primário e secundário do transformador. Elas são proporcionais ao quadrado da corrente nos enrolamentos;
2. **Perdas por corrente parasita:** As perdas por corrente parasita são perdas devidas ao aquecimento resistivo no núcleo do transformador. Elas são proporcionais ao quadrado da tensão aplicada ao transformador;
3. **Perdas por histerese:** As perdas por histerese estão associadas à alteração da configuração dos domínios magnéticos no núcleo durante cada semiciclo. Elas são uma função não linear, complexa, da tensão aplicada ao transformador;
4. **Fluxo de dispersão:** Os fluxos  $\phi_{DP}$  e  $\phi_{DS}$  que escapam do núcleo e passam através de apenas um dos enrolamentos do transformador são fluxos de dispersão. Esses fluxos que se dispersaram produzem uma indutância de dispersão nas bobinas primária e secundária. Seus efeitos devem ser levados em consideração.

### 3.1.5 Transformadores trifásicos

Os transformadores são circuitos trifásicos que podem ser construídos de duas maneiras. Uma forma é simplesmente tomar três transformadores monofásicos e ligá-los em um banco trifásico. Outra forma é construir um transformador trifásico que consiste em três conjuntos de enrolamentos que envolvem um núcleo comum. Esses dois tipos possíveis de construção de transformadores são mostrados nas Figuras 3.9 e 3.10. Atualmente, ambas as formas ( de três transformadores separados ou de um único transformador trifásico) são usadas.



**Figura 3.9: Banco de transformadores trifásicos composto de transformadores independentes. Fonte: [2]**

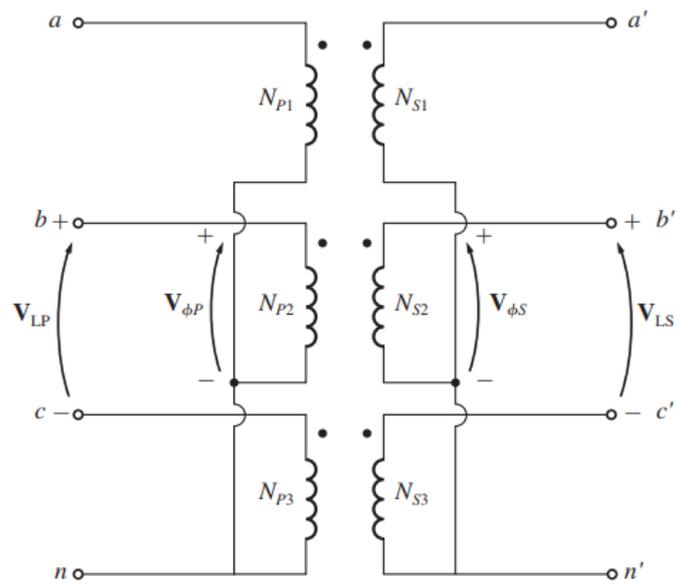


**Figura 3.10: Banco de transformadores trifásicos enrolado em único núcleo de três pernas. Fonte: [2]**

### 3.1.5.1 ligações de um transformador trifásico

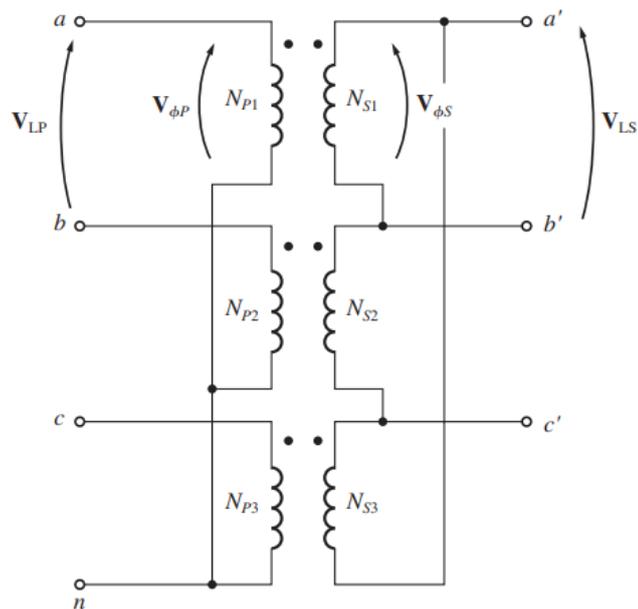
O primário e o secundário de qualquer transformador trifásico podem ser ligados independentemente em configurações estrela ( Y ) ou triângulo (  $\Delta$  ). O que significa que um banco de transformadores trifásicos pode ser montado conforme um total de quatro configurações possíveis ligações:

1. Estrela - estrela ( Y-Y )



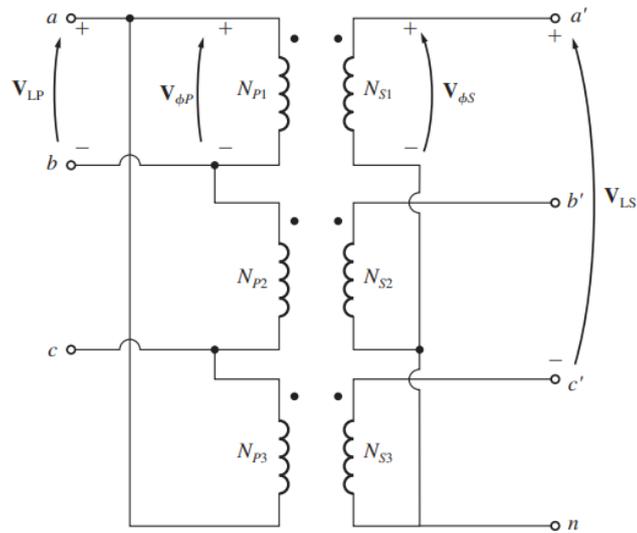
**Figura 3.11: Diagrama de ligação Y-Y. Fonte: [2]**

2. Estrela - Triangulo ( Y- $\Delta$ )



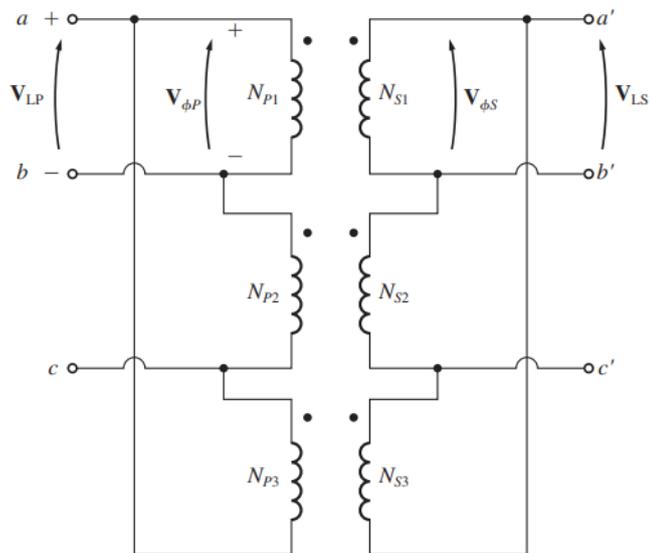
**Figura 3.12: Diagrama de ligação Y- $\Delta$ . Fonte: [2]**

### 3. Triângulo - estrela ( $\Delta - Y$ )



**Figura 3.13: Diagrama de ligação  $\Delta$ -Y. Fonte: [2]**

### 4. triângulo - triângulo ( $\Delta - \Delta$ )



**Figura 3.14: Diagrama de ligação  $\Delta - \Delta$ . Fonte: [2]**

Para os transformadores trifásicos, os cálculos de impedância, regulação de tensão, eficiência e outros, são realizados tomando cada fase de uma vez. Deste modo podemos usar exatamente as mesmas técnicas que já foram desenvolvidas para os transformadores monofásicos.

## 3.2 Desequilíbrio de fases

O conceito de desequilíbrio se define quando em um sistema trifásico, ambas ou uma das fases apresentam valores de tensão e/ou defasagem angular entre si. [3] Um sistema de corrente alternada é composto por três ondas senoidais e defasadas por um ângulo de  $120^\circ$ , nessas condições se diz que o sistema está equilibrado ou também pode ser denominado como sistema trifásico simétrico. A expressão que define um sistema ideal pode ser visualizada nas equações 3.28, 3.29 e 3.30.

$$V_a = V_M \cos(\omega t) \quad (3.28)$$

$$V_b = V_M \cos(\omega t - 120^\circ) \quad (3.29)$$

$$V_c = V_M \cos(\omega t + 120^\circ) \quad (3.30)$$

onde:  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$  são tensões de fase

$V_M$  é tensão de pico

$\omega$  é velocidade angular

t é tempo

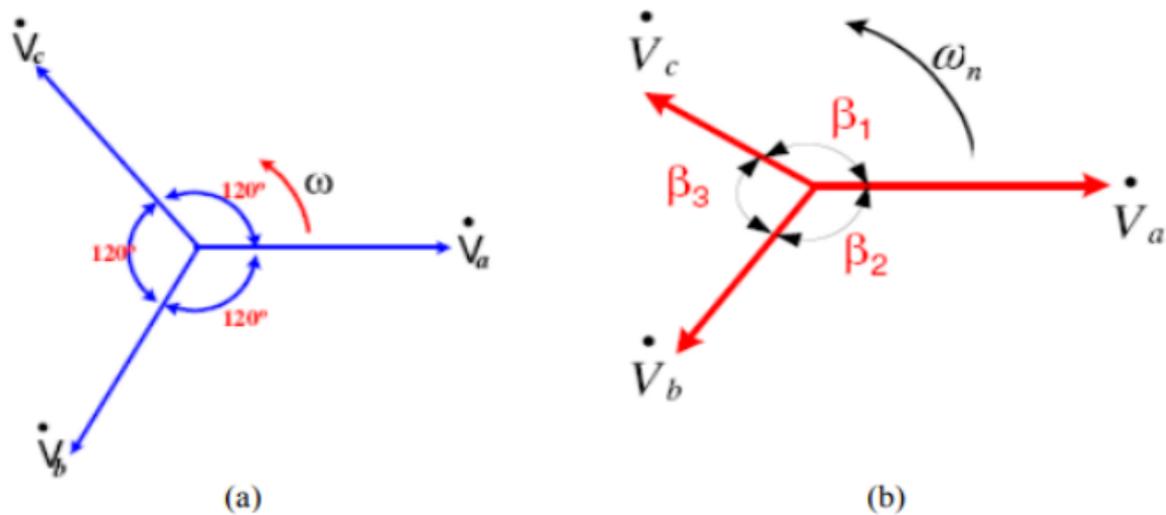
Já a forma fasorial pode ser vista nas equações 3.28, 3.29 e 3.30

$$V_a = 1,0 \angle 0^\circ \quad (3.31)$$

$$V_b = 1,0 \angle -120^\circ \quad (3.32)$$

$$V_c = 1,0 \angle +120^\circ \quad (3.33)$$

Na figura 3.15, pode-se ver na forma vetorial a representação de um sistema equilibrado em que resultante das tensões é igual a zero e desequilibrado



**Figura 3.15: Desfasagem angular vetorial equilibrada ( a ) e desequilibrada ( b ):  
Fonte: [3]**

De modo geral, não é possível eliminar completamente o desequilíbrio em sistemas de distribuição, mas existe um fator que quantifica o nível de desequilíbrio de tensão em um sistema trifásico e assim possibilita conhecer o grau de desequilíbrio do sistema. Este parâmetro é calculado como:

$$\text{fator de desequilíbrio} = \frac{\text{Componente de Sequencia negativa}}{\text{Componente de Sequencia positiva}} \quad (3.34)$$

