



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

**ANÁLISE DE SOLUÇÕES PARA IMPLEMENTAÇÃO DE  
REDUNDÂNCIA OPERACIONAL EM RELAÇÃO AOS  
TRANSFORMADORES DA SUBESTAÇÃO 12 DO CENTRO DE  
TRATAMENTO DE FUMOS (FTC) DA MOZAL\_BELULUANE.**

**Autor:**

Geronimo Fernando Andela Machocoro

**Supervisores:**

Prof. Doutor Zacarias Chilengue, Eng°. (UEM)

Francisco Mavambe, Eng°. (MOZAL)

Maputo, Novembro de 2025



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

**ANÁLISE DE SOLUÇÕES PARA IMPLEMENTAÇÃO DE  
REDUNDÂNCIA OPERACIONAL EM RELAÇÃO AOS  
TRANSFORMADORES DA SUBESTAÇÃO 12 DO CENTRO DE  
TRATAMENTO DE FUMOS (FTC) DA MOZAL\_BELULUANE.**

**Autor:**

Geronimo Fernando Andela Machocoro

**Supervisores:**

Prof. Doutor Zacarias Chilengue, Eng°. (UEM)

Francisco Mavambe, Eng°. (MOZAL)

Maputo, Novembro de 2025

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a toda a minha família, em especial aos meus pais, Fernando Machocoro e Emília Zacarias, pelo exemplo de perseverança, pelo apoio constante e pelo incentivo que foram determinantes ao longo da minha formação académica.

-[Geronimo Machocoro]

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pela vida, saúde e sabedoria concedidas, e pela força para superar os desafios ao longo desta jornada acadêmica. Sem a Sua orientação e proteção, a realização deste trabalho não teria sido possível.

Agradeço profundamente aos meus pais, Fernando Machocoro e Emília Zacarias, pelo amor, exemplo de perseverança e apoio incondicional ao longo de toda a minha formação acadêmica. A orientação, os conselhos e o incentivo de vocês foram fundamentais para que eu alcançasse esta etapa.

Aos meus tios, Pelé Corado e Cesarita Zacarias, pelo apoio demonstrado e pela confiança depositada em mim, fatores que contribuíram de forma significativa para a concretização desta etapa.

Às minhas irmãs, Rosa, Célia, Sandra e Nanda, pela motivação, compreensão e encorajamento transmitidos nos momentos mais desafiadores.

Aos meus amigos, Judson, Dalton, Juvenald, Hélio e Fernando pela amizade sincera, pelo apoio nos momentos de maior exigência e pela motivação constante ao longo desta caminhada acadêmica.

Aos meus supervisores Prof. Doutor Zacarias Chilenge & Eng<sup>o</sup>. Francisco Mavambe e colegas, pelo conhecimento transmitido, pela orientação prestada e pelo contributo essencial para a minha formação acadêmica.

A todos que directamente/indirectamente contribuíram para que eu chegasse até aqui, expresso o meu mais profundo reconhecimento e gratidão.

## Resumo

O presente trabalho tem como objetivo analisar soluções para a implementação de redundância operacional nos transformadores da Subestação 12, responsável pelo fornecimento de energia aos Centros de Tratamento de Fumos (*FTC*) da Mozal, localizada no Parque Industrial de Beluluane. A ausência de redundância compromete diretamente a continuidade do processo produtivo, uma vez que falhas ou manutenções nos transformadores podem provocar a interrupção dos *FTCs* e, conseqüentemente, do forno de cozedura de ânodos, impactando o ritmo de produção e ocasionando perdas financeiras significativas. A metodologia adotada baseia-se em revisão bibliográfica, levantamento de dados em campo, análise técnica dos equipamentos e consulta a catálogos especializados. Os resultados permitem identificar os efeitos da falta de redundância, apresentar alternativas técnicas viáveis e indicar a solução mais adequada, considerando aspectos de confiabilidade, segurança operacional e custos. A proposta recomendada assegura maior disponibilidade dos sistemas e contribui para a continuidade, eficiência e estabilidade da produção de ânodos.

**Palavras-chave:** Redundância operacional; Transformadores; Subestação elétrica; *FTC*; Confiabilidade.

**Abstract**

This study aims to analyze solutions for implementing operational redundancy in the transformers of Substation 12, which supplies power to the Fume Treatment Centers (FTCs) at Mozal, located in the Beluluane Industrial Park. The lack of redundancy directly compromises the continuity of the production process, as failures or maintenance of the transformers may cause interruptions in the FTCs and consequently in the anode baking furnace, affecting production rates and resulting in significant financial losses. The methodology employed includes bibliographic review, field data collection, technical analysis of the equipment, and consultation of specialized catalogs. The results highlight the impacts of the absence of redundancy, present technically viable alternatives, and identify the most suitable solution considering reliability, operational safety, and costs. The recommended proposal ensures greater system availability and contributes to the continuity, efficiency, and stability of anode production.

**Keywords:** Operational redundancy; Transformers; Electrical substation; FTC; Reliability.

**ÍNDICE**

CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Formulação do problema .....	2
1.2. Justificativa .....	3
1.3. Objectivos .....	4
1.3.1. Objectivo geral .....	4
1.3.2. Objectivos específicos .....	4
1.4. Metodologia .....	5
CAPITULO II.....	6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	6
2.1. Subestação Abridada .....	6
2.1.1. Cubículos .....	7
2.1.2. Equipamentos de uma subestação .....	11
2.2. Motores .....	17
2.2.1. Características construtivas do motor de indução .....	17
2.2.2. Rotor do motor .....	21
2.2.3. Escorregamento.....	22
2.2.4. Característica torque x velocidade do MIT .....	24
2.2.5. Conjugado de carga.....	25
2.3. Ventilação exaustora .....	26
2.3.1. Captor .....	28
2.3.2. Sistema de dutos .....	29
2.3.3. Ventilador.....	31
2.3.4. Equipamento de controle de poluição do ar .....	32
2.4. Redundância dos equipamentos.....	33
CAPÍTULO III.....	36
3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA ACTUAL E LEVANTAMENTO DE CARGA.....	36
3.1. O problema - Aumento da demanda de sucção dos fumos.....	36
3.1.1. Causa .....	36
3.1.2. Consequência - Aumento da carga alimentada pela subestação 12 .....	37
CAPÍTULO IV.....	42

4. PROPOSTA E ANÁLISE DE SOLUÇÕES.....	42
4.1. Dimensionamento do transformador .....	42
4.1.1. Disjuntor.....	43
4.1.2. Barramento .....	43
4.1.3. Cabo alimentador.....	44
4.1.4. Dimensões do cubículo de transformação .....	46
4.2. Dimensionamento do ventilador de exaustão .....	47
4.2.1. Dados de referência.....	47
4.2.2. Cálculos aproximados .....	48
4.3. Análise técnica e financeira .....	52
4.3.1. Análise dos Gráficos .....	55
CAPÍTULO V. ....	57
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	57
5.1. Conclusões.....	57
5.2. Recomendações.....	58
CAPÍTULO VI.....	59
6. REREFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59
ANEXOS.....	A

## LISTA DE SÍMBOLOS

AC	Corrente Alternada
AP3XLE	<i>Advanced Potline 3X Low Energy</i> (Modelo de célula eletrolítica)
CC	Corrente Contínua
CLP	Controlador Lógico Programável
FTC	<i>Fume Treatment Center</i> (Centro de Tratamento de Fumos)
GVO	Grande Volume de Óleo
HH	<i>High Hinge</i> (Chave seccionadora com base fusível)
In	Corrente Nominal
I <sub>2</sub>	Corrente Convencional de Funcionamento
IZ	Corrente Máxima Admissível na Canalização
kV	Quilovolt
kVA	Quilovolt-ampere
kW	Quilowatt
MVA	Megavolt-ampere
MT	Média Tensão
ONAN	Óleo Natural, Ar Natural (Sistema de resfriamento de transformadores)
PVO	Pequeno Volume de Óleo
PVC	PVC – Policloreto de Vinila
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Subestação abrigada com ramal de entrada subterrâneo (Fonte: Mesh Engenharia, 2021) .....	7
Figura 2 - Cubículo de medição com entrada subterrânea (Fonte: Mesh Engenharia, 2020) .....	8
Figura 3- Cubículo de proteção (Fonte: Mesh Engenharia, 2020) .....	9
Figura 4 - Cubículo de transformação, com transformador a óleo isolante (Fonte: Mesh Engenharia, 2020) .....	10
Figura 5 – Muflas (Fonte: Raychem, 2021) .....	12
Figura 6 – Para-raios de corpo polimérico (Fonte: Mamede, 2013).....	13
Figura 7 - Transformador de corrente (Fonte: Brasforme, 2021) .....	13
Figura 8 – Transformador de potencial (Fonte: Brasforme, 2021) .....	14
Figura 9 - Disjuntor PVO (Fonte: Beghin, 2012) .....	15
Figura 10 - Relé de sobrecorrente (Fonte: Pextron, 2021) .....	16
Figura 11 - Chave seccionadora com câmara de extinção de arco elétrico (Fonte: Viaporto, 2021) .....	16
Figura 12 - Transformador a óleo (Fonte: Weg, 2021) .....	17
Figura 13 – Estator de um motor de indução típico (Fonte: CHAPMAN, 2013) .....	18
Figura 14 – Campo girante no estator em diferentes instantes (Fonte: LISBOA KNUPPE, L.; HENRIQUE SEFRIN, L., Campo Girante Trifásico, 2013) .....	19
Figura 15 – Desenho esquemático do rotor gaiola de esquilo (a) e um modelo real típico (b). (Fonte: CHAPMAN, 2013).....	20
Figura 16 – Modelos reais de rotores bobinados típicos de motores de indução.....	20
Figura 17 – Produção de conjugado induzido em um motor de indução rotor gaiola de esquilo (Fonte: CHAPMAN, 2013).....	22
Figura 18 – Curva característica de conjugado versus escorregamento de uma máquina de indução, mostrando as regiões de frenagem, motor e gerador. (Fonte: FITZGERALD, KINGSLEY JR, UMANS, 2014).....	24
Figura 19 – Região inversa e linear da operação de uma máquina de indução como motor. (Fonte: CHAPMAN, 2013).....	25
Figura 20 – Sistema fixo com captor de fenda lateral (Fonte: Macintyre, 1990) .....	27
Figura 21 – Ilustração esquemática de um sistema de captação de fumos central (A) e unidade móvel de extração e filtragem de fumos e gases (B) (Fonte: Nederman, 2014). .....	27
Figura 22 – Contornos de velocidades e as linhas de fluxo para captadores de abertura circular (A) sem e (B) com flange (Fonte: Adaptado de Macintyre 1990) .....	29
Figura 23 – Balanceamento de dutos (Fonte: Lisboa, 2007) .....	31
Figura 24 – Relação entre a quantidade de itens redundantes e a taxa de falhas e confiabilidade dos sistemas (Fonte: Smith, 2001) .....	34
Figura 25 – Efeito do tipo de redundância empregada na taxa de falha e na confiabilidade do sistema (Fonte: Smith, 2001) .....	35
Figura 26 – <i>Impacto da migração do Modelo AP35 para AP3LE</i> (Fonte: Autor, 2025) .....	37
Figura 27 – Localização da subestação 12 na área do Carbono da Mozal(Fonte: Google Maps, 2025) .....	38
Figura 28 – Situação inicial de operação da subestação 12 (Fonte: PWS - Autor, 2025).....	39
Figura 29 – Situação actual de operação da subestação (Fonte: PWS - Autor, 2025) .....	40
Figura 30 – Incapacidade de um transformador em alimentar todos os motores (Fonte: PWS - Autor, 2025) .....	41

Figura 31- Ventiladores em paralelo (Fonte: Autor, 2025) .....	47
Figura 32– Operação com 3 ventiladores (Fonte: Autor, 2025) .....	48
Figura 33– Operação com 2 ventiladores (Fonte: Autor, 2025) .....	49
Figura 34 – Interseção entre as curvas do Motor e Ventilador (Fonte: Autor, 2025) .....	51
Figura 35 – comparação de payback (Fonte: Autor, 2025) .....	55
Figura 36 – comparação de payback (Fonte: Autor, 2025) .....	56
Figura 37 – Porporção de riscos e benefícios das soluções (Fonte: Autor, 2025) .....	56

**LISTA DE TABELAS**

- Tabela 1 – Granulometria das partículas coletadas por cada tipo de coletor. (Fonte: Adaptada de Costa, 2005). ..... **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 2 – Dados dos equipamentos de referência (Fonte: Adaptado pelo Autor, 2025) ..... **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 3 – Valores relativos aos motores (Fonte: Autor, 2025)... **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 4 – Especificações técnicas do disjuntor (Fonte: Siemens, 2025) .... **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 5 – Especificações técnicas do barramento (Fonte: Legrand, 2018) **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 6 – Especificações técnicas do condutor (Fonte: CBI, 2006)..... **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 7 – Especificações do ventilador (Fonte: Ficha técnica – Rand Blower Fan, 2010)..... **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 8 – Especificações do ventilador (Fonte: Catálogo – Sodeca, 2014).... **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 9 - Análise técnica e financeira..... **Erro! Indicador não definido.**

## CAPÍTULO I.

### 1. INTRODUÇÃO

A Mozal constitui uma das mais relevantes indústrias de fundição de alumínio do continente africano, localizada no Parque Industrial de Beluluane, no distrito de Boane. A sua operação depende de uma complexa rede eléctrica interna de média tensão, responsável por abastecer vinte e sete instalações essenciais ao processo produtivo do alumínio primário. A alimentação desta rede interna é garantida pela *Mozambique Transmission Company* (MOTRACO), através de três linhas aéreas de transporte de energia que convergem para o barramento principal de 132 kV. A partir deste barramento, a energia é distribuída para diferentes subestações internas, entre as quais se destaca a Subestação 12, cuja relevância se associa directamente ao suporte do processo de produção dos ânodos.

A Subestação 12 é responsável por alimentar os Centros de Tratamento de Fumos (*FTCs*), unidades que, embora concebidas para o tratamento dos fumos provenientes do cozimento dos ânodos, desempenham, simultaneamente, um papel determinante na estabilidade térmica, no controlo do processo e na manutenção das condições adequadas para a produção. O desempenho contínuo e fiável dos motores dos *FTCs* contribui, de forma directa, para a uniformidade e qualidade dos ânodos produzidos, afectando variáveis críticas como densidade, integridade estrutural e consistência físico-química. Qualquer perturbação no funcionamento destes centros repercute-se, inevitavelmente, no ciclo produtivo e na qualidade do produto final.

Os dois transformadores que compõem a Subestação 12 garantem a alimentação eléctrica necessária aos motores dos ventiladores industriais dos *FTCs*. Estes motores operam em regime contínuo e exigem energia eléctrica estável e de elevado desempenho. Assim, a fiabilidade da alimentação fornecida pelos transformadores torna-se um elemento essencial para assegurar a eficiência operacional das etapas de cozimento dos ânodos.

Contudo, em situações de falha inesperada, paragens forçadas ou actividades programadas de manutenção em um dos transformadores, a continuidade do funcionamento pleno dos *FTCs* pode ser comprometida. A indisponibilidade de um transformador limita a capacidade de carga da subestação, afectando os motores responsáveis pela sucção exigida durante o processo. Esta limitação introduz vulnerabilidades que podem comprometer o ritmo produtivo, prolongar o tempo de ciclo e afectar a uniformidade dos ânodos.

Diante deste cenário, torna-se fundamental analisar alternativas técnicas que permitam garantir redundância operativa entre os transformadores da Subestação 12, assegurando a continuidade do processo produtivo dos ânodos mesmo perante falhas ou paragens programadas. A análise torna-se, portanto, relevante e estratégica, uma vez que visa minimizar riscos operacionais e reforçar a fiabilidade e estabilidade das operações industriais da Mozal.

### **1.1. Formulação do problema**

Os Centros de Tratamento de Fumos (*FTCs*) são constituídos por três ventiladores industriais de grande capacidade, cada um accionado por um motor eléctrico alimentado pela Subestação 12. Em condições operacionais padrão, dois ventiladores são suficientes para atender às necessidades do processo de cozimento dos ânodos, sendo o terceiro mantido como reserva estratégica para suprir eventuais falhas ou paragens de manutenção.

Entretanto, devido a alterações recentes nos requisitos operacionais da planta, o processo produtivo passou a exigir maior capacidade de sucção, o que levou à necessidade de operar simultaneamente os três ventiladores. Esta mudança, ainda que necessária para responder à demanda actual do processo, eliminou a margem de reserva anteriormente existente, tornando o sistema mais dependente da capacidade plena da Subestação 12.

Embora os dois transformadores da subestação, em operação conjunta, garantam a energia suficiente para o funcionamento total dos *FTCs*, verificou-se que um único transformador, operando isoladamente, não possui capacidade para alimentar todos

os motores dos ventiladores quando os três se encontram em operação simultânea. Assim, a indisponibilidade de um dos transformadores compromete directamente a continuidade e estabilidade do processo.

Daí que surge a seguinte questão: Como propor uma solução técnica e economicamente viável que assegure a redundância operacional dos transformadores da Subestação 12, reduzindo ao mínimo a necessidade de paragem dos *FTCs*?

## **1.2. Justificativa**

A implementação de redundância operacional nos transformadores da Subestação 12 justifica-se pela necessidade de assegurar a continuidade e a estabilidade do processo produtivo dos ânodos, etapa fundamental na cadeia de produção de alumínio da Mozal. A operação dos Centros de Tratamento de Fumos (*FTCs*), que desempenham um papel determinante na manutenção das condições adequadas ao cozimento dos ânodos, depende integralmente da alimentação eléctrica fornecida por esta subestação. Os ventiladores industriais instalados nos *FTCs* necessitam de uma fonte de energia fiável, contínua e com capacidade adequada às exigências actuais do processo, sendo, portanto, indispensável que os transformadores operem com total segurança e elevada disponibilidade.

A inexistência de redundância entre os transformadores representa um risco significativo para o desempenho da produção, uma vez que a falha de apenas um deles compromete imediatamente a capacidade da instalação de alimentar todos os motores dos ventiladores. Este cenário conduz a limitações operacionais que se reflectem na impossibilidade de manter os *FTCs* a funcionar em plena capacidade, o que, por sua vez, afecta directamente a estabilidade térmica e o ritmo do cozimento dos ânodos. A redução da eficiência deste processo pode provocar irregularidades na estrutura física dos ânodos, variações indesejáveis na sua densidade e alterações no tempo de ciclo, conduzindo a perdas de qualidade e atrasos produtivos.

A falta de redundância aumenta ainda a exposição da operação a paragens não planeadas, que tendem a gerar impactos económicos significativos devido à

interrupção do processo produtivo, ao aumento de retrabalhos e à necessidade de ajustes correctivos para recuperar a estabilidade do sistema. Além deste risco imediato, a sobrecarga imposta ao transformador remanescente, quando um deles se encontra indisponível, acelera o desgaste dos equipamentos, reduz a sua vida útil e aumenta a probabilidade de falhas sucessivas, o que compromete a fiabilidade global da instalação.

