



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

**ANÁLISE DOS IMPACTOS DA SOBRETENSÃO EM SISTEMAS  
INDUSTRIAIS: ESTUDO DE CASO NA FÁBRICA *UNITED  
DISTILLERS MACHAVA***

**Autor:**

Matias Laura Fernando

**Supervisores:**

**UEM:** Prof.Doutor, Zacarias Chilengue, Engº

**DCMZ Electrics:** Engº Cláudio Chambo

Maputo, Junho de 2025



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

**ANÁLISE DOS IMPACTOS DA SOBRETENSÃO EM SISTEMAS  
INDUSTRIAS: ESTUDO DE CASO NA FÁBRICA *UNITED  
DISTILLERS MACHAVA***

**Autor:**

Matias Laura Fernando

**Supervisores:**

**UEM:** Prof.Doutor, Zacarias Chilengue, Engº

**DCMZ Electrics:** Engº Cláudio Chambo

Maputo, Junho de 2025

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho à minha mãe, Laura Adelino Fernando, por ser minha maior motivação e inspiração, pela educação e principalmente pelo amor que tem me proporcionado todos dias.

Aos meus irmãos, Rocina Matias, Jorge Matias, Afonso Matias e Adriano Matias que têm me apoiado desde sempre, por me motivar a crescer e a realizar os meus sonhos.

Ao meu grande amigo e companheiro de jornada, Adson Palmerim que muito tem me motivado a combater este bom combate

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar forças e sabedoria ao longo de toda esta jornada, permitindo-me superar os desafios e alcançar este importante momento.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão ao meu Supervisor, Engenheiro Zacarias Chilengue, pela orientação constante e paciência durante o desenvolvimento deste trabalho. Suas orientações precisas foram essenciais para a realização deste trabalho

Gostaria de expressar minha profunda gratidão também ao meu Supervisor da empresa, Engenheiro Cláudio Chambo, por me receber tão bem e me incentivar a trabalhar neste tema extremamente interessante

Agradeço também aos professores do Departamento de Engenharia Eletroctécnica da Universidade Eduardo Mondlane, cujas aulas e ensinamentos contribuíram significativamente para minha formação académica.

Minha gratidão aos meus amigos da faculdade ( Só testes e Fichas e AUFF ) pela amizade, pelos momentos de troca de ideias e pela colaboração durante os períodos de estudo e pesquisa.

Minha gratidão também à minha família, que sempre me incentivou a seguir meus sonhos e nunca mediu esforços para me apoiar, proporcionando-me o ambiente necessário para o meu desenvolvimento pessoal e académica.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho. Cada palavra de apoio e cada gesto de incentivo foram fundamentais para o meu sucesso.

O meu muito obrigado!

## Resumo

Este projecto analisa os impactos da sobretensão contínua no sistema eléctrico da fábrica United Distillers, onde tensões de 433 V (acima dos 400 V nominais) comprometem a integridade dos equipamentos industriais. A pesquisa identifica causas como desequilíbrios de fases e inadequações no ajuste de transformadores, resultando em desgaste acelerado dos activos, aumento dos custos operacionais e redução da vida útil dos equipamentos críticos, como motores e misturadores. Para mitigar esses problemas, propõe-se a implementação de um *Dynamic Voltage Restorer* (DVR), acoplado a filtros, como solução técnica. O projecto inclui modelagem e simulação utilizando o Matlab Simulink, com análise da viabilidade económica e técnica, demonstrando que o investimento inicial de 1.804.205,00 MZN pode gerar economias anuais estimadas em 275.000,00 MZN, justificando sua adopção. Este trabalho contribui para a melhoria da qualidade de energia eléctrica e a sustentabilidade das operações industriais da fábrica .

**Palavras Chave:** Sobretensão, *Dynamic Voltage Restorer* (DVR), modelagem e simulação, sistemas Industriais, viabilidade económica

## Abstract

This project analyzes the impacts of continuous overvoltage in the electrical system of the United Distillers factory, where voltages of 433 V (above the nominal 400 V) compromise the integrity of industrial equipment. The research identifies causes such as phase imbalances and inadequate transformer adjustments, resulting in accelerated equipment wear, increased operational costs, and reduced lifespan of critical assets, such as motors and mixers. To mitigate these issues, the implementation of a Dynamic Voltage Restorer (DVR) coupled with filters is proposed as a technical solution. The project includes modeling and simulation using Matlab Simulink, with an analysis of economic and technical feasibility, demonstrating that the initial investment of 1,804,205.00 MZN can generate estimated annual savings of 275,000.00 MZN, justifying its adoption. This work contributes to improving electrical energy quality and ensuring the sustainability of the factory's industrial operations.

**Keywords:** Overvoltage, Dynamic Voltage Restorer (DVR), modeling and simulation, industrial systems, economic feasibility.

## **Epígrafe**

*"Bem-aventurado o homem que acha a sabedoria, o homem que adquire o conhecimento,  
pois a sabedoria é mais proveitosa do que a prata e rende mais do que o ouro!"*

*É mais preciosa do que rubis, nada do que você possa desejar se compara a ela".*

***Provérbios 3: 13-15***

## **Índice**

Capítulo I – Considerações Iniciais.....	1
1.1.    Introdução .....	1
1.2.    Formulação do problema .....	2
1.3.    Justificativa.....	2
1.4.    Objectivos .....	3
1.4.1.    Objectivo geral .....	3
1.4.2.    Objectivos específicos .....	3
1.5.    Metodologia.....	3
Capítulo II – Revisão Literária.....	5
2.1.    Sobretensão .....	5
2.1.1.    Conceito .....	5
2.1.2.    Sobretensões de Manobra .....	5
2.1.3.    Sobretensões Atmosféricas .....	6
2.1.4.    Sobretensões Temporárias .....	7
2.1.5.    Sobretensões Permanentes.....	7
2.2.    Sobretensões em sistemas industriais .....	10
2.2.1.    Causas Mais Comuns das Sobretensões em Sistemas Industriais .....	10
2.2.1.3.    Comutação de cargas .....	11
2.2.1.4.    Conexões de Autotransformador.....	12
2.2.2.    Impactos mais comuns das sobretensões em industrias .....	13
2.2.3.    Estratégias para mitigação da sobretensão em sistemas industriais .....	15
Capítulo III-Desenvolvimento do projecto .....	20
3.1.    Caracterização geral do sistema eléctrico da fábrica .....	20
3.1.1.    Alimentação do sistema .....	20
3.1.2.    Sector de Mistura e Moagem .....	20

3.1.3.	Sector de Destilação e Envase .....	20
3.2.1.	Quanto a Amplitude .....	21
3.2.2.	Quanto a duração .....	22
3.3.	Estudo das possíveis causas da sobretensão na fábrica.....	23
3.3.1.	O desequilíbrio de fases .....	24
3.3.2.	Avaliação do Sobredimensionamento do Banco de Capacitores .....	26
3.4.	Avaliação dos impactos das sobretensões na fábrica .....	28
3.4.1.	Impacto da sobretensão no tempo de vida útil dos equipamentos.....	28
3.5.	Proposta de solução para mitigação das sobretensões na fabrica .....	32
3.5.1.	Resultados após a implementação do DVR.....	33
3.5.2.	Resultados esperados com a implementação do DVR .....	37
3.6.	Plano de manutenção .....	37
3.7.	Local de instalação do DVR .....	38
3.7.1.	Fundação e Montagem .....	38
3.7.2.	Integração Eléctrica Segura .....	38
3.7.3.	Medidas de Segurança .....	38
3.8.	Estimativas de custos do projecto .....	39
3.9.	Estudo de viabilidade económica .....	40
3.9.1.	Premissas e Estimativa de Benefícios Anuais .....	40
3.9.2.	Cálculo do Período de Retorno (Payback Period).....	41
3.9.3.	Cálculo do Retorno sobre o Investimento (ROI).....	41
CAPÍTULO IV: CONSIDERAÇÕES FINAIS .....		43
4.1.	Conclusão .....	43
4.2.	Recomendações .....	44
4.3.	Limitações .....	45
4.4.	Bibliografia .....	46

4.4.1. Referências bibliográficas .....	46
4.4.2. Outra bibliografia consultada .....	48
Capítulo V: Anexos .....	1

## Lista de símbolos

EDM	Electricidade de Moçambique
GMG	Grupo Motor Gerador
DVR	Dynamic Voltage Restorer
KVA	Kilo Volt-Ampere
KVAR	Kilo Volt-Ampere Reactivo
KW	Kilo Watt
QEE	Qualidade de energia eléctrica
QGD	Quadro geral de distribuição
QTD	Quantidades
RTIEBT	Regras técnicas de instalações de baixa tensão
UPS	Uninterruptible Power supply
FP	Factor de potência
m	Metro
km	Quilometro
h	Hora
In	Corrente nominal
Is	Corrente de serviço
Iz	Corrente máxima admissível na canalização
I0	Corrente de sequência zero
I1	Corrente de sequencia positiva
I/h	Litro por hora
mm <sup>2</sup>	Milímetros quadrados
MWh	Mega watts hora
P	Potência eléctrica
S	Potencia aparente
Pdc	Poder de corte
Icc	Corrente de curto circuito

## **Lista de símbolos**

J	Momento de inercia
$\rho$	Densidade
$\omega$	Velocidade angular

## **Lista de Figuras**

Figura 1: Representação de sobretensões em sistemas eléctricos.....	5
Figura 2: Exemplo de sobretensão de manobra no momento da energização de um transformador .....	6
Figura 3: Ilustração diferentes amplitudes de tensão .....	8
Figura 4: Ilustração da duração da sobretensão .....	9
Figura 5: Conexão não intencional de diferentes níveis de tensão .....	11
Figura 6: Conexão de aterramento não intencional dos enrolamentos do auto transformador .....	12
Figura 7: Curva ITIC para sub e sobretensão.....	14
Figura 8: Motor queimado devido a sobretensões sustentadas .....	15
Figura 9: Regulador Automático Tensão CDN Energy 1500VA 220V / 220V .....	16
Figura 10: Supresor De Picos De Voltagem SPD 120 / 240 Vca / 100 Ka.....	17
Figura 11: Classificação dos problemas na qualidade de energia mais comuns a serem solucionados pelos <i>Nobreaks</i> .....	18
Figura 12: Topologia de um UPS tradicional .....	19
Figura 13:Sector de moagem e mistura .....	20
Figura 14: Esteiras transportadoras em manutenção na oficina.....	21
Figura 15: Formas de onda de tensão do sistema em condições de sobretensão .....	23
Figura 16: Comparação entre tensões de fase calculadas e tensões de fase medidas Fonte: ( Autor, 2025).....	26
Figura 17: Redução da vida útil do motor ao longo do tempo .....	30
Figura 18: Redução da vida útil do misturador ao longo do tempo.....	30
Figura 19: Comparação da vida útil total .....	31
Figura 20: Formas de onda de tensão após aplicação dos métodos correctivos .....	33
Figura 21: Tensão injectada para correção da sobretensão .....	34
Figura 22: Resposta do sistema na correção da fase A .....	35
Figura 23: Resposta do sistema na correção da fase B .....	36
Figura 24: Resposta do sistema na correção da fase C .....	36
Figura 25: Gráfico ilustrativo do melhoramento esperado do tempo de vida útil do motor e misturador.....	37

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1: Caracterização da sobretensão quanto a amplitude de acordo com as medições de tensão realizadas.....	22
Tabela 2: Caracterização da sobretensão quanto a duração.....	22
Tabela 3: Correntes medidas em cada fase.....	24
Tabela 4: Correntes simétricas calculadas.....	25
Tabela 5: Tabela de analise de análise de reactivos necessários e instalados na instalação.....	27
Tabela 6: Características dos equipamentos amostrais.....	29
Tabela 7: Estimativas de custo do projecto.....	39

## CAPITULO I – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

### 1.1. Introdução

Sobretensão, caracterizada pela elevação da tensão acima do valor nominal de um sistema eléctrico, pode ocorrer de forma temporária ou permanente, sendo causada por factores internos, como desequilíbrios na carga e manobras na rede, ou externos, como fenômenos atmosféricos (SANTOS, 2018). Em ambientes industriais, onde o uso intensivo de energia eléctrica é indispensável, os impactos das sobretensões tornam-se ainda mais críticos, afetando directamente a operacionalidade e a vida útil dos equipamentos.

A fábrica United Distillers, localizada na Machava, opera em média com tensões em torno de 433V, apesar de seu sistema ter sido projectado para uma tensão nominal de 400V. Esse desvio caracteriza uma sobretensão contínua que, embora moderada, representa riscos acumulativos para a integridade de sistemas essenciais à produção. Entre os principais equipamentos da planta estão colunas de destilação, fermentadores, trocadores de calor, sistemas de bombeamento, caldeiras e dispositivos de automação, todos altamente sensíveis a variações eléctricas.

Diante desse cenário, este trabalho busca analisar os impactos dessa sobretensão contínua no sistema eléctrico da fábrica United Distillers, avaliando suas causas, os danos causados em equipamentos críticos e propondo soluções técnicas para mitigação. O trabalho também visa contribuir para o aprimoramento da eficiência operacional e para a protecção dos activos industriais.

## **1.2. Formulação do problema**

Durante os trabalhos de manutenção e substituição dos pressostatos nos compressores da fábrica United Distillers, foi observado que os motores apresentavam leituras de tensão entre 433V e 435V, apesar de sua tensão nominal de operação ser de 400V. Essa discrepância gerou preocupações quanto à integridade dos equipamentos e a correcta operação dos processos produtivos.

Para compreender melhor a situação, foram realizadas medições no quadro eléctrico principal da fábrica, onde se verificou uma média de tensão de 433V. Esse valor contrastava com o projecto original da planta eléctrica, que previa uma saída nominal de 400V no transformador para alimentar a instalação. Essa condição de sobretensão contínua pode ser atribuída a inadequações no ajuste do transformador ou ao desequilíbrio de carga na rede eléctrica, e representa um risco potencial para os sistemas industriais.

O cenário levantado suscita a necessidade de avaliar os impactos dessa sobretensão na planta e diante disso surge a seguinte pergunta de pesquisa:

**Quais são os impactos da sobretensão contínua na fábrica United Distillers e as estratégias para mitigá-los?**

## **1.3. Justificativa**

A sobretensão permanente observada na fábrica, representa um risco significativo para a integridade dos equipamentos e a operação dos processos produtivos. Essa condição pode acelerar o desgaste de componentes críticos, aumentar os custos de manutenção e comprometer a segurança operacional.

Estudar os impactos dessa sobretensão e propor estratégias de mitigação é essencial para garantir a longevidade dos activos industriais, minimizar interrupções na produção e assegurar o cumprimento dos padrões de qualidade. Além disso, contribuir para a literatura técnica ao abordar um problema frequente em indústrias locais, fornecendo soluções em contextos semelhantes.

## **1.4. Objectivos**

### **1.4.1. Objectivo geral**

Analizar dos impactos da sobretensão em sistemas industriais: estudo de caso na fábrica United Distillers Machava

### **1.4.2. Objectivos específicos**

- Avaliar os impactos da sobretensão permanente na performance dos equipamentos da fábrica
- Investigar as causas da sobretensão permanente no sistema eléctrico da fábrica
- Propor soluções técnicas para mitigar a sobretensão
- Desenvolver um plano de monitoramento contínuo e manutenção preventiva

## **1.5. Metodologia.**

Este estudo sobre os impactos da sobretensão no sistema eléctrico fabril da United Distillers seguirá as metodologias abaixo:

### **Quanto aos objectivos da pesquisa: Pesquisa exploratória**

O objectivo é explorar os impactos da sobretensão nos equipamentos e processos da fábrica, identificando suas causas e propondo soluções para mitigação, além de desenvolver hipóteses para estudos futuros.

### **Quanto às técnicas de coleta de dados:**

#### I. Pesquisa documental:

Serão Consultados relatórios de manutenção e documentos técnicos sobre o sistema eléctrico da fábrica.

#### II. Pesquisa bibliográfica:

Serão revisados livros, artigos e manuais técnicos sobre sobretensão e qualidade de energia eléctrica em sistemas industriais.

#### III. Coleta de dados no local:

Medições da tensão serão realizadas na fábrica para verificar a intensidade e frequência da sobretensão e balanceamento de carga.

### **Quanto às técnicas de análise de dados:**

#### I. Simulação:

A ferramentas Digsilent power factory, Matlab Simulink serão usadas para simular o impacto da sobretensão no sistema eléctrico fabril em causa.

II. Interpretação:

Analisa-se-a a relação entre a tensão medida, o desempenho dos equipamentos e os danos causados.

### **1.6. Organização do trabalho**

O trabalho está organizado em cinco capítulos, nomeadamente:

**CAPÍTULO I: CONSIDERAÇÕES INICIAIS**, neste capítulo faz-se uma breve apresentação do trabalho, constando a introdução, a formulação do problema, a justificativa da escolha do tema, os objectivos do trabalho e a respectiva metodologia usada para a realização do mesmo.

**CAPÍTULO II: REVISÃO LITERÁRIA**, para esta secção cabe a apresentação de fundamentos teóricos relacionados com o trabalho a ser desenvolvido.

**CAPÍTULO III: DESENVOLVIMENTO DO PROJECTO**, constitui a base do projecto, onde se apresentam os cálculos efectuados nos dimensionamentos dos componentes do sistema e explicita-se de maneira pormenorizada o sistema no seu todo.

**CAPÍTULO IV: CONSIDERAÇÕES FINAIS**, aqui são apresentadas as conclusões relativas ao trabalho desenvolvido e recomendações para futuros estudos e/ou projectos.

**ANEXOS**: são ilustrados os esquemas do projecto, catálogos consultados, assim como algumas especificações técnicas do projecto em causa.

## CAPITULO II – REVISÃO LITERÁRIA

### 2.1. Sobretensão

#### 2.1.1. Conceito

Sobretensões são distúrbios que ocorrem nos sistemas eléctricos no geral, onde seu valor de pico supera a tensão de regime nominal. Esse evento é dividido em dois grupos, baseados na localização ocorrida, sendo, externos (Atmosféricas) ou Internos (Manobras, Temporários e permanentes) (Adaptado D'AJUZ, 1987)

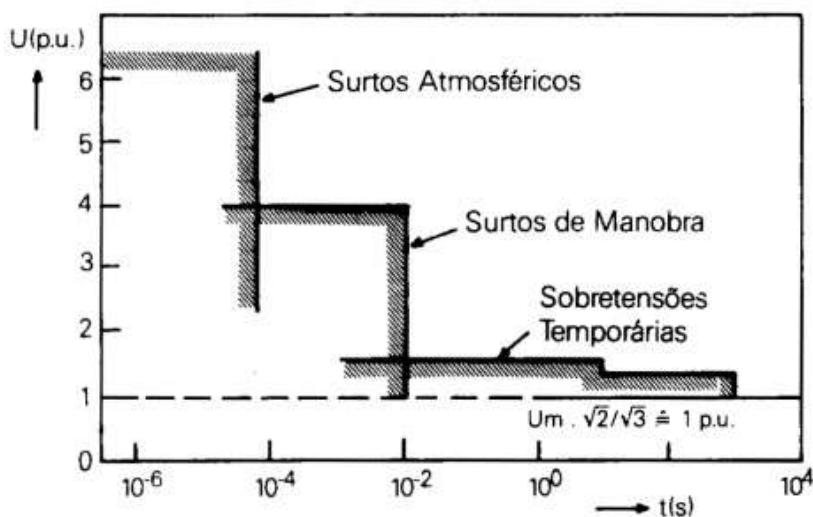


Figura 1: Representação de sobretensões em sistemas eléctricos

Fonte: (D'AJUZ, 1987)

#### 2.1.2. Sobretensões de Manobra

Sobretensões de manobras são sobretensões variáveis no tempo, fase-fase ou fase-terra causadas por mudança bruscas nos sistemas de potência, através de manobras de equipamentos de chaveamento ou curtos-circuitos. Os principais factores para esse evento são energização e religamento de Linhas de Transmissão, rejeição de carga, energização de transformadores (DANTAS, 2007).