### 3.2.1 Consequências do desequilíbrio de fases

O desequilíbrio de fases em sistemas de distribuição de energia elétrica pode ocasionar as seguintes consequências: [3]

1. **Sobrecarga de fase:** Quando há uma carga na fase a e metade dessa carga na fase B, haverá uma carga desequilibrada entre as fases. Essa sobrecarga resulta em uma corrente maior na fase B, de acordo com a lei de Ohm.

$$i_A = \frac{V}{R_A} \quad (3.35)$$

$$i_B = \frac{V}{\left(\frac{R_A}{2}\right)} \quad (3.36)$$

2. **Perda de energia e ineficiência energética:** Quando ocorre o desequilíbrio de fases em uma instalação elétrica, há uma consequente ineficiência energética e perda de energia devido à geração de calor provocada pela corrente elétrica que passa pelo circuito. Esse calor é gerado devido ao aumento da energia cinética dos elétrons livres, o que resulta em uma elevação da temperatura. Quando uma corrente elétrica flui através de um circuito que apresenta forte resistência à sua passagem, parte da energia elétrica é convertida em energia térmica e dissipada no ambiente, resultando em uma perda do potencial elétrico e em um desperdício de energia

$$Q = R * I^2 * t [J] \quad (3.37)$$

$$\frac{Q}{t} = P = R * I^2 [W] \quad (3.38)$$

Quando uma quantidade maior de equipamentos está conectada a uma mesma fase, a carga equivalente total ( R ) no circuito é reduzida, o que leva a um aumento da corrente total. Em outras palavras, em uma fase sobrecarregada, a corrente ( I ) aumenta linearmente à medida que a resistência total ( R ) diminui. Nesse contexto, a potência elétrica ( P ) e o calor ( Q ) gerado também aumentam proporcionalmente ao aumento da corrente. Igualando essa equação à lei de Joule, obtém-se uma relação com a potência elétrica.

$$\Delta T = \frac{Q}{m * c} \rightarrow \Delta T = \frac{R * i^2 * t}{m * c} [^{\circ}C] \quad (3.39)$$

onde: Q = calor

$\Delta T$  = variação de temperatura

m = massa do corpo (cobre)

c = calor específico do corpo (para cobre  $\frac{0,092}{g} \text{ } ^{\circ}C$  ou  $9 * 10^2 \frac{j}{k * g * K}$ )

3 **Risco de incêndio:** Quando há uma sobrecarga em um circuito elétrico, ocorre um aumento da corrente elétrica que percorre os condutores, conforme explicado anteriormente. Esse aumento de corrente gera calor, que é dissipado pelo condutor (

que, nessas condições, passa para o estado de sub-dimensionamento). Se o calor gerado for muito grande e o condutor não conseguir dissipá-lo, há um risco iminente de incêndio e que neste caso está relacionado à sobrecarga de alguma fase. De acordo com o Triângulo do Fogo, a sobrecorrente em um condutor e consequentemente a alta temperatura são fatores que podem contribuir para o início de um incêndio.

### **3.3 Perda de vida útil em transformadores**

Transformadores de distribuição podem suportar uma carga acima do seu valor nominal, por um certo intervalo de tempo, desde que compensada por uma carga abaixo do valor nominal, no período restante. Assim, compensa-se a maior perda de vida na hora de ponta, com a menor perda de vida, na hora fora de ponta. [4]

O nível de sobrecarga para condições de carregamento do transformador igual ou superior a 150% da sua carga nominal implica queda de tensão e geração de calor excessivo no circuito interno do equipamento. A partir da temperatura de 130°, começa a decrescer a concentração de oxigênio no óleo isolante e ocorrem as reações de oxidação no sistema óleo mineral – papel isolante, ou seja, a partir dessa temperatura a formação de gases no óleo isolante ocorre a um ritmo mais acelerado. O que consequentemente poderá causar avarias ao equipamento e/ou seu envelhecimento precoce. [4]

Em regra geral, sobrecarga é o resultado de um fluxo excessivo de corrente que percorre os enrolamentos dos equipamentos, causando aumento adicional de temperatura. Esta sobre temperatura pode causar a deterioração da isolação afetando a sua vida útil.

A capacidade de sobrecarga dos transformadores varia com os seguintes fatores:

- A temperatura do ponto mais quente do enrolamento;
- A elevação média de temperatura do enrolamento sobre o ambiente;
- A relação entre perda em carga e a perda em vazio;
- A constante de tempo;
- A temperatura ambiente.

### 3.3.1 Efeito do tempo de operação na perda de vida dos transformadores

O tempo no qual um transformador opera em sobrecarga influencia diretamente na elevação de temperatura do óleo e do ponto mais quente do seu enrolamento e consequentemente, na perda de vida útil técnica caso a temperatura limite do isolamento for ultrapassada. [4]

A relação entre tempo e a elevação de temperatura do topo do óleo é mostrada da equação 3.40:

$$\Delta\theta_{TO} = (\Delta\theta_{FO} - \Delta\theta_{IO}) \times (1 - e^{-t_h/\tau_o}) + \Delta\theta_{IO} \quad (3.40)$$

Onde:  $\Delta\theta_{TO}$  é a elevação de temperatura do topo do óleo sobre a temperatura ambiente no fim do tempo  $t_h$ , [ $^{\circ}C$ ];

$\Delta\theta_{FO}$  é a elevação de temperatura final do topo do óleo sobre a temperatura ambiente para qualquer carregamento, [ $^{\circ}C$ ];

$\Delta\theta_{IO}$  é a elevação inicial de temperatura de topo do óleo no início de intervalo do tempo  $t_h$ , [ $^{\circ}C$ ];

$\tau_o$  é a constante de tempo do topo do óleo, [h];

$t_h$  é o período de tempo de operação do transformador, [h].

Quando um transformador opera em condição de sobrecarga, a elevação de temperatura  $\Delta\theta_{TO}$  a um determinado instante de tempo  $t_h$  atinge um valor acima do normal, comprometendo a isolação e o desempenho da máquina. A constante de tempo térmico do topo do óleo, o  $\tau$ , correspondente à sobrecarga é calculada conforme a Equação 3.41

$$\tau_o = \frac{C_t \times (\Delta\theta_{FO} - \Delta\theta_{IO})}{P_{C-PT}} \quad (3.41)$$

Onde:  $C_t$  é a capacidade térmica do transformador para o fluxo de óleo não dirigido, [Wh/ $^{\circ}C$ ];

$P_{C-PT}$  é a perda total na condição de carga a ser mantida, menos a perda dissipada pelas paredes dos tanques, [W].

### 3.3.2 Sobrecargas e envelhecimento dos transformadores

A vida de isolamento de transformadores está ligada diretamente a pontos nos quais existem concentrações de perdas, ou seja, nas regiões de altas temperaturas. Esta região

de alta densidade de perdas paralelamente ao estado do isolamento sólido e líquido do transformador se torna os principais fatores na determinação do desempenho e de vida útil dos transformadores. [4]

Conforme se refere, a operação dos transformadores a uma temperatura superior a 130 °C pode causar a formação de gases no seu isolamento sólido e no óleo, causando riscos à integridade da sua resistência dielétrica, acelerando o ritmo de envelhecimento ou provocando falha ao equipamento. [4]

A relação entre a temperatura do ponto mais quente do enrolamento do transformador com a temperatura média do enrolamento, em condição de carga variável, é máxima nos períodos de transição para a ponta de carga quando a taxa de crescimento de calor gerado nos enrolamentos é maior que a taxa de dissipação proporcionada pelo sistema de refrigeração. É neste período que acontece a perda adicional de vida dos transformadores caso o período do tempo desta sobre-temperatura seja superior ao valor máximo aceitável. Portanto, a perda de vida útil dos transformadores com o sobrecarregamento é função das propriedades mecânicas do papel isolante, que depende da temperatura e do tempo de operação. [4]

O envelhecimento térmico do óleo isolante em transformadores ocorre a partir da ordem de 75°C. À medida que aumenta a temperatura, aumenta a presença de contaminação sólida simultaneamente com a água no óleo, reduzindo cada vez mais a sua constante dielétrica e constituindo, portanto, um campo ideal para a descarga elétrica, aumentando ainda mais o seu ritmo de envelhecimento térmico. A contaminação líquida provém de formação de partículas de água solúvel no óleo, enquanto a contaminação sólida, do processo de degradação de fibra celulose e da corrosão da cuba, formando partículas sólidas de óxidos. A vida útil do equipamento é tanto maior quanto maior for a sua potência nominal instalada para uma determinada demanda. Para analisar a perda de vida dos transformadores com carregamento, apresenta-se a Tabela 3.1 da norma *American National Standards Institute (ANSI)/ Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) C57. 91-1981* [5] que mostra os dados de ensaio realizado sobre a perda de vida de um transformador classe 65°C à temperatura média ambiente de 30°C. Os valores neste guia de carregamento do transformador são determinados, considerando as constantes do tempo do topo do óleo e do ponto mais quente de 3,5 h e 0,0834, respectivamente, e o valor da relação entre as perdas no enrolamento e no ferro de 2,7.

**Tabela 3.1: Dados dos ensaios sobre a perda de vida do transformador com carregamentos a temperatura ambiente de 30°. Fonte: [5]**

$t_h$ (h)	Perda de vida extra (%)	Carga inicial igual a 50%			Carga inicial igual a 75%			Carga inicial igual a 90%		
		Pico de Carga (p.u.)	$\theta_{HL}$ (max) (°C)	$\theta_{TO}$ (max) (°C)	Pico de Carga (p.u.)	$\theta_{HL}$ (max) (°C)	$\theta_{TO}$ (max) (°C)	Pico de Carga (p.u.)	$\theta_{HL}$ (max) (°C)	$\theta_{TO}$ (max) (°C)
1	Normal	2,12	156	89	1,96	152	94	1,82	148	96
	0,05	2,38	176	96	2,27	175	101	2,16	173	105
	0,10	2,49	186	99	2,37	184	104	2,27	182	108
	0,50	2,76	209	107	2,65	207	112	2,56	207	116
2	Normal	1,79	148	97	1,68	145	99	1,57	141	100
	0,05	2,02	169	107	1,93	167	110	1,85	164	111
	0,10	2,10	177	111	2,02	175	114	1,95	174	116
	0,50	2,34	200	122	2,26	199	125	2,20	197	127
4	Normal	1,50	140	102	1,44	138	102	1,38	133	100
	0,05	1,70	161	114	1,65	159	114	1,60	157	114
	0,10	1,77	168	118	1,72	167	119	1,68	165	119
	0,50	1,97	191	132	1,93	189	132	1,89	188	132
8	Normal	1,28	130	100	1,25	127	99	1,21	124	97
	0,05	1,46	149	112	1,43	147	112	1,41	146	111
	0,10	1,53	157	118	1,50	155	116	1,47	153	116
	0,50	1,69	177	131	1,67	176	130	1,65	174	129
24	Normal	1,08	112	90	1,07	111	89	1,07	111	89
	0,05	1,24	130	101	1,24	129	101	1,23	128	100
	0,10	1,30	136	105	1,29	135	105	1,29	135	105
	0,50	1,45	154	118	1,45	154	118	1,45	153	117
	1,00	1,53	164	124	1,52	163	124	1,52	163	124

De acordo com a Tabela 3.1 da norma ANSI/ IEEE.C57.91-1981 [5], em um transformador submetido a um carregamento inicial de 50%, um pico de carga de 2,12 p.u. durante 1,0 hora, não ocasiona a perda de vida adicional ao equipamento. Portanto, a sua perda de vida útil estimada no período normalizado de 20 anos, ocorre a um ritmo normal, ou seja, 0,0137% por dia ( 0,0137% x365 x 20 anos  $\cong$  100%). Para carregamentos iniciais superiores a 50%, os respectivos picos de carga devem ser reduzidos para que o ritmo do envelhecimento ocorra normalmente.