A adopção de uma solução de redundância torna-se essencial para garantir que a produção dos ânodos decorra mesmo em situações de falha imprevista ou durante intervenções de manutenção programada. Com a redundância assegurada, é possível manter o fornecimento eléctrico necessário aos *FTCs*, evitando interrupções e permitindo que os ventiladores continuem a operar dentro dos parâmetros de carga especificados. Esta capacidade de manter a continuidade operacional reforça a previsibilidade do processo, preserva a integridade dos equipamentos e reduz o risco de variabilidade na qualidade dos ânodos.

Deste modo, a implementação de redundância na Subestação 12 constitui uma medida estratégica que contribui significativamente para a fiabilidade, estabilidade e eficiência global da produção. A solução proposta alinha-se com os princípios de rigor técnico, inovação e segurança operacional adoptados pela Mozal, assegurando que a empresa possa sustentar o seu desempenho industrial e manter elevados níveis de consistência e qualidade na produção dos ânodos ao longo do tempo.

### **1.3. Objectivos**

Para a realização deste trabalho são traçados os seguintes objectivos:

#### **1.3.1. Objectivo geral**

Analisar soluções para a implementação de redundância operacional em relação aos transformadores da Subestação 12, garantindo a continuidade do funcionamento dos centros de tratamento de fumos.

#### **1.3.2. Objectivos específicos**

- Identificar os riscos decorrentes da falta de redundância nos transformadores da

subestação.

- Propor soluções para redundância em relação aos transformadores.
- Comparar as soluções considerando os prós e contras.
- Seleccionar a solução mais viável de acordo com critérios definidos.

#### **1.4. Metodologia**

Para a elaboração do presente trabalho, será realizada os seguintes procedimentos metodológicos:

- Pesquisa bibliográfica: Esta etapa consiste na pesquisa e análise de matérias já existentes, tais como livros, artigos científicos, teses, normas técnicas e documentos institucionais relacionados ao tema e catálogos técnicos.
- Pesquisa de Campo: Será realizada a colecta de informações directamente no local de estudo, de forma a levantar dados reais, actuais e específicos que caracterizam a situação em análise.
- Uso de softwares/programas como o PWS e Electrical AutoCAD para as diferentes simulações e ilustrações.

## CAPITULO II.

### 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1. Subestação Abrigada

Conforme Mamede (2017), nesse tipo de subestação, os aparelhos estão instalados em áreas protegidas das intempéries, conhecidas como cubículos, cabines ou postos. Podem ser erguidos em construções de alvenaria ou com estrutura metálica.

As subestações de alvenaria costumam ser edificadas em concreto armado, sendo essas mais empregadas por indústrias, comércios e condomínios residenciais. No entanto, esse tipo de instalação requer uma área consideravelmente maior do que a das subestações metálicas compactas para a sua edificação. Por outro lado, têm um custo mais baixo, facilidade na montagem e na manutenção. Dentro delas, as subestações de alvenaria apresentam compartimentos destinados a finalidades específicas, sendo estes cubículos:

- Cubículo de medição;
- Cubículo de proteção;
- Cubículo de transformação.

Na figura 1, é apresentada a subestação abrigadas em alvenaria, com ramal de entrada subterrânea.

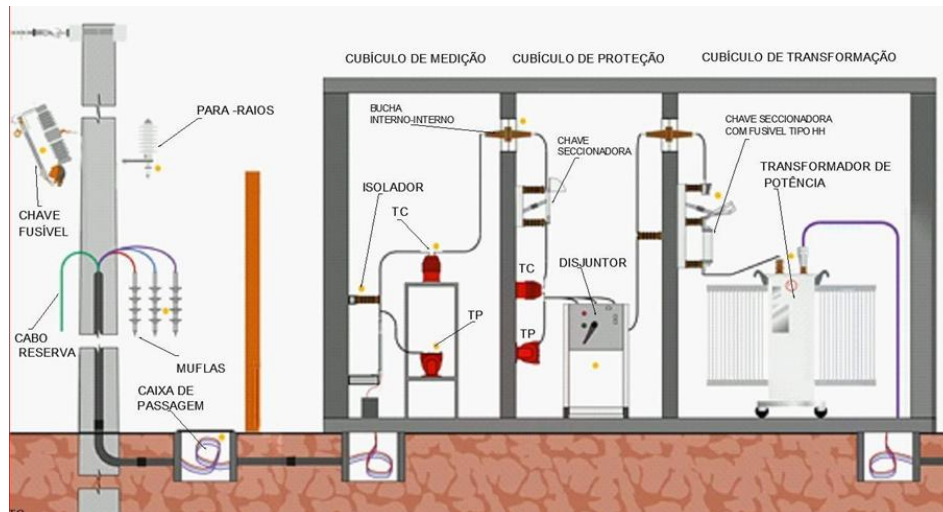


Figura 1 - Subestação abrigada com ramal de entrada subterrâneo (Fonte: Mesh Engenharia, 2021)

## 2.1.1. Cubículos

### 2.1.1.1. Cubículo de medição

Conforme demonstrado nas Figuras 1, apresentada anteriormente, o cubículo de medição segue após as partes externas da subestação. Nesse cubículo, encontram-se os dispositivos auxiliares de medição, como o TC (transformador de corrente) e o TP (transformador de potencial), responsáveis por reduzir a corrente e a tensão elétrica a níveis adequados para o sistema de medição. Este local é de uso exclusivo da concessionária de energia elétrica, sendo vedada a entrada de pessoas não autorizadas.

A maioria das concessionárias adota para a edificação deste cubículo os seguintes critérios:

- Potência do transformador superior a 225 kVA;
- Mais de um transformador de potência instalado na subestação;
- Se a tensão secundária do transformador não for padronizada pela concessionária.

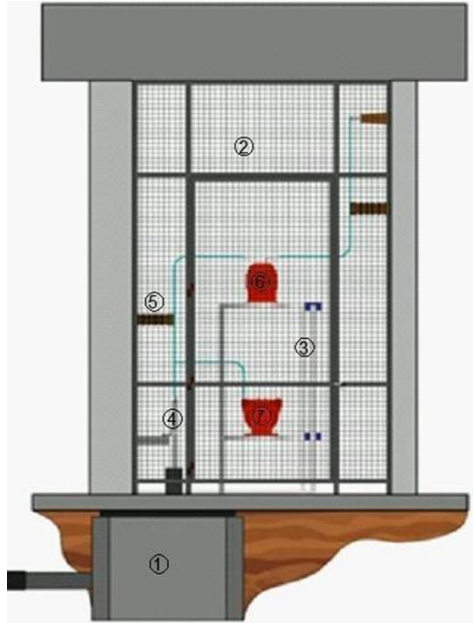


Figura 2 - Cubículo de medição com entrada subterrânea (Fonte: Mesh Engenharia, 2020)

Na Figura 2 é apresentado o cubículo de medição. Verifica-se a presença dos seguintes componentes:

1. Caixa de passagem
2. Grade de Proteção
3. Cavalete
4. Mufla interna
5. Isolador Epóxi
6. TC – Transformador de Corrente
7. TP – Transformador de Potencial

### 2.1.1.2. Cubículo de proteção

Depois do cubículo de medição, existe o cubículo ou posto de proteção. Esse posto tem como objetivo acomodar os instrumentos de medição destinados ao sistema de proteção, ou seja, para o relé, normalmente classificado como sobrecorrente 50/51. Ademais, oferece alimentação auxiliar para o comando e

serviços auxiliares da subestação, incluindo a energização do relé, alimentação dos nobreaks e motorização do disjuntor.

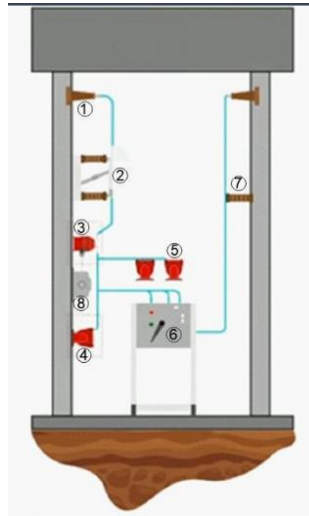


Figura 3- Cubículo de proteção (Fonte: Mesh Engenharia, 2020)

Este cubículo possibilita a execução de manobras intencionais de ligar e desligar o sistema por meio do disjuntor de média tensão, bem como a interrupção em caso de falha. Além disso, permite o isolamento seguro do sistema elétrico durante a manutenção, utilizando a chave seccionadora.

Na Figura 3 é apresentado o cubículo de proteção. Pode-se verificar a presença dos seguintes componentes:

1. Bucha de passagem;
2. Chave seccionadora – abertura sob carga;
3. TC – Transformador de corrente para proteção;
4. TP – Transformador de potencial para proteção;
5. TP – Transformador de potencial para alimentação da proteção;
6. Disjuntor de média tensão;
7. Isolador de pedestal;
8. Punho de manobra.

### 2.1.1.3. Cubículo de transformação

O cubículo de transformação ocupa o terceiro lugar. Esse local é encarregado de acomodar o transformador de força, que pode ser isolado a óleo ou a seco. De acordo com a NBR 14039 (2005), se o transformador tiver uma potência de 500 kVA ou superior e utilizar líquido isolante inflamável, é necessário construir barreiras corta-fogo e dispositivos de drenagem do óleo. Isso inclui a instalação de um tanque de contenção ou um sistema S.A.O (separação de água e óleo) para prevenir possíveis incêndios de acordo com a NBR 14039 (2005).

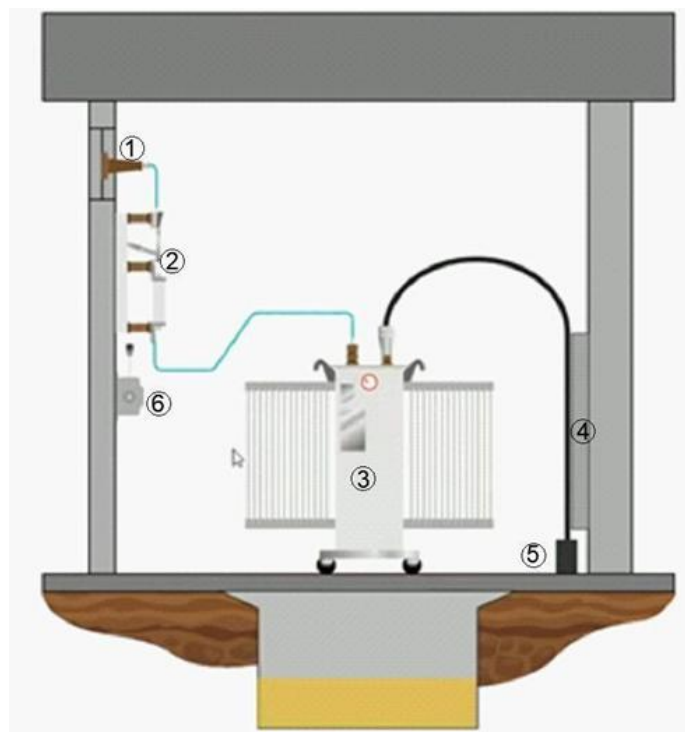


Figura 4 - Cubículo de transformação, com transformador a óleo isolante (Fonte: Mesh Engenharia, 2020)

O posto de transformação é constituído pelos seguintes componentes listados a seguir e que podem ser visualizados na Figura 4.

1. Bucha de passagem interno – interno;

2. Chave seccionadora com base fusível (tipo HH);
3. Transformador de potência;
4. Eletrólito;
5. Duto de distribuição / caixa de passagem.
6. Punho de acionamento.

### **2.1.2. Equipamentos de uma subestação**

Uma subestação consumidora de alvenaria é uma construção composta por cubículos ou postos que abrigam principalmente equipamentos e instrumentos de medição e proteção. Esses dispositivos permitem que a tensão e a corrente sejam ajustadas a níveis adequados para o funcionamento das cargas da instalação elétrica. Esses equipamentos são distribuídos nos cubículos em uma ordem apropriada para que sua operação seja realizada de forma segura. Os aparelhos e ferramentas presentes em uma subestação são os seguintes:

- Mufla;
- Para-raios;
- Transformador de corrente – TC;
- Transformador de potencial – TP;
- Disjuntor;
- Relé;
- Chave seccionadora;
- Transformador de potência.

#### **2.1.2.1. Mufla**

De acordo com Junior (2004), a mufla, também chamada de terminal polimérico, é um aparelho empregado para isolar um condutor isolado ao se conectar com outro condutor nu (barramento) ou terminais de conexão de um equipamento (transformador). Dependendo de sua estrutura construtiva, as muflas

podem ser fabricadas para uso tanto ao ar livre quanto em ambientes protegidos. Quando empregadas ao ar livre, é comum encontrá-las instaladas na extremidade externa do alimentador de uma subestação consumidora. Por outro lado, quando utilizadas no interior, elas se conectam aos barramentos no cubículo de entrada de uma subestação consumidora.



Figura 5 – Mufas (Fonte: Raychem, 2021)

A Figura 5 mostra dois tipos de mufas: à esquerda, para uso interno, e à direita, para uso externo.

#### **2.1.2.2. Para-raios**

Segundo Barros (2015), o para-raios é um dispositivo de proteção contra picos de tensão, causados por descargas atmosféricas ou por manobras de chaveamento interno de chaves seccionadoras ou disjuntores. Este dispositivo protege os aparelhos de uma subestação e os transformadores de distribuição, diminuindo o nível de sobretensão para que seja compatível com a capacidade suportável. A habilidade de proteger os dispositivos elétricos é resultado da não linearidade dos materiais empregados em sua fabricação. Em condições normais, esse equipamento atua como uma chave aberta, enquanto em situações de sobretensões, fecha, permitindo que a corrente elétrica seja direcionada para a terra.

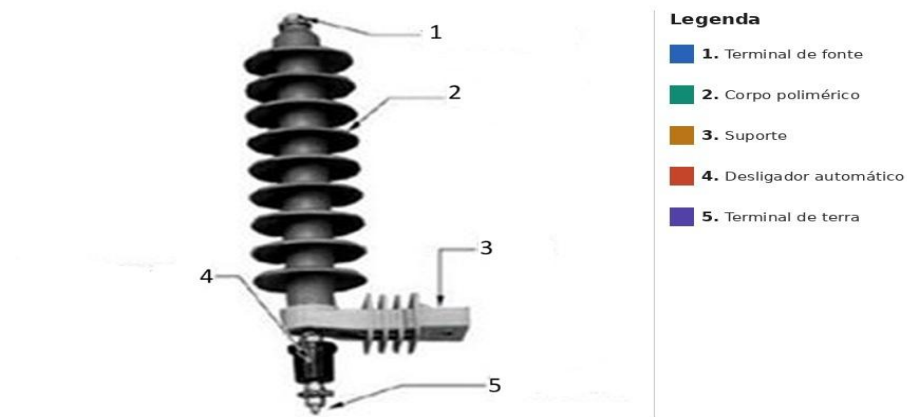


Figura 6 – Para-raios de corpo polimérico (Fonte: Mamede, 2013 – Adaptado pelo Autor, 2025)

A Figura 6 apresenta um para-raios de corpo polimérico, detalhando suas partes componentes.

### 2.1.2.3. Transformador de corrente

O transformador de corrente é um dispositivo que converte altas correntes que circulam em seu enrolamento primário, devido à corrente de carga do circuito ao qual está conectado, em correntes menores (normalmente 5A) em seu enrolamento secundário. Isso possibilita a medição da corrente em valores adequados para instrumentos de medição (faturamento de energia) e proteção (relé), segundo Mardegan (2020).



Figura 7 - Transformador de corrente (Fonte: Brasforme, 2021)

A Figura 7 ilustra a configuração física de um TC, amplamente empregado em subestações abrigadas de 13,8 kV.

#### 2.1.2.4. Transformador de potencial

Transformador de tensão Segundo Mardegan (2020), o transformador de potencial (TP) é um dispositivo monofásico com dois enrolamentos, primário e secundário, que estão isolados eletricamente, mas acoplados magneticamente. Sua função é reduzir a tensão a níveis inferiores aos do enrolamento primário, permitindo assim as seguintes finalidades:

- Incentivar a segurança dos colaboradores;
- Isolar eletricamente o circuito de potência dos instrumentos de medição e proteção;
- Reproduzir exatamente o valor da tensão no enrolamento primário no secundário.

Na Figura 8, pode-se visualizar um TP utilizado com frequência em subestações abrigadas de 13,8 kV.



Figura 8 – Transformador de potencial (Fonte: Brasforme, 2021)

#### 2.1.2.5. Disjuntor

O disjuntor é um dispositivo eletromecânico projetado para interromper correntes elétricas em um circuito nas seguintes situações: normais, sobrecorrente, curto-circuito e outras anomalias que possam ocorrer. De acordo com Barros (2015), esses dispositivos, projetados com várias tecnologias para a extinção do arco elétrico, podem ser dos seguintes tipos:

- Pequeno volume de óleo (PVO);
- Grande volume de óleo (GVO);

- Sopros magnéticos;
- Ar comprimido;
- Vácuo;
- Gás.

Na Figura 9 é apresentado um exemplo de um disjuntor de média tensão de pequeno volume de óleo.



Figura 9 - Disjuntor PVO (Fonte: Beghin, 2012 – Adaptado pelo Autor, 2025)

#### 2.1.2.6. Relé de Proteção

Relés de proteção e disjuntores são utilizados para proteger a subestação de energia elétrica. Ao identificar a ocorrência de um defeito, o relé envia um comando ao disjuntor para interromper a instalação elétrica. Com o progresso tecnológico, os relés evoluíram para dispositivos completamente digitais, compostos por circuitos eletrônicos e chips de alta velocidade de processamento. Esses chips proporcionam uma variedade de proteções aos sistemas elétricos, incluindo sobrecarga, curto-circuito, sobretensão, subtensão, entre outras, segundo Mamede (2016).

O relé mais utilizado nas subestações que atendem consumidores de média tensão é o de proteção contra sobrecorrente instantânea e temporizada 50/51. Esse aparelho mede a corrente reduzida pelos transformadores de corrente (TCs) e, sempre que a corrente de fase ou de neutro excede os limites de suas curvas de atuação, envia um sinal de trip ao disjuntor. A Figura 10 mostra um relé de

sobrecorrente da marca Pextron, comumente usado na proteção de subestações de energia elétrica de 13,8 kV.



Figura 10 - Relé de sobrecorrente (Fonte: Pextron, 2021)

### 2.1.2.7. Chave seccionadora

A Figura 11 mostra uma chave seccionadora, que, segundo Barros (2015), é um dispositivo de manobra composto por três lâminas móveis. Essas lâminas são acionadas simultaneamente por um eixo rotativo, que pode ser acionado por um bastão ou manopla. Tanto a parte fixa quanto a parte móvel são sustentadas por isoladores. Esse aparelho possibilita a abertura e o fechamento das lâminas de fases em circuitos sem carga.