O impacto dessa sobretensão no sistema é dependente do exato momento da manobra de energização, devido o fato que os polos do disjuntor não são comutados simultaneamente, quando a primeira fase é comutada, é gerado ondas trafegantes nas demais fases, devido

ao acoplamento entre elas. As ondas irão se propagar pelo sistema, sendo refletidas nos terminais abertos, ocorrendo maiores sobretensões.

A Figura 2 mostra um exemplo de sobretensões de manobra no momento de energização de um transformador

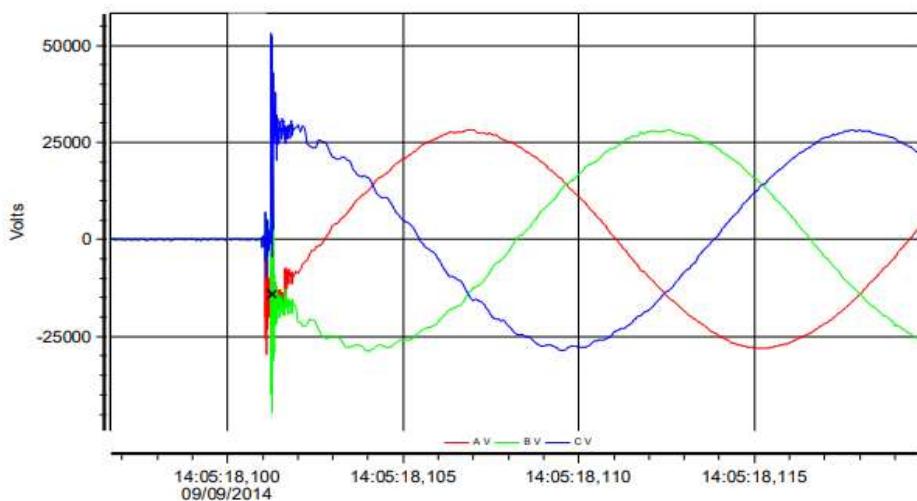


Figura 2: Exemplo de sobretensão de manobra no momento da energização de um transformador

Fonte: (Cogo, 2015)

Segundo D'AJUZ, outros factores que influenciam nesse evento de sobretensão, são características do sistema, como:

- Equipamentos
- topologia da rede,
- Potência de curto-círcuito do sistema alimentador,
- Dispersão entre os contatos do disjuntor,

#### 2.1.3. Sobretensões Atmosféricas

Conforme descrito na norma IEC 62305, "Sobretensões atmosféricas são fenômenos transitórios associados a descargas atmosféricas que podem induzir correntes e tensões elevadas em instalações elétricas, comprometendo a integridade de equipamentos e sistemas."

Esses eventos podem causar sérios danos a equipamentos eléctricos, especialmente àqueles mais sensíveis, como sistemas de controle, telecomunicações e electrónicos, além de representar um risco à segurança humana e à integridade estrutural de edificações e infraestruturas

Além do danos térmicos que pode ser causado por descargas atmosféricas, gerando incêndios e danificações de equipamentos, outra consequência que também é atrelado a esse fenómeno são as interferências magnéticas, que essa pode gerar mau funcionamento ou perda total em sistemas de monitoramento, comunicação e controle (JITSUKAWA, 2010).

#### **2.1.4. Sobretensões Temporárias**

As sobretensões temporárias (TOV - *Temporary Overvoltages*) são elevações transitórias na tensão eléctrica que podem durar desde alguns segundos até minutos. Essas elevações geralmente ocorrem devido a falhas momentâneas ou condições anormais no sistema eléctrico. Embora não sejam permanentes, os efeitos dessas sobretensões podem ser prejudiciais, especialmente para dispositivos eletrônicos sensíveis.

Suas características tem como principais curta duração, e com picos e amplitude reduzidos, normalmente inferiores a 1,5 p.u. Devido essa sobretensão persistir no sistema enquanto a sua causa não for eliminada, seu estudo é importante para projectar instalações e equipamentos que suportem o tempo necessário(Adaptado JITSUKAWA, 2010).

#### **2.1.5. Sobretensões Permanentes**

As sobretensões permanentes, também conhecidas como sobretensões contínuas ou sustentadas, representam um aumento prolongado nos níveis de tensão em um sistema eléctrico, que persiste por longos períodos, como minutos, horas ou até dias. Diferentemente das sobretensões transitórias ou temporárias, que são causadas por eventos momentâneos, as sobretensões permanentes decorrem de condições estáveis, porém anormais, no sistema eléctrico (JITSUKAWA, 2010).

##### **2.1.5.1. Características das sobretensões permanentes**

###### **I. Amplitude**

A amplitude das sobretensões permanentes é um factor crítico, pois determina o grau de estresse imposto aos equipamentos eléctricos e electrônicos conectados ao sistema. Em geral, essas sobretensões apresentam amplitudes moderadas, variando entre 10% e 30% acima da tensão nominal do sistema. Por exemplo, em um sistema com tensão nominal de 220 V, uma sobretensão permanente pode elevar a tensão para valores entre 242 V e 286 V.

Essa elevação contínua na tensão pode ser atribuída a diversas causas, como falhas em reguladores de tensão, ajustes inadequados em transformadores, erros humanos durante a operação ou manutenção, e variações significativas na carga do sistema. A persistência dessa condição implica em um estresse constante sobre os componentes do sistema eléctrico, podendo levar à degradação prematura de isolamentos, aumento das perdas por efeito Joule e redução da vida útil dos equipamentos. (Stagg, 2012)

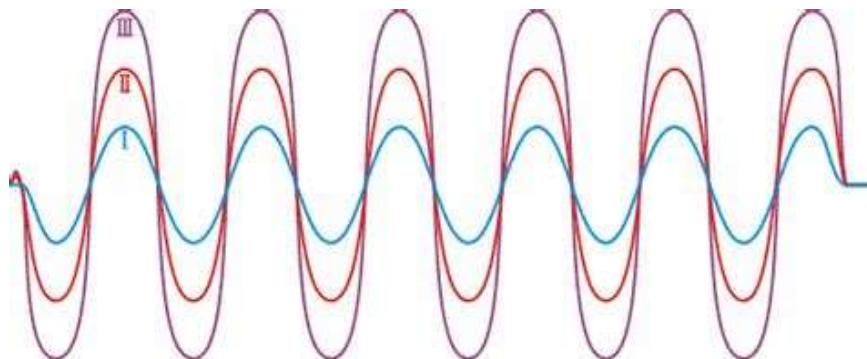


Figura 3: Ilustração diferentes amplitudes de tensão

Fonte: <https://technik.reicke.de>

## II. Duração

A duração é uma das características mais marcantes das sobretensões permanentes e está directamente associada à sua natureza e origem. Ao contrário das sobretensões transitórias, que duram fracções de segundo, ou das temporárias, que persistem por minutos, as sobretensões permanentes são condições de longa duração. Essas sobretensões podem permanecer presentes no sistema por horas, dias ou até semanas, dependendo da causa e da intervenção para corrigir o problema.(Stagg, 2012)

- **Curta Duração:** Algumas horas a um dia, geralmente devido a eventos corrigíveis, como um erro de ajuste em um regulador de tensão.
- **Média Duração:** Dias ou semanas, em casos onde há falhas mais complexas no sistema, como transformadores defeituosos ou ajustes inadequados nas subestações.
- **Longa Duração:** Pode se tornar indefinida em sistemas sem monitoramento ou manutenção preventiva, especialmente em redes de distribuição remotas ou mal gerenciadas.

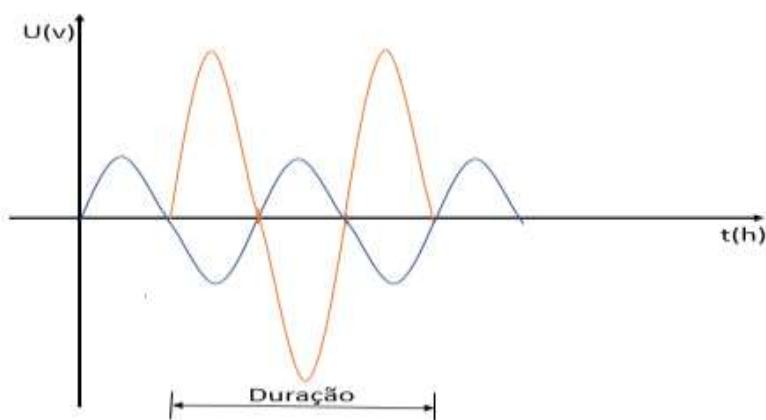


Figura 4: Ilustração da duração da sobretensão

Fonte: (O autor, 2025)

Sobretensões permanentes são causadas por problemas de estado estacionário no sistema eléctrico. Isso significa que a condição que gera o aumento da tensão permanecendo constante até que seja corrigida, uma das mais comuns em indústrias são as reduções de carga sem compensação adequada em que a demanda de energia em um sistema diminui significativamente, mas os mecanismos de regulação de tensão não ajustam os níveis de tensão para refletir essa mudança. Esse desequilíbrio pode causar sobretensões permanentes que podem levar de dias à meses.(Stagg, 2012)

### III. Impacto acumulativo

Mesmo quando não causam falhas imediatas, as sobretensões permanentes aceleram o envelhecimento de componentes eléctricos, reduzindo sua vida útil

## 2.2. Sobretensões em sistemas industriais

As sobretensões em sistemas industriais representam um dos desafios mais críticos para a confiabilidade dos processos produtivos. Elas podem surgir devido a diversas causas, incluindo descargas atmosféricas, oscilações na rede elétrica, partidas e paradas de grandes motores, além de falhas em equipamentos de controle.

O ambiente industrial, por sua complexidade e densidade de carga, é particularmente suscetível a esses eventos. A interação entre máquinas de alta potência, sistemas eletrônicos sensíveis e redes de distribuição elétrica cria condições onde sobretensões transitórias, temporárias ou permanentes podem se manifestar de maneira mais frequente e com consequências mais graves. Assim, a gestão eficaz das sobretensões não é apenas uma questão técnica, mas também econômica, devido aos custos associados à manutenção e substituição de equipamentos, perda de produtividade e redução produtividade energética.(Stagg, 2012)

### 2.2.1. Causas Mais Comuns das Sobretensões em Sistemas Industriais

#### 2.2.1.1. Electricidade Estática

Areia ou poeira carregadas pelo vento podem adquirir alta carga elétrica e transferir tensões relativamente altas para condutores eléctricos aéreos expostos. Correias em movimento accionadas por polias não metálicas também podem gerar altas tensões por meio de electricidade estática, que, por sua vez, podem ser transferidas para os condutores do sistema eléctrico se as estruturas metálicas envolventes não estiverem adequadamente aterradas.

A taxa na qual a carga eléctrica é transferida para os condutores do sistema eléctrico por meio de electricidade estática é extremamente baixa. Mesmo uma conexão de aterramento com resistência relativamente alta no sistema eléctrico será capaz de dissipar essas correntes estáticas para o solo tão rápido quanto elas são recebidas, resultando em sobretensões insignificantes.(CSANYI, 2021)

### 2.2.1.2. Contato físico com um sistema de tensão mais alta

Se os condutores de um circuito eléctrico de alta tensão entrarem em contato com os de um circuito de baixa tensão, o mesmo potencial eléctrico será estabelecido em ambos os circuitos no ponto de contato. Se o circuito de baixa tensão não tiver seu neutro aterrado, seu potencial será elevado ao mesmo da rede de alta tensão, ou ocorrerá um flashover (descarga disruptiva).

Contactos acidentais entre tensões primárias e secundárias em sistemas industriais são evitados pelo uso de envoltórios metálicas e barreiras metálicas que separam os condutores de sistemas com diferentes potenciais de operação. Em alguns casos, circuitos aéreos possuem tanto a rede primária quanto a secundária no mesmo poste, mas distâncias de segurança substanciais reduzem ao mínimo o risco de contato acidental. (CSANYI, 2021)

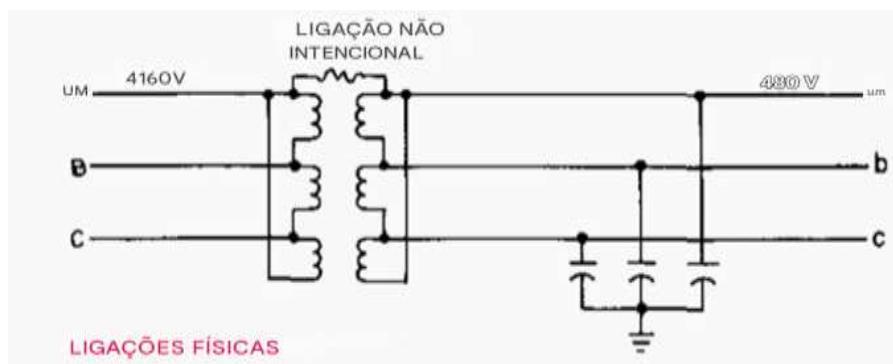


Figura 5: Conexão não intencional de diferentes níveis de tensão

Fonte: CSANYI, 2021

### 2.2.1.3. Comutação de cargas

As operações de comutação em circuitos constituem mudanças abruptas nos parâmetros do circuito e podem ser responsáveis pela geração de sobretensões, embora geralmente sejam de curta duração e não excedam de duas a três vezes o valor normal. É importante reconhecer que os interruptores normais de corrente alternada (AC) oferecem muito pouca oposição ao fluxo de corrente do circuito durante o período de condução, mas actuam para aumentar rapidamente a rigidez dielétrica durante uma passagem por zero da corrente e evitar a reestabelecimento do fluxo de corrente no meio ciclo seguinte.

Como resultado dessa accção, não é necessário que a energia magnética armazenada na indutância do circuito seja dissipada durante a interrupção. A interrupção ocorre em um momento em que a corrente é zero, instante em que a energia magnética armazenada também é zero. Uma compreensão qualitativa do mecanismo pelo qual essas sobretensões são geradas pode ser útil. (CSANYI, 2021)

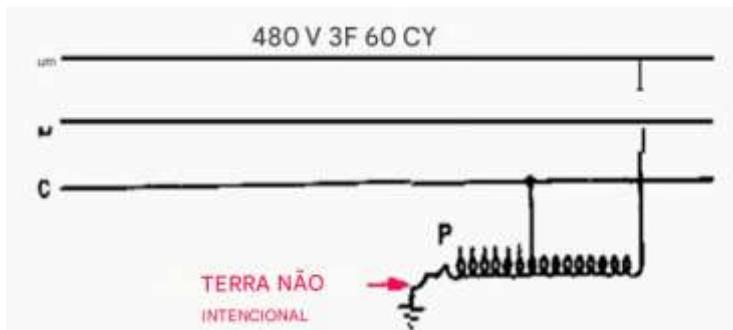
#### 2.2.1.4. Conexões de Autotransformador

Os autotransformadores utilizados para interconectar dois sistemas eléctricos com diferentes níveis de isolamento devem ser evitados em sistemas industriais, **a menos que ambos estejam solidamente aterrados no neutro**. A conexão metálica comum entre os dois sistemas, formada pelos enrolamentos do autotransformador, tende a expor o sistema de menor tensão a quase os mesmos surtos transitórios esperados no sistema de maior tensão.

Existem algumas exceções, e um exemplo específico ajudará a ilustrar essa situação.

Se for planejado um sistema para operar inicialmente a **2400 V** e, posteriormente, ser convertido para **4160 V**, com todos os equipamentos contendo níveis de isolamento compatíveis com o potencial de operação de **4100 V**, será aceitável empregar um autotransformador adequado para interconectar esse sistema de **2400 V** com outro sistema de **4160 V**.

Uma variação incomum do funcionamento do autotransformador, que tem sido responsável por sobretensões em diversos casos, ocorre quando um transformador possui enrolamentos estendidos operando em um sistema com neutro não aterrado, como ilustrado na Figura 4.



**Figura 6:** Conexão de aterramento não intencional dos enrolamentos do auto transformador

Fonte: CSANYI, 2021

Se operado com a tensão de linha do sistema aplicada em uma fração do enrolamento total, a tensão vetorial na extremidade da extensão do enrolamento será como ilustrado na Figura 6. Isso ocorre porque a tensão por volta desenvolvida na extensão do enrolamento será exatamente a mesma que a tensão por volta no enrolamento excitado.

Se a extremidade da extensão do enrolamento for inadvertidamente conectada ao solo ou desenvolver um curto-circuito ao solo, o ponto de potencial do aterramento tenderá a se afastar do centro do triângulo de tensão para o potencial da extremidade extrema da extensão do enrolamento, resistido apenas pelo acoplamento de capacidade do sistema de alta tensão para o aterramento. (CSANYI, 2021)

Como resultado, a presença de qualquer extensão de enrolamento pode causar a elevação do potencial de um condutor de fase para mais de **173% do potencial operacional normal**.

O grau de sobretensão pode ser muito mais severo se houver maiores extensões de enrolamento presentes. É importante perceber que essas sobretensões seriam transferidas para todos os equipamentos conectados ao mesmo sistema metálico. Assim, um curto-circuito ao solo em uma extensão do enrolamento de um transformador em uma pequena área de teste pode causar falhas significativas. Como tem sido demonstrado inúmeras vezes, o aterramento do neutro do sistema de fornecimento eléctrico corrigirá esse tipo de sobretensão potencial. (CSANYI, 2021)

### **2.2.2. Impactos mais comuns das sobretensões em industrias**

Os valores alcançados em quando ocorrem sobretensões de origem de descargas atmosféricas, podem causar queda na qualidade do fornecimento, ou até interrupção. Quando atingida directamente uma instalação podem ocorrer danos térmicos e até incêndios (JITSUKAWA, 2010).