Da tabela, percebe-se que as sobrecargas elevadas geram calor excessivo que eleva a temperatura das partes internas do transformador, causando uma aceleração no ritmo de envelhecimento do seu isolamento.

Segundo IEEE Std C57.91 [6], a temperatura do ponto mais quente do enrolamento do transformador  $\theta_H$  é calculada adicionando a temperatura ambiente às elevações de temperatura de topo do óleo e do ponto mais quente como mostra a Equação 3.42

$$\theta_H = \theta_A + \Delta\theta_{TO} + \Delta\theta_H \quad (3.42)$$

Onde:  $\theta_A$  é a temperatura ambiente, [°C];

$\Delta\theta_{TO}$  é a elevação de temperatura do topo do óleo sobre a temperatura ambiente, [°C];

$\Delta\theta_H$  é a elevação de temperatura do ponto mais quente do enrolamento sobre a temperatura do topo do óleo no fim de um tempo  $t_h$ , [°C].

A elevação da temperatura do ponto mais quente do enrolamento sobre a temperatura do topo do óleo, à semelhança da Equação da elevação de temperatura do topo do óleo sobre a temperatura ambiente mostrada na equação 3.40, pode ser determinada através da equação 3.43 [5]:

$$\Delta\theta_H = (\Delta\theta_{HF} - \Delta\theta_{HI}) \times (1 - e^{-\frac{t_h}{\tau_H}}) + \Delta\theta_{HI} \quad (3.43)$$

Onde:  $\Delta\theta_{HF}$  é a elevação da temperatura final do ponto mais quente do condutor sobre a temperatura do topo do óleo para qualquer carga k, [°C];

$\Delta\theta_{HI}$  é a elevação da temperatura inicial do ponto mais quente do condutor sobre a temperatura do topo do óleo para qualquer carregamento k, [°C];

$\tau_H$  é a constante de tempo do ponto mais quente do enrolamento, [h];

$t_h$  é o período de tempo de operação, [h].

Portanto, de acordo com essa norma, os valores finais e iniciais das elevações de temperaturas do topo do óleo sobre o ambiente e de enrolamento sobre o topo do óleo, que resultam da variação de um patamar de carga aplicada aos enrolamentos do transformador, são determinados pelas Equações: 3.44 e 3.45

$$\Delta\theta_{OKPi} = [(K_{LPi}^2 \times R_{CV} + 1)/(R_{CV} + 1)]^{n_o} \times \Delta\theta_{OCN} \quad (3.44)$$

$$\Delta\theta_{HKPi} = K_{LPi}^{2 \times m_e} \times \Delta\theta_{HCN} \quad (3.45)$$

Onde:  $\Delta\theta_{OKPi}$  corresponde,  $\Delta\theta_{FO}$  quando  $P_i$  é considerado o último patamar e corresponde,  $\Delta\theta_{IO}$ , quando o patamar de carga é considerado inicial.

$\Delta\theta_{HKPi}$  corresponde,  $\Delta\theta_{HF}$  quando  $P_i$  é considerado o último patamar e corresponde,  $\Delta\theta_{HI}$ , quando o patamar de carga é considerado inicial.

$K_{LPi}$  é a demanda de potência referente ao patamar  $P_i$ , [p.u];

$R_{CV}$  é a relação entre a perda em carga e a perda em vazio do transformador;

$\Delta\theta_{HCN}$  é a elevação de temperatura do ponto mais quente do enrolamento sobre a temperatura do topo do óleo, em condições de carregamento normal, [°];

$\Delta\theta_{OCN}$  é a elevação de temperatura do topo do óleo sobre a temperatura ambiente, em condições de carregamento normal, [°];

$m_e$  é um valor que relaciona perdas nos enrolamentos com a variação de temperatura;

$n_o$  relaciona variação de temperatura do óleo isolante com a variação na carga.

A vida útil estimada em p.u. dos transformadores de distribuição, de acordo com a norma IEEE Std C57.91TM – 1995 / Cor 1-2002 [7], para isolamento 55°C, pode ser calculada pela equação 3.46:

$$Vida\_util\_por\_unidade = 2,00 \times e^{(15000/\theta_H + 273)} \quad (3.46)$$

onde:  $\theta_H$  é a temperatura do ponto mais quente do enrolamento, [°C].

De modo similar, a vida útil dos transformadores de isolamentos classe 65°C, para a temperatura máxima de referência dos pontos mais quentes dos enrolamentos iguais a 110°C e 120°C, em p.u., pode ser calculada através das Equações 3.47 e 3.48

$$Vida\_util\_por\_unidade = 9,8 \times 10^{-18} \times e^{(15000/\theta_H+273)} \quad (3.47)$$

$$Vida\_util\_por\_unidade = 2,65 \times 10^{-17} \times e^{(15000/\theta_H+273)} \quad (3.48)$$

Portanto, a interpretação que se pode fazer das Equações 3.46 a 3.48 é que quanto maior for a temperatura do ponto mais quente do enrolamento, consequência da sobrecarga imposta ao transformador, menor é a sua vida útil estimada

Na tabela 3.2 pode ser vista a estimativa de vida útil para transformadores de classe de isolamento 55°C e 65°C, estimada pelas equações 3.46, 3.47 e 3.48.

**Tabela 3.2: Vida útil estimada do transformador em função da temperatura do ponto mais quente do enrolamento. Fonte: [4]**

Transformador classe isolamento 55°C		Transformador classe isolamento 65°C		Transformador classe isolamento 65°C	
Temperatura máxima de referência 95°C		Temperatura máxima de referência 110°C		Temperatura máxima de referência 120°C	
$\theta_H$	Vida p. u.	$\theta_H$	Vida p. u.	$\theta_H$	Vida p. u.
50	294,77512	50,0	1444,40	50	3905.78
60	73,085510	60,0	358,12	60	968.39
70	19,655440	70,0	96,3125	70	260,44
80	5,694530	80,0	27,9032	80	75,46
90	1,766330	90,0	8,655	90	23,41
100	0,583369	100	2,859	100	7,73
110	0,204146	110	1,000	110	2,71
120	0,075361	120	0,3693	120	1,000
130	0,029230	130	0,144	130	0,388
140	0,011870	140	0,0582	140	0,158
150	0,005029	150	0,0247	150	0,067
160	0,002218	160	0,0109	160	0,030
170	0,001015	170	0,00498	170	0,0135
180	0,000486	180	0,00236	180	0,0064
190	0,000235	190	0,00116	190	0,0032
200	0,000119	200	0,000581	200	0,0016

A determinação da taxa de envelhecimento global do transformador em % é determinada

pela Equação 3.49

$$\Delta V(\%) = 100 \times 10^{-(A+B/(\theta_H+273))} \times \Delta t \quad (3.49)$$

Onde:  $\Delta t$  é o intervalo de tempo de funcionamento do transformador, [h];

A é igual a -14,133 para transformador de 55°C e -13,391 para transformador de 65°C;

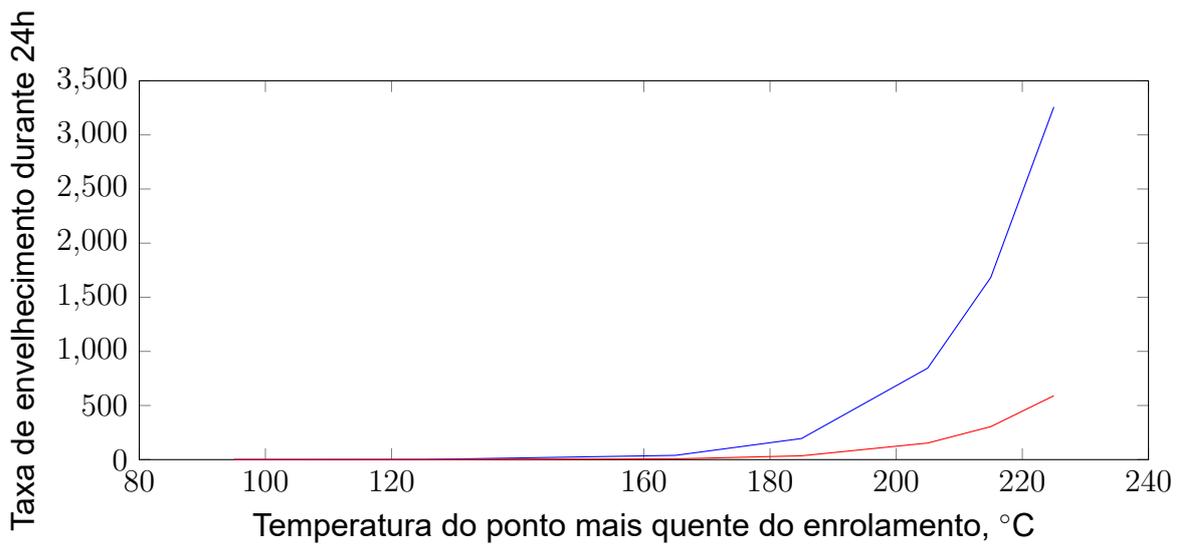
B é igual a 6972,15.

A taxa de envelhecimento do transformador determinada pela Equação 3.49 [8], em um período de 24 horas, pode ser analisada através da Tabela 3.3

**Tabela 3.3: Vida útil estimada do transformador em função da temperatura do ponto mais quente do enrolamento. Fonte: [4]**

Transformador classe 55°C		Transformador classe 65°C(110°C)	
$\theta_H(^{\circ}\text{C})$	Taxa de envelhecimento(%)	$\theta_H(^{\circ}\text{C})$	Taxa de envelhecimento(%)
95	0,036	95	0,007
105	0,18	105	0,02
115	0,35	115	0,06
125	0,99	125	0,18
135	2,66	135	0,48
145	6,82	145	1,24
155	16,72	155	3,03
165	39,36	165	7,13
175	89,21	175	16,16
185	195,06	185	35,31
195	412,53	195	74,72
205	845,52	205	153,15
215	1682,75	215	304,81
225	3257,69	225	590,08

Como se pode notar na Tabela 3.3 e na Figura 3.16, o ritmo de envelhecimento do transformador aumenta com aumento de temperatura dos seus enrolamentos.



**Figura 3.16: Taxa de envelhecimento do transformador x temperatura do enrolamento em %**

A vida útil técnica total dos transformadores, em anos, para curva de carga considerada constante ao longo do dia, pode ser determinada através da Equação 3.50:

$$Vida\_util(anos) = \frac{100\%}{[\Delta V_{24h}(\%)] \times 365} \quad (3.50)$$

Onde:  $\Delta_{[24h]}(\%)$  é a taxa de envelhecimento global do transformador ao longo de 24 horas.

Utilizando os valores da taxa de envelhecimento do transformador na Tabela 3.3 e a Equação 3.50, tem-se a Tabela 3.4 apresentando a vida útil dos transformadores com classes de isolamentos 55°C e 65°C em função das temperaturas:

**Tabela 3.4: Vida útil estimada do transformador em anos. Fonte: [4]**

Transformador classe 55°C		Transformador classe 65°C(110°C)	
$\theta_H(^{\circ}C)$	Vida útil em anos	$\theta_H(^{\circ}C)$	Vida útil em anos
95	7,42	95	40,98
105	2,34	105	12,93
110	1,34	110	7,43
115	0,78	115	4,33
125	0,28	125	1,53
135	0,11	135	0,57
145	0,04	145	0,22

# Capítulo 4

## Desenho e implementação do protótipo

Neste capítulo serão abordados aspectos referentes ao dimensionamento e construção do protótipo, bem como as etapas sucedidas até a concepção do protótipo.