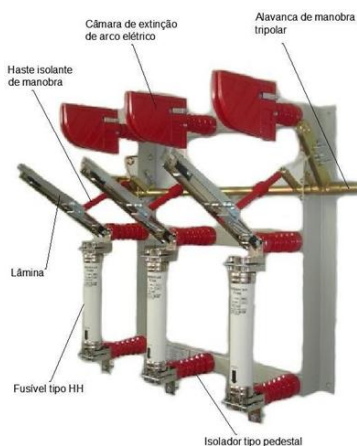


Figura 11 - Chave seccionadora com câmara de extinção de arco elétrico (Fonte: Viaporto, 2021)

### 2.1.2.8. Transformador

Segundo Barros (2015), o transformador é uma máquina elétrica estática que possibilita o aumento ou a redução da tensão e da corrente por meio da transferência de energia elétrica do enrolamento primário para o enrolamento secundário ou terciário, se houver, utilizando a indução eletromagnética, mantendo a frequência de entrada inalterada. O transformador é composto por dois componentes essenciais: as bobinas (primária e secundária) e o núcleo formado por chapas de material ferromagnético.

Segundo Barros (2015), existem dois tipos construtivos de transformadores nas subestações de consumidores: os a óleo e os a seco. Conforme ilustrado na Figura 12, os enrolamentos da máquina podem ser isolados e refrigerados por meio do líquido isolante presente nos a óleo. Por outro lado, os a seco são revestidos com uma resina isolante de epóxi e resfriados pelo ar que circula nas bobinas, conforme ilustrado na Figura 13.



Figura 12 - Transformador a óleo (Fonte: Weg, 2021)

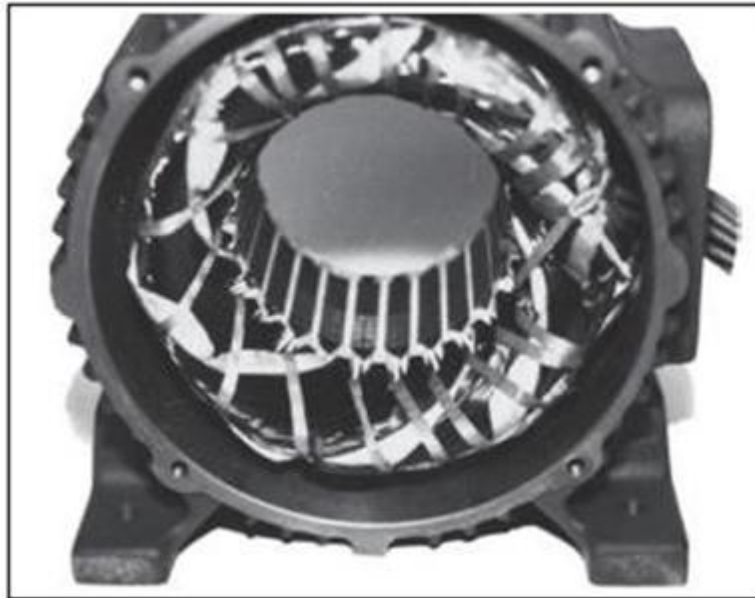
## 2.2. Motores

### 2.2.1. Características construtivas do motor de indução

O princípio de funcionamento de uma máquina de indução é, como o próprio nome já sugere, a indução de tensão e corrente que ocorre entre seus enrolamentos. Ou seja, a máquina de indução se baseia nas teorias físicas relacionadas à indução eletromagnética, utilizando principalmente os conceitos do motor elétrico de indução, cuja patente pertence à Nikola Tesla (licenciadas pela Westinghouse Electric em 1888). Mesmo sendo possível usar uma máquina de indução como motor ou como gerador, e em algumas aplicações até como frenagem, a utilidade como motor apresenta maiores

vantagens em relação às outras aplicações. Por esse motivo, é muito comum as máquinas de indução serem denominadas simplesmente como motor de indução.

O motor de indução trifásico é dividido em duas partes principais: a parte fixa, o estator, e a parte móvel, o rotor. Semelhante a uma máquina síncrona, o estator do motor de indução apresenta as mesmas características físicas de construção. Ou seja, o estator é composto por três enrolamentos dispostos à  $120^\circ$  mecânicos, e recebe uma alimentação CA trifásica (tensões defasadas de  $120^\circ$ ). Os enrolamentos trifásicos do estator, que podem ser ligados em delta ou em estrela, são enrolados nas ranhuras do estator, o qual é constituído pelo empilhamento de laminações de aço, finas e altamente permeáveis, dentro de uma estrutura de aço ou ferro fundido. O fluxo magnético produzido nos enrolamentos do estator, e que atravessa o entreferro do rotor, é girante e com a sua velocidade proporcional à frequência da tensão de alimentação.



*Figura 13 – Estator de um motor de indução típico (Fonte: CHAPMAN, 2013)*

Como os enrolamentos do estator são excitados com correntes defasadas, cada enrolamento gera um campo magnético com valor proporcional à magnitude da corrente que está alimentando o estator. Além disso, a direção do fluxo também muda a cada instante da corrente. Na figura 14 a seguir é possível analisar como se comporta o campo girante do estator.

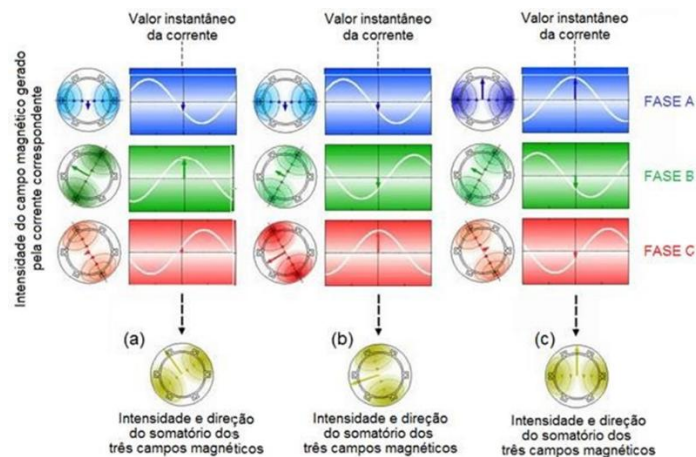


Figura 14 – Campo girante no estator em diferentes instantes (Fonte: LISBOA KNUPPE, L.; HENRIQUE SEFRIN, L., *Campo Girante Trifásico*, 2013)

Ao analisar a Figura 14(a), é possível observar que a fase da corrente “b” está no pico de sua amplitude positiva, enquanto as fases das correntes “a” e “c” estão com uma amplitude pequena, se comparada com a fase “b”. Como a intensidade e direção do campo resultante é o somatório vetorial das 3 fases, para o instante da Figura 14(a) a amplitude da fase “b” é quem estabelece a direção da resultante, uma vez que nesse instante sua magnitude é superior em relação às demais fases. A mesma lógica se mantém para os demais instantes, Figura 14(b) e 14(c), onde as demais fases ditam as novas direções do campo magnético resultante. É importante salientar que o módulo do vetor do campo magnético se mantém constante, apenas a sua direção é quem varia ao longo do tempo, o que garante a sua característica de campo girante.

É esse fluxo girante no estator quem induzirá tensão nos enrolamentos do rotor, e, por estarem curto-circuitados, induzirá também corrente alternada. Desse modo, o próprio campo girante do estator induz tensão nos enrolamentos do rotor, o qual não é alimentado diretamente, ou seja, a energização do rotor ocorre apenas por indução. Já para o rotor existem dois tipos diferentes de construção: rotor gaiola de esquilo e rotor bobinado.

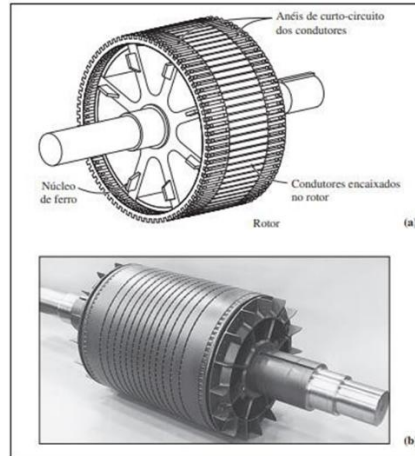


Figura 15 – Desenho esquemático do rotor gaiola de esquilo (a) e um modelo real típico (b). (Fonte: CHAPMAN, 2013)

O rotor gaiola de esquilo é composto por uma série de barras de material condutor, curto-circuitadas por anéis metálicos nas suas extremidades, e que estão localizadas em volta do conjunto de chapas do rotor. Para ajudar na indução eletromagnética, o núcleo do rotor é composto por laminas de ferro isoladas uma das outras, o que garante que a perda por correntes parasitas sejam minimizadas. Analisando isoladamente apenas as barras com os anéis metálicos, o nome rotor gaiola de esquilo é bem apropriado, pois, como lembra Chapman (2013), “[...] se os condutores fossem examinados isoladamente, seriam semelhantes àquelas rodas nas quais os esquilos ou os hamsters correm fazendo exercício.”.

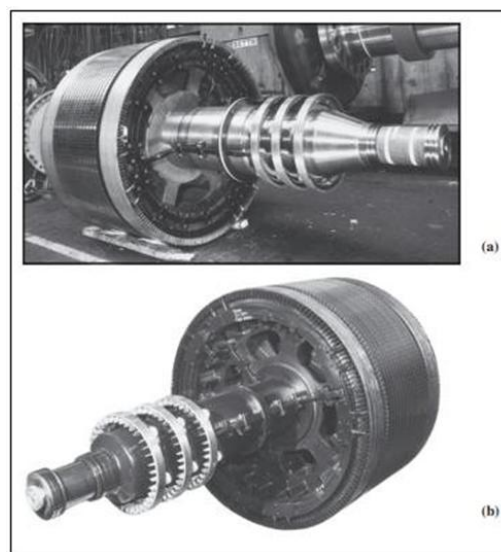


Figura 16 – Modelos reais de rotores bobinados típicos de motores de indução.

Já em relação ao rotor bobinado, o rotor é envolvido por um conjunto de enrolamentos trifásicos isolados que são semelhantes aos enrolamentos do estator. Os enrolamentos de cada fase do rotor, os quais são ligados em Y, são conduzidos para o exterior por meio de três anéis deslizantes montados sobre o eixo do rotor. Os enrolamentos do rotor não tem ligação a nenhuma fonte de alimentação externa, e, por meio das escovas que se apoiam nos anéis deslizantes, os enrolamentos ficam curto-circuitados. Por conta dessa configuração, a medição da corrente do rotor fica mais fácil se comparada com o rotor gaiola de esquilo, uma vez que o acesso às escovas facilita essa medição, além da facilidade de inserção de resistência extra no circuito do rotor (CHAPMAN, 2013).

### 2.2.2. Rotor do motor

Para uma melhor explicação sobre a obtenção de movimento do rotor em um motor de indução, será adotado como exemplo um rotor gaiola de esquilo imerso em um estator alimentado por um conjunto trifásico de tensão alternada.

A alimentação trifásica acaba por gerar, nos enrolamentos do estator, uma corrente alternada, a qual produz um campo magnético girante. As três correntes alternadas senoidais, com a mesma amplitude e defasadas de  $120^\circ$ , circulando por três bobinas fixas, cujos eixos magnéticos também distam de  $120^\circ$  entre si, acabam por produzir um campo magnético girante de intensidade constante igual à  $B_s$ . A velocidade do campo girante  $B_s$ , também conhecida como velocidade síncrona ( $n_s$ ), depende da frequência de alimentação da rede elétrica, e seu valor, em RPM, é dado pela equação 1.

$$n_s = \frac{120 \times f_{se}}{p} \quad (2.1)$$

Onde:

$f_{se}$  = frequência (Hz) da tensão de alimentação do estator;

$p$  = número de polos da máquina.

Para converter a velocidade síncrona de rotações por minuto para radianos por segundos (rad/s), basta utilizar a expressão 2 a seguir.

$$\omega_s = \frac{n_m \times 2\pi}{60} \quad (2.2)$$

Uma vez em que o campo magnético girante  $B_s$  passa através das barras condutoras do rotor, pela lei de Faraday ocorre uma tensão induzida nas barras do rotor por conta da variação do fluxo magnético. A tensão induzida  $E_{IND}$  em uma dada barra do rotor é dada pela equação 3.

$$E_{IND} = (V \times B) \cdot l \quad (2.3)$$

Onde:

$V$  = velocidade da barra em relação ao campo magnético girante;

$B$  = vetor densidade de fluxo magnético;

$l$  = comprimento do condutor por onde passa o campo magnético  $B$ .

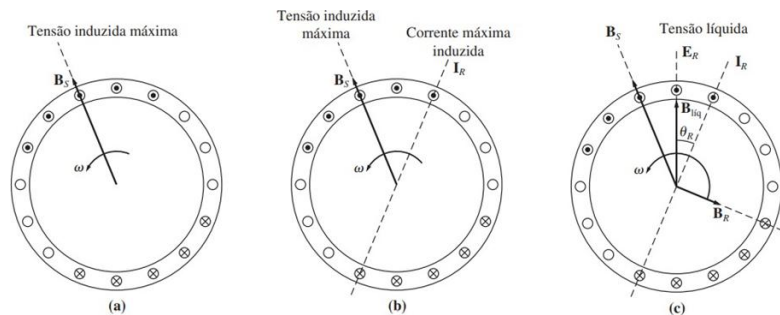


Figura 17 – Produção de conjugado induzido em um motor de indução rotor gaiola de esquilo (Fonte: CHAPMAN, 2013)

### 2.2.3. Escorregamento

Por conta da tensão induzida nas barras do rotor ter uma forte dependência da relação entre velocidade do rotor e os campos magnéticos, é mais didático falar em velocidade relativa para descrever o comportamento de um motor de indução. Para descrever o movimento relativo do rotor e dos campos magnéticos, é utilizado o termo velocidade de escorregamento ( $V_s$ ), expresso pela diferença entre a velocidade síncrona  $n_s$  e a velocidade do eixo do rotor  $n_r$ .

$$V_S = n_s - n_r \quad (2.4)$$

Da equação 4 ainda é possível definir um outro termo relacionado com a velocidade relativa: o escorregamento ( $s$ ). Definido como sendo a velocidade de escorregamento dividido pela velocidade síncrona, o escorregamento é a velocidade relativa entre o campo girante do estator e a velocidade do rotor, e é expressa em percentagem.

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2.5)$$

O escorregamento também pode ser expresso em termos da velocidade angular (radianos por segundo) como:

$$S = \frac{\omega_s - n\omega_r}{n\omega_s} \quad (2.6)$$

Por meio das expressões anteriores, a velocidade mecânica do eixo do rotor  $n_r$  também pode ser expressa em termos de velocidade síncrona e de escorregamento. Resolvendo as equações (5) e (6) em relação à velocidade mecânica, obtém-se:

$$n_r = (1 - s) \cdot n_s \quad (2.7)$$

ou

$$\omega_r = (1 - s) \cdot \omega_s \quad (2.8)$$

Essas equações da velocidade mecânica do rotor em relação ao escorregamento serão úteis posteriormente, quando forem deduzidas as relações de conjugado e potência do motor de indução.

Uma vez que a velocidade síncrona  $n_s$  depende da frequência da tensão de alimentação do estator (equação 1), uma grande vantagem do motor de indução é o controle da velocidade pela frequência da alimentação do estator. Uma vez em que o campo magnético girante  $B_s$  é produzido pelo arranjo trifásico de ondas senoidais, a frequência do arranjo interfere, proporcionalmente, na velocidade do campo  $B_s$ . Como o rotor sempre tenta alcançar o campo magnético  $B_s$ , a velocidade do rotor também é proporcional à frequência da alimentação AC. Assim, usando um conversor de

frequência, pode-se controlar a velocidade do motor de indução com muita facilidade (CHAPMAN, 2013).

#### 2.2.4. Característica torque x velocidade do MIT

Como em todo motor, realizar a análise do comportamento da velocidade em relação ao torque é de extrema importância para que se possa obter um melhor aproveitamento da máquina. Há certas aplicações onde a velocidade é mais relevante do que o torque proporcionado pelo motor, e em outras o contrário. Por conta disso, através do circuito elétrico equivalente do MIT, é possível analisar as características de operação do motor em relação ao seu torque e velocidade.

A curva característica de conjugado versus velocidade, ou conjugado versus escorregamento, pode ser representada como ilustrada na Figura 19 a seguir.

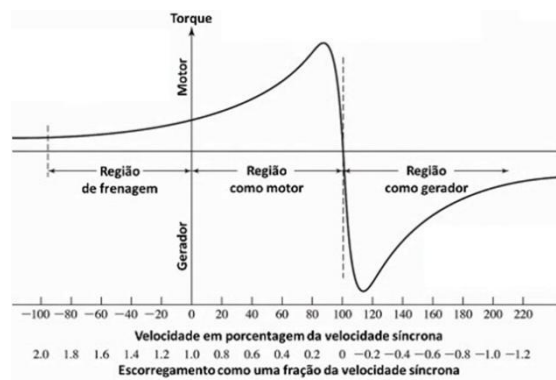


Figura 18 – Curva característica de conjugado versus escorregamento de uma máquina de indução, mostrando as regiões de frenagem, motor e gerador. (Fonte: FITZGERALD, KINGSLEY JR, UMANS, 2014)

É interessante analisar que, dependendo da velocidade, a máquina de indução pode trabalhar em 3 faixas de operação (região de frenagem, de motor e de gerador).

Na função como gerador, a velocidade do rotor da máquina de indução é maior do que a velocidade síncrona, ou seja, o sentido do conjugado induzido inverte-se e a máquina opera como um gerador, convertendo potência mecânica em elétrica. O uso das máquinas de indução como geradores não é muito usual por conta do seu baixo rendimento.

No caso da região de frenagem, situação na qual a velocidade do rotor da máquina de indução gira em sentido oposto ao sentido dos campos magnéticos, o

torque induzido na máquina reduzirá a máquina abruptamente, forçando-a a girar no sentido oposto. A comutação de duas fases do estator faz com que ocorra uma inversão do sentido de rotação do campo magnético na máquina.

O torque varia inversamente com o escorregamento do motor. Na Figura 19 é possível observar essas duas características do torque, região linear e inversa, quando a máquina de indução atua como motor.