Já sobretensões internas tem mais impacto em equipamentos de informática e eletrônicos. Com a evolução da tecnologia, esses equipamento estão cada vez mais presente em processos industriais (equipamentos de controle, comunicação, monitoramento e muitos outros).

Devido estes equipamentos serem mais sensíveis a variações de tensão e corrente, seu estudo é de extrema importância para escolha de equipamentos de proteções adequados para evitar prejuízos com manutenções e parada na produção (MENEZES, 2007)

Visando uma padronização de limites de suportabilidade em questões de sobretensões, para equipamentos na área de informática, foi criada a curva CBEMA/ITIC ou *Information Technology Industry Council* (ITIC) , Figura 7, que apresenta uma referência para factores de vulnerabilidade à sobretensões em intervalos de tempo. (Serafim, 2021)

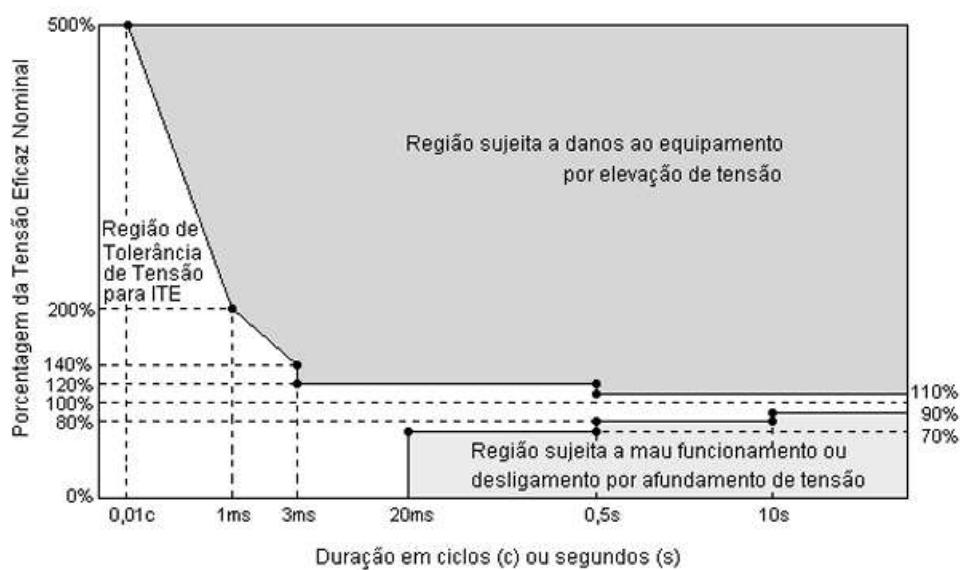


Figura 7: Curva ITIC para sub e sobretensão

Fonte: IEEE, 1996

### 2.2.2.1. Danos Físicos a equipamentos

Esses danos ocorrem devido à exposição a níveis de tensão acima do nominal, o que sobrecarrega componentes internos e leva a falhas. Os equipamentos eletrônicos sensíveis, como inversores de frequência, PLCs e sensores, são particularmente vulneráveis às sobretensões transitórias, que podem causar a queima de circuitos e drivers. Transformadores, motores e cabos também sofrem desgaste acelerado, principalmente em casos de sobretensões temporárias ou permanentes, onde o aquecimento excessivo degrada o isolamento elétrico, provocando curtos-circuitos ou falhas irreversíveis.

Além disso, sistemas de iluminação são frequentemente impactados, com a redução significativa da vida útil de lâmpadas e luminárias. Esses danos físicos resultam em aumento

de custos operacionais devido à necessidade de substituição precoce de componentes e manutenções corretivas frequentes.(Stagg, 2012)



Figura 8: Motor queimado devido a sobretensões sustentadas

Fonte: <https://www.vrogue.co>

### **2.2.2.2. Aumento dos Custos Operacionais**

Quando os níveis de tensão excedem os valores nominais, as perdas por efeito Joule nos condutores e equipamentos aumentam consideravelmente, resultando em maior consumo de energia sem benefícios adicionais ao processo produtivo. Equipamentos como motores e transformadores, ao operarem sob sobretensão, dissipam mais calor, o que reduz sua eficiência e eleva o consumo energético. Isso se reflete directamente na factura de energia, podendo incluir penalidades devido à redução do factor de potência ou à superação das demandas contratadas.

### **2.2.3. Estratégias para mitigação da sobretensão em sistemas industriais**

#### **2.2.3.1. Reguladores automáticos de tensão**

Os reguladores automáticos de tensão são dispositivos projetados para manter os níveis de tensão eléctrica dentro de limites seguros, garantindo estabilidade e protecção para os sistemas eléctricos e os equipamentos conectados. Esses dispositivos ajustam automaticamente a tensão fornecida em resposta a variações na rede eléctrica, sejam elas

quedas ou sobretensões. Em ambientes industriais, onde a continuidade da energia são cruciais, os reguladores automáticos desempenham um papel essencial.

Esses dispositivos operam por meio de transformadores, circuitos de controle e componentes eletrônicos que monitoram constantemente os níveis de tensão. Quando detectam desvios, corrigem a tensão em tempo real, assegurando que os equipamentos recebam a tensão apropriada para seu funcionamento ideal. Isso é especialmente útil em sistemas sujeitos a flutuações frequentes de carga, como partidas de motores de grande porte ou mudanças abruptas na demanda de energia.



Figura 9: Regulador Automático Tensão CDN Energy 1500VA 220V / 220V

Fonte: CDN Energy, 2020

#### 2.2.3.2. Supressores de Pico

Os supressores de pico, também conhecidos como dispositivos de protecção contra surtos (DPS), são componentes essenciais para a protecção de sistemas eléctricos contra sobretensões transitórias. Essas sobretensões, geralmente causadas por descargas atmosféricas, manobras na rede eléctrica ou falhas internas, podem atingir níveis de tensão extremamente altos em um curto período, causando danos significativos a equipamentos sensíveis. O papel dos supressores de pico é limitar a amplitude dessas sobretensões, desviando a energia excedente para o sistema de aterramento.

Esses dispositivos são instalados em pontos estratégicos, como painéis de distribuição, circuitos de alimentação e directamente em equipamentos críticos, garantindo protecção abrangente. Operam de forma rápida, ativando-se instantaneamente ao detectar um

aumento súbito na tensão e retornando ao estado de inatividade assim que a sobretensão é eliminada.



Figura 10: Supresor De Picos De Voltagem SPD 120 / 240 Vca / 100 Ka.

Fonte: Power All, 2018

#### 2.2.3.3. Sistema de fornecimento interrupto

Os Nobreaks comumente chamados de UPS combinam diversas funções de suprimento de carga com proteção contra distúrbios que possam atingir as cargas críticas. Durante eventos de sobretensão, os UPS filtram a energia recebida, regulam os níveis de tensão e fornecem uma corrente limpa e estável para os equipamentos conectados.

Além de proteger contra sobretensões, os UPS também mitigam outros problemas de qualidade de energia, como quedas de tensão, oscilações de frequência e ruídos elétricos. Isso é especialmente importante em ambientes industriais que dependem de equipamentos de alta precisão ou que operam processos críticos e contínuos.(Barreto et al 2018)

Problema (Distúrbio)	Forma de onda	Stand-by	Interativo	On-line
1) interrupção ( <i>outage</i> , ou <i>blackouts</i> )		✓	✓	✓
2) afundamento instantâneo de tensão ( <i>sags</i> , ou <i>dip</i> )		✓	✓	✓
3) elevação instantânea de tensão ( <i>surge</i> )		✓	✓	✓
4) afundamento momentâneo de tensão ( <i>brownouts</i> )			✓	✓
5) elevação momentânea de tensão ( <i>swell</i> )			✓	✓
6) transitório impulsivo ( <i>spikes</i> )				✓
7) variação na frequência				✓
8) ruídos				✓
9) distorção harmônica				✓

Figura 11: Classificação dos problemas na qualidade de energia mais comuns a serem solucionados pelos dispositivos de fornecimento ininterrupto

Fonte: Apolinário, 2017

O estabilizador de tensão no UPS tem a função de regular e manter os níveis de tensão fornecidos aos equipamentos conectados dentro de limites seguros, mesmo em condições de flutuação na rede eléctrica. Ele compensa automaticamente quedas (subtensões) ou elevações (sobretensões) na tensão de entrada, garantindo que os dispositivos recebam uma alimentação estável e protegendo-os contra danos causados por distúrbios eléctricos.

Na figura 12 tem-se uma representação em diagrama unifilar do funcionamento deste modelo, onde a linha contínua representa a alimentação primária, e a linha tracejada o sistema funcionando em modo bateria, utilizado para alimentação do sistema durante a falta de energia. O estabilizador mantendo a tensão dentro dos parâmetros desejados para o funcionamento adequado dos equipamentos críticos.(Barreto et al 2018)

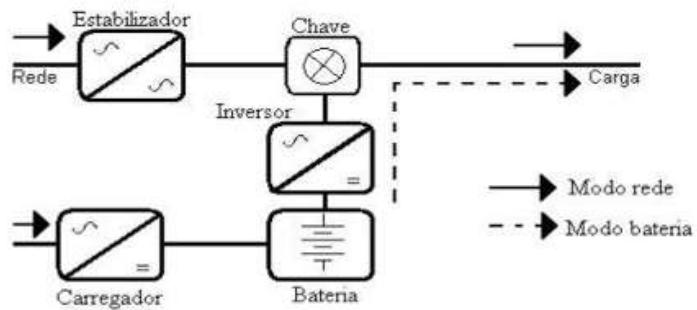


Figura 12: Topologia de um UPS tradicional

Fonte: NBR 15014, 2003

## CAPITULO III-DESENVOLVIMENTO DO PROJECTO

### 3.1. Caracterização geral do sistema eléctrico da fábrica

#### 3.1.1. Alimentação do sistema

O sistema eléctrico da fábrica é projectado para atender às demandas de uma instalação de pequena escala voltada à produção de destilados, com alimentação eléctrica fornecida por um transformador abaixador trifásico de 6,6 kV para 400 V. Este transformador possui uma frequência de 50 Hz.

#### 3.1.2. Sector de Mistura e Moagem

No sector de moagem e mistura, encontram-se moinhos com potência somada de 30 kW e misturadores motorizados de 15 kW, ambos operados por motores trifásicos. Já no sector de fermentação, os tanques com controle de temperatura, com aquecedores de 10 kW cada, e as bombas de recirculação de líquidos, de 5 kW, constituem cargas mistas, incluindo resistências, motores e sistemas de controle eletrônico.



Figura 13:Sector de moagem e mistura

Fonte: O autor, 2025

#### 3.1.3. Sector de Destilação e Envase

O sector de destilação, por sua vez, utiliza alambiques motorizados com aquecimento eléctrico de 20 kW por unidade, além de sistemas de resfriamento baseados em

compressores somados de 15 kW. Estas cargas são uma combinação de elementos resistivos (aquecedores) e indutivos (motores), exigindo um sistema elétrico robusto. No sector de envase, máquinas automatizadas e esteiras transportadoras, controladas por inversores, predominam como cargas electrónicas



Figura 14: Esteiras transportadoras em manutenção na oficina

Fonte: O autor, 2025

### 3.1.4. Iluminação

Para a infraestrutura de iluminação, a fábrica utiliza lâmpadas LED e fluorescentes a vapor de sódio, totalizando cerca de 188 pontos de luz, além de sistemas de iluminação de emergência

## 3.2. Caracterização da sobretensão da fabrica

### 3.2.1. Quanto a Amplitude

Com base nas medições realizadas, a sobretensão foi detectada com amplitudes em torno de 433 V, acima da tensão nominal de referência de 400 V. A seguir, apresenta-se uma tabela com as medições realizadas e a margem de sobretensão observada.

Tabela 1: Caracterização da sobretensão quanto a amplitude de acordo com as medições de tensão realizadas

Medição	Tensão Medida (V)	Margem de Sobretensão (V)	Percentual de Ultrapassagem (%)
1	433	33	8,25%
2	430	30	7,50%
3	435	35	8,75%
4	432	32	8,00%
5	434	34	8,50%
6	431	31	7,75%

Fonte: O autor, 2025

A sobretensão varia de **430 V a 435 V**, indicando uma amplitude média de ultrapassagem de aproximadamente **8%** em relação à tensão nominal.

### 3.2.2. Quanto a duração

A sobretensão foi registrada ao longo de vários dias consecutivos, reforçando a classificação como uma **sobretensão sustentada**. A seguir, apresenta-se uma tabela com os dias das medições, as horas de ocorrência e os intervalos médios em que a sobretensão foi observada.

Tabela 2: Caracterização da sobretensão quanto a duração

Dia	Intervalo de Ocorrência	Tensão em Média (V)	Classificação
02/05/2025	08h00 - 14h00	432	Sustentada
03/05/2025	08h00 - 16h00	433	Sustentada
05/05/2025	09h00 - 15h00	434	Sustentada
09/05/2025	07h30 - 17h30	433	Sustentada
12/05/2025	08h15 – 17h15	431	Sustentada

Fonte: ( Autor, 2025)

As sobretensões foram observadas durante 5 a 8 horas consecutivas nos dias monitorados. A consistência nos intervalos de ocorrência reforça a classificação como uma sobretensão sustentada.

A tensão média ao longo dos dias foi de 432,6 V, com variações mínimas, indicando estabilidade no comportamento da sobretensão.

Sobretensões com duração prolongada e estabilidade nos valores são consideradas sustentadas, assim sendo a sobretensão da fabrica é caracterizada como **permanente ou sustentada**.

Para uma melhor visualização dos distúrbios que afectam a fabrica em causa, foi necessário fazer o levantamento de cargas para a posterior modelagem do sistema eléctrico fabril no Matlab Simulink, tendo chegado a seguinte formas de onda ilustrada na figura abaixo.

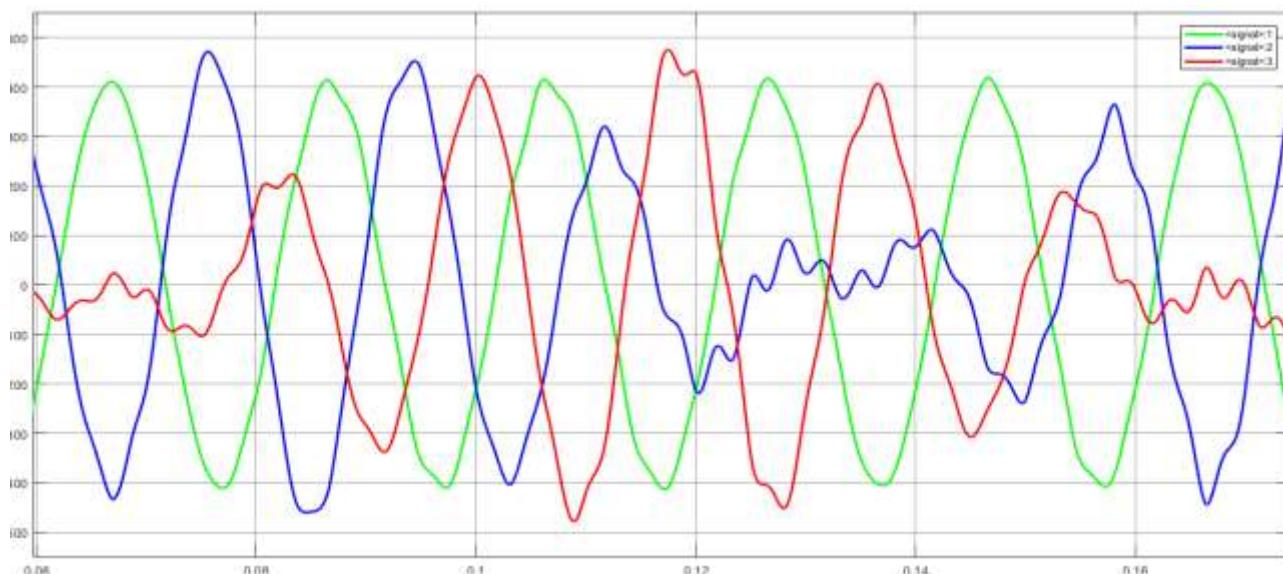


Figura 15: Formas de onda de tensão do sistema em condições de sobretensão

Fonte: Autor, 2025

### 3.3. Estudo das possíveis causas da sobretensão na fábrica

Três causas principais se destacam como potenciais geradoras de sobretensões na fábrica:

- O desequilíbrio de fases;
- O sobredimensionamento do banco de capacitores; e

- Ajuste Inadequado do TAP do transformador.

### 3.3.1. O desequilíbrio de fases

O desequilíbrio de fases pode ocorrer quando as correntes em um sistema trifásico diferem em amplitude, devido à distribuição desigual de cargas. Quando as correntes não são equilibradas, ocorre uma circulação de corrente na componente de sequência zero que altera o potencial do ponto de neutro. Isso pode elevar a tensão em uma ou mais fases em relação ao neutro, principalmente em sistemas mal aterrados ou com conexões fracas no neutro.

Para uma análise prática, consideramos medições das correntes em cada fase e calcular-se o desequilíbrio e seu impacto nas tensões.

As correntes medidas em cada fase são as seguintes:

Tabela 3: Correntes medidas em cada fase

Medição	Corrente Fase A (A)	Corrente Fase B (A)	Corrente Fase C (A)
1	47	44	55
2	46,5	45,6	56,23
3	48	44	55,77
4	47,5	46,5	54,5
5	46,8	44,3	54,2
<b>Média (A)</b>	<b>47,2</b>	<b>44,8</b>	<b>55,154</b>

. Fonte: ( Autor, 2025)

A tensão em cada fase é composta pelas contribuições das componentes simétricas

$$V_{fase} = V_0 + V_1 + V_2 \quad (1)$$

Onde:

- V1: componente de sequência positiva (equilibrada).
- V2: componente de sequência negativa (inversamente defasada).
- V0: componente de sequência zero (modo comum).

As componentes V2 e V0 surgem devido ao desequilíbrio de corrente e podem gerar tensões adicionais nas fases.