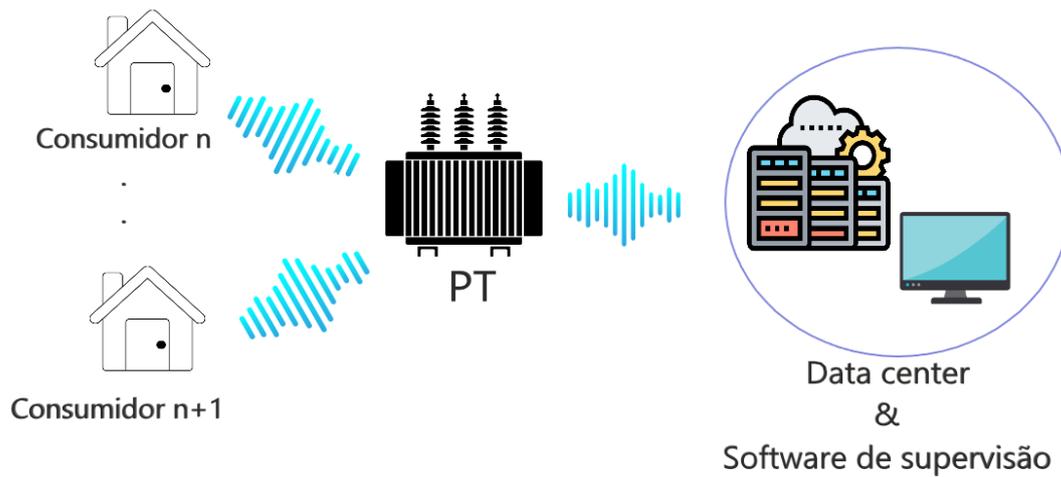
### 4.1 Visão geral

Como resposta a questão colocada em 1.2, foi concebido o *Load Manager* (LM). Este sistema foi concebido com a premissa de operar com os contadores actualmente em uso pela EDM ( os Split meters).

O LM permite o monitoramento em tempo real dos transformadores de distribuição de energia eléctrica da EDM, bem como das cargas neles conectadas. Este sistema efectua medições de correntes no sistema de distribuição de energia e envia esta informação a uma central de controle por meio de tecnologia wireless de maneira a permitir a detecção de problemas de sobrecarga e desbalanceamento de fases no sistema mencionado.

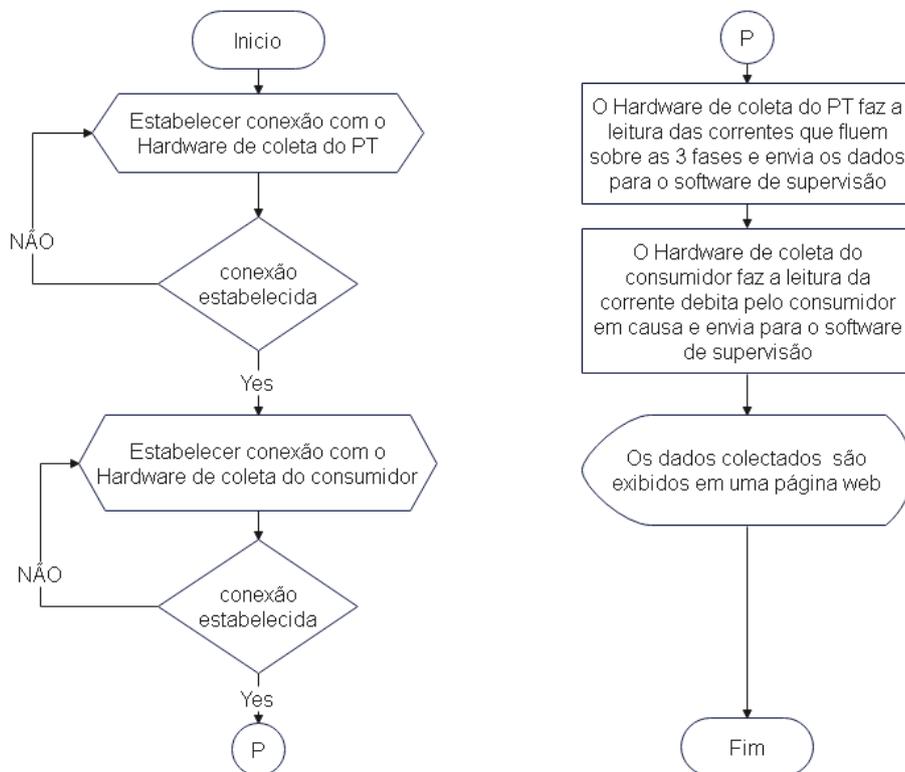
#### 4.1.1 Configuração geral do sistema

A figura 4.1, ilustra a forma de configuração geral que se propõe para o LM.



**Figura 4.1: Configuração geral da proposta de solução. Fonte: Autor, 2024**

O fluxograma da figura 4.2 mostra de forma resumida o princípio de funcionamento do sistema proposto.



**Figura 4.2: Princípio geral de funcionamento do sistema. Fonte: Autor, 2024**

## **4.2 Descrição funcional do sistema**

O sistema automático de partilha e balanceamento de cargas em postos de transformação de distribuição de energia eléctrica, é um sistema desenvolvido com vista a ser aplicado em postos de transformação de distribuição de energia eléctrica, bem como nas residências alimentadas pelos respectivos postos de transformação. O sistema irá permitir a concessionária de fornecimento de energia eléctrica detectar as condições de sobrecarga e desequilíbrio de fases nos transformadores, bem como monitorar em tempo real o consumo debitado da rede por cada consumidor. Associada as capacidades previamente mencionadas, o sistema irá permitir a concessionária realizar comutações remotas dos consumidores pelas fases disponíveis como mecanismo de mitigar as condições de sobrecarga e desequilíbrio de fases, combatendo o envelhecimento precoce deste activo muito valioso para a concessionária.

O sistema conta com duas componentes, a de software e a de hardware. A parte de hardware por sua vez é dividida em 2 partes, a primeira propõe-se que seja instalada no lado do secundário do posto de transformação de energia eléctrica e é composta por um conjunto de microcontrolador com capacidade de conexão a internet e três sensores de corrente eléctrica para a medição das correntes debitadas pelos consumidores em cada fase. A segunda propõe-se que seja instalada na entrada do contador do consumidor, sendo esta composta por um microcontrolador, um módulo relé de três canais e um sensor de corrente eléctrica. Para a parte do software será criada uma página web e integrar-se-a a esta, uma base de dados para armazenamento de dados dos clientes, dos postos de transformação e outros.

### **4.2.1 Requisitos do sistema**

Este foi um sistema concebido com a finalidade de melhorar a vida útil dos transformadores de distribuição de energia eléctrica da EDM, por ele estar dividido em duas partes (o hardware e o software), podemos especificar os requisitos do mesmo tendo em vista a categorização dos mesmos como de hardware e software. O sistema tem como requisitos:

#### 4.2.1.1 Requisitos de hardware

- Permitir a medição das correntes a serem debitadas nas 3 fases do Posto de Transformação (PT);
- Permitir a medição da corrente total que cada consumidor debita da rede;
- Permitir que cada consumidor possa ser comutado entre as 3 fases do PT;
- Possuir conectividade a internet.

#### 4.2.1.2 Requisitos de software

- Permitir a visualização dos valores das correntes medidas pelo hardware de coleta;
- Integrar uma base de dados para registro de clientes e postos de transformação;
- enviar comandos de comutação do consumidor pelas 3 fases do PT.

### 4.2.2 Descrição do Hardware

Nesta seção, abordaremos os materiais utilizados para o desenvolvimento do protótipo, suas especificações técnicas, bem como o seu princípio de funcionamento e o seu papel no sistema.

#### 4.2.2.1 Placa microcontroladora ESP32

O ESP32 é uma placa microcontroladora de baixo custo e alta performance, esta placa foi desenvolvida pela Espressif Systems. Esta placa possui um microprocessador dual-core de 32 bits e inclui Wi-fi e Bluetooth integrados. Ele é equipado com uma variedade de interfaces de entrada e saída, como *General Purpose Input/Output* (GPIO), Modulação por Largura de Pulso (PWM), Conversor Analógico-Digital (ADC), Conversor Digital-Analógico (DAC) e interfaces para comunicação como *Serial Peripheral Interface* (SPI), Circuitos Integrados - *Inter-Integrated Circuits* (I2C) e *Universal Asynchronous Receiver Transmitter* (UART). A descrição dos seus pinos pode ser vista na figura 4.3.

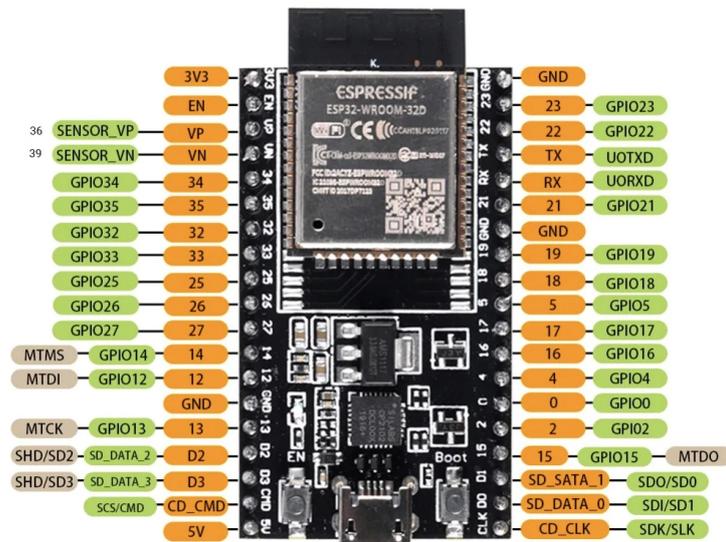


Figura 4.3: Descrição de pinos do ESP32. Fonte: [9]

Tabela 4.1: Especificações técnicas do ESP32. Fonte: DATASHEET ESP32-WROOM-32D

Categoria	Item	Descrição
Hardware	Tensão de alimentação	3.0 V 3.6 V
	Corrente de operação	média: 80 mA
	Temp operacional recom	-40 °C +85°C
	Cristal integrado	40 MHz
	Memória Flash	4 MB
Wi-Fi	Protocolos	802.11 b/g/n(802.11n até 150Mbps)
	Faixa de frequência	2,4 GHz 2,5 GHz
Bluetooth	Protocolos	Bluetooth v4.2 BR/EDR e BLE
	Rádio	Receptor NZIF com sensibilidade de -97 dbm Transmissor de classe 1, classe2, classe 3 e AFH

A tabela 4.1 fornece as especificações gerais do ESP32, nesta podem ser vistos os principais aspectos técnicos do microcontrolador, como tensão de alimentação, frequência de clock memória e outras características relevantes.

Conforme mencionado na secção 4.2 o hardware de coleta está dividido em 2 partes. Na primeira parte este microcontrolador será utilizado para servir de unidade de processamento que será responsável por receber as correntes medidas pelos sensores de corrente ligados nas 3 fases e preparar estas informações para serem enviadas para o software de supervisão. Neste microcontrolador os pinos de interesse são os pinos 32, 33 e 35. Sendo o pino 32 usado para receber os pulsos de corrente da fase R, o pino 35 usado para receber os pulsos de corrente da fase S e o pino 33 usado para receber os pulsos de corrente da fase T. De seguida estes dados são enviados ao software de supervisão para posterior processamento e ilustração na página.