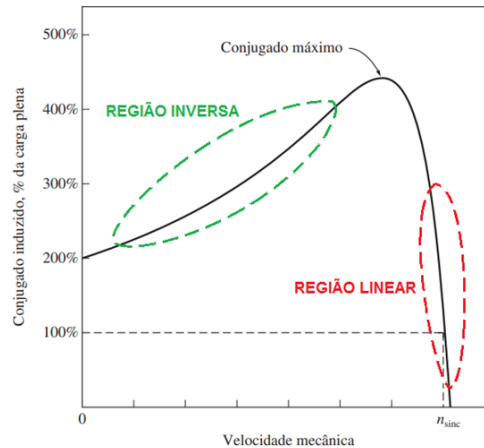


Figura 19 – Região inversa e linear da operação de uma máquina de indução como motor. (Fonte: CHAPMAN, 2013)

### 2.2.5. Conjugado de carga

Segundo Mamede Filho (2001), “Os motores elétricos quando ligados apresentam um esforço que lhes permite girar o seu eixo. A este esforço dá-se o nome de conjugado motor. Já a carga acoplada reage a este esforço negativamente, ao que se dá o nome de conjugado de carga ou conjugado resistente”. Dessa forma, durante a partida do motor elétrico, para que a carga acoplada ao eixo do rotor entre em movimento, o conjugado motor necessariamente tem que ser maior que o conjugado resistente. A expressão 9 a seguir apresenta uma equação genérica para o conjugado de carga.

$$C_c = C_i + \alpha \cdot (\omega n m) \beta \quad (2.9)$$

Onde:

$C_c$  = conjugado da carga, cuja unidade pode ser expressa em  $\text{kgf}\cdot\text{m}$  ou  $\text{N}\cdot\text{m}$ ;

$C_i$  = conjugado da carga em repouso ou também conhecido por conjugado inercial, ou seja, no instante da partida. Sua unidade é expressa em kgf.m ou N.m. Tal conjugado é característico do próprio motor, por isso é determinado pelos gráficos dos conjugados de carga disponíveis nos catálogos dos próprios fabricantes das máquinas;

$\omega_{nm}$  = velocidade angular instantânea do motor, em Hz, levando em consideração que a carga está solidária ao eixo do motor;

$\alpha$  = constante referente às características da carga;

$\beta$  = constante referente à natureza da carga (se a máquina é uma bomba, talha, exaustor etc.).

Além da expressão 9, o conjugado da carga também pode ser obtido conhecendo-se os valores da velocidade da máquina ( $\omega_m$ ) e a potência consumida pela carga ( $P_{carga}$ ).

$$T_{carga} = \frac{P_{carga}}{\omega_m} \quad (2.10)$$

### 2.3. Ventilação exaustora

A ventilação local exaustora (VE) é realizada de forma mecânica e consiste em remover os contaminantes geradas pelo processo no próprio local em que são produzidos, evitando que estes se dispersem no ambiente. Para realizar a extração do contaminante a ventilação local exaustora atua capturando os poluentes por meio de uma corrente de ar com velocidade adequada (velocidade de captura), criada por dispositivos especiais chamados captores (COSTA, 2005).

Oliveira (2008) destaca ainda que ventilação local exaustora tem como principal objetivo a proteção da saúde do trabalhador, dado que ao captar os poluentes diretamente na fonte geradora evita que eles se dispersem no ar e atinjam a zona de respiração do trabalhador.

Mesquita, Guimarães e Nefussi (1988), apontam como principais componentes de um sistema de ventilação local exaustora:

- 1) Captor;
- 2) Sistema de dutos;

- 3) Ventilador;
- 4) Equipamento de controle de poluição do ar.

Conforme Goodfellow e Tahti (2001), os sistemas de ventilação local podem ser fabricados e utilizados de forma fixa, flexível ou móvel. Sistemas fixos, como o da Figura 21, são aqueles onde não é possível realizar o movimento de tubulações ou de outros elementos do sistema, exceto a abertura e fechamento das tampas e portas.



Figura 20 – Sistema fixo com captor de fenda lateral (Fonte: Macintyre, 1990)

Sistemas flexíveis são aqueles que utilizam ligações ajustáveis para interligar os captores ao sistema de dutos, de modo que abertura de captação pode ser colocada em diferentes posições dentro de uma área limitada, tal sistema é exemplificado na Figura 22A. Já em sistemas móveis, a captação é realizada em um equipamento portátil como o da Figura 22B, dessa forma, os captores de gases podem ser alocados em qualquer lugar dentro de um ambiente de trabalho (GOODFELLOW; TAHTI, 2001).

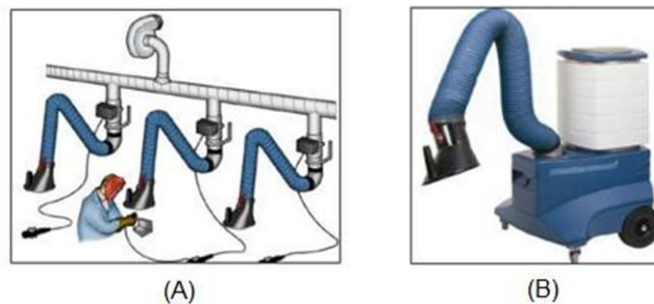


Figura 21 – Ilustração esquemática de um sistema de captação de fumos central (A) e unidade móvel de extração e filtragem de fumos e gases (B) (Fonte: Nederman, 2014).

### 2.3.1. Captor

Dispositivo instalado junto à fonte geradora dos poluentes, responsável pela captação do ar que contém o contaminante, no qual, pela diferença de pressões entre o ar ambiente e o existente no captor, estabelece uma corrente de ar para o seu interior (MACINTYRE, 1990).

Segundo Lisboa (2007), os captores podem ter uma grande variedade de configurações, sendo divididos em dois grandes grupos: captores enclausurantes, ou seja, aqueles que envolvem a fonte poluidora de modo que a emissão dos poluentes ocorre dentro do captor e captores externos, caracterizados por estarem posicionados de forma adjacente a fonte de emissão. Esse tipo de captor deve gerar, na zona de emissão, uma corrente de ar com velocidade capaz de captar e conduzir os poluentes.

Assunção (1989) ressalta que para selecionar o captor ideal deve-se levar em conta a fonte poluidora, a restrição de espaço e as condições operacionais, visando não gerar dificuldades na operação e movimentação de materiais, pessoas e equipamentos. Além disso, é necessário selecionar um captor que apresenta menor perda de carga e que necessite de menor vazão de captação, visto que tais fatores são importantes sob o ponto de vista de custo operacional e custo do sistema.

Costa (2005) afirma que as partículas de contaminante, de acordo com sua origem e grau de toxicidade, deverão ser induzidas a se deslocar para o captor com uma determinada velocidade, denominada velocidade de captura ( $V_c$ ). Em outras palavras, a velocidade  $V_c$  corresponde a velocidade do ar no ponto em que se encontram as partículas, capaz de impor o escoamento desejado.

De acordo com Macintyre (1990) a velocidade de captura, decresce em relação à boca do captor uma vez que este é instalado a certa distância da fonte geradora dos poluentes. Em casos de captores com boca circulares sem flanges (Figura 23A), nota-se que há uma captação de ar que fica para trás da boca, esse fenômeno é evitado se na boca do captor possuir flanges ou abas laterais (Figura 23B).

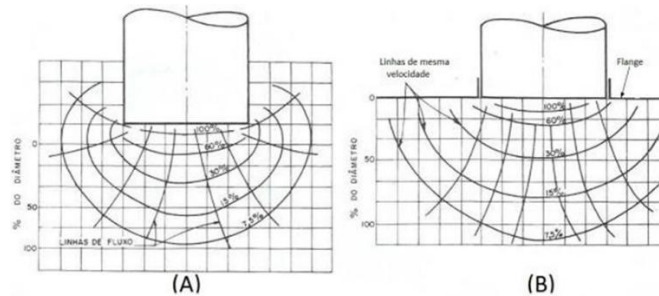


Figura 22 – Contornos de velocidades e as linhas de fluxo para captores de abertura circular (A) sem e (B) com flange (Fonte: Adaptado de Macintyre 1990)

Para realizar um projeto de um sistema de exaustão, é necessário inicialmente determinar a velocidade de captura adequada, tendo em vista que a partir desse valor e do tipo de captor é que se dará continuidade no dimensionamento da instalação. (MACINTYRE, 1990).

A velocidade de captura ( $V_c$ ) depende do peso específico real, das dimensões e das condições de geração do contaminante, informações necessárias para determinar um deslocamento inicial que pode dificultar ou facilitar sua captura. Por isso, ao projetar o captor, deve-se considerar o movimento inicial das partículas ou do deslocamento do ar na região de captação (COSTA, 2005).

### 2.3.2. Sistema de dutos

Equipamentos responsáveis por transportar o ar contaminado até a entrada do ventilador e deste ao exterior, ou, aos equipamentos de controle de poluição (MACINTYRE, 1990).

Costa (2005) destaca que os dutos do sistema de ventilação local exaustora, sempre que possível devem possuir seção circular, para evitar que ocorra estagnação dos contaminantes em arestas ou zonas de velocidade reduzida. O material utilizado nos dutos normalmente é chapa de aço, soldada, ou chapa de aço galvanizada, rebitada, para trabalhar abaixo de 200°C. Além disso, os dutos devem possuir um apoio ou sustentação a cada distância equivalente a 20-30 vezes o seu diâmetro e devem ser posicionados afastados no mínimo 20 cm de paredes e teto, para possibilitar sua manutenção.

Quando um fluido escoar ao longo de uma tubulação, ocorrem distorções no escoamento causadas pelo contato entre o fluido e a superfície do tubo. Essas influências promovem determinadas perdas de pressão no decorrer da instalação, que, na mecânica dos fluidos, são denominadas perdas de cargas. Desse modo, quanto maior for a rugosidade da parede da tubulação ou mais viscoso for o fluido, maior será a perda de energia (CLEZAR; NOGUEIRA, 2009).

Macintyre (1990) ressalta que ao longo de um sistema de dutos existem elementos que contribuem para o aumento da perda de carga, em razão do atrito e turbulências geradas. Sendo elas: curvas, cotovelos, joelhos, alargamento graduais ou expansões, entre outros.

A velocidade do ar nos dutos deve ser suficiente para manter as partículas do contaminante em suspensão e transportá-las ao mesmo tempo. Porém, segundo Lisboa (2007), a velocidade do ar na tubulação influencia também na perda de carga, logo, na energia necessária para o fluido percorrer o sistema. Quanto maior a velocidade, maior será a perda de carga e conseqüentemente, maior a potência requerida do ventilador. Portanto, é mais econômico que a velocidade fique acima, mas próxima da velocidade mínima de transporte necessário para cada caso específico, de modo que atenda ambos os objetivos.

Em sistemas com várias ramificações é necessário fornecer um meio de distribuir adequadamente o fluxo de ar entre elas, desse modo a rede de dutos deve ser balanceada garantindo que a vazão seja distribuída de acordo com a perda de pressão das partes individuais do sistema. Caso contrário o sistema vai se auto balancear, visto que só pode existir uma pressão estática em uma mesma junção e dessa forma pode vir a não atender mais as vazões e velocidades projetadas (LISBOA, 2007).

O balanceamento estático consiste em atingir equilíbrio no ponto de junção entre dois ramais, de forma que em cada um deles se tenha as vazões requeridas. Como exemplificado na Figura 24.

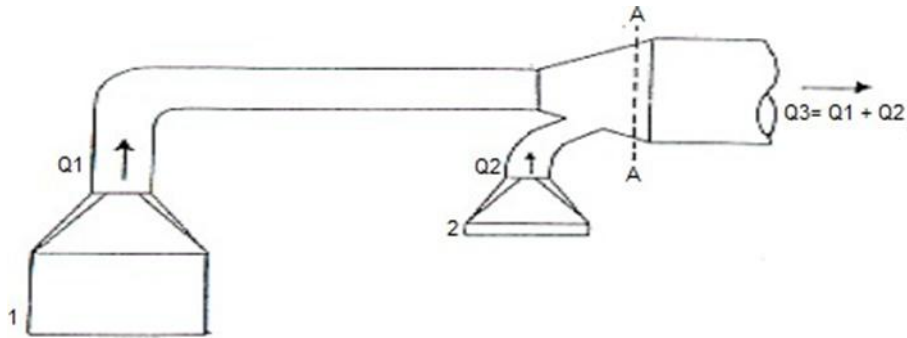


Figura 23 – Balanceamento de dutos (Fonte: Lisboa, 2007)

Desta forma, conforme apresentado na Equação 1, a pressão estática na seção AA é igual a pressão cinética do fluido mais as perdas de carga na ramificação 1, que por sua vez, deve ser igual a pressão cinética do fluido mais as perdas de carga na ramificação 2 (LISBOA, 2007).

$$P_{EAA} = P_{c1} + \Delta P_{1A} = P_{c2} + \Delta P_{2A} \quad (2.11)$$

Clezar e Nogueira (2009) afirmam que um sistema estará balanceado quando a diferença percentual entre as pressões estáticas das ramificações for menor que 5%.

### 2.3.3. Ventilador

Os ventiladores são turbomáquinas geratrizes ou operatrizes, também designadas como turbodinâmicas, que se destinam a produzir o deslocamento de gases (MACINTYRE, 1990). Segundo Mesquita, Guimarães, Nefussi (1988), o objetivo geral deste equipamento é mover uma dada quantidade de ar por um sistema conectado a ele, assim o ventilador deve gerar uma pressão estática suficiente para vencer as perdas do sistema e uma pressão cinemática para manter o ar em movimento.

Para Clezar e Nogueira (2009), os ventiladores são usualmente classificados de acordo com a direção de movimentação do fluxo através do rotor. Dessa forma, têm-se os ventiladores centrífugos em que o escoamento é substancialmente radial utilizados para a movimentação de ar numa ampla faixa de pressões e vazões, ao passo que, nos ventiladores axiais o fluxo de ar é praticamente paralelo ao eixo de modo que estes

são empregados em aplicações de baixa e média pressão. Na ventilação local exaustora são mais utilizados os ventiladores centrífugos, sendo os principais: o de pás radiais, de pás para trás e de pás curvadas para frente (LISBOA, 2007).

Costa (2005) afirma que, para evitar sobrecarga no motor de acionamento dos ventiladores decorrente do aumento da abertura equivalente dos circuitos de ventilação local exaustora, que se caracterizam por variar muito sua perda de carga, é indicada a utilização de ventiladores centrífugos com as pás voltadas para trás (*limit load*) ou eventualmente os de pás radiais. Esse tipo de ventilador apresenta uma característica favorável para tal serviço, já que, além de produzir grandes diferenças de pressão, não sofrem um aumento sensível da potência consumida em função das perdas de carga do sistema.

#### 2.3.4. Equipamento de controle de poluição do ar

Os poluentes exauridos do ambiente de trabalho, uma vez captados e conduzidos em dutos pela ação dos ventiladores, devem ser coletados, eliminados do ar, recolhidos e tratados de modo com que o ar purificado possa ser liberado na atmosfera. A coleta do poluente pode ser feita por uma série de equipamentos projetados especificamente. De uma forma geral, a escolha depende de fatores relativos às propriedades do contaminante, aspectos econômicos e práticos. Podem ser câmaras gravitacionais, filtro de mangas, precipitadores térmicos, centrífugos ou ciclones (MESQUITA; GUIMARÃES; NEFUSSI, 1988).

Quando se trata de contaminantes sólidos de granulometria conhecida, é possível escolher o tipo de coletor através da tabela 1 conforme Costa (2005), que fornece o tamanho mínimo das partículas a serem filtradas.

Tabela 1 – Granulometria das partículas coletadas por cada tipo de coletor. (Fonte: Adaptada de Costa, 2005)

Tipo de coletor	Tamanho mínimo da partícula coletada ( $\mu\text{m}$ )
Câmaras de gravidade	200
Câmaras inerciais	50 a 150
Ciclones grandes	40 a 60
Ciclones pequenos	20 a 30

Rotociclones	15 a 30
Coletores húmidos	0,5 a 2
Filtros de tecidos	0,5
Filtros eletrostáticos	0,0001 a 1

Tais equipamentos devem ser considerados no cálculo da pressão exigida pelo sistema, uma vez que representam pontos de perda de carga (LISBOA, 2007).

#### 2.4. Redundância dos equipamentos

Tem-se observado que empresas dos diversos segmentos do mercado estão sendo exigidas a inovarem em seus processos e alcançarem níveis ótimos de qualidade e produtividade para permanecerem competitivas. No contexto atual, as pressões mercadológicas impostas por esse cenário de expressiva competitividade implicam a intolerância a perdas decorrentes de falhas em equipamentos, diante do comprometimento que essas podem representar em termos de lucratividade para as organizações. Por conta disso, exige-se que a manutenção seja vista como uma função estratégica das empresas (MENDES, 2011), que pode contribuir para maximizar a disponibilidade dos equipamentos, minimizar custos operacionais e aumentar a produtividade e segurança (KARDEC; RIBEIRO, 2002).

O termo **redundância** é utilizado quando mais de um equipamento estão disponíveis para a realização de uma mesma função (MENDES, 2011), por isso sistemas que utilizam redundâncias se tornam mais confiáveis à medida que diminui a probabilidade de falha durante certo período de tempo. Esses sistemas são amplamente utilizados nas indústrias, nas quais processos de risco exigem altos níveis de confiabilidade. Por conta disso, tais sistemas são encontrados, por exemplo, em refinarias de petróleo, indústrias de aço, indústrias aeronáuticas e indústrias nucleares. Os tipos de redundância se diferenciam por características específicas dos sistemas de que fazem parte. Nesse sentido, os itens redundantes podem estar ativos ou em standby.

A redundância ativa é caracterizada por um sistema no qual todos os itens estão em operação e o sistema não deixa de funcionar quando um ou mais itens falham. A redundância ativa total é aquela em que o sistema falha somente quando todos os itens que o constituem falham. Para a redundância ativa parcial o número de equipamentos que pode falhar é inferior ao caso da redundância ativa total, já que, para o sistema continuar operando, mais de um item precisa estar funcionando. No caso da redundância ativa condicional, o funcionamento do sistema é condicionado pelo modo de falha de seus itens constituintes, ou seja, se dois ou mais itens falharem no mesmo modo de falha, o sistema para. Por outro lado, se a falha ocorrer de modo diferente entre os dois, o sistema continuará funcionando (SMITH, 2001).

No caso da redundância standby, são utilizados itens adicionais ou de reserva no sistema, sendo acionados apenas quando o item em operação e que apresenta a mesma função para de funcionar (SMITH, 2001). Para o funcionamento de tais sistemas, são necessários sensores responsáveis pela detecção de falhas e pela troca dos itens.

A Figura 25 mostra que para sistemas redundantes a confiabilidade é maior do que para sistemas sem redundância no início da vida útil, tendo um declínio abrupto em determinado momento. Além disso, percebe-se que quanto maior é o número de itens redundantes, maior é o período com elevadas confiabilidade (SMITH, 2001).