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

Com base nas correntes médias foram calculados os valores das componentes simétricas das correntes usando a equação 2, por forma a analisar o seu impacto nas tensões, e chegou-se a seguinte tabela

Tabela 4: Correntes simétricas calculadas

Corrente medida (A)	Correntes Simétricas (A)
47,154	49.05
44.13	3.13
54,2	0.19

Fonte: ( Autor, 2025)

A tensão de sequência negativa (V2) cria mais assimetria, mas seu impacto é menor devido ao pequeno valor de I2, sendo assim será desconsiderado o seu efeito na elevação de tensão e a equação 1 fica reduzida a seguinte equação abaixo:

$$V_{fase} = V_1 + V_0 \quad (3)$$

Procede-se com a determinação da corrente de desequilíbrio na fase menos carregada e posteriormente a tensão na fase B.

$$I_{desequilibrio} = I_b - I_0 \quad (4)$$

$$I_{desequilibrio} = 44,13 - 49,05 = |-4,92| = 4,92 \text{ A}$$

$$V_{faseB} = V_{nominal} + V_0 = 230 + 4,92 \times 0,98 = 234,12 \text{ V}$$

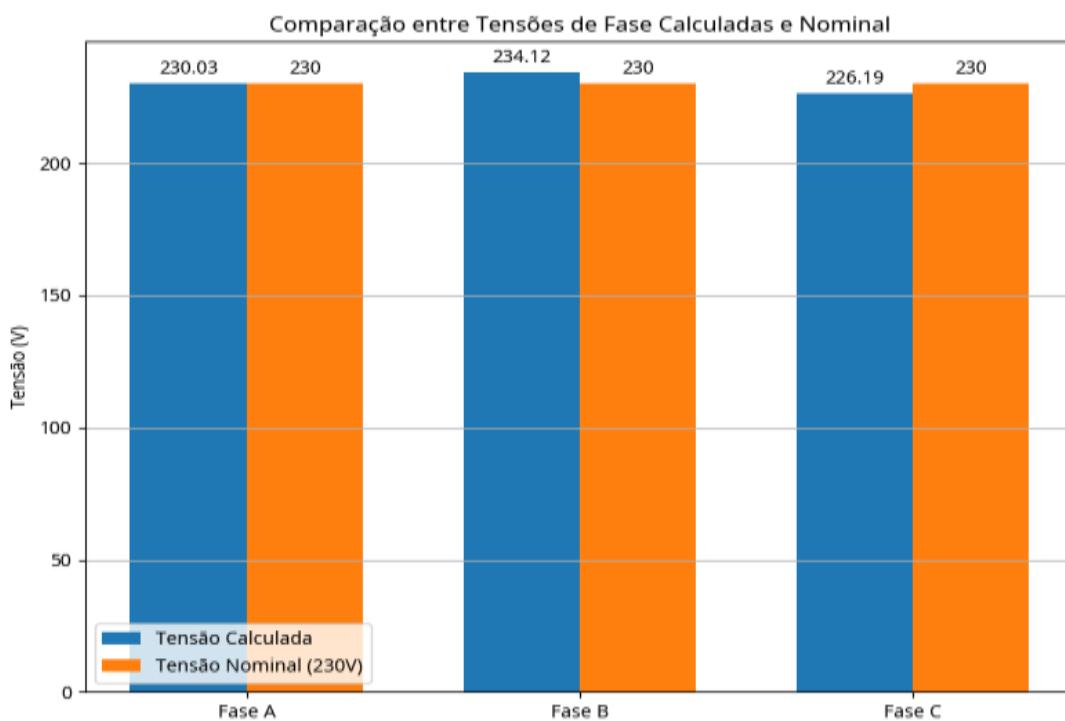


Figura 16: Comparação entre tensões de fase calculadas e tensões de fase medidas  
Fonte: ( Autor, 2025)

A análise das correntes medidas indica um desequilíbrio não tão significativo, com componentes de sequência negativa e zero representando cerca de 5.34% da componente de sequência positiva. Este desequilíbrio, sob as condições de impedância assumidas, leva a uma variação nas tensões de fase, com uma fase experimentando uma leve sobretensão (Fase B: +1.8%) e outra uma subtensão (Fase C: -1.7%) em relação à nominal de 230V.

Destas análises pode-se concluir de que o desequilíbrio de fases em questão não representa uma ameaça a elevação de tensão, pois trata-se de um desequilíbrio muito comum em sistemas eléctricos.

### 3.3.2. Avaliação do Sobredimensionamento do Banco de Capacitores

O sobredimensionamento de um banco de capacitores ocorre quando sua capacidade de fornecimento de energia reactiva excede a demanda necessária para compensar o factor de potência de um sistema eléctrico. Embora os bancos de capacitores sejam projectados para corrigir o factor de potência e melhorar a eficiência do sistema, seu uso inadequado

pode levar a consequências indesejadas, como sobretensões e outros problemas no sistema eléctrico

O sistema eléctrico fabril funcionava com um factor de potencia de 0,76 o que levou a instalação de um banco de capacitores fixo com uma capacidade de 45KVAR com o objectivo de elevar o factor de potencia da instalação para 0.91 e assim reduzir a potencia reactiva de 99,04 para 58,67, entretanto o que se necessita de potencia reactiva é 40,87 e o que se tem instalado são 45KVAR, o que mostra claramente que há ligeiro um sobredimensionamento do banco.

A tabela abaixo ilustra os dados do sistema aquando da instalação do banco de capacitores, isto há sensivelmente 4 anos.

Tabela 5: Tabela de analise de análise de reactivos necessários e instalados na instalação

Item	Valor	Unidade
Potência activa (PP)	138,75	kW
Factor de potência actual	0,76(antes da instalação do banco)	-
Factor de potência desejado	0,91	-
Potência reactiva actual (Qactual)	99,04(antes da antes da instalação do banco)	kVAR
Potência reactiva desejada (Qdesejado}	58,67	kVAR
Capacidade necessária do banco (Qbanco)	40,37	kVAR

Fonte: ( Autor, 2025)

banco de capacitores instalado possui uma capacidade superior a 40,37KVAR, estando sobredimensionado, os cálculos a seguir mostram como o sobredimensionamento afecta na elevação da tensão do sistema.

$$V_{nova} = V_{nominal} * \sqrt{1 + \frac{Q_{excedente}}{P}} \quad (5)$$

O excedente da tensão pode ser determinada pela diferença entre a potencial nominal do banco e a potencial resultante dos cálculos, ou seja, a potencia necessária do banco.

$$Q_{excedente} = Q_{nomB} - Q_{necB} = 45 - 40,37 = 4,63 \text{ KVAR}$$

$$V_{nova} = 400 * \sqrt{1 + \frac{4,63}{138,75}} = 416 \text{ V}$$

A tensão sobe de 400 V para aproximadamente 416 V, representando uma elevação de 4%, estando dentro dos limites padronizados de 5%.

### 3.4. Avaliação dos impactos das sobretensões na fábrica

As sobretensões registradas na fábrica não apresentam efeitos imediatos que possam ser facilmente perceptíveis a curto prazo. Contudo, seus impactos se manifestam de forma cumulativa ao longo do tempo, afetando diretamente a vida útil dos equipamentos e os custos operacionais da instalação.

#### 3.4.1. Impacto da sobretensão no tempo de vida útil dos equipamentos

Equipamentos eléctricos, como motores, transformadores e dispositivos electrónicos, são projectados para operar dentro de uma faixa específica de tensão. Sobretensões sustentadas, ainda que moderadas, aceleram o desgaste desses equipamentos, reduzindo sua durabilidade e aumentando a necessidade de manutenção e substituição. Esse desgaste progressivo resulta em custos adicionais para a fábrica, comprometendo a durabilidade operacional dos equipamentos em causa.

O tempo de vida útil dos equipamentos pode ser determinado pela formula de aproximação de proposta por Arrhenius. Isso pode ser feito utilizando modelos matemáticos baseados em fatores de estresse e a relação tensão-tempo de falha.

$$L_{ajustada} = L_{nominal} \times \left( \frac{V_{nominal}}{V_{operação}} \right)^n \times e^{-\frac{B(T_{operação}-T_{referencia})}{T_{operação}-T_{referencia}}} \quad (5)$$

Onde:

- $L_{nominal}$ : Vida útil nominal (em horas).
- $V_{nominal}$ : Tensão nominal.

- $V_{\text{operação}}$  : Tensão de operação.
- $n$ : Exponente relacionado ao tipo de equipamento.
- $T_{\text{operação}}$  : Temperatura real de operação (em Kelvin).
- $T_{\text{referência}}$ : Temperatura nominal (em Kelvin).
- $B$ : Constante dependente do material

Para o estudo do impacto da sobretensão na vida dos equipamentos escolheu-se como amostra um motor eléctrico e um misturador da fabrica por forma a elucidar como a sobretensão impacta na vida útil dos equipamentos. Os equipamentos amostrais apresentam as seguintes características apresentadas na tabela 6.

Tabela 6: Características dos equipamentos amostrais

Motor		Misturador	
Parâmetro	Condições Nominais	Parâmetro	Condições Nominais
Tensão (V)	400	Tensão (V)	400
Temperatura de operação (°C)	40	Temperatura de operação (°C)	40
Temperatura real de operação (°C)	45-50	Temperatura real de operação (°C)	45-50
Vida útil total estimada (anos)	20	Vida útil total estimada (anos)	18-20
Tempo já operado (anos)	5	Tempo já operado (anos)	5
Tempo restante (anos)	15	Tempo restante (anos)	14

Fonte:( Autor, 2025)

Recorrendo aos cálculos interativos usando a equação (5) na qual substituiu-se os valores da tabela cima, considerado exponente relacionado ao tipo de equipamento( $n$ ) igual a 3 para motores eléctricos e misturadores e a tensão de operação sob tensão elevada de 433 Volts, chegou-se aos resultados ilustrados na tabela em anexo 6 (tabela A6.1-11) e aos gráficos analíticos ilustrados abaixo:

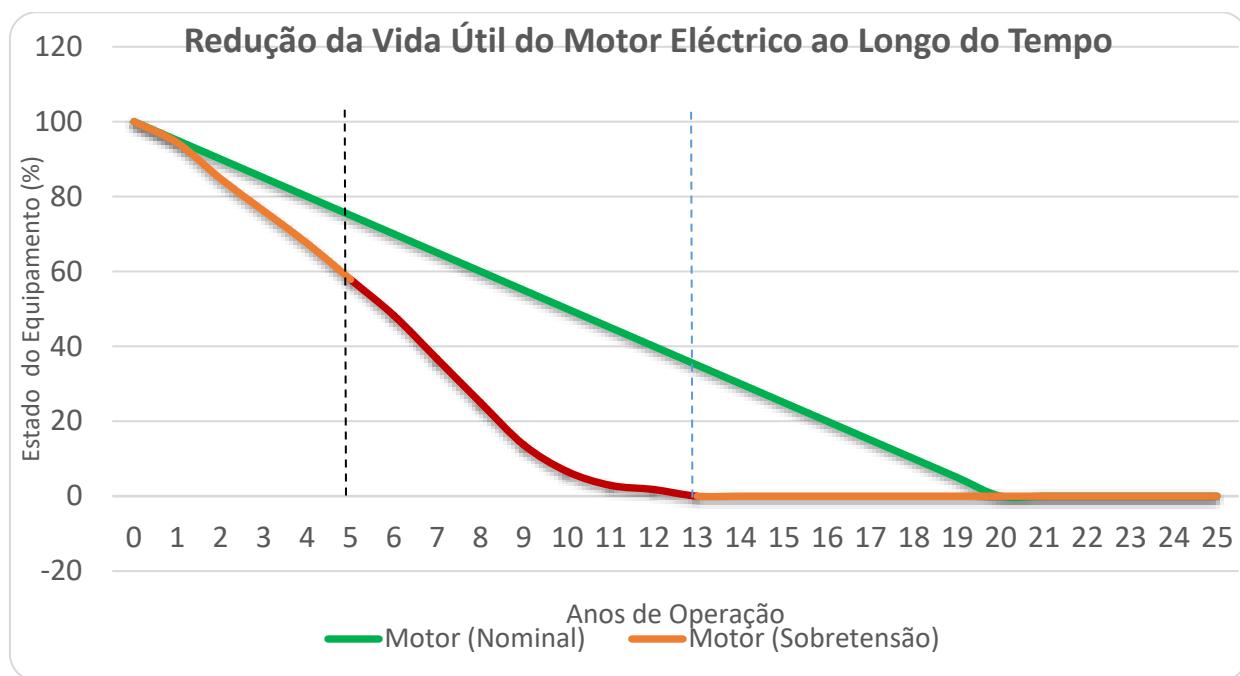


Figura 17: Redução da vida útil do motor ao longo do tempo

Fonte: (Autor, 2025)

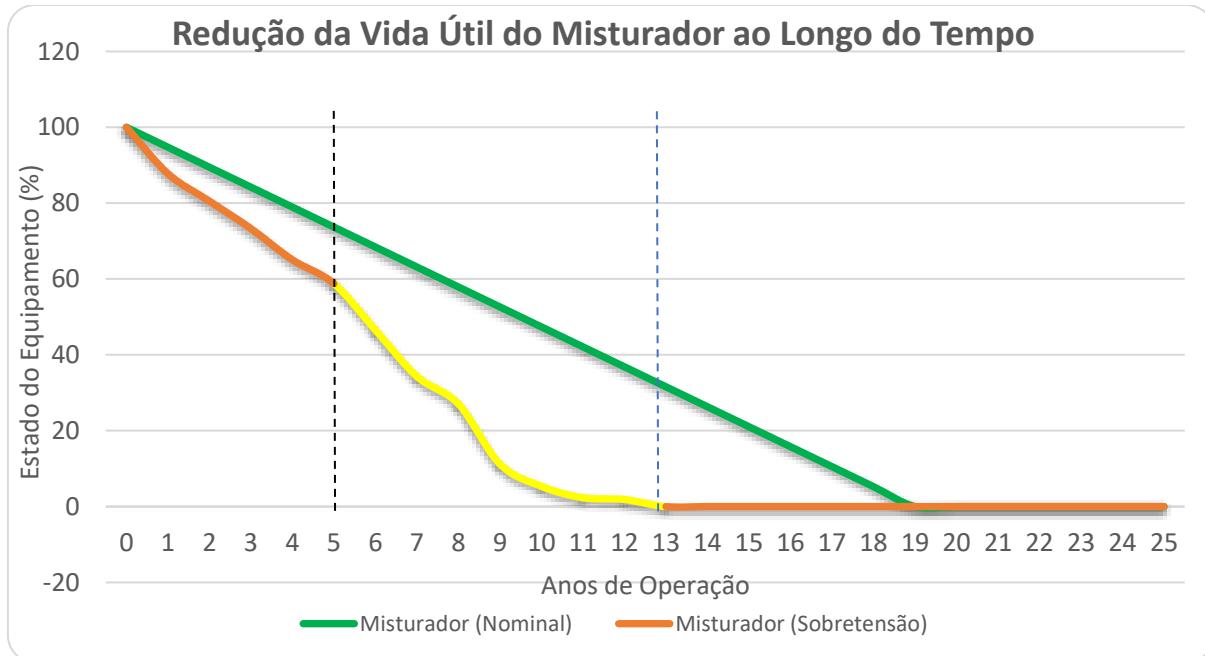


Figura 18: Redução da vida útil do misturador ao longo do tempo.

Fonte (Autor, 2025)

### 3.4.1.1. Análise comparativa

A análise revela um impacto significativo da sobretensão na vida útil dos equipamentos. Com apenas 8,25% de sobretensão (433V vs 400V nominal) e um aumento de temperatura de 5 a 10°C, a vida útil é reduzida em 38% tanto para motores eléctricos quanto para misturadores.

O impacto é ainda mais crítico quando analisamos o tempo restante de vida útil, considerando que os equipamentos já estão em operação há 5 anos. Os motores eléctricos, que teriam mais 15 anos de vida útil em condições nominais, terão apenas 8,1 anos em condições de sobretensão (redução de 46%). Para os misturadores, a situação é similar: de 14 anos restantes em condições nominais para apenas 7,8 anos em sobretensão (redução de 44,36%).

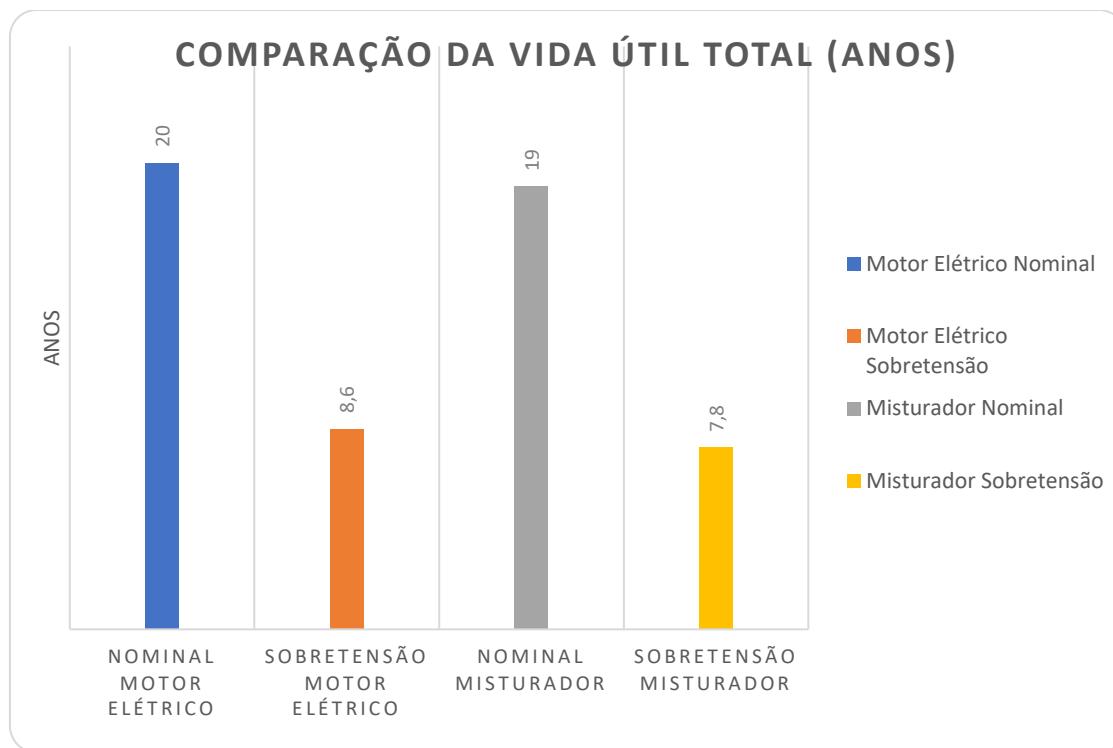


Figura 19: Comparação da vida útil total

Fonte: Autor, 2025

### **3.5. Proposta de solução para mitigação das sobretensões na fabrica**

Para mitigar esses impactos, propõe-se a implementação de um **DVR** (*Dynamic Voltage Restorer*), um dispositivo electrónico avançado projectado para corrigir rapidamente variações de tensão, incluindo sobretensões, subtensões e outras anomalias transitórias e permanentes.

O DVR é instalado online com a rede de alimentação, funcionando como um estabilizador dinâmico que injecta ou absorve tensão para manter os níveis dentro de limites seguros. Sua rápida resposta é essencial em ambientes industriais como o da fábrica, onde as sobretensões, embora não causem danos imediatos, têm um efeito cumulativo sobre os equipamentos como visto anteriormente, reduzindo sua vida útil e gerando custos adicionais com manutenção e substituição.

Na ausência de um modelo de simulação digital previamente disponível nos softwares, torna-se necessário desenvolver um modelo do sistema a partir de seus componentes internos. Os componentes principais incluem:

- I. **Bloco controlador:** Descrito no Anexo 3 figura A3.1-6, responsável pelo gerenciamento e operação do sistema.
- II. **Conversor de dois níveis acoplado a um transformador de 12 terminais:** Detalhado no Anexo 3 figura A3.2-5, sendo um elemento essencial para a conversão e integração do sistema ao barramento eléctrico.