Na segunda parte, que é a parte ligada ao contador do consumidor, ele servirá de unidade de processamento responsável por receber os comandos do software de supervisão de maneira a comutar um determinado consumidor entre as 3 fases disponíveis. Ele é também responsável enviar o valor de corrente a ser debitado da rede pelo respectivo consumidor ao software de supervisão para permitir uma melhor tomada de decisão em relação ao alívio da rede sob as condições de sobrecarga e desequilíbrio de fases.

#### **4.2.2.2 Sensor de corrente ACS721**

O sensor de corrente ACS712 é um dispositivo para medir corrente eléctrica, tanto em circuitos de Corrente Contínua (DC), quanto em circuitos de CA. Este sensor é composto pelo chip ACS712 que contém um sensor de efeito Hall e um amplificador integrado. O princípio fundamental por de trás de sua operação é o efeito Hall. A seguir explicamos de maneira detalhada o seu princípio de funcionamento:

Quando a corrente eléctrica passa pelo condutor de cobre do ACS712, ela gera um campo magnético ao redor desse condutor. A intensidade desse campo magnético é proporcional à intensidade da corrente que passa pelo condutor, de acordo com a lei de Biot-Savart. O sensor de efeito Hall no ACS712 por sua vez detecta esse campo magnético gerado, desenvolvendo uma ddp proporcional à densidade do fluxo magnético, que por sua vez é proporcional a corrente eléctrica que gerou o campo magnético. Essa tensão é então

amplificada pelo amplificador integrado no chip, resultando em uma saída de tensão analógica. De acordo com a corrente medida a tensão de saída do ACS712 irá variar e este está calibrado para produzir uma tensão de saída de 2,5V quando a corrente através do condutor for zero(para o caso de alimentação de 5V). Para correntes positivas, a tensão de saída aumenta linearmente, enquanto para correntes negativas a tensão de saída diminui linearmente. A sensibilidade do sensor, ou seja, quanto a tensão de saída varia por ampere de corrente depende do modelo específico do sensor. Na tabela 4.2 podem ser vistas as especificações técnicas do sensor ACS712 de 30A que foi o sensor utilizado para a construção do protótipo.

**Tabela 4.2: Especificações técnicas do sensor de corrente ACS712.**  
**Fonte:DATASHEET do ACS712**

Característica	Descrição
Tensão de alimentação	5 VDC
Faixa de medição	-30 A à 30 A
Sensibilidade	66 mV/A
Resistência	1.2 mΩ

Tal como a placa microcontroladora ESP32, o sensor de corrente ACS712 também é aplicado dos dois lados do hardware de coleta. Do lado do secundário do transformador, são utilizados 3 sensores ACS712. Estes estão ligados nas portas 32, 33 e 35 do microcontrolador previamente mencionado. Estes são os dispositivos que vão nos permitir medir as correntes a serem debitadas nas 3 fases do transformador. E do lado dos consumidores, cada hardware de coleta será equipado com um sensor de corrente para permitir que possamos visualizar a corrente que cada consumidor debita da rede. Na figura 4.4 pode ser vista a descrição de pinos do sensor de corrente ACS712.



**Figura 4.4: Descrição de pinos do sensor de corrente ACS712. Fonte: [10]**

### 4.2.2.3 Módulo relé de 3 canais

Conforme mencionado na secção 4.2, o hardware de coleta do lado do consumidor será equipado com um módulo relé de 3 canais. Este será responsável por garantir a comutação remota do consumidor pelas 3 fases da rede eléctrica. Ele será conectado ao microcontrolador, que por sua vez quando receber o comando pelo software de supervisão fará a comutação do consumidor para a fase indicada ou mesmo desconecta-lo da rede. Na figura 4.5 pode ser vista descrição de pinos do módulo relé de 3 canais e na tabela 4.3 podem ser vistas as especificações técnicas do mesmo.

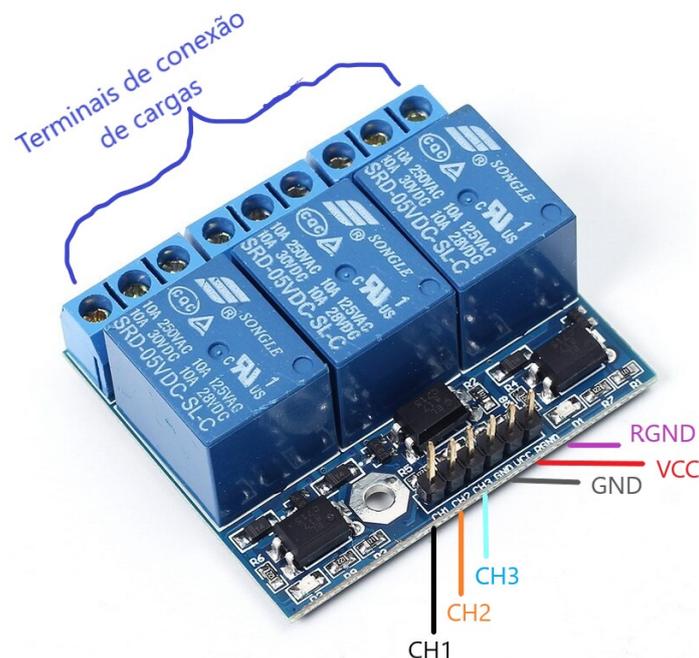


Figura 4.5: Descrição de pinos do móddulo relé de 3 canais. Fonte: [11]

Da descrição de pinos acima compreendamos como este dispositivo funcionará no protótipo: ao ser aplicado um sinal digital(ligar/desligar) nos canais CH1, CH2 e CH3, o módulo relé irá responder ligando/desligando o consumidor em somente um dos canais, o que quer dizer que em nenhum momento os três canais poderão estar em estado ligado em simultâneo.

**Tabela 4.3: Especificações técnicas do módulo relé de 3 canais. Fonte:DATASHEET do módulo relé**

Característica	Descrição
Tensão de alimentação	5 VDC
Tensão de controle	0 à 250 VAC
Corrente máxima de controle	7A

#### 4.2.2.4 Módulo SIM800L

Devido a necessidade de troca de informações entre o software de supervisão e o hardware de coleta por meio de interface wireless, o módulo SIM800L fará parte do conjunto de componentes deste protótipo. Ele terá a função de possibilitar com que o hardware de coleta conecte-se a rede celular para utilizar o recurso de envio e recebimento de dados General Packet Radio Service (GPRS) ( Protocolo de Controle da Transmissão - *Transmission Control Protocol* (TCP)/ Protocolo de Internet - *Internet Protocol* (IP), Protocolo de Transferência de HiperTexto - *HyperText Transfer Protocol* (HTTP), etc) para comunicar com o software de supervisão. Na figura 4.6 podemos ver a ilustração gráfica do módulo SIM800L, bem como os seu diagrama de pinos e na tabela 4.4 podem ser vistas as especificações técnicas do mesmo.



**Figura 4.6: Descrição de pinos do módulo SIM800L. Fonte: [12]**

**Tabela 4.4: Especificações técnicas do módulo SIM800L. Fonte:DATASHEET do SIM800L**

Característica	Descrição
Tensão de alimentação	3.4 à 4.4 VDC
Banda de frequências	quad-band 850/900/1800/1900 MHz
Consumo de corrente	Em torno de 1A durante transmissão

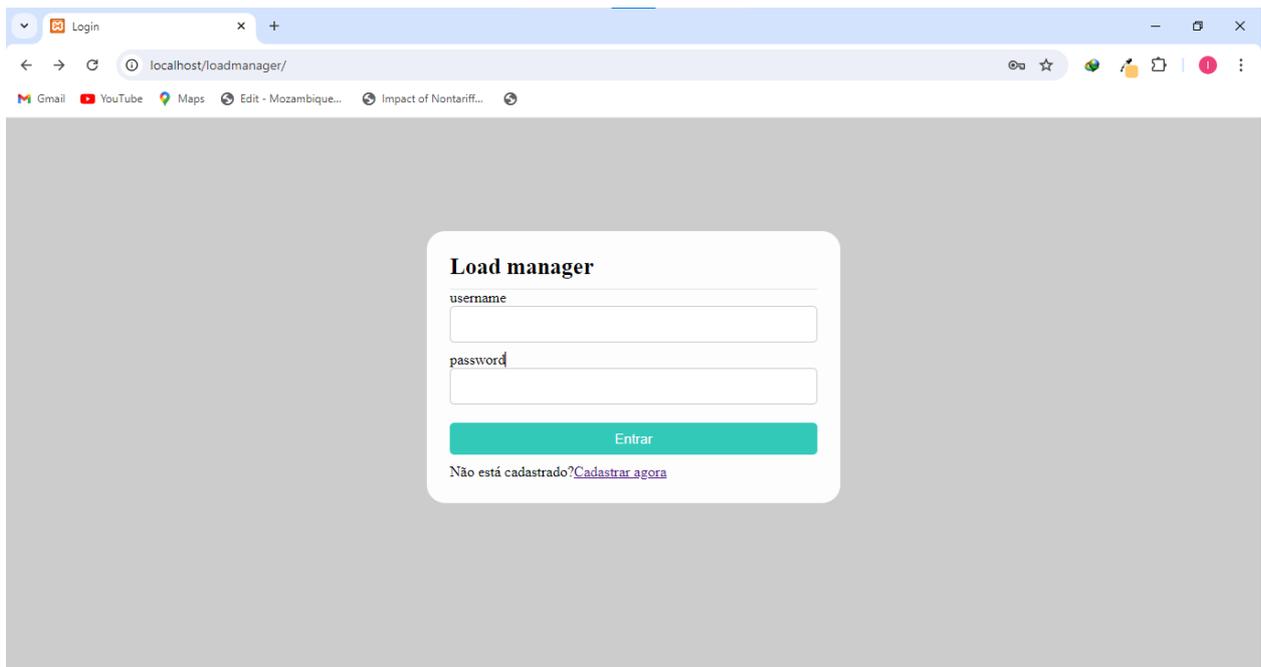
### **4.2.3 Descrição do software**

O software de supervisão é composto por uma página web criada com base em linguagens de programação ( PHP) e marcação ( HTML e CSS). Esta é basicamente parte visual do sistema, através dela o supervisor/operador tem acesso a todos os transformadores da rede de distribuição de energia, bem como aos clientes a ele conectado.

A prior o operador deparar-se-a com um tela de login, de seguida com a tela principal que é onde terá a possibilidade de interagir com 4 menus, nomeadamente: dashbord, clientes, Postos de transformação e Alarmes.