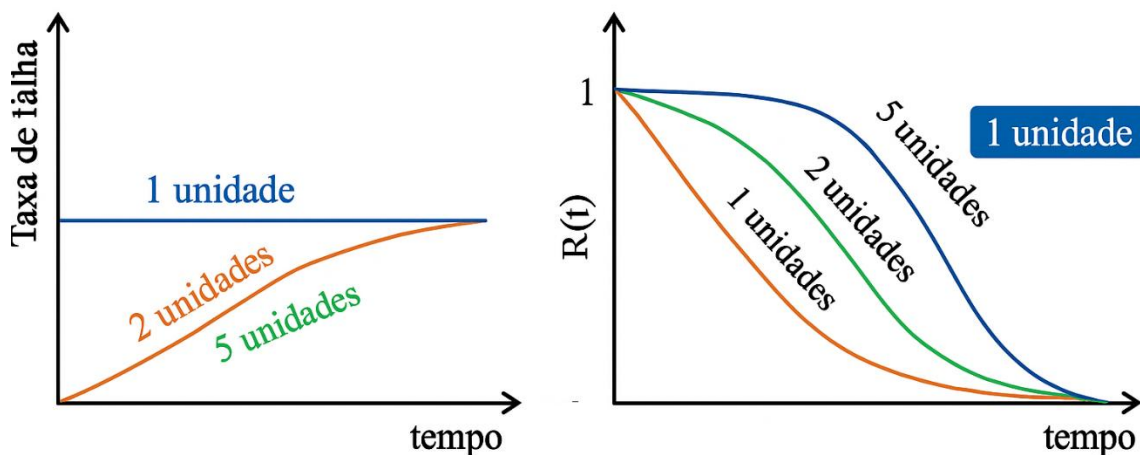


Figura 24 – Relação entre a quantidade de itens redundantes e a taxa de falhas e confiabilidade dos sistemas  
(Fonte: Smith, 2001)

Ao utilizar redundância em sistemas, pode-se observar uma melhora na confiabilidade, sendo essa maior para sistemas com redundância standby do que com redundância ativa. Isso se justifica pelo fato de que os itens que constituem o sistema standby operam por menos tempo, suas falhas são independentes (não causam ou aceleram a falha dos demais). Na Figura 26, essa comparação é evidenciada para o caso particular de taxas de falhas constantes (distribuição exponencial), sendo facilmente percebido que sistemas redundantes apresentam menor taxa de falha e maior confiabilidade do que sistemas sem redundância, e que a redundância em standby possui maior confiabilidade e menor taxa de falha na comparação com a redundância ativa (SMITH, 2001).

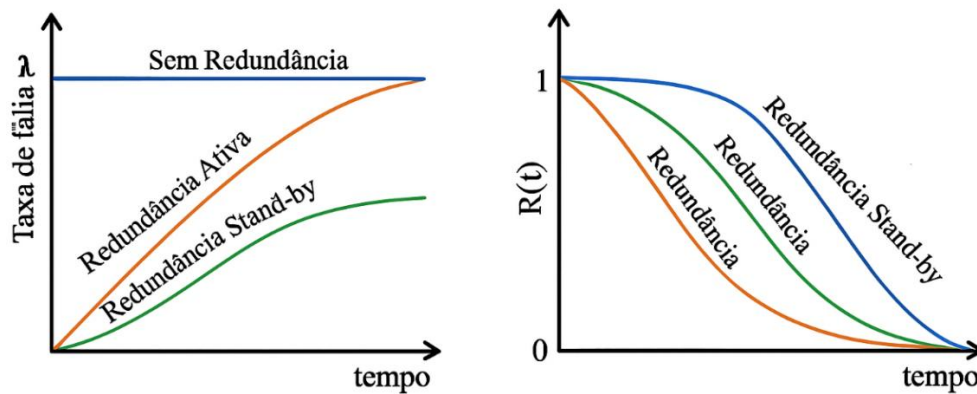


Figura 25 – Efeito do tipo de redundância empregada na taxa de falha e na confiabilidade do sistema (Fonte: Smith, 2001)

A forma pela qual os sistemas redundantes são monitorados também é importante ao se realizar estudos de confiabilidade. Nesses sistemas, quando não é possível monitorar continuamente, inspeções periódicas são necessárias para assegurar que o sistema esteja operando adequadamente e que o componente redundante esteja pronto para operar quando for solicitado. Essas inspeções, cujos intervalos são predeterminados, permitem detectar falhas escondidas em componentes e repará-las. Nesse sentido, deve-se encontrar o intervalo ótimo entre inspeções para maximizar a disponibilidade e a segurança e minimizar os custos (LAPA et al., 2006).

Inspeções frequentes aumentam a disponibilidade, mas também envolvem maiores custos relativos à manutenção preventiva. Por outro lado, longos períodos entre inspeções diminuem os custos de inspeção, mas aumentam os custos de manutenção corretiva, já que há intervalos de tempo maiores nos quais o sistema pode estar inoperante (GRAY, 1985; FLAMMINI et al., 2009).

### **CAPÍTULO III.**

## **3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA ACTUAL E LEVANTAMENTO DE CARGA**

### **3.1. O problema - Aumento da demanda de sucção dos fumos**

#### **3.1.1. Causa**

O sistema de exaustão tem como função principal garantir a remoção contínua e controlada dos gases provenientes do forno, mantendo a pressão interna ligeiramente negativa para evitar fugas de fumos para o ambiente. Quando há um aumento anormal na demanda de sucção, isto é, quando os ventiladores precisam trabalhar com maior esforço (maior velocidade ou pressão) para manter o mesmo nível de vácuo, isso indica que o sistema está a compensar entradas de ar falsas ou incrementos de volume de gases.

A seguir, detalham-se a principal causa desse fenómeno:

#### **3.1.1.1. Aumento do tamanho dos ânodos para atender o modelo AP3XLE**

A evolução para o modelo de célula eletrolítica AP3XLE implica em ânodos de maiores dimensões e maior área superficial exposta ao processo eletrolítico, com o objetivo de aumentar a eficiência de produção de alumínio e reduzir perdas energéticas.





Figura 27 – Localização da subestação 12 na área do Carbono da Mozal (Fonte: Google Maps, 2025)

O barramento principal alimenta os três transformadores de potência trifásicos de 31,5 MVA, 132/22KV, 50 Hz, que alimentam a rede elétrica de distribuição em anel de 22kV, no qual estão interligadas todas as subestações existentes na rede elétrica interna, sendo a subestação 9 uma delas que possui dois transformadores de 3.15 MVA, 22/3.3 kV.

A subestação número 12 da Mozal está localizada na área do Carbono, a referida área é responsável pela produção dos ânodos usados no processo de fundição do alumínio. Trata-se de uma subestação composta por dois transformadores iguais de 2MVA, 3.3/0.415 kV ligados em paralelo e alimentados pela subestação 9.

Tabela 2 – Dados dos equipamentos de referência (Fonte: Adaptado pelo Autor, 2025)

Equipamentos	Características
Transformadores	2 MVA, 3.3/0.415 kV, ONAN, WEG
Disjuntores	3200 A, 65 kA, 3P, 690 V, ACB, SIEMENS
Motores	355 kW, 1490 RPM, 400 V, FP = 0.85, WEG

### 3.1.2.1. Situação inicial de operação da subestação 12

A imagem abaixo representa a operação inicial da subestação 12 alimentada por duas entradas provenientes da subestação 9, configurada para garantir redundância e flexibilidade operacional.

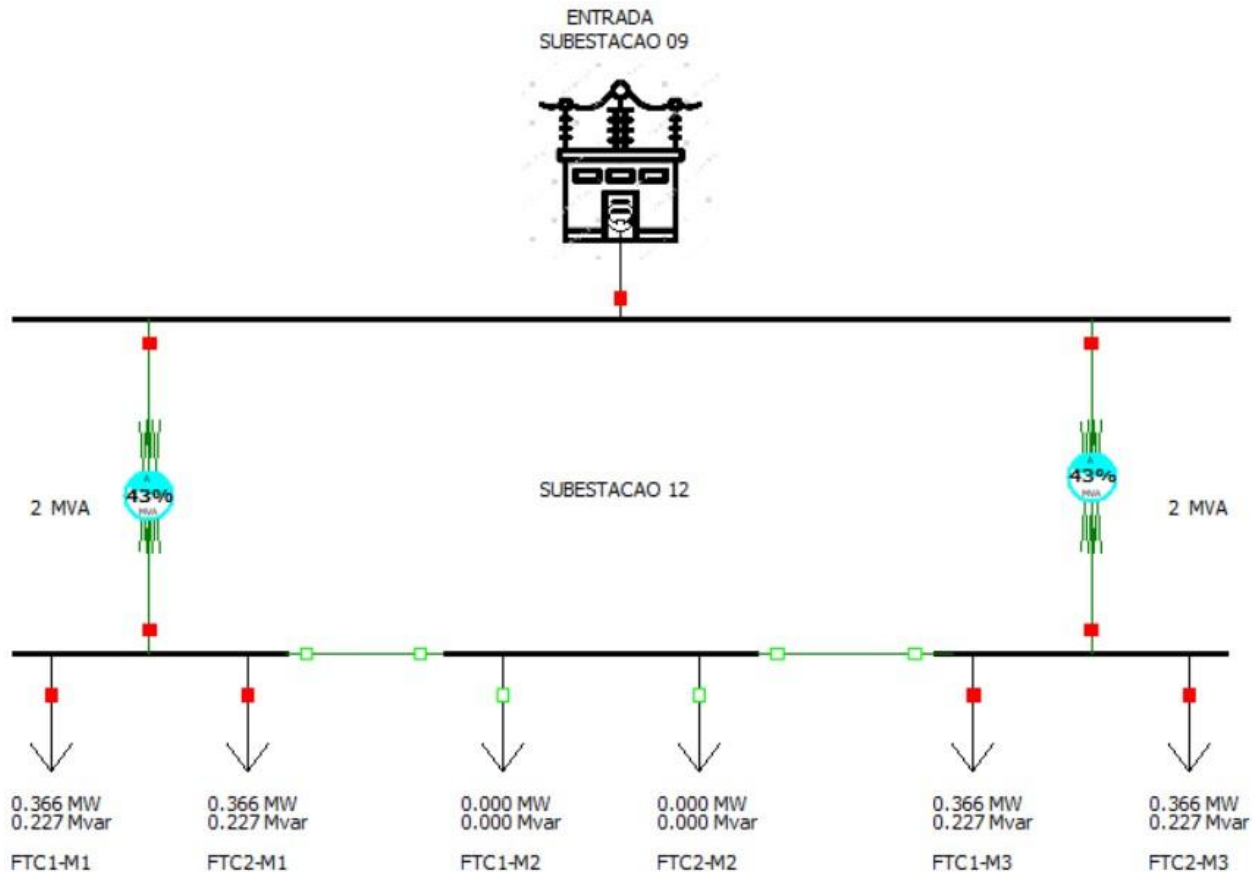


Figura 28 – Situação inicial de operação da subestação 12 (Fonte: PWS - Autor, 2025)

A subestação foi projectada para que o conjunto dos dois (2) transformadores obedeçam a redundância N-1, onde cada um destes transformadores alimenta os correspondentes dois (2) motores de cada centro de tratamento de fumos (FTC), totalizando quatro (4) motores em funcionamento no regime normal de operação da subestação e os restantes dois (2) motores em *standby*.

### 3.1.2.2. Situação actual de operação da subestação

Para atender a demanda da planta, actualmente não mais existem motores em *standby*, ou seja, os seis (6) motores estão operacionais permanentemente, como resultado o conjunto dos dois (2) transformadores deixaram de cumprir a redundância N-1 por causa do aumento da carga.

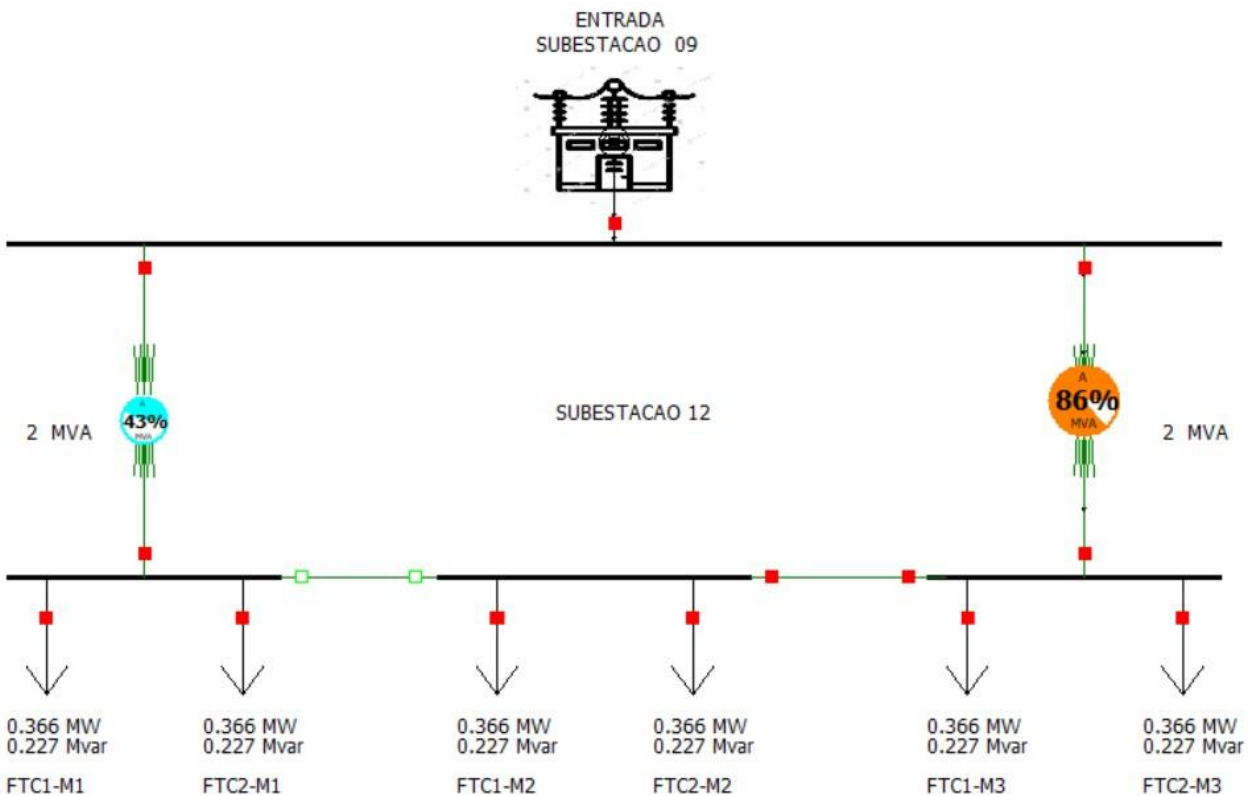


Figura 29 – Situação actual de operação da subestação (Fonte: PWS - Autor, 2025)

Como consequência, a ausência de um dos transformadores por falha ou manutenção impossibilita a alimentação de todos os motores através do restante um transformador, deixando assim a planta vulnerável e sujeita a riscos.

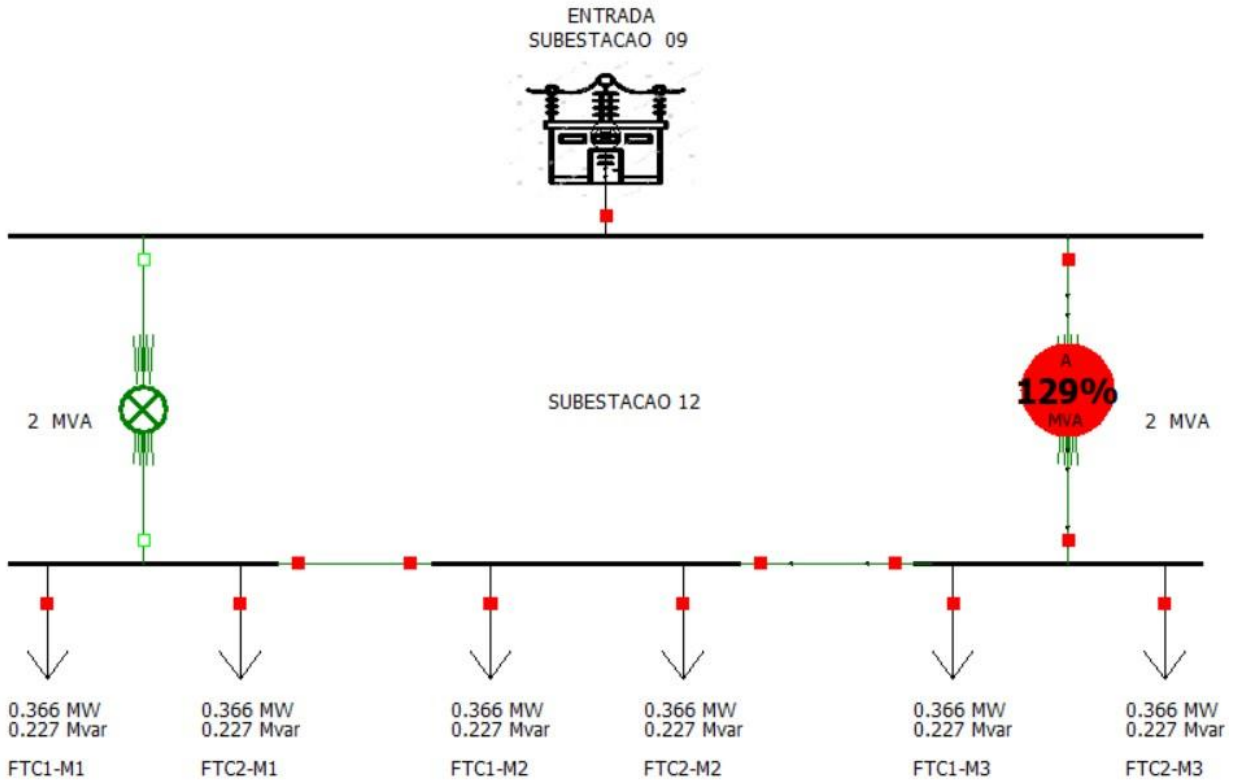


Figura 30 – Incapacidade de um transformador em alimentar todos os motores (Fonte: PWS - Autor, 2025)

### 3.1.2.3. Riscos associados a paragem do FTC

#### a) Interrupção da linha de produção:

A paragem dos fornos faz com que os ânodos em fase de cozedura não possam completar o ciclo térmico adequado, resultando em perda de produto e impossibilidade de fornecimento contínuo para as cubas eletrolíticas.

#### b) Perdas económicas significativas:

Estima-se que, por cada hora de paragem, sejam perdidos cerca de 20 ânodos, o que representa um prejuízo aproximado de 1.151.100,00 MZN por hora (considerando o custo de 57.555,00 MZN por ânodo). Esta perda não inclui ainda os custos associados à retomada do processo e impacta directamente as cubas eletrolíticas de fundição do

## CAPÍTULO IV.

### 4. PROPOSTA E ANÁLISE DE SOLUÇÕES

#### 4.1. Dimensionamento do transformador

A seguir apresento o estudo completo de dimensionamento do novo transformador da subestação abrigada de média tensão 3,3/0,415 kV, considerando o aumento da carga. O objetivo principal deste dimensionamento foi restaurar a redundância N-1 em relação aos transformadores, além do dimensionamento do transformador, realizei também a análise detalhada dos equipamentos complementares como disjuntores, barramento, cablagens e das características físicas relacionadas com o espaço.

A tabela a seguir apresenta os motores alimentados pelos transformadores:

Tabela 3– Valores relativos aos motores (Fonte: Autor, 2025)

Equipamento	Potência (kW)	Rendimento ( $\eta$ )	Fator de potência ( $\cos \varphi$ )	Potência aparente (kVA)
Motor 1-1	355	0.97	0.85	430.56
Motor 2-1	355	0.97	0.85	430.56
Motor 1-2	355	0.97	0.85	430.56
Motor 2-2	355	0.97	0.85	430.56
Motor 1-3	355	0.97	0.85	430.56
Motor 2-3	355	0.97	0.85	430.56

$$\text{Potência total: } S_{\text{total}} = 6 \cdot S = 6 \times 430.56 = 2583.36 \text{ kVA} \quad (4.1)$$

Assim, a potência aparente total da instalação é de 2.583 MVA.