Além disso, foi acoplado ao DVR um filtro para reduzir os níveis de distorções harmónicas no sistema eléctrico da fábrica. Este filtro desempenha um papel crucial na melhoria da qualidade da energia elétrica, garantindo maior estabilidade e desempenho do sistema.

O desenvolvimento desse modelo permitirá não apenas a simulação do comportamento do sistema, mas também a avaliação de sua eficácia na mitigação de problemas de qualidade de energia, como sobretensões, subtensões e distorções harmônicas.

### 3.5.1. Resultados após a implementação do DVR

Após a modelagem do DVR, o dispositivo foi integrado ao sistema eléctrico fabril utilizando a ferramenta de simulação e análise Matlab Simulink. As conexões elétricas para essa simulação estão detalhadas no Anexo 2 figura 29, que apresenta o esquema completo de ligação do DVR ao sistema.

A simulação resultou em uma série de análises, que estão ilustradas e descritas abaixo, destacando o desempenho do DVR na mitigação de problemas de qualidade de energia, como distorções harmónicas, flutuações de tensão e outras anomalias eléctricas observadas no sistema fabril.

Esses resultados fornecem informações críticas para avaliar a eficácia do modelo desenvolvido, bem como o impacto do DVR na estabilidade e eficiência do sistema eléctrico da fábrica.

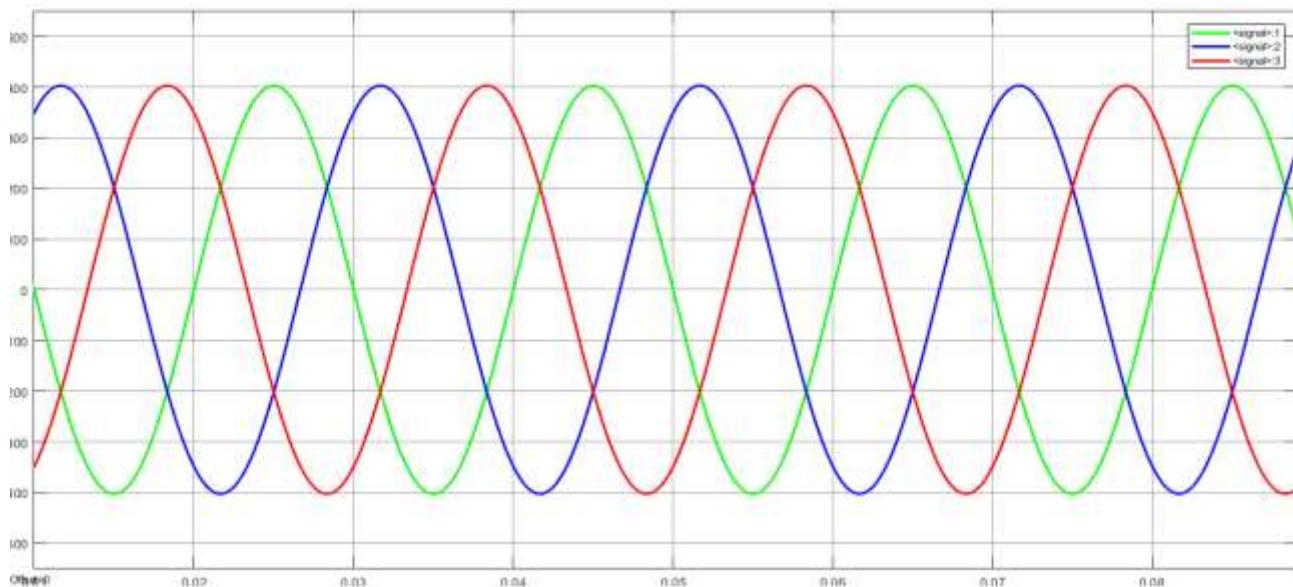


Figura 20: Formas de onda de tensão após aplicação dos métodos correctivos

Fonte: O autor, 2025

Ao analisar a Figura 20, é possível observar que os problemas de sobretensão e distorções previamente identificados na Figura 15 foram resolvidos com a implementação do DVR acoplado ao filtro.

A forma de onda resultante demonstra um sistema mais estável, com características eléctricas aprimoradas, operando de maneira eficiente e segura. Isso evidencia a eficácia do DVR e do filtro na melhoria da qualidade da energia eléctrica, garantindo maior confiabilidade e desempenho para o sistema fabril.

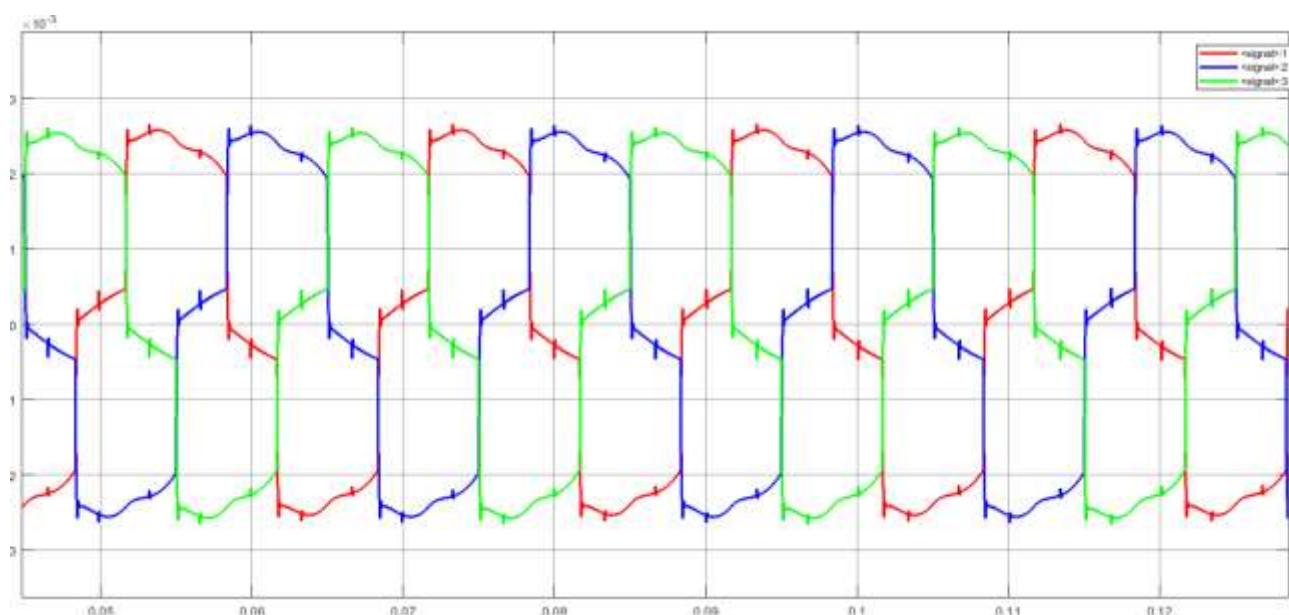


Figura 21: Tensão injectada para correção da sobretensão

Fonte: O autor, 2025

Na Figura 21, as oscilações amortecidas observadas representam o comportamento dinâmico do sistema eléctrico durante a actuação do DVR. Essas oscilações ocorrem porque, ao detectar a sobretensão no sistema, o DVR injecta uma tensão correctiva em cada fase, o que provoca variações transitórias na forma de onda enquanto o sistema se estabiliza.

As oscilações resultam principalmente da interação entre os elementos indutivos e capacitivos do sistema eléctrico, como motores, transformadores e bancos de capacitores, que respondem às mudanças rápidas na tensão. Essas características são naturais em sistemas eléctricos, especialmente durante eventos de compensação dinâmica, e podem

ser amplificadas por ressonâncias intrínsecas ao sistema. Contudo, o amortecimento das oscilações indica que o DVR e o filtro estão operando de forma eficiente, reduzindo gradativamente a amplitude das flutuações até atingir a estabilidade.

Esse comportamento é fundamental para a melhoria da qualidade de energia, pois evita que as oscilações persistam, protegendo os equipamentos contra falhas e garantindo que o sistema funcione de forma eficiente e segura. A presença do filtro acoplado ao DVR desempenha um papel crucial na redução das distorções harmônicas e na suavização das transições, resultando em formas de onda estáveis, como observado na figura 21.

### 3.5.1.1. Resposta do sistema

A resposta do sistema com a aplicação do DVR face aos distúrbios do sistema são ilustrados na figuras abaixo ilustradas. Onde para a natureza do distúrbio que cada fase enfrenta, o sistema tende a responder de forma a mitigar este distúrbio o mais rápido possível.

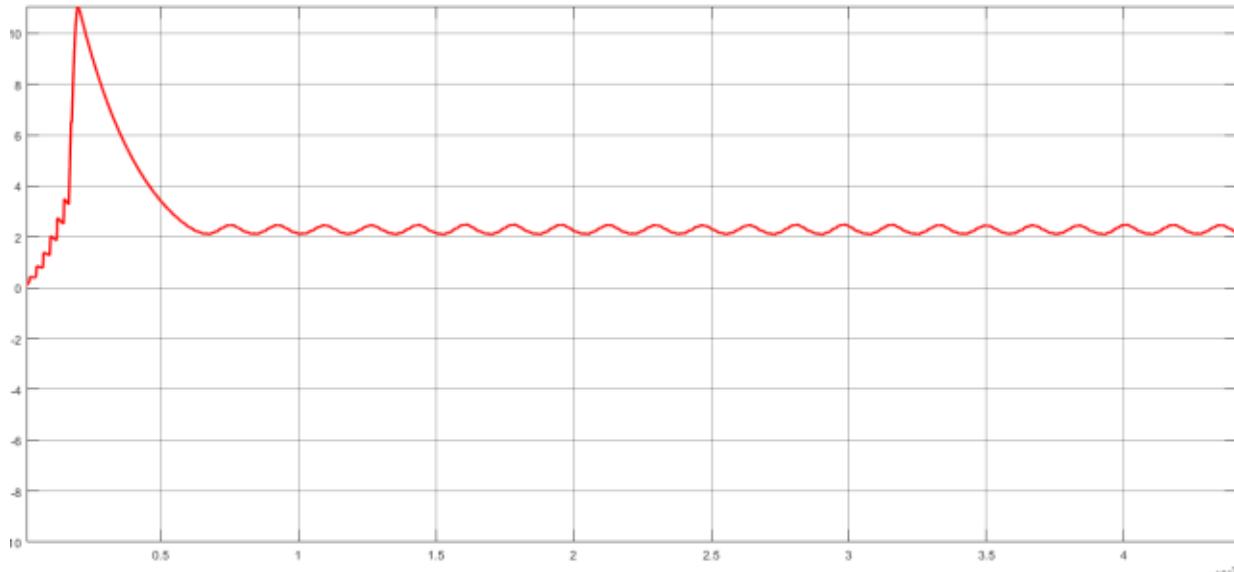


Figura 22: Resposta do sistema na correção da fase A

Fonte: O autor, 2025

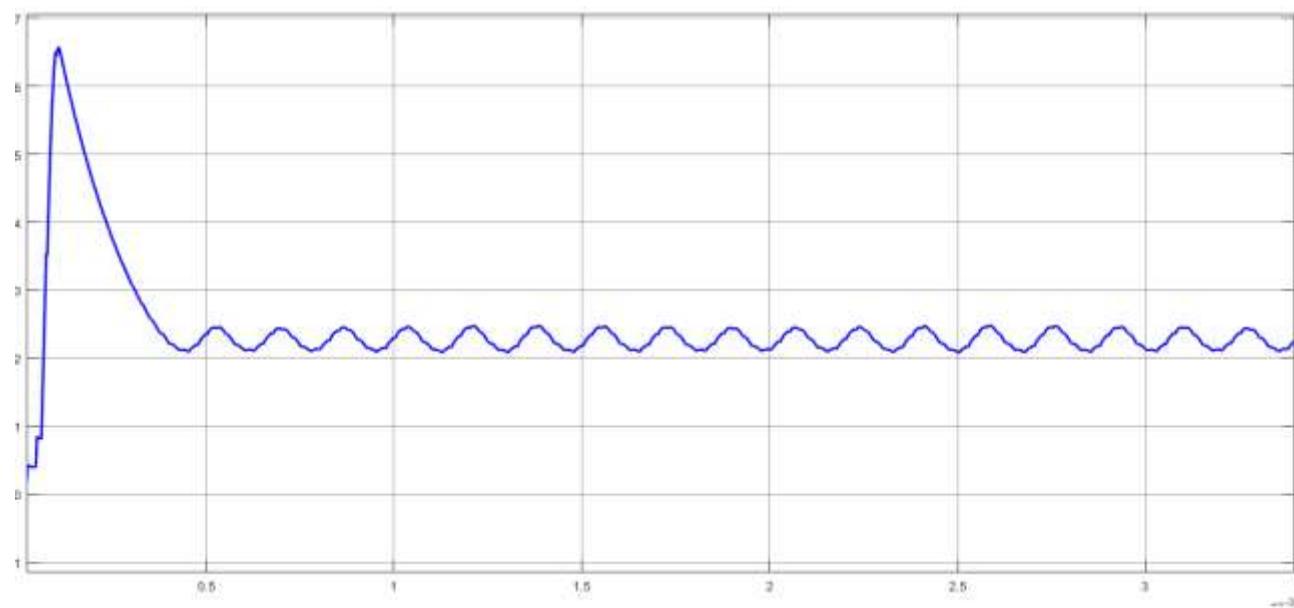


Figura 23: Resposta do sistema na correção da fase B

Fonte: O autor, 2025

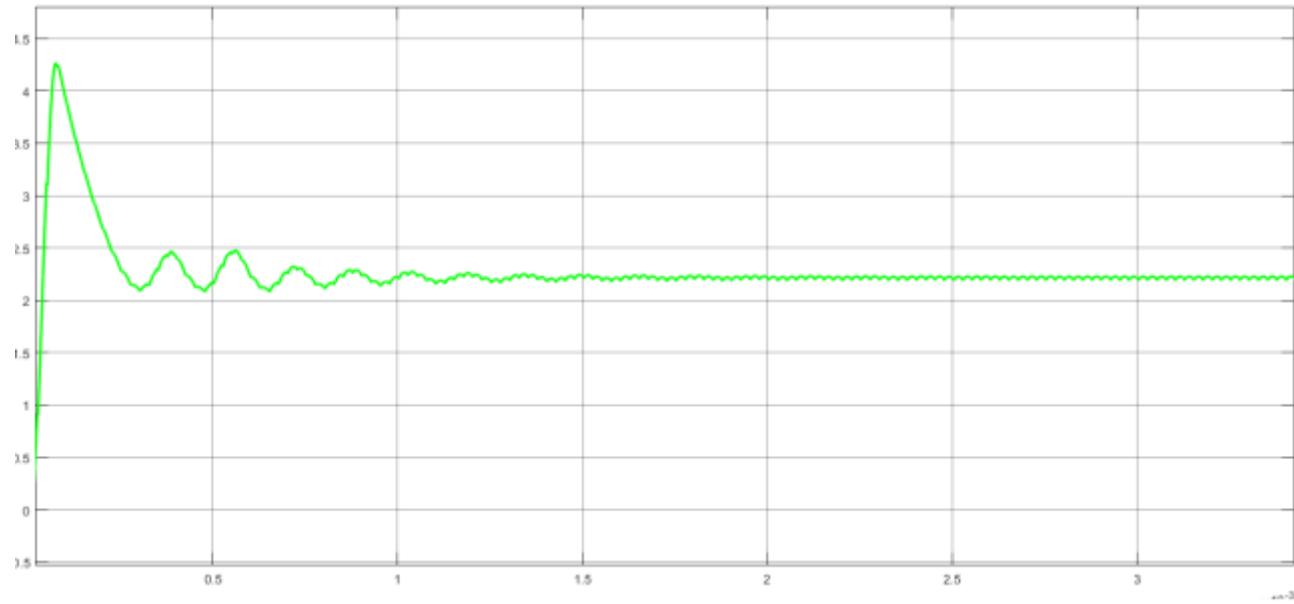


Figura 24: Resposta do sistema na correção da fase C

Fonte: O autor, 2025

### 3.5.2. Resultados esperados com a implementação do DVR

Apos a implementação do DVR espera-se que o sistema funcione de forma mais estável e assegurando o tempo de vida útil dos equipamentos que estão comprometidos com as sobretensões que assolam a fabrica

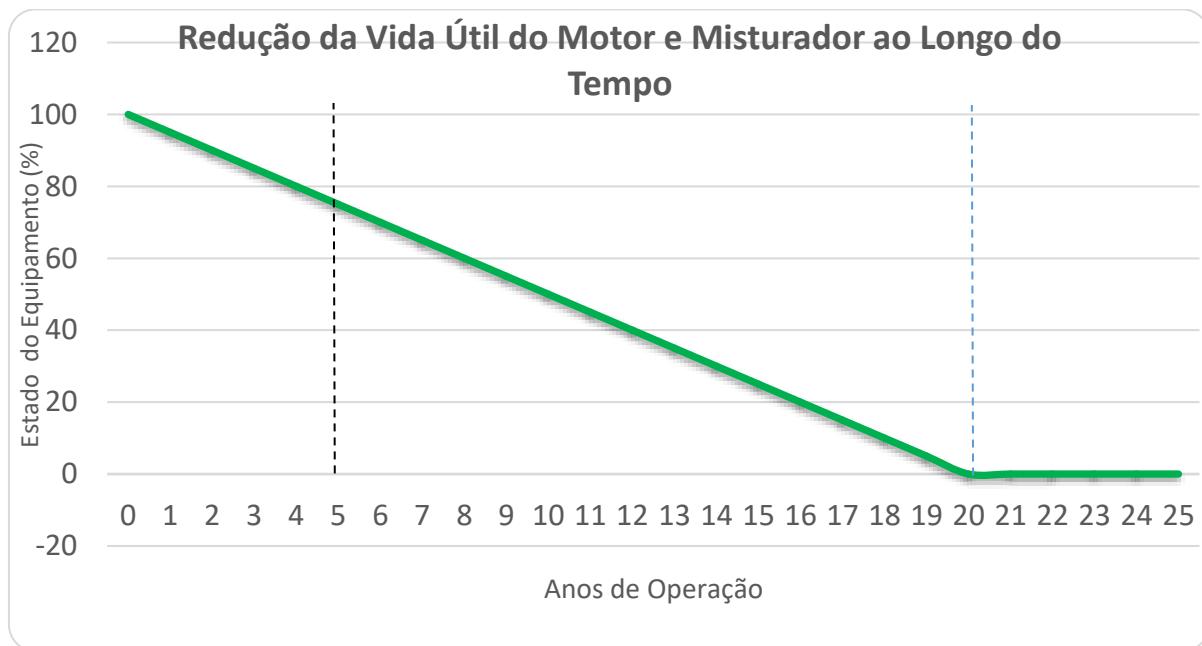


Figura 25: Gráfico ilustrativo do melhoramento esperado do tempo de vida útil do motor e misturador

Fonte: O autor, 2025

### 3.6. Plano de manutenção

Um plano de manutenção é um documento que organiza as actividades necessárias para garantir a operação segura, eficiente e contínua de equipamentos ou sistemas. Esse plano pode ser preventivo, correctivo ou preditivo e deve ser personalizado para o contexto específico.