#### **4.2.3.1 Tela de login**

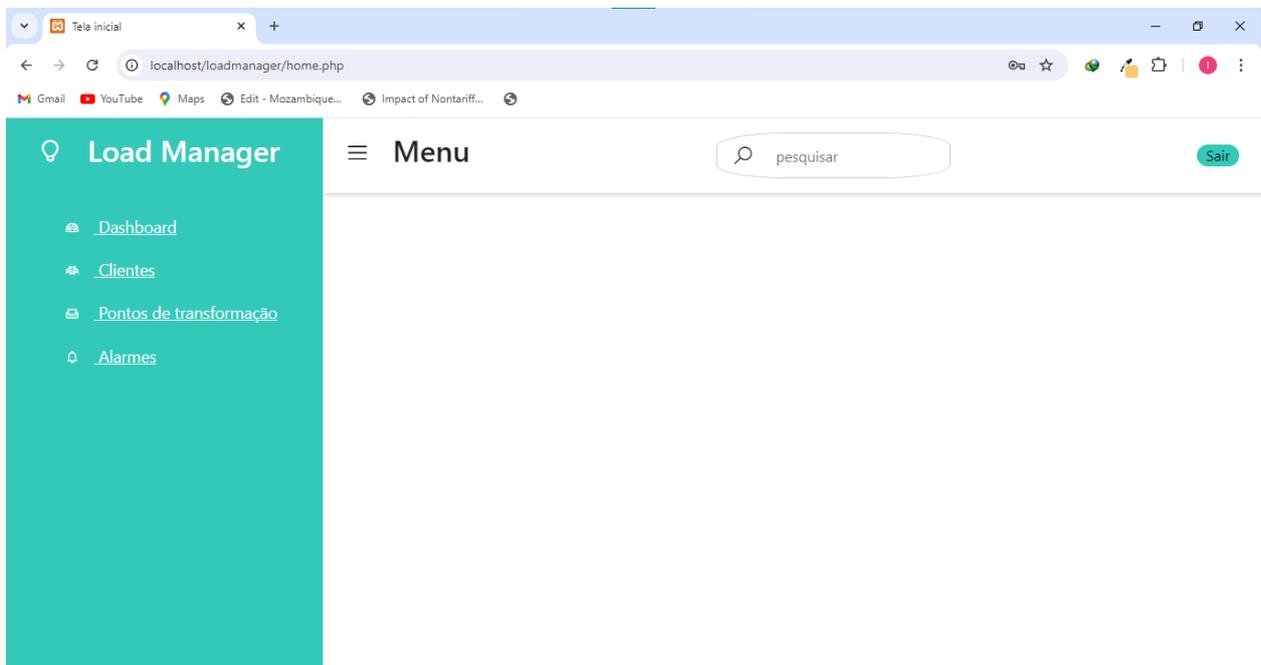
A tela de login foi concebida com o objectivo de garantir a segurança do sistema. Ela funciona de maneira a permitir o acesso somente a usuários previamente cadastrados na base de dados do sistema. Para ter acesso ao sistema o usuário deve fornecer dados como username e password conforme ilustra a figura 4.7.



**Figura 4.7: Tela de login. Fonte:Autor, 2024**

#### 4.2.3.2 Tela principal

Após a autenticação dos dados de inicio de sessão do usuário, ele é redirecionado para a tela inicial. Neste tela o usuário tem acesso a 4 menus. conforme ilustra a figura 4.8.



**Figura 4.8: Tela inicial. Fonte:Autor, 2024**

### 4.2.3.3 Menu Dashboard

Este é um menu com interfaces gráficas que fornecem, uma visualização rápida da quantidade de clientes e postos de transformação registrados no sistema, bem como da quantidade de alarmes disparados pelo sistema.

Estes cartões não são clicáveis e conforme mencionado anteriormente, fornecem somente uma visão quantitativa dos principais itens encontrados no sistema. A figura 4.9 é uma ilustração da disposição do menu 4.2.3.3.

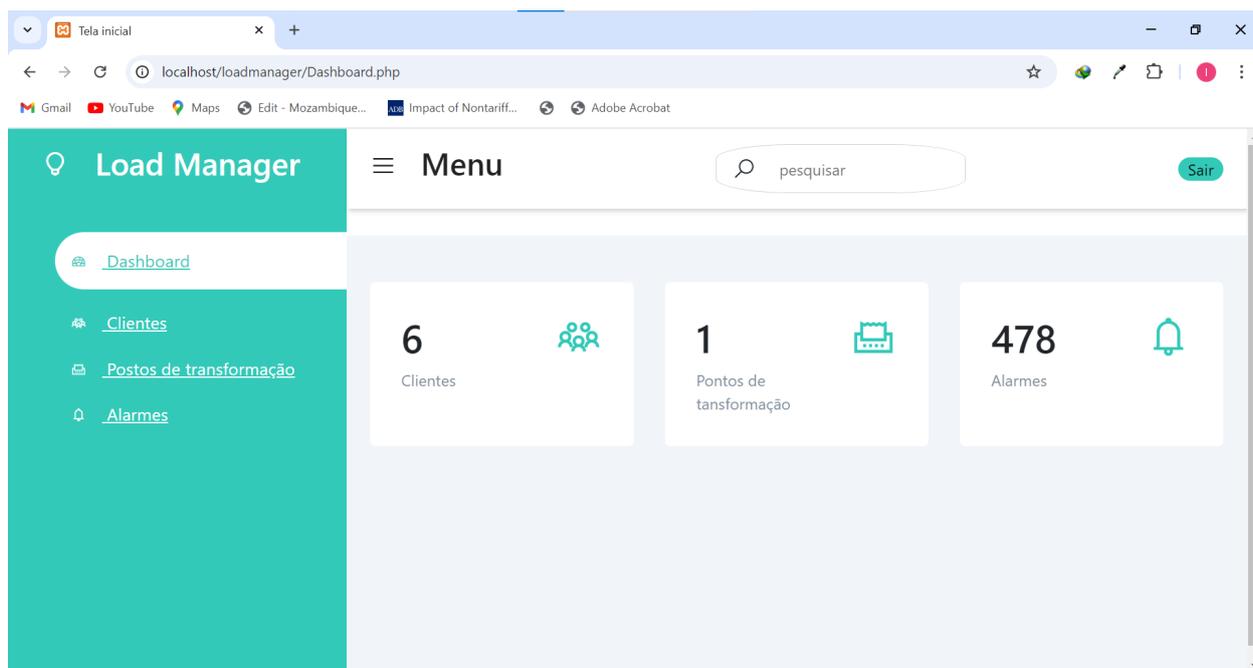


Figura 4.9: Menu dashboard. Fonte:Autor, 2024

### 4.2.3.4 Menu clientes

Neste menu o usuário tem acesso a lista de consumidores ligados a rede, valor de corrente medido pelo respectivo hardware de coleta e a botões que permitem realizar ações como: comutar determinado consumidor pelas 3 fases da rede ou desconecta-lo da rede e registrar um novo consumidor.

Conforme ilustrado na figura 4.10, o menu é composto por uma tabela com 8 colunas. A coluna 4 da tabela é onde são escritos os valores de corrente debitadas por cada consumidor, estes valores são enviados a esta página por meio de uma *Application Programming Interface* (API), que é responsável por garantir a comunicação bi-direcional entre a página web e os hardwares de coleta. Nas colunas 5, 6, 7 e 8 podem ser vistos os botões que são utilizados para enviar os comandos de comutação dos consumidor pelas 3 fa-

ses da rede ou desliga-lo. O sistema só permite que um consumidor seja ligado em uma fase da rede por vez, ou seja, em hipótese alguma será possível ter mais de um botão do conjunto dos quatro botões disponíveis para cada consumidor em estado on. Além disso, a página possui capacidade de recuperar/gravar os últimos estados dos botões e das correntes dos usuários, em caso de a página ser fechada ou recarregada.

ID	Nome	PT nr	I	Fase R	Fase S	Fase T	Desconectar
1	consumidor1	500	0	OFF	OFF	OFF	ON
2	consumidor2	500	0	OFF	OFF	OFF	ON
3	consumidor3	500	0	OFF	OFF	OFF	ON
4	consumidor4	500	0	OFF	OFF	OFF	ON
5	consumidor5	500	0	OFF	OFF	OFF	ON
6	consumidor6	500	0	OFF	OFF	OFF	ON

**Figura 4.10: Menu clientes. Fonte:Autor, 2024**

#### 4.2.3.5 Menu Postos de transformação

Neste menu o usuário tem acesso a lista de transformadores registados no sistema, incluindo detalhes de sua chapa característica e os valores a serem medidos pelo hardware de coleta ligado ao mesmo. Para além das informações previamente mencionadas, neste menu o usuário tem acesso a 3 botões que permitem realizar as seguintes funções: adicionar um novo posto de transformação ao sistema, editar dados de um posto de transformação já registado no sistema e apagar do sistema um posto de transformação previamente registado no sistema.

Os valores das correntes debitadas em cada uma das 3 fases do posto de transformação são escritos nas colunas 8, 9 e 10 da tabela ilustrada na figura 4.11. E a partir desses valores o sistema calcula o carregamento com base na carga ligada na rede e o nível de desequilíbrio entre as fases.

Quando o carregamento estiver entre 100% e 149.99% o sistema irá disparar um alarme

que será registado na base de dados como: "Próximo de carregamento crítico". E em caso do carregamento ser igual ou superior a 150% outro alarme será disparado e registado na base de dados como: "Carregamento crítico". Por ultimo, um terceiro alarme será disparado e registado na base de dados como: "Sistema desbalanceado" caso o índice de desequilíbrio seja igual ou superior a 10%.

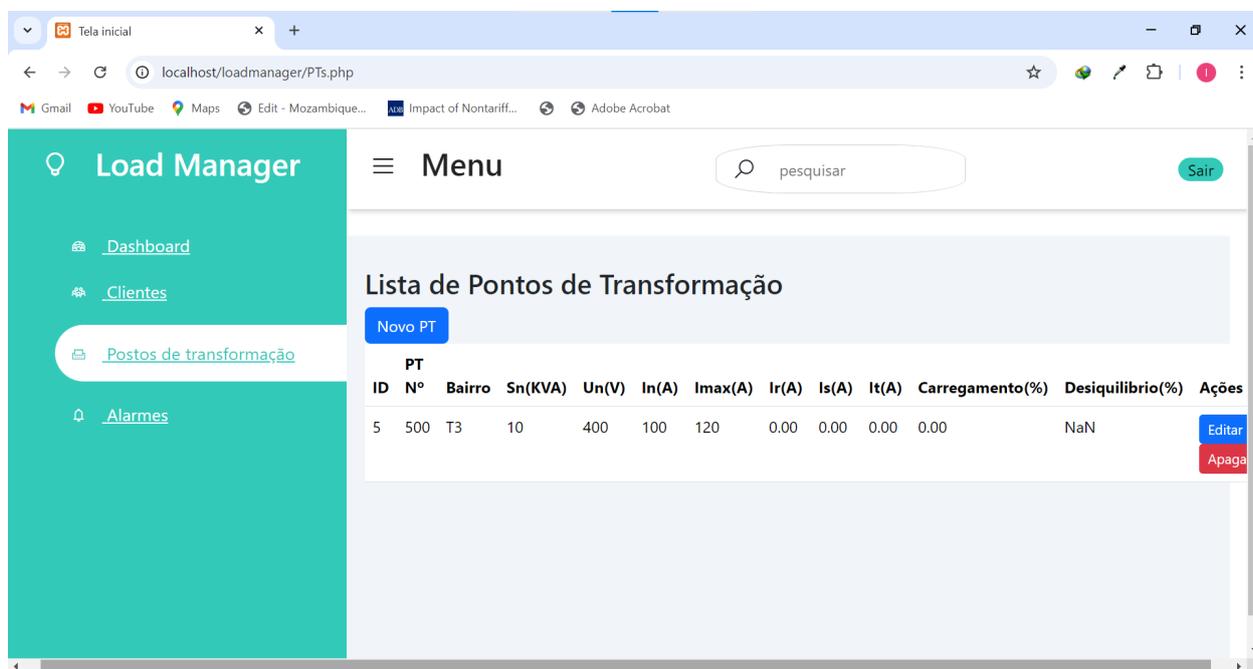


Figura 4.11: Menu postos de transformação. Fonte:Autor, 2024

#### 4.2.3.6 Menu Alarmes

Por fim, neste menu o usuário tem acesso a lista de alarmes disparados pelo sistema. Estes alarmes são disparados automaticamente pelo sistema quando alguma das condições mencionadas em 4.2.3.5 é verificada em algum posto de transformação. Na figura 4.12 pode ser vista a ilustração gráfica do mesmo.