A redundância N-1 estabelece que cada transformador deve ser capaz de alimentar toda a carga sozinho em caso de falha do outro.

Portanto, para restaurar a redundância, o transformador deverá ter uma potência nominal:

$$S_{\text{trafo}} \geq S_{\text{total}} \quad (4.2)$$

$$\text{Considerando margem de segurança de 15\%: } S_{\text{trafo}} = 1.15 \times 2.583 = 2.970 \text{ MVA} \quad (4.3)$$

Logo, é selecionado dois transformadores de 3 MVA – 3,3/0,415 kV, com ligação Dyn11, frequência de 50 Hz, resfriamento ONAN.

#### 4.1.1. Disjuntor

O disjuntor deve suportar a corrente nominal e o pico de curto-circuito no lado de baixa tensão.

A corrente de serviço no secundário do transformador é:

$$I_s = \frac{S_{\text{trafo}}}{\sqrt{3} \times VL} = \frac{3 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 0.415} = 4174 \text{ A} \quad (4.4)$$

A corrente nominal do disjuntor deverá ser igual ou superior a corrente nominal, devendo assumir um valor padronizado. Portanto, o disjuntor de baixa tensão deve ter corrente nominal  $\geq 4174$  A, com poder de interrupção de  $\geq 69.57$  kA (considerando corrente de curto-circuito calculada).

Assim, foi escolhido o disjuntor tripolar de 5000 A, 100 kA, curva de disparo ajustável, modelo Siemens 3WL.

Tabela 4 – Especificações técnicas do disjuntor (Fonte: Siemens, 2025)

Características	
Modelo	Siemens SENTRON 3WL1
Corrente nominal (In)	até 5000 A
Tensão de operação (Ue)	até 1000V AC
Capacidade de interrupção	100 kA
Número de polos:	3

#### 4.1.2. Barramento

O barramento servirá de ponto de ligação entre os transformadores e as cargas, assim sendo, com base na corrente nominal de 5000 A, iniciei o processo de seleção do barramento consultando o catálogo técnico da Legrand.

Com base nas tabelas de capacidade de corrente fornecidas pelo fabricante, selecionei o barramento de cobre com configuração de 2 barras por fase, cada uma com dimensões de 95 mm x 460 mm, totalizando uma secção efetiva de 43 700 mm<sup>2</sup> por fase e suportando correntes de curto-circuito até 100 kA durante 1 segundo.

Tabela 5 – Especificações técnicas do barramento (Fonte: Legrand, 2018)

Características		
Rated current	In [A]	5000
Overall dimension of the busbars	L x H [mm]	95x460
Rated operational voltage	Ue [V]	1000
Frequency	f [Hz]	50
Rated short-time current (1 s)	ICW [kA]rms	100

#### 4.1.3. Cabo alimentador

##### 4.1.3.1. Escolha da secção do cabo alimentador

Para a ligação do transformador ao quadro geral de baixa tensão (QGBT), a cablagem deve ser dimensionada para suportar a corrente nominal e a queda de tensão admissível.

Para este caso, foi escolhido o condutor de cobre e o método de isolamento por Cloreto de Polivinila (PVC). Com base na corrente de serviço calculada e considerando 8 condutores por fase, verificou-se na tabela (tabela que consta do anexo III) que a secção adequada para o cabo alimentação é de 500mm que suporta uma corrente máxima de 760A (IZ).

Tabela 6 – Especificações técnicas do condutor (Fonte: CBI, 2006)

Características		
Secção do condutor	mm <sup>2</sup>	500
Diâmetro do condutor	mm	27.5
Resistência	Ω/km	0.0510
Reactância	Ω/km	0.073
Capacitância	µF/km	2.350

#### 4.1.3.2. Protecção contra sobrecarga

##### Cálculo da corrente máxima admissível na canalização

A protecção das canalizações eléctricas contra sobrecargas é assegurada se as características dos aparelhos de protecção respeitarem simultaneamente as seguintes condições:

A corrente estipulada do dispositivo de protecção ( $I_n$ ) seja maior ou igual à corrente de serviço da canalização respectiva ( $I_s$ ) e menor ou igual que a corrente máxima admissível na canalização ( $I_Z$ ), (RTIEBT MOÇAMBIQUE).

$$I_s \leq I_n \leq I_Z \quad (4.5)$$

A corrente convencional de funcionamento do dispositivo de protecção ( $I_2$ ) seja menor ou igual que 1,45 a corrente máxima admissível na canalização ( $I_Z$ ).

$$I_2 \leq 1,45 I_Z \quad (4.5)$$

Tendo em conta a corrente nominal que é  $4174/8 = 522$  A assim, o calibre máximo da protecção será de 600 A, a secção do cabo é de 500 mm e a corrente máxima admissível será de 760 A de acordo com a tabela em anexo I.

##### 1ª condição:

$$I_s \leq I_n \leq I_Z$$

A intensidade nominal ( $I_n$ ) terá que ser maior ou igual a 522 A ( $I_s$ ) e menor ou igual 760 A:  $522 \leq 600 \leq 760$  A

##### 2ª condição:

$$I_2 \leq 1,45 \times I_Z$$

A corrente convencional de funcionamento ( $I_2$ ) do disjuntor de 600 A é de 870 A ( $1,45 \times I_n$ ). A 2ª condição está verificada já que:  $870 \leq 1,45 \times I_Z \Leftrightarrow 870 \leq 1102$

A condições são satisfeitas, o que quer dizer que a secção escolhida para o cabo é ideal.

#### 4.1.3.3. Cálculo de queda de tensão percentual do cabo

De acordo com Lima Filho (2011), a redução de tensão causada pela corrente elétrica nos condutores dos circuitos de uma instalação deve permanecer dentro de limites máximos específicos para não comprometer o desempenho dos equipamentos conectados a esses circuitos. É importante destacar que, quando a queda de tensão é significativa, os circuitos apresentam nos seus terminais uma tensão inferior ao valor nominal requerido.

$$\Delta U \% = \frac{1.06}{1900} * \gamma * L * I_s * \cos\phi \quad (4.6)$$

Onde:

$\Delta U \%$  é a queda de tensão em percentagem

$\gamma$  é a resistência do cabo por quilometro

L é o comprimento da canalização

$I_s$  é a corrente de serviço

$\cos\phi$  é o factor de potência

O valor da resistência do cabo por quilometro foi consultado na tabela que consta no anexo IV.

$$\Delta U \% = \frac{1.06}{1900} * 0.0366 * 6.97 * 522 * 0.85 = 0.063$$

$$\Delta U \% \leq 10\%$$

O valor da queda de tensão está dentro dos limites aceitáveis, portanto a secção escolhida do cabo é adequada.

#### 4.1.4. Dimensões do cubículo de transformação

Cada transformador de 3 MVA tem dimensões aproximadas de 2.5 m x 1.5 m x 2 m (CxLxA) e peso de 2.5 toneladas. É necessário garantir 1,2 m de espaço lateral para manutenção, 1.5 m frontal para acesso aos bornes, e 0,8 m traseiro para ventilação natural.

## 4.2. Dimensionamento do ventilador de exaustão

### 4.2.1. Dados de referência

Na operação de ventiladores em paralelo, isto é, quando as entradas e saídas dos ventiladores estão ligadas entre si, a pressão e vazão total se relaciona da seguinte forma:

- A pressão total de cada ventilador é a mesma, ou seja:  $P_T = P_1 = P_2 = P_3$
- A vazão total é igual a soma das vazões debitadas pelos ventiladores individuais, isto é:  $Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3$

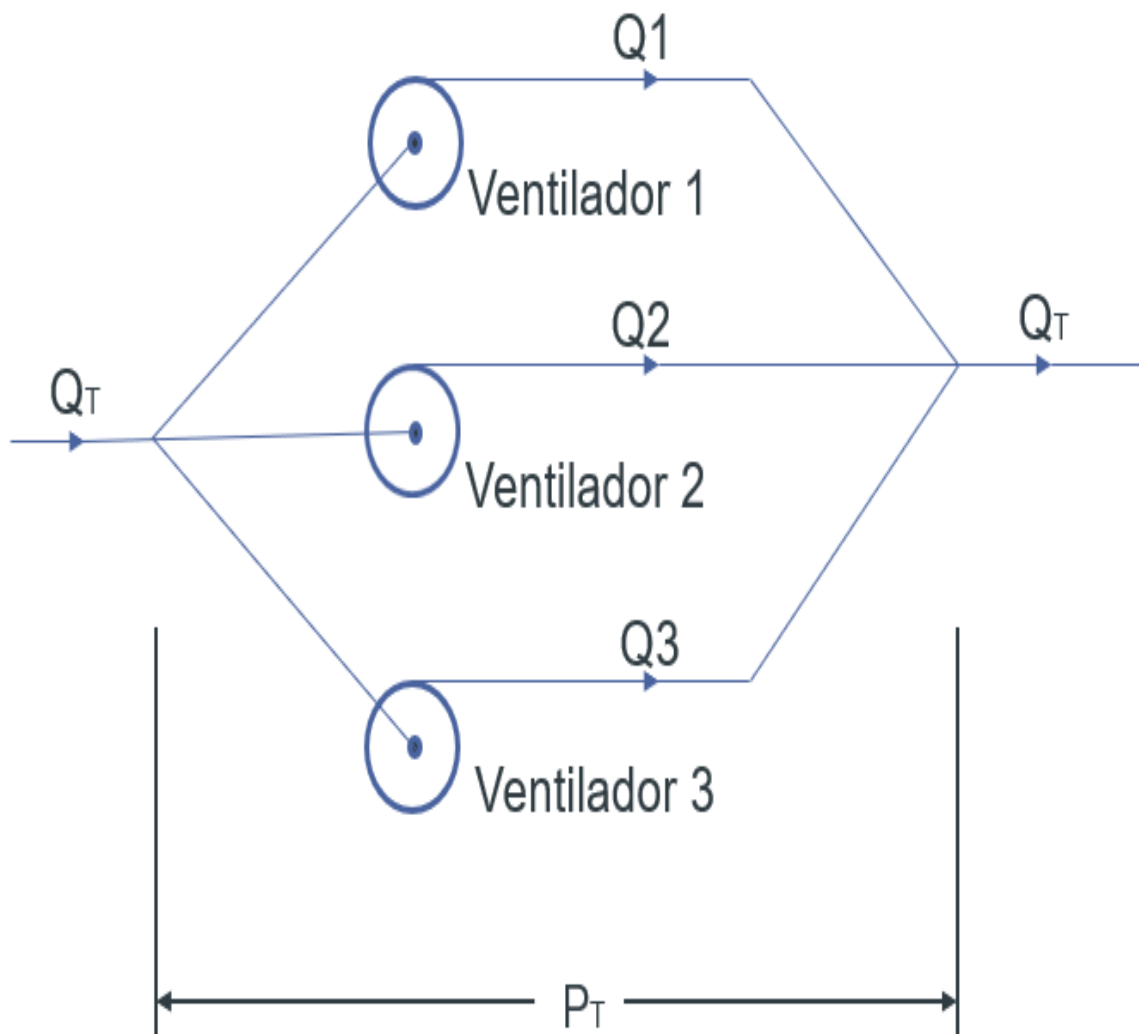


Figura 31- Ventiladores em paralelo (Fonte: Autor, 2025)

A tabela abaixo ilustra a especificações técnicas relacionadas ao actual ventilador que servirá de referência para a seleção do novo ventilador considerando nomeadamente os valores nominais de pressão, vazão e potência do motor.

Tabela 7 – Especificações do ventilador (Fonte: Ficha técnica – Rand Blower Fan, 2010)

Fabricante	Potência do motor (kW)	Vazão máxima (m <sup>3</sup> /s)	Pressão máxima (mm w.c.)	Velocidade (RPM)
RAND BLOWER	355	21.7	858	1490

#### 4.2.2. Cálculos aproximados

##### 4.2.2.1. Operação com 3 ventiladores

a) Pressão máxima (mm w.c.)

$$PT = P1 = P2 = P3 = 858 \text{ mm w.c.}$$

b) Vazão máxima (m<sup>3</sup>/s)

$$QT = Q1 + Q2 + Q3 = 21.7 + 21.7 + 21.7 = 65.1 \text{ m}^3/\text{s}$$

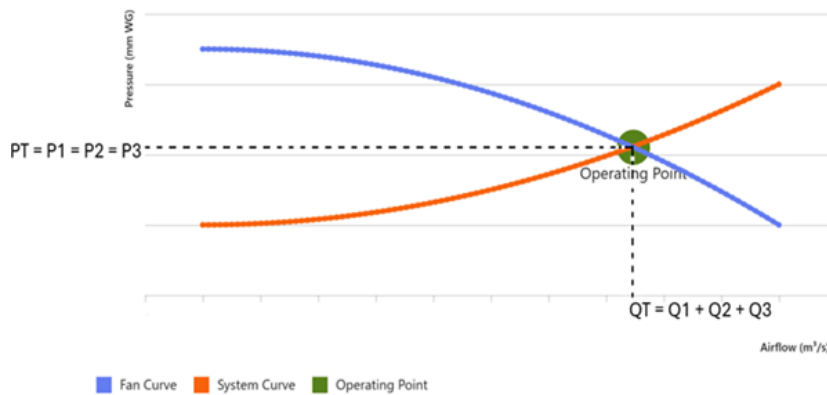


Figura 32– Operação com 3 ventiladores (Fonte: Autor, 2025)

- A curva azul representa a curva característica dos ventiladores (Fan Curve).

- A curva laranja representa a curva do sistema (System Curve).
- O ponto verde indica o ponto de operação, onde a soma das vazões dos três ventiladores atende à demanda do sistema com a pressão constante de 858 mm WG.

#### 4.2.2.2. Operação com 2 ventiladores

a) Pressão máxima (mm w.c.)

$$PT = P1 = P2 = P3 = 858 \text{ mm w.c.}$$

b) Vazão máxima (m<sup>3</sup>/s)

$$QT = 65.1 \text{ m}^3/\text{s} \Rightarrow Q1 = Q2 = 65.1 / 2 = 32.55 \text{ m}^3/\text{s}$$

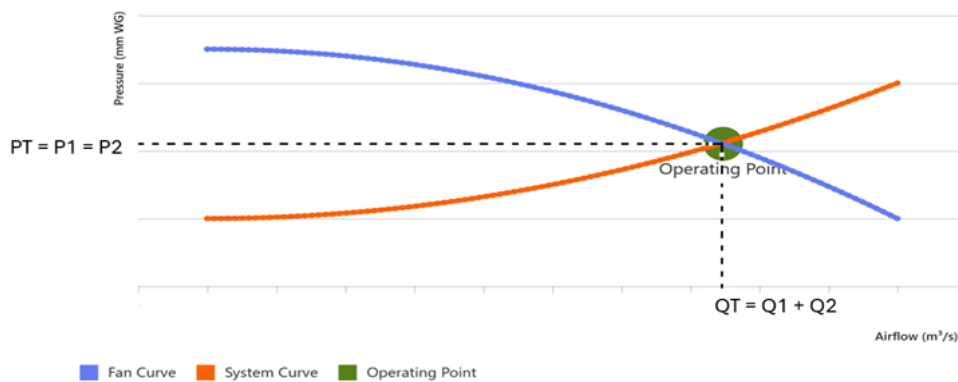


Figura 33– Operação com 2 ventiladores (Fonte: Autor, 2025)

#### 4.2.2.3. Seleção do ventilador

A seleção do ventilador de exaustão foi realizada com base nos parâmetros de projeto previamente definidos, de forma a garantir o desempenho adequado do sistema e a eficiência energética do conjunto. Os principais requisitos de operação estabelecidos foram uma pressão estática total de 858 mmW.C., uma vazão de 32,55 m<sup>3</sup>/s, equivalentes a aproximadamente 117.180 m<sup>3</sup>/h e a condição de que a potência necessária do motor não exceda os 355 kW.

Tabela 8 – Especificações do ventilador (Fonte: Catálogo – Sodeca, 2014)

<b>Modelo</b>	<b>Potência do motor (kW)</b>	<b>Vazão máxima (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Pressão máxima (mm w.c.)</b>	<b>Velocidade (RPM)</b>
CAS-X-1401-340	250	128150	858	1440

#### 4.2.2.4. Curva torque x velocidade

Ao estudar o comportamento dinâmico do conjunto motor-carga, analisa-se sempre duas curvas fundamentais traçadas em função da velocidade  $n$  (ou da rotação em RPM): a curva do torque motor  $\tau$  ( $n$ ) e a curva do torque resistente  $\tau_r(n)$  (ou par da carga). A intersecção destas duas curvas determina os pontos em que os pares se igualam - ou seja, os pontos de equilíbrio em que o motor pode funcionar numa velocidade estacionária.

#### Dados nominais da carga:

Velocidade nominal:  $n_{nom} = 1440$  RPM

Potência nominal:  $P_{nom} = 250$  kW

A partir desses valores, pode-se obter o torque nominal ( $T_{r_{nom}}$ ) usando a relação entre potência, torque e velocidade angular. A potência mecânica (em W) e o torque (em N·m) estão ligados por:  $P = \tau \cdot \omega$

Onde,  $\omega$  é a velocidade angular em rad/s. Com  $n$  em RPM:  $\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60}$

**Lei de afinidade usada:**  $\tau_{r(n)} = \tau_{nom} \left(\frac{n}{n_{nom}}\right)^2$

A análise do ponto de operação do motor é feita através do traçado conjunto das curvas do torque motor  $\tau(n)$  - retirada da ficha técnica e, do torque resistente  $\tau_r(n)$  anteriormente obtida. O ponto de intersecção corresponde à velocidade de equilíbrio em

que o motor trabalha sob carga. A curva da carga (ventilador) segue  $\tau_r(n) \propto n^2$ , garantindo uma intersecção única em regime normal, esta intersecção situa-se na zona estável do sistema e é, portanto, segura para operação regime permanente como se pode observar na figura abaixo.