### **3.7. Local de instalação do DVR**

#### **3.7.1. Fundação e Montagem**

O DVR é um equipamento sensível e requer uma base sólida e nivelada para a sua instalação. Geralmente, recomenda-se uma base de betão dimensionada para suportar o peso total do equipamento, incluindo os gabinetes de potência e armazenamento de energia. A superfície deve ser perfeitamente nivelada para evitar tensões mecânicas na estrutura do equipamento. Devem ser previstas fixações adequadas para ancorar o equipamento à base, prevenindo movimentos accidentais, especialmente em áreas sujeitas a vibrações, embora a instalação deva preferencialmente ocorrer em locais com baixa vibração.

#### **3.7.2. Integração Eléctrica Segura**

A instalação eléctrica deve ser realizada por técnicos qualificados, seguindo rigorosamente as normas técnicas aplicáveis (como as RTIEBT em Moçambique) e as recomendações do fabricante do DVR. Isto inclui o dimensionamento correcto dos cabos de entrada e saída, a instalação de dispositivos de protecção contra sobrecorrente (disjuntores) adequados à capacidade do DVR e às características do sistema, e a implementação de um sistema de aterramento eficaz e dedicado, conforme especificado pelo fabricante, para garantir a segurança e o correcto funcionamento do equipamento

#### **3.7.3. Medidas de Segurança**

O local de instalação do DVR deve ser considerado uma área de acesso restrito, acessível apenas a pessoal autorizado e devidamente treinado. Devem ser afixados sinais de aviso claros indicando a presença de alta tensão e os riscos associados. Medidas de protecção contra incêndio, como detectores de fumo e extintores apropriados para equipamentos eléctricos (Classe C), devem estar disponíveis nas proximidades. Devem existir procedimentos claros para a desenergização segura do equipamento em caso de emergência ou para trabalhos de manutenção.

### 3.8. Estimativas de custos do projeto

Tabela 7: Estimativas de custo do projeto.

Item	Descrição	Custo Estimado (MZN)	Observações
1. Equipamento (DVR)	Aquisição do equipamento DVR, trifásico, 400V, 50Hz. LAC-200-04-N-3	1.553.200,00	Valor baseado numa estimativa média (US\$ 20.000) dentro da faixa de preços pesquisados (US\$ 14.200 - US\$ 25.200).
2. Transporte Marítimo e Frete	Custos de envio do equipamento desde o país de origem (China) até Maputo	62.128,00	Estimado em 4% do custo do equipamento. Varia conforme a origem, peso, volume e transportadora.
3. Seguro de Transporte	Seguro da carga durante o transporte internacional.	15.532,00	Estimado em 1% do custo do equipamento.
4. Direitos de Importação e IVA	Taxas alfandegárias (direitos aduaneiros) e Imposto sobre o Valor Acrescentado (IVA=16%) aplicáveis à importação do equipamento.	108.345,00	25% sobre o valor CIF. A taxa exata depende da classificação fiscal do equipamento e regulamentação vigente.
5. Desembarço Alfandegário e Taxas Locais	Custos com despachante aduaneiro e outras taxas portuárias/lokais para libertação da carga.	35.000,00	
6. Transporte Local e Manuseio	Transporte do equipamento do porto de Maputo até à fábrica, incluindo custos de carregamento/descarregamento	10.000,00	
7 Local de Instalação	Adequação do espaço físico na fábrica para instalação do DVR	15.000,00	Requisitos do fabricante do DVR.
9. Comissionamento e Testes	Configuração inicial, testes de funcionamento e integração do DVR no sistema da fábrica	5.000,00	Pode estar incluído no custo de instalação ou ser um custo separado
		<b>Total:1.804.205,00</b>	

Fonte: O autor, 2025

### 3.9. Estudo de viabilidade económica

O objectivo é avaliar o retorno financeiro esperado do investimento, considerando os custos estimados e os benefícios económicos projectados. As métricas utilizadas para esta avaliação são o Período de Retorno (*Payback Period*) e o Retorno sobre o Investimento (ROI).

#### 3.9.1. Premissas e Estimativa de Benefícios Anuais

Para realizar os cálculos de viabilidade, é fundamental estimar os benefícios económicos anuais que a instalação do DVR proporcionará. Conforme analisado no relatório, a sobretensão contínua na fábrica (operando a 433V em vez dos 400V nominais) causa um desgaste acelerado dos equipamentos, reduzindo significativamente a sua vida útil (estimada uma redução de 38% na vida útil total e 44-46% na vida útil restante para motores e misturadores) e aumentando os custos operacionais. A instalação do DVR visa mitigar estes problemas, gerando economias anuais através de:

**I. Redução de Custos com Substituição de Equipamentos:** A normalização da tensão de operação para os níveis nominais (400V) prolongará a vida útil dos equipamentos críticos (motores, transformadores, electrónicos, etc.), adiando a necessidade de substituições prematuras. Considerando o impacto severo da sobretensão na vida útil demonstrado no relatório e o parque de máquinas da fábrica (moinhos, misturadores, bombas, compressores, sistemas de automação), estima-se uma economia anual conservadora de **100.000,00 MZN** associada à extensão da durabilidade dos activos.

**II. Redução de Custos de Manutenção Correctiva:** Equipamentos operando sob tensão estável e nominal sofrem menos avarias e stress nos seus componentes. Isso levará a uma diminuição na frequência de reparações não planeadas e na necessidade de peças sobressalentes. Estima-se uma redução nos custos anuais de manutenção corretiva de **85.000,00 MZN**.

**III. Redução de Perdas por Paragem de Produção:** Falhas em equipamentos críticos, muitas vezes induzidas por problemas na qualidade da energia como a sobretensão, podem levar a interrupções não planeadas na produção. A maior

fiabilidade do sistema elétrico com o DVR minimizará estas paragens. Estima-se uma economia anual associada à redução de perdas de produção de **90.000,00 MZN**.

Com base nestas premissas, o **Benefício Económico Anual Estimado (S)** resultante da implementação do DVR é de:

$$S = 100.000,00 + 85.000,00 + 90.000,00 = 275.000,00 \text{ MZN/ano}$$

Conforme detalhado na tabela de estimativa de custos, o Custo Total Estimado do Projecto, incluindo aquisição do DVR, transporte, impostos, instalação e contingências, é de 1.804.205,00 MZN.

### **3.9.2. Cálculo do Período de Retorno (*Payback Period*)**

O Período de Retorno indica o tempo necessário para que os benefícios acumulados do projecto igualem o investimento inicial. É calculado pela fórmula:

$$\text{Payback} = \frac{\text{Custo Total do Investimento}}{\text{Benefício Económico Anual Estimado}} \quad (6)$$

$$\text{Payback} = \frac{1.804.205,00}{275.000,00} = 6.5 \text{ anos}$$

Este resultado sugere que o investimento inicial na instalação do DVR seria recuperado através das economias geradas em aproximadamente 6 anos e 6 meses. Este é considerado um período de retorno razoável para investimentos em infraestrutura industrial com benefícios a longo prazo.

### **3.9.3. Cálculo do Retorno sobre o Investimento (ROI)**

O ROI mede a rentabilidade do investimento ao longo de um determinado período. Para esta análise, consideraremos um horizonte temporal de 10 anos, um período comum para avaliação de projetos de capital.

Primeiro, calculamos o Lucro Líquido Total ao longo de 10 anos:

$$\begin{aligned} \text{Benefício Total} &= \text{Benefício Anual Estimado} \times 10 \text{ anos} \\ \text{Benefício Total (10 anos)} &= 275.000,00 \text{ MZN/ano} \times 10 = 2.750.000,00 \text{ MZN} \end{aligned}$$

$$\text{Lucro Líquido} = \text{Benefício Total} - \text{Custo Total do Investimento}$$
$$\text{Lucro Líquido} = 2.750.000,00 - 1.804.205,00 = 945.795,00$$

Agora, calculamos o ROI usando a fórmula:

$$ROI = \frac{\text{Lucro líquido}}{\text{Total de investimento}} * 100\% \quad (7)$$

$$ROI = \frac{945.795,00}{1.804.205,00\text{MZN}} * 100\% = 52\%$$

Um ROI de aproximadamente 52% ao longo de 10 anos indica que, para cada Metical investido no projecto, espera-se um retorno adicional de 0.52 Meticais (além da recuperação do investimento inicial) durante esse período. Este valor demonstra uma rentabilidade considerável e reforça a viabilidade económica do projecto.

## CAPÍTULO IV: CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 4.1. Conclusão

A análise dos impactos da sobretensão na fábrica revelou consequências significativas para os equipamentos e os custos operacionais. Com uma sobretensão de 8,25%, observou-se um acelerado desgaste de componentes essenciais, como motores e misturadores, resultando em uma redução estimada de 38% na vida útil dos equipamentos. Além disso, os custos de manutenção e substituição aumentaram consideravelmente, comprometendo a sustentabilidade das operações.

Embora o desequilíbrio de fases tenha sido identificado no sistema, as análises indicaram que ele não foi o principal causador da elevação de tensão. Este factor reforça a necessidade de uma abordagem direcionada para mitigar as sobretensões sustentadas.

Nesse contexto, a implementação do DVR mostrou-se eficaz. O dispositivo corrigiu a sobretensão, estabilizando a tensão em 400 V, e eliminou distorções harmônicas que afectavam a qualidade da energia eléctrica. As simulações realizadas comprovaram sua capacidade de injectar tensões correctivas de forma eficiente e de amortecer oscilações transitórias, melhorando significativamente a estabilidade do sistema eléctrico.

A viabilidade econômica da solução também foi avaliada. O investimento inicial de 1.804.205,00 MZN é amplamente justificado pelos benefícios anuais estimados em 275.000,00 MZN, oriundos da redução de custos com manutenção, substituição de equipamentos e interrupções de produção. Esses resultados confirmam o DVR como uma solução tecnicamente eficaz e financeiramente viável para garantir a estabilidade e a eficiência do sistema eléctrico da fábrica.

Este trabalho reforça a importância de tecnologias avançadas para mitigar problemas de qualidade de energia e assegurar a operação confiável e sustentável em ambientes industriais.

#### **4.2. Recomendações**

##### I. Implementação Imediata do DVR:

- Instalar o DVR no quadro eléctrico principal, conforme modelo simulado, para proteção contra sobretensões.
- Priorizar a aquisição de um DVR com filtro harmônico integrado (ex.: modelo LAC-200-04-N-3).

##### II. Monitoramento Contínuo:

- Implementar um plano de manutenção preventiva com medições periódicas de tensão e corrente.
- Utilizar softwares de análise (ex.: Digsilent Power Factory) para detecção precoce de anomalias.

#### **4.3. Limitações**

##### I. Escopo do Estudo:

- Focou-se em sobretensões permanentes, não abrangendo impactos de transitórios atmosféricos ou manobras.

##### II. Dados de Campo:

- As medições foram realizadas em um período limitado (1 mês), podendo não capturar variações sazonais.

##### III. Simulações:

- O modelo do DVR no Matlab Simulink assume condições ideais, sem considerar variações extremas de carga ou falhas externas.

##### IV. Custos:

- A estimativa econômica não inclui possíveis variações cambiais ou tributações futuras na importação do DVR.

#### 4.4. **Bibliografia**

##### 4.4.1. Referências bibliográficas

- [1] D'AJUZ, A. 1987 Transitórios eléctricos e coordenação de isolamento: aplicação em sistemas de potência de alta-tensão. 1<sup>a</sup> edição, Niterói: EDUFF. 435 p.
- [2] Electricidade de Moçambique. Relatório e contas. 2022, 186(5), 73-75..
- [3] IEEE 1996. Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications. IEEE Std 446-1995 [The Orange Book], p. 1–320.,
- [4] JITSUKAWA, J. 2010. Coordenação de isolamento de subestações isoladas a ar. 1<sup>a</sup> edição,
- [5] MARTINS, L. S. Apontamentos para projecto de instalação elétrica II. 55(5), 36-51, 2005.
- [6] MENEZES, T. V. 2007, Estratégia para análise de afundamento de tensão no planeamento do sistema elétrico.
- [7] MIRANDA, J. C. 2009, IEC-61850: Interoperabilidade e Intercambialidade entre Equipamentos de Supervisão, Controle e Proteção Através das Redes de Comunicação de Dados. Tese (Mestrado) — Universidade de São Paulo. 314 p.
- [8] OLIVEIRA, R. L. 2022, Estudo de UPS em Aplicações Críticas de Fornecimento de Energia. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Minas Gerais.
- [9] RAMOS, M., PENTEADO, J. 2021, A. Uma Contribuição para a Área de Saúde por meio da Verificação do Impacto da Qualidade de Energia e das Instalações Elétricas nos Equipamentos Electromédicos. 7(2), 2-3.,
- [10] SANTOS, C. A. 2020, Impacto da Utilização de Estabilizadores de Energia em Hospitais. Tese (Doutorado em Sistemas de Energia) — Universidade de São Paulo

- [11] SOUZA, M. F., & ANDRADE, R. L. 2018 Conversão e Armazenamento de Energia em Sistemas Críticos, 1<sup>a</sup> edição, Editora Energia. Rio de Janeiro.
- [12] STAGG, B. 2012, Análise de Curto-Circuito e Princípios de Proteção em Sistemas de Energia: Fundamentos e Prática. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier Editora Ltda. 447 p.
- [13] USIDA, W. F. 2011. Sistema inteligente para alocação eficiente de dispositivos indicadores de falta em alimentadores de distribuição. Tese — Universidade de São Paulo, São Carlos,. 208 p.
- [14] ZANGIROLAMI, T. 2016. Sistemas de alimentação ininterrupta de energia CC de baixa potência. Tese (Licenciatura em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Juiz de Fora,

#### **4.4.2. Outra bibliografia consultada**

[1]<https://www.piller.com/pt-pt/product/energy-storage-flywheels-and-battery-systems/>, 23 de maio de 2025

[2] <https://www.vrogue.com>, 23 de abril de 2025

[3] : <https://technik.reicke.de>, 18 de maio de 2025

[5]<https://tanquesebombas.com.br/produto/tanque-aereo-estacionario-horizontal-capacidade-de-150-litros-com-bacia>, 27 de maio de 2025