Timestamp	Alarm Description	Count
2024-09-08 21:23:59	proximo de carregamento critico	5
2024-09-08 21:23:59	Sistema desbalanceado	5
2024-09-08 21:24:00	Sistema desbalanceado	5
2024-09-08 21:24:00	Sistema desbalanceado	5
2024-09-08 21:24:00	proximo de carregamento critico	5
2024-09-08 21:24:00	proximo de carregamento critico	5
2024-09-08 21:24:00	proximo de carregamento critico	5
2024-09-08 21:24:00	Sistema desbalanceado	5
2024-09-08 21:24:01	carregamento critico	5
2024-09-08 21:24:01	carregamento critico	5
2024-09-08 21:24:01	carregamento critico	5
2024-09-08 21:24:01	carregamento critico	5

**Figura 4.12: Menu alarmes. Fonte:Autor, 2024**

# Capítulo 5

## Ensaaios e resultados

O ensaio do protótipo sucedeu a nível laboratorial, este ensaio consistiu no teste de conexão de todos intervenientes do protótipo por via da API, teste de envio de comandos por via da pagina web para o hardware de coleta, leitura das correntes que fluem pela rede e teste do disparo dos alarmes.

### 5.1 Teste de conexão

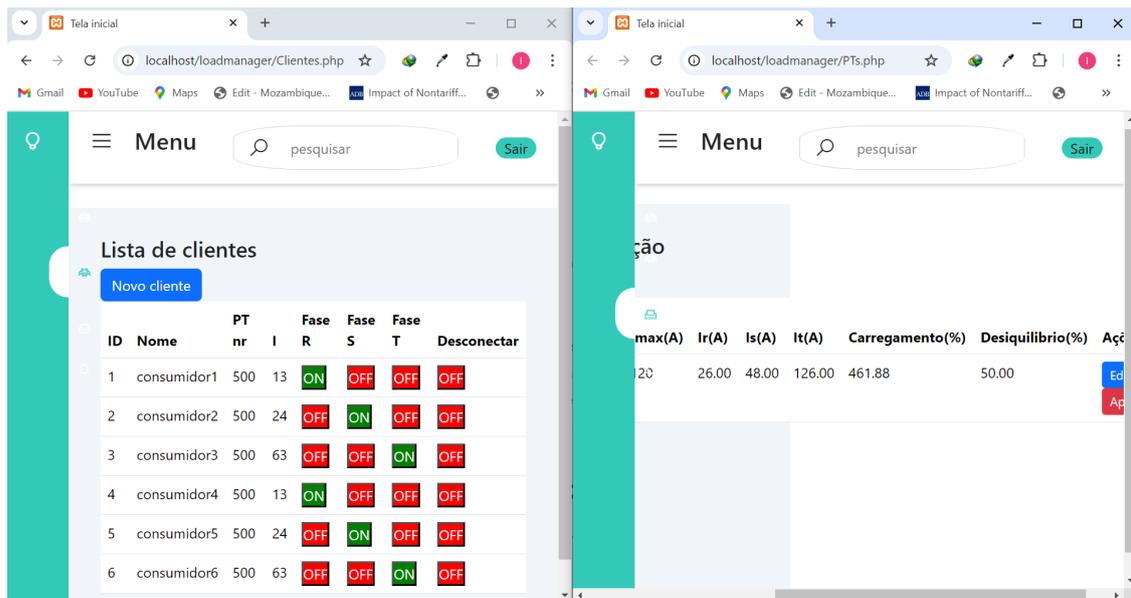
Teste de conexão consistiu em executar tentativas de conexão entre hardwares de coleta e a pagina web. E verificar as respostas das tentativas no command prompt do servidor. Os resultados deste ensaio podem ser vistos na figura 5.1.

```
Command Prompt - php websocket.php
Nova conexao estabelecida! (198)
Conexao encerrada! (198)
Nova conexao estabelecida! (203)
Conexao encerrada! (203)
Nova conexao estabelecida! (208)
Nova conexao estabelecida! (213)
^C
c:\xampp\htdocs\loadmanager>php websocket.php
Nova conexao estabelecida! (65) 1
Nova conexao estabelecida! (100) 2
Nova conexao estabelecida! (105) 3
0.00:pt5:esppt:localhost:totFaseR
0.00:pt5:esppt:localhost:totFaseS
0.00:pt5:esppt:localhost:totFaseT
Nova conexao estabelecida! (108) 4
Conectado ao servidor WebSocket!
0.00:pt5:esppt:localhost:totFaseR
0.00:pt5:esppt:localhost:totFaseS
0.00:pt5:esppt:localhost:totFaseT
Nova conexao estabelecida! (111) 5
Conectado ao servidor WebSocket!
```

Figura 5.1: Resultado do teste de conexão. Fonte:Autor, 2024

Nesta figura podemos ver as respostas das tentativas de conexão entre os dispositivos e a página web, onde as respostas legendadas como 1 e 2 são da página web concretamente dos menus 4.2.3.4 e 4.2.3.5 respectivamente. Subsequentemente as respostas legendadas como 3, 4 e 5 são dos hardwares de coleta.

## 5.2 Teste de envio de comandos e leitura das correntes



The image shows two browser windows side-by-side. The left window displays the 'Lista de clientes' page, which contains a table with columns for ID, Nome, PT nr, and three 'Fase' columns (I, R, S, T), along with a 'Desconectar' column. The right window displays the 'Carregamento' page, which shows a table with columns for 'max(A)', 'Ir(A)', 'Is(A)', 'It(A)', 'Carregamento(%)', 'Desiquilibrio(%)', and 'Ação'.

ID	Nome	PT nr	Fase I	Fase R	Fase S	Fase T	Desconectar
1	consumidor1	500 13	ON	OFF	OFF	OFF	
2	consumidor2	500 24	OFF	ON	OFF	OFF	
3	consumidor3	500 63	OFF	OFF	ON	OFF	
4	consumidor4	500 13	ON	OFF	OFF	OFF	
5	consumidor5	500 24	OFF	ON	OFF	OFF	
6	consumidor6	500 63	OFF	OFF	ON	OFF	

max(A)	Ir(A)	Is(A)	It(A)	Carregamento(%)	Desiquilibrio(%)	Ação
20	26.00	48.00	126.00	461.88	50.00	Ed Ap

**Figura 5.2: Resultado do teste de envio de comando e leitura das correntes.**  
**Fonte: Autor, 2024**

Na figura 5.2, pode ser visto o resultado do teste de envio de comandos e leitura das correntes na rede. Na imagem verificaram-se resultados satisfatórios, pois o sistema foi capaz de conectar os consumidores nas fases pretendidas, mostrar a corrente consumida por cada consumidor, a corrente total em cada fase do sistema e ainda realizar corretamente o calculo do carregamento e do índice de desequilíbrio.

## 5.3 Teste de disparo de alarmes

O teste do disparo dos alarmes consistia em verificar se a página registava os alarmes disparados. Na figura 5.3 pode ser visto que o resultado é satisfatório, pois verificou-se que os alarmes eram disparados e a página web era capaz de recuperar e imprimir os mesmo conforme esperado.

2024-09-09 18:45:23	Sistema desbalanceado	5
2024-09-09 18:45:23	proximo de carregamento critico	5
2024-09-09 18:45:23	carregamento critico	5

**Figura 5.3: Resultado do teste de disparo de alarmes. Fonte:Autor, 2024**

## 5.4 Custos do projecto

Nesta secção apresentamos o levantamento dos custos para a construção do protótipo, bem como a estimativa do valor final do dispositivo. Na tabela 5.1 encontram-se os custos dos materiais necessários, bem como da mão de obra necessária para a execução do projecto.

**Tabela 5.1: Levantamento dos custos para a realização do projecto Fonte: Autor, 2024**

Item	Qtd	Preço por unidade(MZN)
Esp-32S	3	1550,00
Módulo relé de 3 canais	6	140,00
Sensor de corrente ACS712	9	62,00
Adaptador para Esp-32	3	80,00
Transformador 220VAC-9VAC	3	400,00
Módulo SIM800L	1	1200,00
Módulo LM2596	1	350,00
Cola dupla face	1	200,00
Barras de junção	1	20,00
Sub-total		8178,00
Mão de obra		8995,80
Total		17173,80

O custo total para a construção do protótipo, sem incluir a mão de obra é estimado em oito mil cento e setenta e oito meticais ( 8178). Mas este valor pode reduzir a metade ou mais do que a metade. A motivação por de trás disto é que os dispositivos são comprados a atacado e nestas condições eles acabam tendo o seu valor elevando em relação a compra a grosso.

# Capítulo 6

## Conclusões e recomendações

### 6.1 Conclusão

O presente trabalho intentou como objectivo geral desenvolver um sistema automático de partilha e balanceamento de carga em transformadores de distribuição de energia eléctrica. A fim de alcançar este objectivo, foram despendidos esforços para auferir o estado da rede a nível da região do Infulene, que foi a área onde incidiu a pesquisa. A pesquisa consistiu na consulta dos arquivos de registo de carregamentos dos transformadores de distribuição sob supervisão da ASC Infulene, donde foi possível constatar alguns casos de transformadores operando em condições de sobrecarga e uma grande maioria deles também com índices de desequilíbrio acima do nível recomendado. Estas constatações deram o ponta-pé de saída para a busca da solução mais eficiente para a mitigação dos problemas em questão. Nesta busca, ficou estabelecido que a proposta de solução devia ser capaz de permitir a comutação remota dos consumidores pelas três fases da rede, assim como desconectá-lo de maneira a cumprir com o alívio do transformador sob condições de sobrecarga e desequilíbrio de fases. Para isso, foram seleccionados o conjunto de equipamentos que tornariam essa abordagem possível e informações detalhadas sobre os mesmos foram apresentadas no presente relatório. Com os equipamentos completamente delineados, surge a necessidade de garantir que os mesmos pudessem ser manipulados a distancia, desse modo, foi acoplado aos equipamentos um segundo fragmento (software de supervisão) que colaborará com os dispositivos em campo para tornar a comutação remota dos consumidores, possível. Com o protótipo devidamente desenhado e implementado foram realizados testes de maneira a comprovar a sua eficiência, destes testes foram obtidos resultados satisfatórios já que o sistema era capaz de atender os

objectivos para os quais foi projectado. Sendo ele capaz de permitir a comutação remota dos consumidores pelas 3 fases da rede, calcular o nível de carregamento do transformador, o índice de desequilíbrio do mesmo e com esses dados detectar as condições de sobrecarga e desequilíbrio de fases. O desenvolvimento deste projecto proporcionou uma grande oportunidade de aprendizagem, pois exigiu a aplicação de diversos conhecimentos adquiridos durante a formação académica, bem como de diversos conhecimentos obtidos ao longo do desenvolvimento do mesmo. Em suma, considera-se que foram cumpridos de maneira integral os objectivos pré-dispostos neste trabalho.