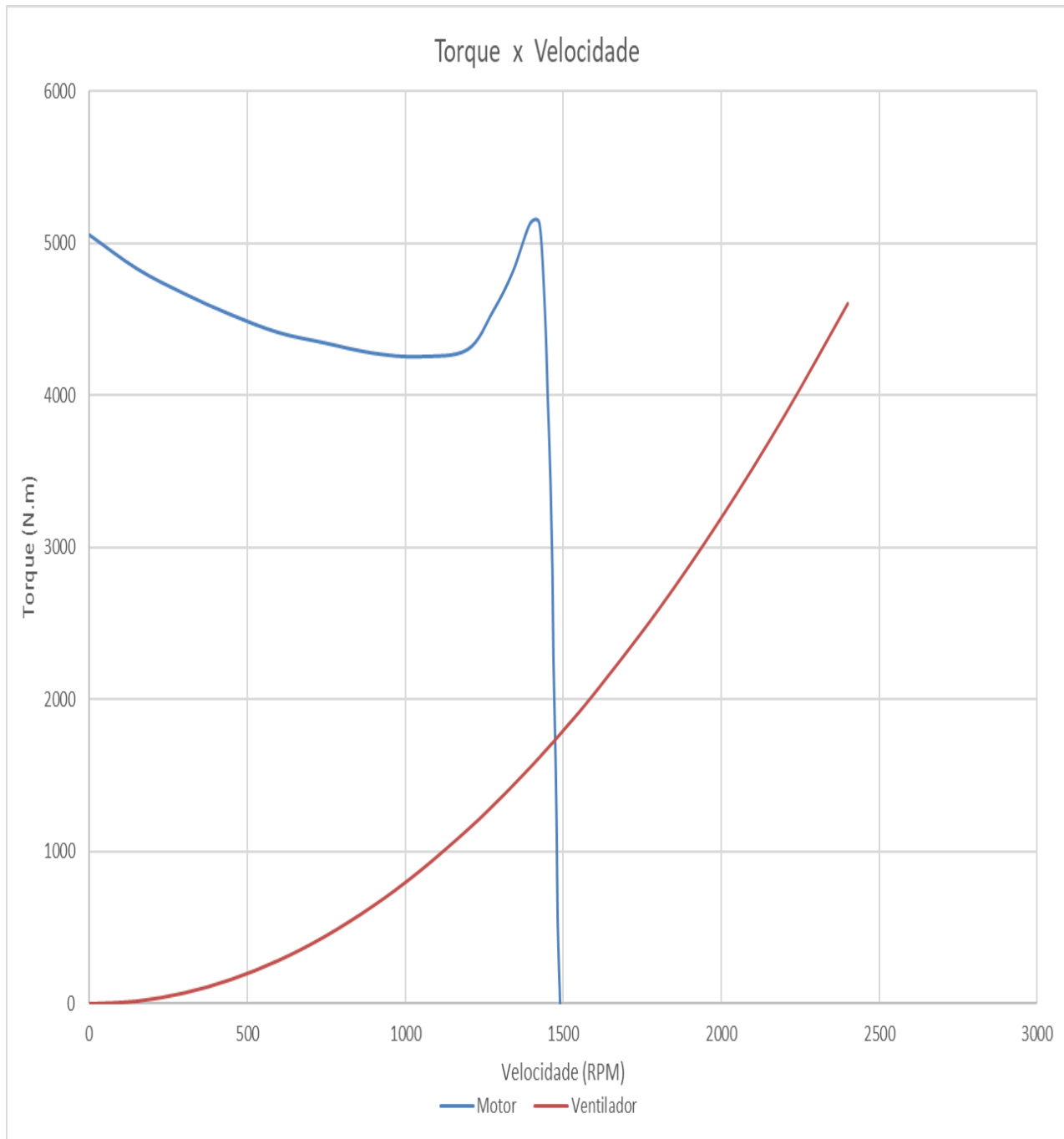


Figura 34 – Intersecção entre as curvas do Motor e Ventilador (Fonte: Autor, 2025)

### 4.3. Análise técnica e financeira

#### A) Estimativas de custos

Tabela 9 - Estimativa de custo dos equipamentos 1

Equipamentos 1					
Item	Especificações	Unit.	Quant.	Custo	
				Unitário (MZN)	Total (MZN)
1	Transformador 3MVA, 3.3/0.415 kV, Dyn11, 50Hz, onan, WEG.	um	2	5,755,500.00	11,511,000.00
2	Disjuntor SENTRON 3WL1, 5000 A, 100 kA, 3 Poles, SIEMENS.	um	6	682,133.33	4,092,800.00
3	Barramento 5000 A, 95x460 mm, 100 kA, LEGRAND.	m	24	127,900.00	3,069,600.00
4	Cabo PVC, 500 mm <sup>2</sup> , 5 kg/m, 0.089 Ω/km, 45.3 kA (1 sec), CBI African Electrical Cables.	m	70	43,851.43	3,069,600.00
<b>Subtotal (equipamentos)</b>					21,743,000.00
<b>Obras civis</b>					2,685,900.00
<b>Transporte e mão de obra</b>					5,348,000.00
<b>Custo total de investimento</b>					26.219.500,00

Tabela 10 - Estimativa de custo dos equipamentos 2

Equipamentos 2					
Item	Especificações	Unit.	Quant.	Custo	
				Unitário (MZN)	Total (MZN)
1	Ventilador de exaustão CAS-X-1401-340, 250 kW, 128150 m <sup>3</sup> /h, 858 mm w.c.	um	6	959,250.00	5,755,500.00
<b>Subtotal (equipamentos)</b>					5,755,500.00
<b>Transporte e mão de obra</b>					2,303,200.00
<b>Ajustes menores</b>					895,300.00
<b>Custo total de investimento</b>					8.953.000,00

Tabela 11.1 - Análise técnica e financeira

Secção	Aspecto analisado	Solução 1 - Dois novos transformadores de maior capacidade	Solução 2 - Novos ventiladores de exaustão de maior capacidade de sucção (mantendo motores)
1	Dados de referência	6 motores × 355 kW, $\cos\phi = 0.85$ , $\eta = 0.97 \rightarrow S_{total} \approx 2.583$ MVA. Transformadores actuais: 2 × 2 MVA.	Operação desejada com 4 motores $\rightarrow S_{total} \approx 1.7$ M VA. Ventiladores: 355 kW, 858 mmWG, 21.7 m <sup>3</sup> /s.
2	Critério de redundância N-1	Cada transformador deve suportar sozinho toda a carga: $T \geq S_{carga}$ .	Idem - após optimização, 4 motores $\leq$ capacidade do transformador existente (2 MVA).
3	Necessidade de intervenção	Substituir os transformadores por outros de maior potência. Redundância perdida porque $S_{carga} > T_{actual}$ .	Restaurar a condição N-1 sem trocar transformadores e sim, através da substituição dos ventiladores por outros de maior capacidade.
4	Trabalhos técnicos necessários	1.Dimensionamento de transformadores $\rightarrow T_{novo} \geq S_{load} \times (1 + \text{margem } 15\%)$ . 2.Revisão das proteções e fiação. 3.Obras civis para expansão do cubículo de transformação.	1.Dimensionar ventiladores de exaustão $\rightarrow Q_{Vent.novo} \geq Q_{Vent.actual}$ 2.Validar que corrente dos motores não excede nominal.
6	Prós	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Garante redundância.</li> <li>• Poderá suportar potencial expansão.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Custo inicial baixo.</li> <li>• Mantém infraestrutura eléctrica existente da subestação.</li> <li>• Redução de consumo: Menos motores e 250 kW &lt; 355 kW.</li> </ul>
7	Contras / Riscos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Custo inicial elevado.</li> <li>• Requer obras civis e paragem longa.</li> <li>• Necessidade de reajustar protecção, cablagem e barramento.</li> <li>• Aumento no consumo: Trafo 3 MVA &gt; 2 MVA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necessidade de optimização dos dutos.</li> <li>• Paragem no processo de instalação.</li> <li>• Risco de não atingir sucção necessária.</li> </ul>

Tabela 12.2 - Análise técnica e financeira

<b>Indicador de decisão</b>	<p>Custo ≈ 26.219.500,00 MZN; Risco = Médio; Benefício = Médio → Payback = Longo (&gt; 1 ano).</p> <p>a) Economia anual:  <math>S_{\text{anual}} = L = 18.417.600,00 \text{ MZN}</math></p> <p>Onde, o L representa valor economizado na perda de ânodos anualmente (<math>57555 \cdot 20 \cdot 8 \cdot 2</math>)</p> <p>b) Payback (Anos)  <math>\text{Payback} = \frac{I}{S_{\text{anual}}} = 1.42 \text{ anos}</math>  <math>\text{Payback} \approx 1 \text{ ano e } 5 \text{ meses}</math></p> <p>O <i>payback</i> é relativamente longo, reduz apenas o risco de paragem minimizando as perdas na produção de ânodos.</p>	<p>Custo ≈ 8.953.000,00 MZN; Risco = Baixo; Benefício = Alto → Payback = Curto (&lt; 1 ano)</p> <p>a) Potência eléctrica consumida por cada motor:  <math>P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{250}{0.97} = 257.73 \text{ kW}</math></p> <p>b) Potência eléctrica poupada com 1 motor em <i>standby</i> (cada <i>FTC</i>) e redução (R) de consumo de 105 kW em cada motor:  <math>P_{\text{saved}} = 2 \cdot P_1 + R = 948.46 \text{ kW}</math>  Onde, <math>R = 4 \cdot 105 \text{ kW} / 0.97 = 433 \text{ kW}</math></p> <p>c) Energia anual poupada (kWh/ano):  <math>E_{\text{saved}} = P_{\text{saved}} \cdot H = 5\,690\,760 \text{ kWh/Ano}</math>  Onde, H representa o número médio de horas de operação da planta anualmente.</p> <p>d) Economia anual:  <math>S_{\text{anual}} = E_{\text{saved}} \cdot C + L = 27.917.244 \text{ MZN}</math>  Onde, C representa a tarifa de energia (2.37 MZN/kWh) e L o valor economizado na perda de ânodos anualmente (<math>57555 \cdot 20 \cdot 6 \cdot 2</math>)</p> <p>e) <i>Payback</i>  <math>\text{Payback} = \frac{I}{S_{\text{anual}}} = 0.320 \text{ anos} \approx 4 \text{ meses}</math></p> <p>O <i>payback</i> é relativamente curto, isto por que é poupada uma grande quantidade de energia e minimiza as perdas na produção de ânodos.</p>
-----------------------------	--	---

Tabela 13.2 - Análise técnica e financeira

	<p>O <i>payback</i> é o indicador de viabilidade financeira que mostra quanto tempo levará para que se recupere o investimento inicial e comece a se colher os benefícios.</p>
--	--

<p><b>Recomendação final</b></p>	<p>Após análise dos indicadores de decisão, recomenda-se a adopção da solução 2, pois apresenta custo significativamente menor (<math>\approx 8.953.000,00</math> MZN), risco baixo, benefícios elevados e retorno rápido do investimento (<i>payback</i> inferior a 1 ano). Essa opção garante maior viabilidade econômica, reduz exposição a riscos e proporciona resultados concretos em curto prazo.</p> <p>Por outro lado, a solução 1 não é recomendado, devido ao custo elevado (<math>\approx 26.219.500,00</math> MZN), benefícios apenas médios e <i>payback</i> longo (superior a 1 ano), o que compromete a atratividade e sustentabilidade financeira do projecto.</p>
----------------------------------	---

#### 4.3.1. Análise dos Gráficos

Os gráficos apresentados fornecem uma visão clara e objetiva sobre os critérios de decisão adotados neste estudo. A seguir, interpreta-se cada gráfico e sua relevância para a escolha da solução recomendada:

##### 4.3.1.1. Gráfico de Custos

Demonstra que a solução baseada na substituição dos ventiladores apresenta um custo significativamente inferior ( $8.953.000,00$  MZN) em comparação com a solução dos transformadores ( $26.219.500,00$  MZN). Este diferencial reforça a viabilidade econômica da alternativa recomendada.

Comparação de Custos das Soluções (MZN)

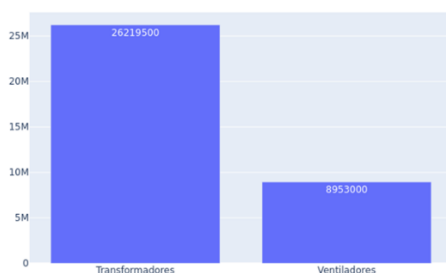


Figura 35 – comparação de *payback* (Fonte: Autor, 2025)

##### 4.3.1.2. Gráfico de *Payback*

Evidencia que a solução dos ventiladores possui um retorno do investimento em apenas 4 meses, enquanto a solução dos transformadores requer 17 meses. Este

indicador confirma a atratividade financeira da solução escolhida, permitindo rápida recuperação do capital investido.

Comparação de Payback (meses)

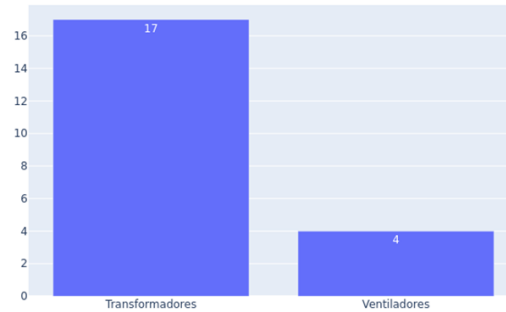


Figura 36 – comparação de payback (Fonte: Autor, 2025)

#### 4.3.1.3. Gráfico de Pizza (Riscos e Benefícios)

Mostra que a solução dos ventiladores concentra maior proporção de benefícios (80%) e menor risco (20%), contrastando com a solução dos transformadores, que apresenta risco médio (40%) e benefício médio (60%). Esta análise qualitativa reforça a adequação da solução recomendada, não apenas sob o ponto de vista económico, mas também estratégico e operacional.

Proporção de Riscos e Benefícios das Soluções

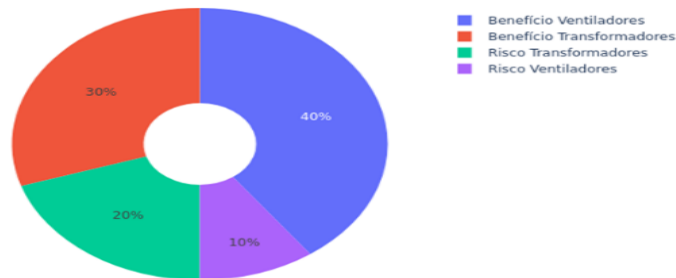


Figura 37 – Porporção de riscos e benefícios das soluções (Fonte: Autor, 2025)

## CAPÍTULO V.

### 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

#### 5.1. Conclusões

A análise desenvolvida ao longo do trabalho permitiu compreender de forma aprofundada os desafios operacionais enfrentados pela Subestação 12 da Mozal, particularmente no que concerne à ausência de redundância N-1 nos transformadores que alimentam os Centros de Tratamento de Fumos (*FTC*). Este problema decorre do aumento da demanda de sucção dos gases, associado à evolução tecnológica para o modelo AP3XLE, que implicou maior dimensão dos ânodos e conseqüente incremento do volume de fumos a serem tratados.

A inexistência de capacidade redundante nos transformadores expõe a planta a riscos económicos, em caso de falha ou manutenção e acarretando perdas financeiras elevadas, estimadas em mais de 1.151.100,00 MZN por hora de paragem.

Foram estudadas duas soluções, nomeadamente; solução 1, que consiste na substituição dos transformadores por unidades de maior capacidade (3 MVA cada), garantindo a redundância N-1 e solução 2, cujo o objectivo é a substituição dos ventiladores por modelos de maior capacidade, mantendo os transformadores existentes e reduzindo a carga eléctrica global. Ambas as soluções atendem ao objetivo de restaurar a confiabilidade operacional, porém apresentam diferenças substanciais em termos de custo, complexidade e retorno financeiro.

A solução 1 implica um investimento aproximado de 26.219.500,00 MZN, com payback de 1 ano e 5 meses, além de exigir obras civis e ajustes complexos na infraestrutura eléctrica.

A solução 2 apresenta custo significativamente inferior (8.953.000,00 MZN) e um payback extremamente atrativo (4 meses), devido à redução do consumo energético e minimização das perdas na produção de ânodos.

Considerando os indicadores de risco, benefício e retorno, a Solução 2 revela-se a mais adequada, pois alia menor custo inicial, risco operacional reduzido, benefícios ambientais e energéticos, além de rápida recuperação do investimento.

## 5.2. Recomendações

Com base nas conclusões apresentadas, recomenda-se a implementação da solução 1, que consiste na substituição dos ventiladores existentes por modelos de maior eficiência, garantindo a vazão e pressão necessárias para atender à demanda atual sem sobrecarregar os transformadores. É fundamental validar a compatibilidade eléctrica dos motores com os novos ventiladores, assegurando que a corrente nominal não seja excedida. Para garantir uma execução segura e eficaz, deve-se elaborar um cronograma detalhado que minimize paragens não planeadas, priorizando períodos de baixa demanda produtiva, e acompanhar as intervenções com testes de desempenho e calibração dos variadores de velocidade (*VSD*). Além disso, recomenda-se implementar indicadores de consumo específico (kWh/tonelada de ânodo produzido) para avaliar os ganhos energéticos decorrentes da solução.

Paralelamente, é essencial estabelecer um plano de manutenção preventiva para os ventiladores, incluindo inspeções periódicas e substituição programada de componentes críticos, garantindo redundância operacional por meio da configuração adequada de standby. A capacitação técnica das equipas de operação e manutenção deve ser promovida continuamente, assegurando domínio sobre as novas tecnologias implementadas e incluindo módulos sobre eficiência energética e gestão de sistemas de ventilação industrial. Por fim, sugere-se avaliar a possibilidade de integração de tecnologias complementares, como sistemas de recuperação de calor e otimização de dutos, visando ganhos adicionais de eficiência, e considerar, a médio prazo, soluções híbridas que combinem melhorias nos ventiladores com ajustes na infraestrutura eléctrica, caso haja expansão da capacidade produtiva.

## CAPÍTULO VI.

## 6. REREFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MAMEDE FILHO, João. Instalações elétricas industriais. 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC. 2011
2. MAMEDE FILHO, João. Manual de equipamentos elétricos. 3ª ed. Rio de Janeiro: LTC. 2005.
3. CHAPMAN, S. J. *Electric Machinery Fundamentals*. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2013.
4. FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., C.; UMANS, S. D. *Electric Machinery*. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 2014.
5. SMITH, D. J. *Reliability, Maintainability and Risk*. 7. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.
6. MACINTYRE, A. J. *Ventilation and Smoke Control in Buildings*. 1990.
7. BRASFORME. Catálogo de Transformadores. 2021. Disponível em: site oficial da empresa. Acessado em: 10 de Setembro. 2025.
8. COSTA, J. Materiais de Isolamento Elétrico. São Paulo, 2012.
9. LISBOA, R. Balanceamento de Dutos. São Paulo, 2007.
10. MACINTYRE, A. J. Ventilação Industrial e Controle de Fumos. São Paulo, Edgard Blücher, 1990.
11. WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S/A. Transformadores de Distribuição a Óleo.
12. SODECA, Catálogo Técnico de Ventiladores, 2014.
13. MUZY, Gustavo Luis Castro de Oliveira. Subestações Elétricas. UFRJ. 2012
14. SIEMENS, switchgear sivacon, 2025.

# ANEXOS

## ANEXO 1 - ACTA DE ENCONTROS

Tabela A1-1: Acta de encontros do dia 16/09/2025



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA  
LICENCIATURA EM ENGENHARIA ELÉCTRICA

### ACTA DE ENCONTROS

#### 1. AGENDAS

Apresentação do termo de atribuição de tema ao supervisor

#### 2. PRESENCAS

<b>Supervisor</b>	Prof Doutor Zacarias Chilengue, Eng.
<b>Estudante</b>	Geronimo Machocoro
<b>Outros</b>	

#### 3. RESUMO DO ENCONTRO

Contacto com o supervisor para fazer uma análise e deixar o seu parecer em relação ao TAT.