# **ANEXOS**

---

## Anexo 1: Medição no quadro Parcial

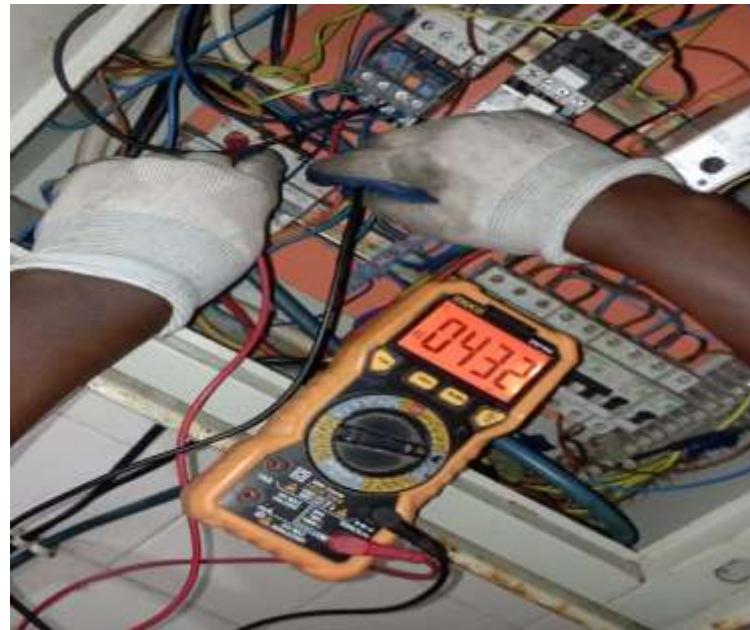


Figura A1.1-1: Medição de tensão na entrada do corte geral

Fonte: O autor, 2025

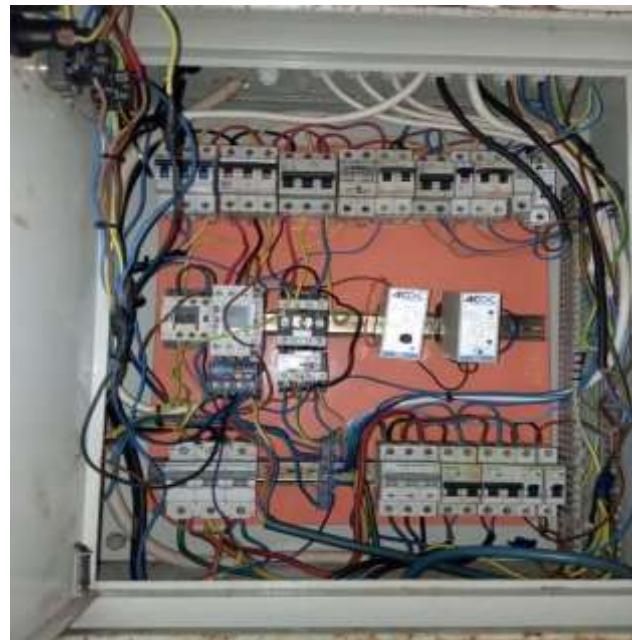


Figura A1.2-1: Quadro parcial

Fonte: O autor, 2025

## Anexo 1: Medição no quadro Parcial



Figura A1.1-2: Corrente do motor do compressor de ar

Fonte: O autor, 2025



Figura A1.2-2: Banco de capacitores

Fonte: O autor, 2025

## Anexo 2: Esquemas eléctricos

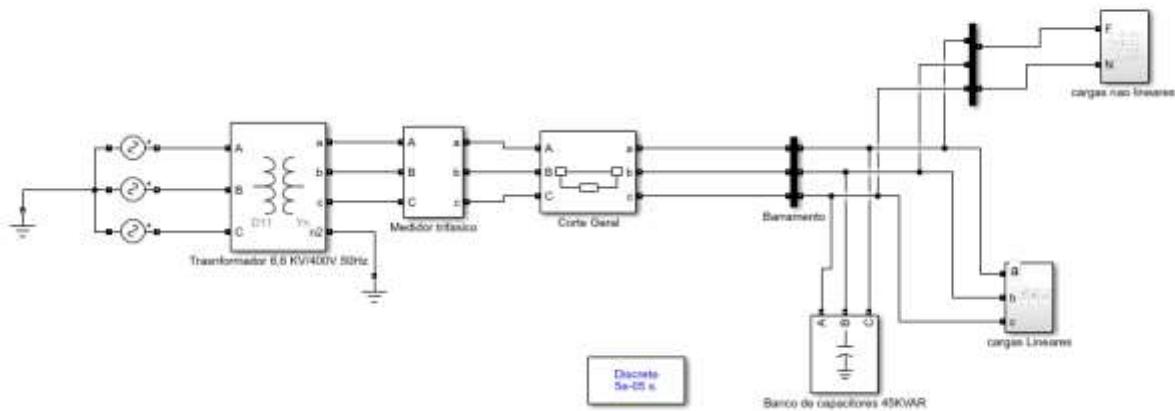


Figura A2.1-3: Esquema eléctrico da fabrica modelado no Matlab Simulink

Fonte: O autor, 2025

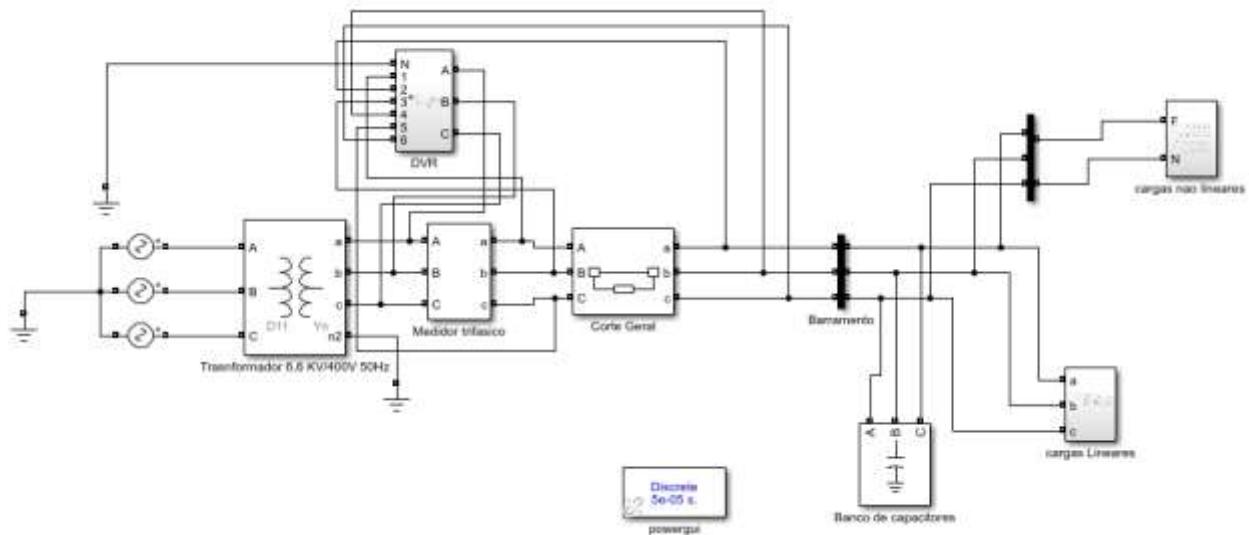


Figura A2.2-3: Esquema eléctrico da fabrica com a implementação do DVR

Fonte: O autor, 2025

## Anexo 2: Esquemas eléctricos

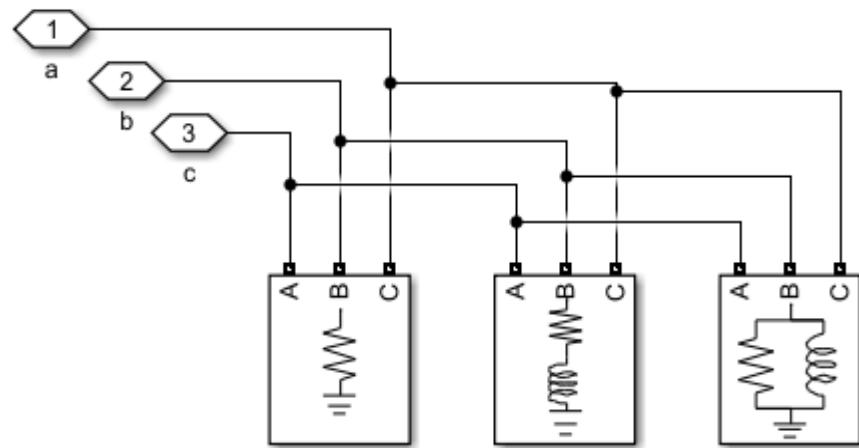


Figura A2.1-4: Cargas lineares

Fonte: O autor, 2025

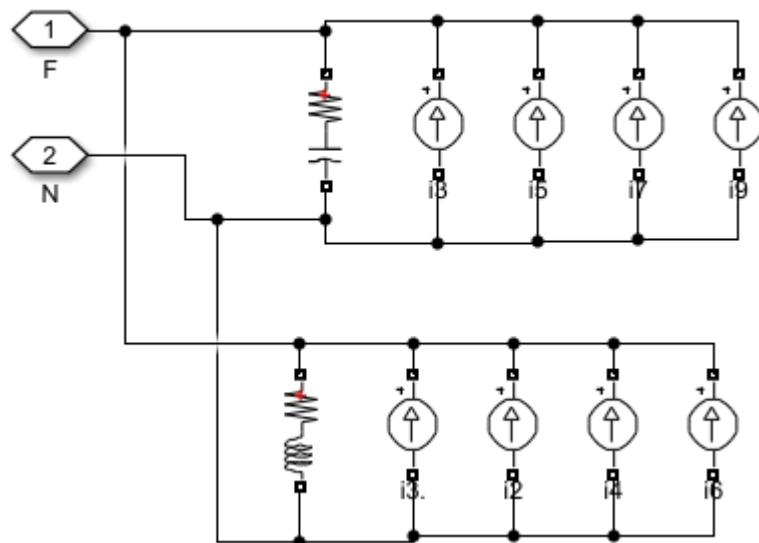


Figura A2.2-4: Cargas não lineares(modeladas como fontes de corrente)

Fonte: O autor, 2025

### Anexo 3: Componentes do DVR Projectado

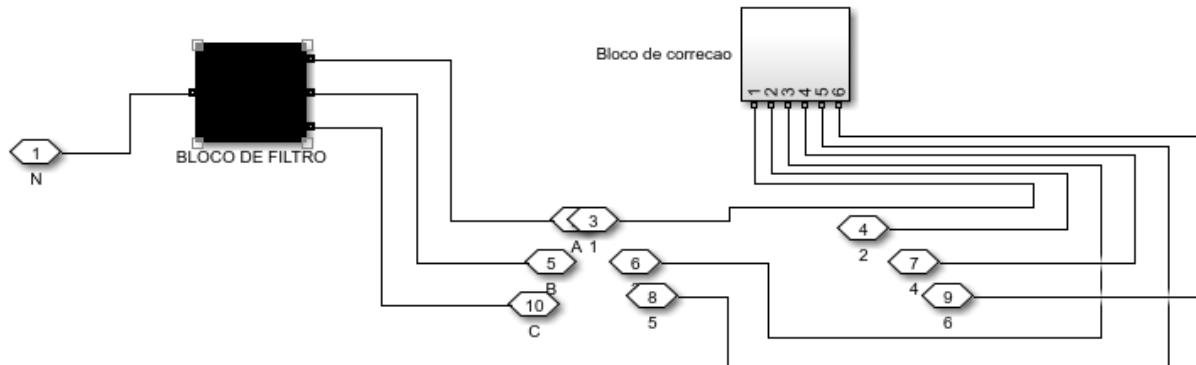


Figura A3.1-5: Principais blocos do DVR

Fonte: O autor, 2025

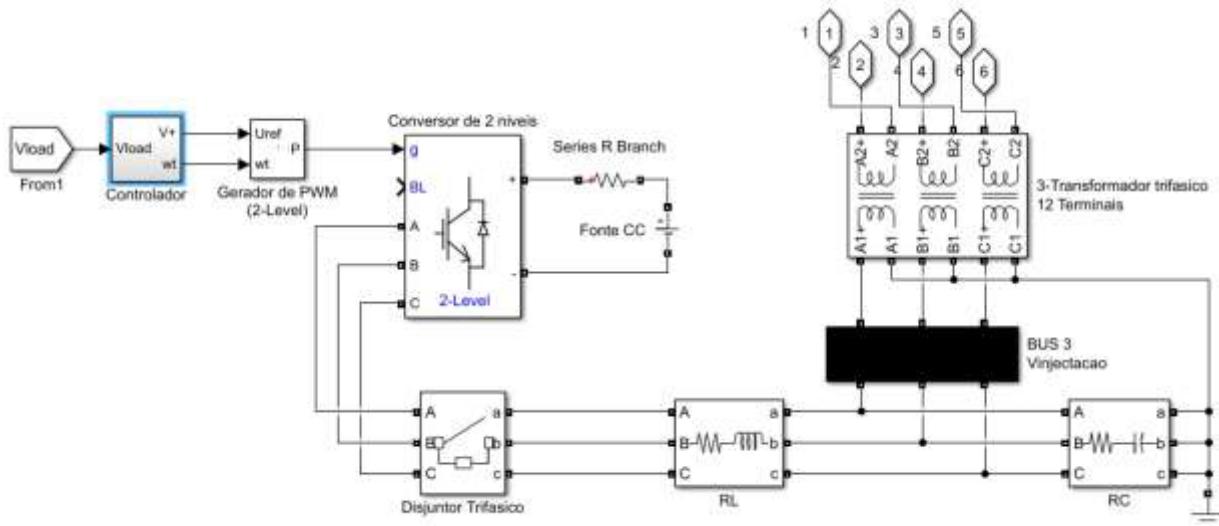


Figura A3.2-5: Conversor de 2 níveis acoplado a um transformador de 12 terminais

Fonte: O autor, 2025

### Anexo 3: Componentes do DVR Projectado

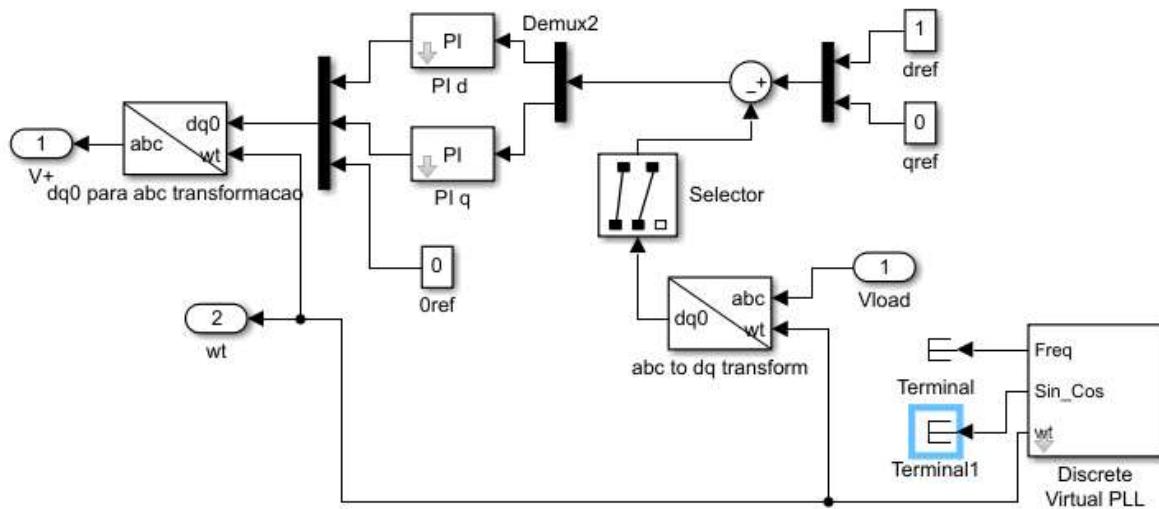


Figura A3.1-6: Bloco de controle de tensão (controlador)

Fonte: O autor, 2025

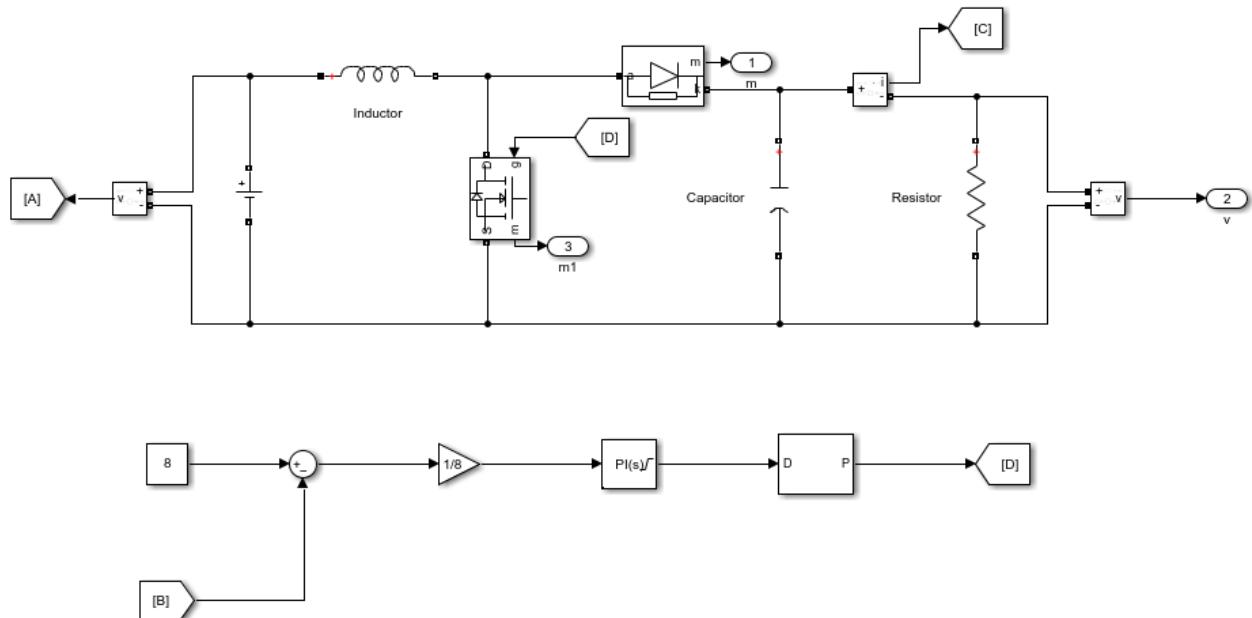


Figura A3.2-6: Modelagem do controlador Proporcional Integrativo(P.I)