## **6.2 Recomendações**

1. Por questões financeiras, não foi possível construir o protótipo contendo o módulo SIM800L conforme pretendido no desenho do protótipo. Tratando-se de prototipagem, foi utilizado o recurso a comunicação wifi disponibilizada pelo próprio Esp-32s para estabelecer a comunicação entre o hardware de coleta e o software de supervisão. Desse modo recomenda-se que estudos futuros sejam logrados de maneira a integrar o dispositivo em questão ao sistema.
2. Por este projecto ter sido projectado a nível de prototipagem, em caso de necessidade de aplicação real do mesmo, recomenda-se a substituição dos dispositivos experimentais aqui utilizados por dispositivos mais robustos, de maneira conferir ao sistema uma qualidade de produto final.

# Bibliografia

- [1] Electricidade de Moçambique E P. (2006). Postos de Transformação Rurais. Manual de montagem de postos de transformação rurais
- [2] Chapman, S. J. (2013). Fundamentos de máquinas eléctricas(5th ed.). Porto Alegre: Mc Graw Hill. ISBN: 978-85-8055-207-2
- [3] Fernandes, H. M. Desbalanceamento de fases e os impactos na distribuição de energia.Repositório Universitário da Ânima (RUNA), 2023. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/41237>. Acesso em: 04-06-2024
- [4] Vieira, M. O. Perda de vida útil técnica e perda de vida útil econômica dos transformadores de distribuição. Dissertação (Mestrado ciências em engenharia eléctrica). Repositório Universidade Federal de Itajubá, 2007. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/3804>. Acesso em: 15-06-2024
- [5] ANSI / IEEE C57.91-1981- American National Standard.- “guide for loading mineral – oil – immersed overhead and pad-mounted distribution Transformers, rated 500 kVA and less with 65°C 55°C average winding rise”
- [6] IEEE Std C57.91 “IEEE Guid for Loading Mineral -oil-Imersed Transformer” – 1995 [18] ANSI / IEEE C57.91-1981- American National Standard.- “guide for loading mineral – oil – immersed overhead and pad-mounted distribution Transformers, rated 500 kVA and less with 65°C 55°C average winding rise”
- [7] IEEE Std C57.91TM – 1995 / Cor 1-2002, IEEE Guide for Loading Mineral – Oil – Immersed Transformers – Corrigendum 1 - 12 June 2003.
- [8] IEEE Conference Record of the 2006 International Symposium on Electrical Insulation

[9] <https://altronics.cl/>. Acesso em:15-06-2024

[10] <https://www.arduinoecia.com.br/>. Acesso em:15-06-2024

[11] <https://nyerekatech.com/>. Acesso em: 18-06-2024

[12] <https://lastminuteengineers.com/> Acesso em: 18-06-2024

# **Anexos**

# Anexo 1

## Transformadores avariados 2024

TRANSFORMADORES AVARIADOS 2024											
Item	Nº do PT	Potencia (kVA)	Nivel de Tensão (kV)	Marca	Nº de Série	Ano de Fabrico	Massa (kg)	Bairro	Data da Avaria	Prováveis Causas	Custo Médio (MZN)
1	539	250	33/0,4	TM	904915	2013	1650	Intaka	1/25/2024	Curto circuito interno	1,170,000
2	1069	315	33/0,4	TENALEC LIMITED	T-29492	2009	1735	Muhalaze	2/23/2024	Cuba danificada	1,435,200
3	316R	500	33/0,4	POWERTECH	20793501/02	2013	2300	Intaka	3/24/2024	Curto circuito interno	2,496,000
4	567	250	33/0,4	ABB	44313-17	2000	1170	Intaka	3/25/2024	Curto circuito na fase T	1,170,000
5	160	500	33/0,4	POWERTECH	30726802/02	2010	2300	Infulene D	3/26/2024	Curto circuito na fase S	2,496,000
6	S/N	32	33/0,4	TM	395462	2013	284	Tavira	4/5/2024	Descarga atmosférica	357,700
7											
8											
9											
10											
11											

Figura 1.1: Lista de transformadores avariados ASC Infulene. Fonte: ASC Infulene

## **Anexo 2**

# **Esquemas eléctricos**

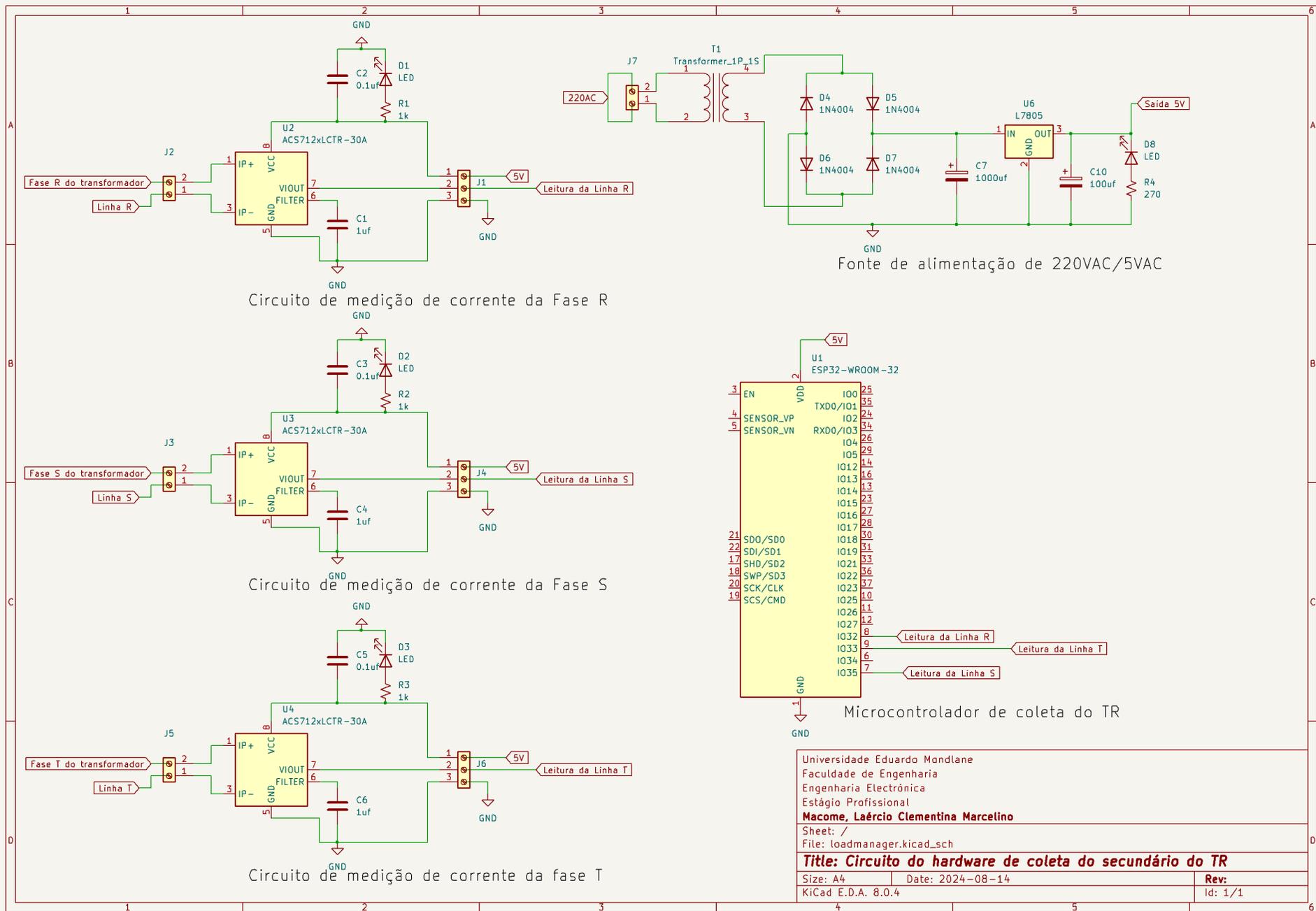


Figura 2.1: Circuito do hardware de coleta do lado do transformador. Fonte: Autor,2024

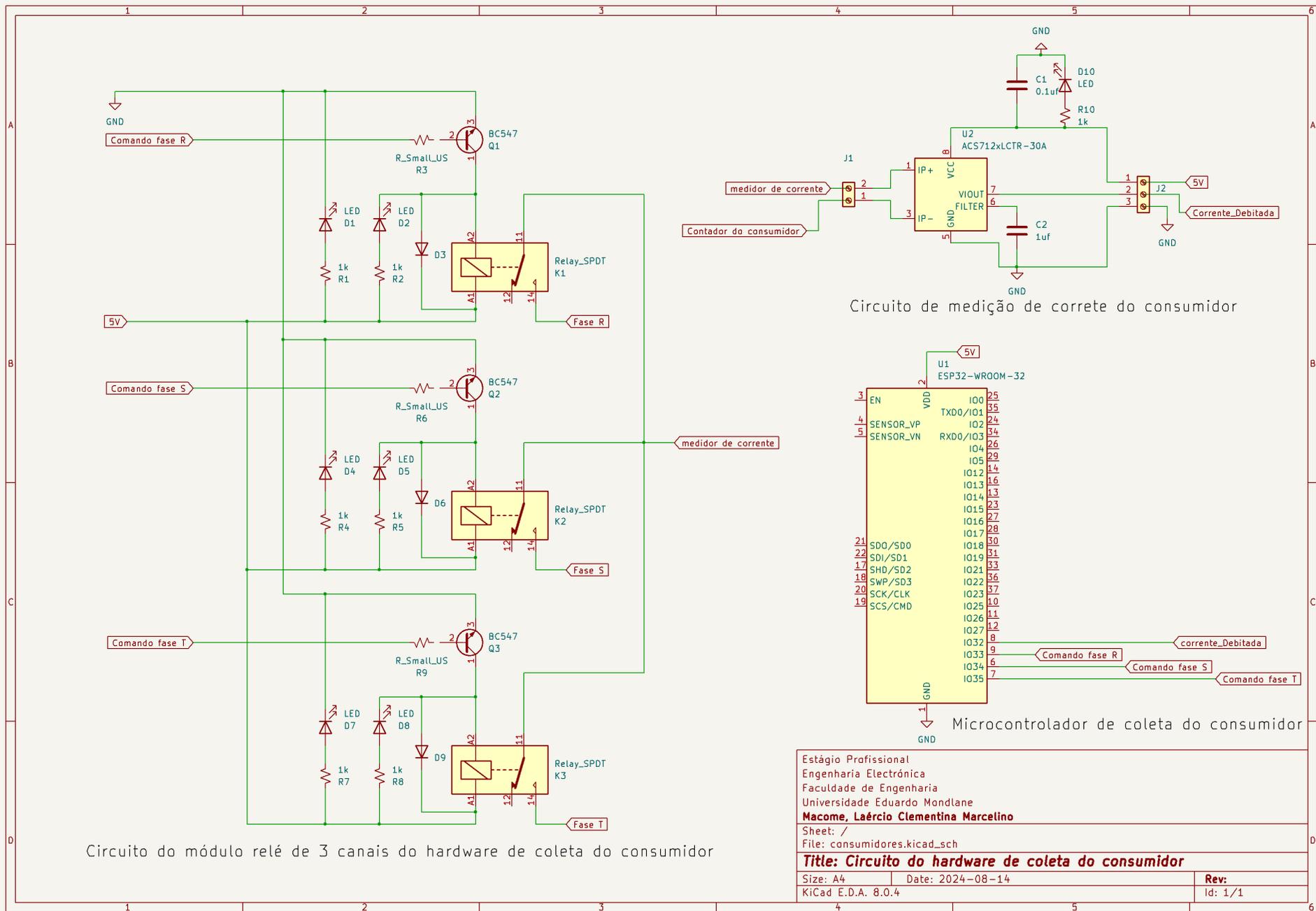


Figura 2.2: Circuito do hardware de coleta do lado do consumidor. Fonte: Autor,2024