## ANEXO 1 - ACTA DE ENCONTROS

Tabela A1-2: Acta de encontro de dia 16/09/2025



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA**  
**LICENCIATURA EM ENGENHARIA ELÉCTRICA**

### 4. RECOMENDAÇÕES

O supervisor Prof. Doutor Zacarias Chilengue, Eng., deixo recomendações sobre o ponto <b>1.5.</b> do TAT relativo aos procedimentos metodológicos.
--

<b>5. OBSERVAÇÕES</b>	
-----------------------	--

<b>6. DATA DO PROXIMO ENCONTRO</b>	
------------------------------------	--

## ANEXO 1 - ACTA DE ENCONTROS

Tabela A1-3: Acta de encontro de dia 31/10/2025



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA**  
**LICENCIATURA EM ENGENHARIA ELÉCTRICA**

### 1. AGENDAS

Apresentação progresso do projecto

### 2. PRESENÇAS

<b>Supervisor</b>	Prof Doutor Zacarias Chilengue, Eng.
<b>Estudante</b>	Geronimo Machocoro
<b>Outros</b>	

### 3. RESUMO DO ENCONTRO

Apresentação do projecto e exposição de dificuldades.

### 4. RECOMENDAÇÕES

Continuar com o levantamento de carga e discussão de resultados

### 5. OBSERVAÇÕES

### 6. DATA DO PROXIMO ENCONTRO

## ANEXO 1 - ACTA DE ENCONTROS

Tabela A1-4: Acta de encontro de dia 20/11/2025



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA**  
**LICENCIATURA EM ENGENHARIA ELÉCTRICA**

### 1. AGENDAS

Apresentação do projecto final
--------------------------------

### 2. PRESENCAS

<b>Supervisor</b>	Prof Doutor Zacarias Chilengue, Eng.
<b>Estudante</b>	Geronimo Machocoro
<b>Outros</b>	

### 3. RESUMO DO ENCONTRO

Apresentação do projecto final ao supervisor
--

### 4. RECOMENDAÇÕES

--

### 5. OBSERVAÇÕES

--	--

## **ANEXO 1 - ACTA DE ENCONTROS**

**Tabela A1-4: Acta de encontro de dia 20/11/2025**



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA  
LICENCIATURA EM ENGENHARIA ELÉCTRICA**

<b>6. DATA DO PROXIMO ENCONTRO</b>	
------------------------------------	--

## ANEXO 2 - RELATÓRIO DE PROGRESSO

Tabela A2-5: Relatório de progresso



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA  
LICENCIATURA EM ENGENHARIA ELÉCTRICA

### RELATÓRIO DE PROGRESSO

<b>REFERÊNCIA DO TEMA:</b>	2025ELEPD42	<b>DATA:</b>	28/08/2025
----------------------------	-------------	--------------	------------

#### 1. ACTIVIDADES PLANIFICADAS

ACTIVIDADE	PRAZO PREVISTO
1. Apresentação de Termo de Atribuição de Tema ao supervisor.	12/09/2025
2. Apresentação da progressão do trabalho.	31/09/2025
4. Apresentação do trabalho final.	21/11/2025

#### 3. CONTROLO DE EXECUÇÃO

ACTIVIDADE	DATA	ESTÁGIO (%)	OBSERVAÇÕES
1.	12/09/2025	90	Requisição de assinaturas do TAT.
2.	31/09/2025	100	-
3.	21/11/2025	100	Correção dos erros ortográficos.

### ANEXO 3 - Tabela de dimensionamento de condutores elétricos

Tabela A3.6: Tabela de dimensionamento de condutores elétricos (Fonte: RTIEBT, 2005)

Calibre máximo da protecção Amperes	Secção dos condutores Milim. quadrados	Intensidade máxima admissível Amperes
6	0,75	9
6	1	11
10	1,5	14
15 - 16	2,5	20
20	4	25
25	6	31
35	10	43
60	16	75
80	25	100
100	35	125
125	50	160
160	70	200
190	95	240
225	120	280
260	150	325
300	185	380
360	240	450
430	310	540
500	400	640
600	500	760
700	625	880
850	800	1050
1000	1000	1250

## ANEXO 4 - Tabela de resistência elétrica de condutores

Tabela A4.7: Tabela de resistência elétrica de condutores (Fonte: RTIEBT, 2005)

SECÇÃO NOMINAL mm <sup>2</sup>	NÚMERO DE FIOS	Resistência máxima em corrente contínua a 20° C π Ω/km			
		Cabos monocondutores e cabos com condutores paralelos		Cabos Multicondutores cabeados	
		Cobre não estanhado	Cobre estanhado	Cobre não estanhado	Cobre estanhado
0,2	1	88,5	89,5	—	—
0,3	1	59,1	59,7	—	—
0,5	1	36,4	36,8	—	—
0,75	1	23,8	24,0	—	—
1	1	17,7	17,9	—	—
1,5	1	11,9	12,0	12,1	12,2
2,5	1	7,14	7,21	7,28	7,36
4	1	4,47	4,51	4,55	4,60
6	1	2,97	3,00	3,03	3,06
10	7	1,79	1,81	1,83	1,84
16	7	1,13	1,14	1,15	1,16
25	7	0,712	0,719	0,727	0,734
35	19	0,514	0,519	0,524	0,529
50	19	0,379	0,383	0,387	0,391
70	19	0,262	0,265	0,268	0,270
95	19	0,189	0,191	0,193	0,195
120	37	0,150	0,151	0,153	0,154
150	37	0,122	0,123	0,124	0,126
185	37	0,0972	0,0982	0,0991	0,100
240	61	0,0740	0,0747	0,0754	0,0762
300	61	0,0590	0,0595	0,0601	0,0607
400	61	0,0461	0,0465	0,0470	0,0475
500	61	0,0366	0,0369	0,0373	0,0377
630	127	0,0283	0,0286	0,0289	0,0292
800	127	0,0221	0,0224	0,0226	0,0229
1000	127	0,0175	0,0177	0,0176	0,0181

## ANEXO 5 - Curva de torque e corrente versus velocidade do motor

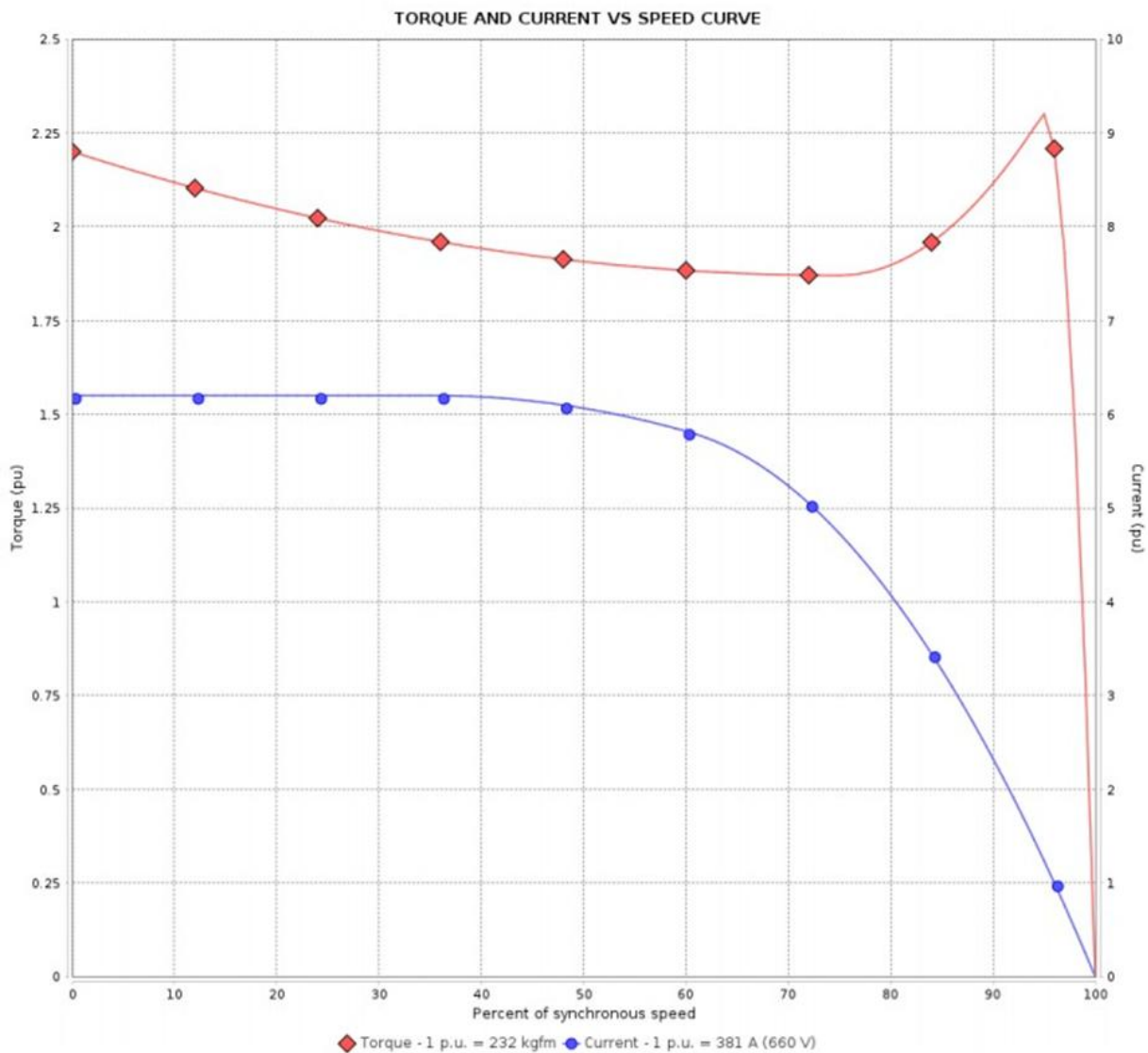


Figura A5.8 - Curva de torque e corrente versus velocidade do motor (Fonte: Catálogo - WEG, 2025)

## ANEXO 6 - Diagrama unifilar simplificado da subestação

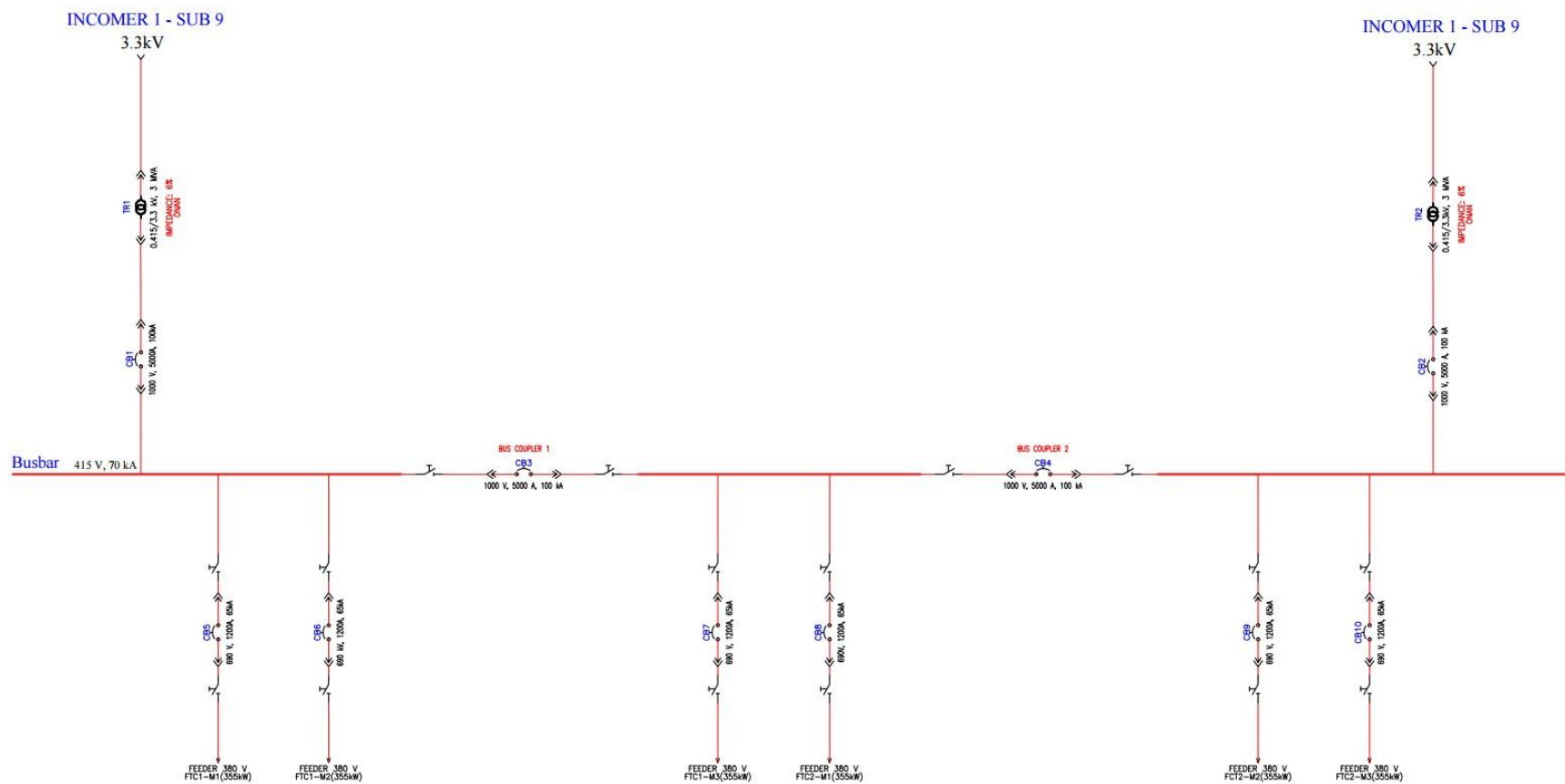



Figura A6.9 - Diagrama unifilar simplificado da subestação (Fonte: Adaptado pelo Autor, 2025)

## Anexo 7 - Especificações técnicas do transformador

Tabela A7.10 - Especificações técnicas do transformador (Fonte: Catálogo - WEG, 2025)

FOLHA DE DADOS					
Transformador Óleo Distribuição					
<b>Identificação</b>					
Código do produto:	17458263				
Tipo:	Transformador abaixador				
Norma / Especificação:	NBR 5356				
<b>Características do ambiente</b>					
Instalação:	Ao tempo				
Altitude máxima de instalação (m.s.n.m):	1000.0				
Atmosfera:	Não agressiva				
Temperatura máxima do ambiente (°C):	40.0				
<b>Características elétricas</b>					
Frequência (Hz): 60.0		Fases: Trifásico		Grupo de ligação: Dyn1	
Enrolamento	Potência (kVA)		Tensão (kV)	Ligação	Comutação
	ONAN				
Alta tensão	3000.0		3.3 -4x0.6 kV	Triângulo	CST
Baixa Tensão			0.415	Estrela	
Elevação de temperatura dos enrolamentos média (°C)					65.0
Elevação de temperatura dos enrolamentos ponto mais quente (°C)					80.0
Classe do material isolante					E (120 °C)
Ensaio dielétricos	Alta tensão		Baixa Tensão		
		Fase	Neutro	Fase	Neutro
	Nível de isolamento (kV)	3.6		1.2	1.2
	Tensão de impulso (pleno) (kV)	20		30.0	30.0
	Tensão de impulso (cortado) (kV)	30		33.0	
	Tensão aplicada (kV)	10		10.0	10.0
Tensão induzida (kV)	2 x Vn			2xVn	2xVn
Temperatura de Referência @ 85.0 °C - ONAN					100%
Perdas a vazio (kW)					3.6
Perdas em carga (kW)					0.0
Perda Total (kW)					42.6
Corrente de excitação (%)					1.2
Alta/Baixa tensão	Base		Impedância @ 85.0 °C - ONAN (%)		
	Posição (kV)	Potência (kVA)	6.0		
	3.3 / 0.415		3000.0		
Refrigeração					ONAN
Nível de ruído (dB)					63.0
Descargas parciais (pC)					300.0
Corrente de inrush (A <sub>pk</sub> )					
Fator K					K1
Fator de Carga [%]	Regulação (100% de carga)				
	ONAN (Φ = 0.8)	ONAN (Φ = 0.9)	ONAN (Φ = 1)		
100	5.32	4.38	1.6		

## Anexo 8 - Especificações técnicas do ventilador de exaustão

CAS-X





**CAS-X**

Descrição: Ventilador de alta pressão com accionamento por correia e motor eléctrico, polia e kit de correia e protectores normalizados de acordo com a norma EN-294 e ISO-13852

Características:

- Turbina com pás de curvatura inversa fabricadas em chapa de aço robusta
- Motor montado em bancada geral

Motor:

- Motores com eficiência IE-2, excepto para motores com potências inferiores a 0,75 kW e motores monofásicos.
- Motores de classe F, com rolamentos, protecção IP55.
- Trifásico 230/400V.-50Hz. (até 5,5CV.) e 400/690V.-50Hz. (potências superiores a 5,5CV.)
- Temperatura máxima do ar transportado: -20°C a +150°C.

Acabamento:

- Acabamento anticorrosivo em resina de poliéster, polimerizado a 190°C, após desengorduramento alcalino e pré-tratamento sem fosfatos.

Sob consulta:

- Enrolamentos especiais para diferentes tensões
- Ventilador concebido para transportar ar até 250°C
- Ventiladores em aço inoxidável
- Certificação ATEX, Categoria 2

**Ventiladores de alta pressão com accionamento por correia, motor eléctrico, polia e kit de correia e protectores normalizados de acordo com a norma EN-294 e ISO-13852**

**Ventilador:**

- Carcaça em chapa de aço
- Turbina com pás de curvatura inversa fabricadas em chapa de aço robusta
- Motor montado em bancada geral

**Motor:**

- Motores com eficiência IE-2, excepto para motores com potências inferiores a 0,75 kW e motores monofásicos.
- Motores de classe F, com rolamentos, protecção IP55.
- Trifásico 230/400V.-50Hz. (até 5,5CV.) e 400/690V.-50Hz. (potências superiores a 5,5CV.)
- Temperatura máxima do ar transportado: -20°C a +150°C.

**Acabamento:**

- Acabamento anticorrosivo em resina de poliéster, polimerizado a 190°C, após desengorduramento alcalino e pré-tratamento sem fosfatos.

**Sob consulta:**

- Enrolamentos especiais para diferentes tensões
- Ventilador concebido para transportar ar até 250°C
- Ventiladores em aço inoxidável
- Certificação ATEX, Categoria 2



**Código de encomenda**

CAS-X-711-100

↓

CAS-X: Ventiladores de alta pressão com accionamento por correia e motor eléctrico

↓

Tamanho da turbina

↓

Potência do motor (CV)

CAS-X-1401-340	1440	416,0	240,0	250	128150	820	2680
----------------	------	-------	-------	-----	--------	-----	------

Figura A8.11 - Especificações técnicas do ventilador de exaustão (Fonte: Catálogo - SODECA, 2014)