Fonte: O autor, 2025

#### Anexo 4 : Formas de onda

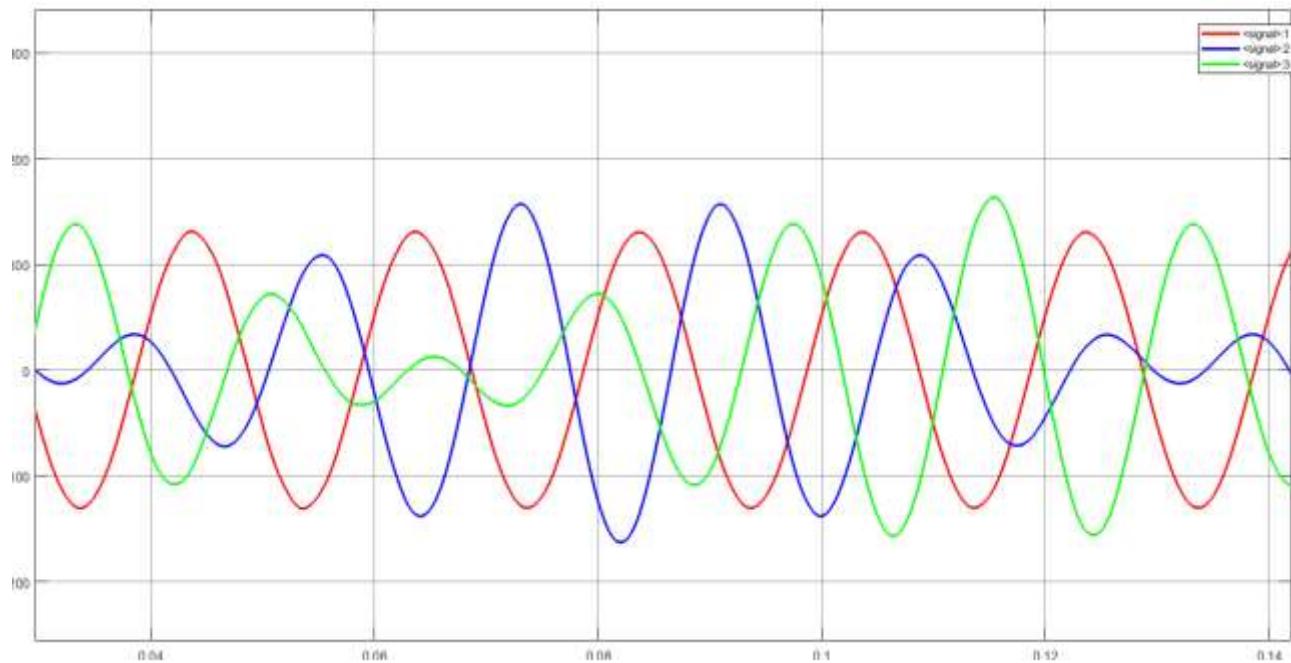


Figura A4.1-7: Formas de onda de corrente em cada fase

Fonte: O autor, 2025

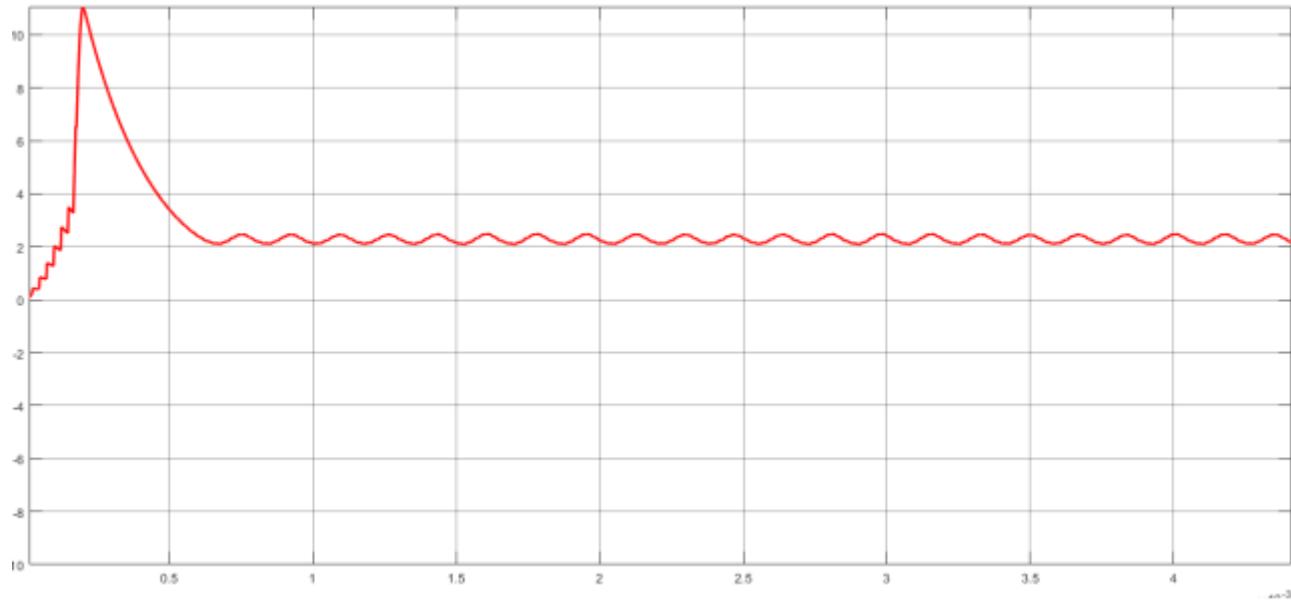


Figura A4.2-7: Resposta do sistema face aos distúrbios na Fase A

Fonte: O autor, 2025

#### Anexo 4 : Formas de onda

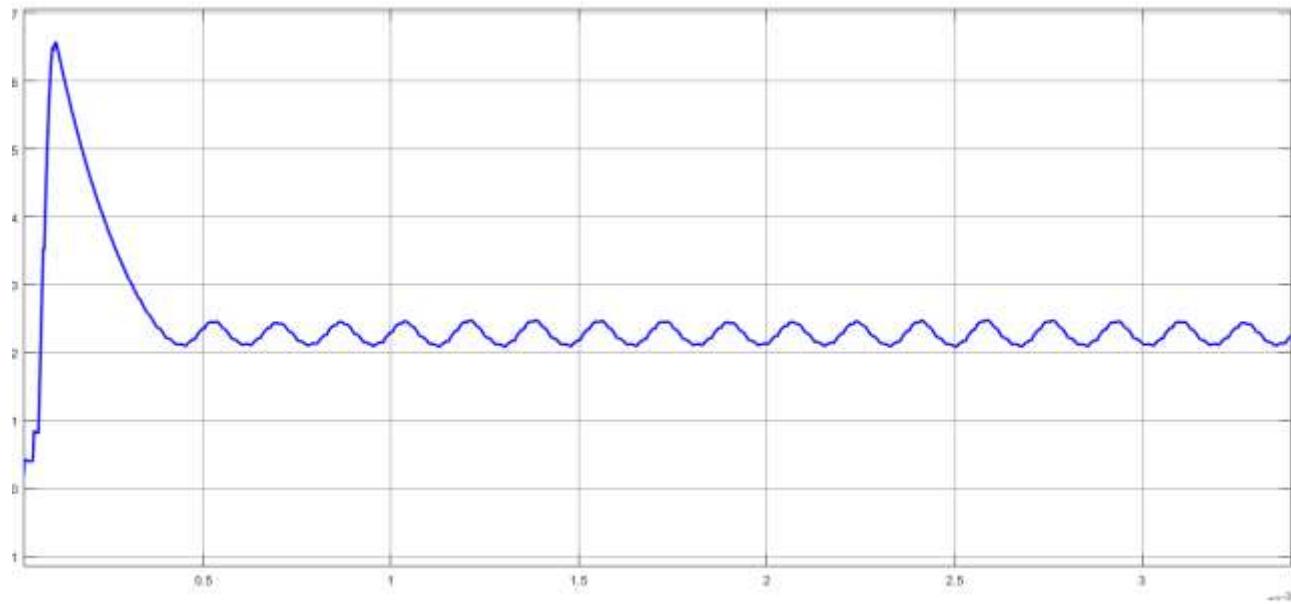


Figura A4.1-8: Resposta do sistema face aos distúrbios na fase B

Fonte: O autor, 2025

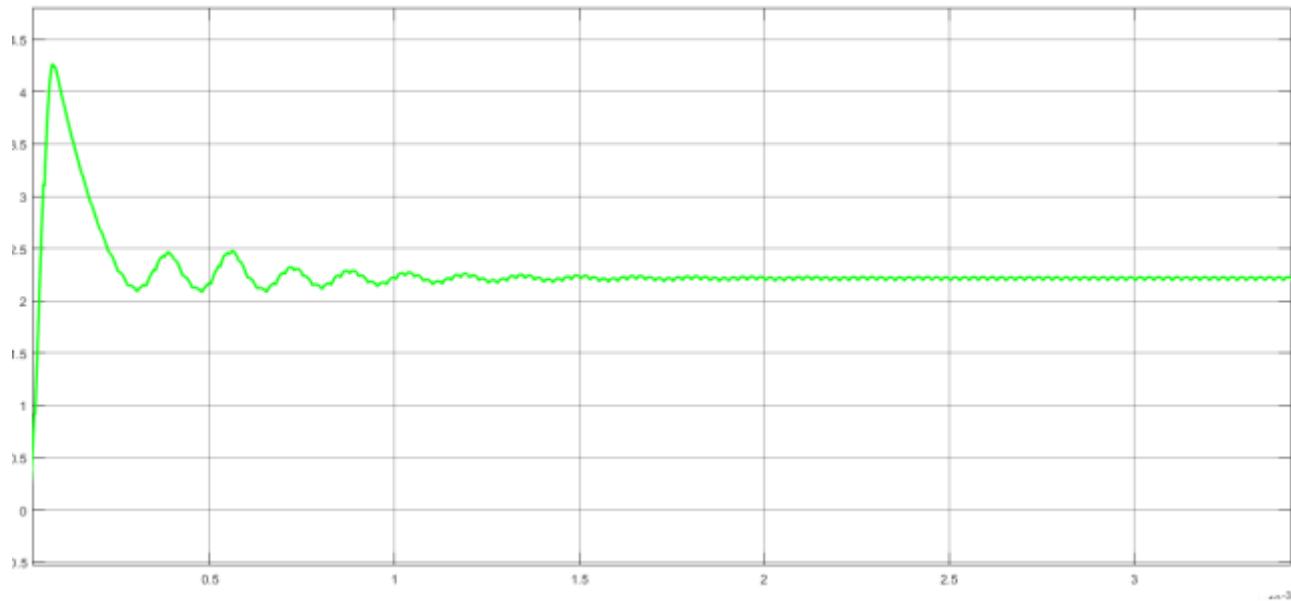


Figura A4.2-8: Resposta do sistema face aos distúrbios na fase C

Fonte: O autor, 2025

#### Anexo 4 : Formas de onda

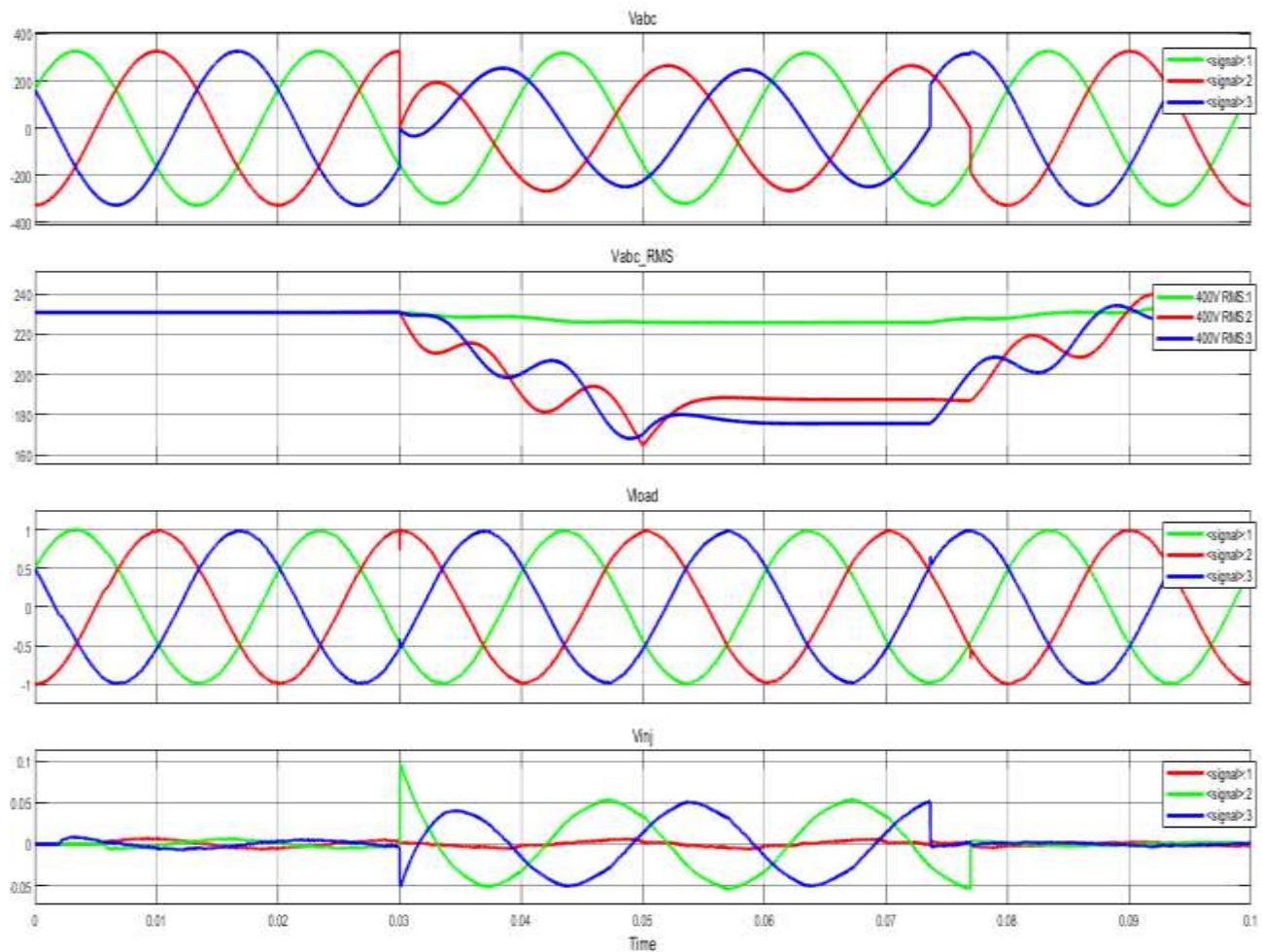


Figura A4.1-9: Resposta do DVR quando ocorrem **subtensões** acentuadas

Fonte: O autor, 2025

## Anexo 5: Especificações técnicas do DVR escolhido



Figura A5.1-10: *Dynamic Volatge restorer-cabine*

Fonte: [Dynamic Voltage Restorer Dvr](#)

## Anexo 6: Tabelas

Tabela A6.1-11: Dados do grafico para a analise do tempo de vida util dos equipamentos

<b>Dados para Gráfico da reducao ao Longo do Tempo:</b>				
<b>Ano</b>	<b>Motor (Nominal)</b>	<b>Motor (Sobretensão)</b>	<b>Misturador (Nominal)</b>	<b>Misturador (Sobretensão)</b>
0	100	100	100	100
1	95	88,37209302	94,73684211	87,76009792
2	90	76,74418605	89,47368421	75,52019584
3	85	65,11627907	84,21052632	63,28029376
4	80	53,48837209	78,94736842	51,04039168
5	75	41,86046512	73,68421053	38,8004896
6	70	30,23255814	68,42105263	26,56058752
7	65	18,60465116	63,15789474	14,32068543
8	60	6,976744186	57,89473684	2,080783354
9	55	0	52,63157895	0
10	50	0	47,36842105	0
11	45	0	42,10526316	0
12	40	0	36,84210526	0
13	35	0	31,57894737	0
14	30	0	26,31578947	0
15	25	0	21,05263158	0
16	20	0	15,78947368	0
17	15	0	10,52631579	0
18	10	0	5,263157895	0
19	5	0	0	0
20	0	0	0	0

Fonte: O autor,2025

Tabela A.6.1-12: Resultados da analise do tempo de vida útil

Parâmetro	Motor Elétrico (Nominal)	Motor Elétrico (Sobretensão)	Misturador (Nominal)	Misturador (Sobretensão)
Vida útil total (anos)	20	8,6	19	8,17
Tempo já operado (anos)	5	5	5	5
Tempo restante (anos)	15	8,6	14	7,8
Redução da vida útil (%)	0,00%	57,00%	0,00%	57,00%
Redução do tempo restante (%)	0,00%	46,00%	0,00%	44,36%
Custo anualizado (€)	750	1744,19	1315,79	3059,98
Aumento do custo anualizado (%)	0,00%	132,56%	0,00%	132,56%

Fonte: O autor, 2025

## Anexo 7: Actas dos encontros

Tabela A7.1-13: Proposta do tema e apresentação do Termo de atribuição do tema



FACULDADE DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA  
ACTA DE ENCONTROS

<b>REFERÊNCIA DO TEMA</b>	2025ELEPD09	Data:	17/02/2025
---------------------------	-------------	-------	------------

**1. AGENDA:**

Proposta do tema e Apresentação do termo de atribuição de tema

**2. PRESENÇAS**

Supervisor	<i>José Luís P. G.</i>
Estudante	<i>José Luís P. G.</i>

**3. RESUMO DO ENCONTRO**

Neste encontro, o estudante primeiramente ao supervisor apresentou o tema e posteriormente o Termo de Atribuição do Tema e o Plano de Actividades previsto para a elaboração do relatório. O supervisor deu o seu parecer sugerindo ao estudante que fizesse algumas alterações no TAT e PA.

**5. RECOMENDAÇÕES**

Usar uma linguagem clara e objectiva nas abordagens por forma a evitar erros de percepção, pois o estudante havia usado termo tensões medias para referir a media de tensões, e que este erro pode alterar todo o contexto do problema detectado.

<b>6. DATA DO PRÓXIMO ENCONTRO</b>	07-05-2025
------------------------------------	------------

## Anexo 7: Actas dos encontros

Tabela A7.1-14: Apresentação dos capítulos 1 e 2



FACULDADE DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA  
ACTA DE ENCONTROS

REFERÊNCIA DO TEMA:	2025ELEPD09	Data:	17/02/2025
---------------------	-------------	-------	------------

**1. AGENDA:**

Apresentação dos Capítulos 1 e 2

**2. PRESENÇAS**

Supervisor	<i>Pedro J. F.</i>
Estudante	<i>Ricardo J. C. Sampaio</i>

**3. RESUMO DO ENCONTRO**

Neste encontro o estudante apresentou o capítulo 1 que são as considerações iniciais. ou seja, a introdução, os objectivos, a metodologia a ser usada  
No mesmo encontro o estudante apresentou o capítulo 2 ou seja, a revisão da literatura

**5. RECOMENDAÇÕES**

O supervisor recomendou ao estudante para colocar os objectivos mais directos e a revisão da literatura deve estar alinhada especificamente com o propósito do trabalho

6. DATA DO PRÓXIMO ENCONTRO	19-05-2024
-----------------------------	------------

## Anexo 7: Actas dos encontros

Tabela A7.1-15: Apresentação do capítulo 3



FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA

### ACTA DE ENCONTROS

REFERÊNCIA DO TEMA	2025ELEPD09	Data:	17/02/2025
--------------------	-------------	-------	------------

#### 1. AGENDA:

Apresentação do Capítulo 3

#### 2. PRESENÇAS

Supervisor	<i>[Signature]</i>
Estudante	<i>[Signature]</i>

#### 3. RESUMO DO ENCONTRO

Neste encontro o estudante apresentou o capítulo 3, a parte central do trabalho, o desenvolvimento do projecto.

#### 5. RECOMENDAÇÕES

O supervisor recomendou ao estudante a organizar e a ser claro nas discussões dos resultados

6. DATA DO PRÓXIMO ENCONTRO	28-05-2024
-----------------------------	------------

## Anexo 7: Actas dos encontros

Tabela A7.1-16: Apresentação do relatório final



FACULDADE DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA  
ACTA DE ENCONTROS

REFERÊNCIA DO TEMA	2025ELEPD09	Data:	17/02/2024
--------------------	-------------	-------	------------

**1. AGENDA:**

Apresentação do relatório final

**2. PRESENÇAS**

Supervisor	<i>José M. L. P.</i>
Estudante	<i>José M. L. P. - J. M. S. S.</i>

**3. RESUMO DO ENCONTRO**

Remotamente foi entregue ao supervisor, a proposta final do relatório escrito para possível aprovação.

**5. RECOMENDAÇÕES**

O supervisor recomendou realizar que algumas revisões fossem feitas no trabalho tendo em conta o regulamento académico.

**6. DATA DO PRÓXIMO ENCONTRO**

10.06.2024

## Anexo 7: Actas dos encontros

Tabela A7.1-17: Apresentação e entrega do relatório final



FACULDADE DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA  
ACTA DE ENCONTROS

REFERÊNCIA DO TEMA	2025ELEPD09	Data:	17/02/2025
--------------------	-------------	-------	------------

1. AGENDA:

Apresentação e entrega do relatório final

2. PRESENÇAS

Supervisor	<i>Presente</i>
Estudante	<i>Nicolas J. S. Oliveira</i>

3. RESUMO DO ENCONTRO

Todas as cópias do relatório de estágio a serem entregues foram verificadas e assinadas para posterior submissão do trabalho.

5. RECOMENDAÇÕES

--

6. DATA DO PRÓXIMO ENCONTRO	N/A
-----------------------------	-----

## Anexo 8: Relatório de progresso

Tabela A8.1-18: Proposta do tema e apresentação do Termo de atribuição do tema



### FACULDADE DE ENGENHARIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA

#### Relatório de Progresso

REFERÊNCIA DO TEMA:	2025ELEPD09
---------------------	-------------

#### 1. ACTIVIDADES PLANIFICADAS

Atividade	Prazo Previsto
1. Escolha e pesquisa do tema	Março de 2025
2. Levantamento bibliográfico	Abril de 2025
3. Escolha de instrumentos de recolha de dados	Abril de 2025
4. Pesquisa de campo	Abril de 2025
5. Redação da revisão bibliográfica	Maio de 2025
6. Desenvolvimento do Sistema Personalizado	Maio de 2025
8. Redação da Análise e dos Resultados	Maio de 2025
9. Redação das conclusões e referências bibliográficas	Maio de 2025
10. Revisão e redação final	Junho de 2025
11. Submissão do relatório final	Junho de 2025

#### 2. CONTROLO DAS ACTIVIDADES

Atv.	Data	Estágio (%)	Observações	Rúbrica
1	30/03/2025	60%	Tema escolhido e pesquisas executadas	1/1
2	14/04/2025	100%	Elaboração e submissão do TAT e plano de atividades	1/1
4	19/04/2025	100%	Conclusão e envio da pesquisa bibliográfica	1/1
5	06/05/2025	100%	Sistema desenvolvido e testes de simulação executados	1/1
6	01/06/2025	100%	Submissão das cópias do relatório	1/1
7	10/06/2025	100%		1/1