



# Dimensionamento de Transformadores para Serviços Auxiliares: Metodologia para Cálculo Automático

JOÃO PEDRO DA CUNHA MAGALHÃES PEREIRA  
junho de 2024

# **Dimensionamento de Transformadores para Serviços Auxiliares: Metodologia para Cálculo Automático**

**João Pedro da Cunha Magalhães Pereira**

**1190735@isep.ipp.pt**

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Eletrotécnica - Sistemas Elétricos de Energia**

**Orientador: Professora Doutora Eng<sup>a</sup>. Teresa Nogueira**

**Supervisor: Gestor de Projetos Marco Cunha**

**Júri:**

Presidente:

Maurício Dias, Professor Doutor Eng<sup>o</sup>, ISEP

Vogais:

Alexandre Silveira, Professor Doutor Eng<sup>o</sup>, ISEP

Teresa Nogueira, Professora Doutora Eng<sup>a</sup>, ISEP



# Resumo

Este trabalho pretende caracterizar exaustivamente as subestações e destacar a sua importância nos sistemas elétricos de energia, nomeadamente, analisar o papel preponderante dos sistemas de serviços auxiliares AC e DC. Para apoiar o estudo, foi desenvolvida uma ferramenta automática de cálculo para estimação da carga elétrica nas subestações, ao nível do transformador de serviços auxiliares.

Numa primeira etapa, foi criada uma base de dados com informação abrangente dos vários equipamentos das subestações. Esta informação será essencial para cálculo do consumo dos serviços auxiliares de uma subestação. Com o dimensionamento elaborado de forma eficaz, é possível evitar excessos e deficiências no dimensionamento do equipamento da subestação.

Com este trabalho pretende-se maximizar o dimensionamento dos transformadores das subestações, garantindo que sejam escolhidos de forma mais económica, lógica e eficiente para suportar a carga específica de cada subestação. A ferramenta desenvolvida irá não apenas melhorar a gestão da energia, mas também reduzir os custos operacionais e garantir a sustentabilidade ambiental em instalações de subestações AC/DC. Esta ferramenta permitirá uma avaliação mais precisa das necessidades de carga elétrica, fornecendo uma visão geral do sistema.

A Dissertação apresenta a metodologia de cálculo e o respetivo algoritmo de suporte ao desenvolvimento da ferramenta de cálculo. É apresentado um caso de estudo para aplicação da ferramenta, resultando na melhor utilização de todas as suas funcionalidades e na otimização do sistema.

**Palavras-chave:** Subestações, transformadores, serviços auxiliares, consumo, fator de simultaneidade e dimensionamento.



# **Abstract**

*This work thoroughly analyzes substation features and emphasizes their significance in electrical energy systems. It will focus on studying the essential roles played by AC and DC auxiliary service systems. To facilitate this study, a useful automatic calculation tool has been developed to estimate the electrical load in substations at the level of the auxiliary services transformer.*

*The initial step was to establish a database that contains comprehensive information regarding the different equipment used in a substation. This information is crucial for accurately calculating the consumption of auxiliary services required by a substation. By designing the equipment's size effectively, any excesses or deficiencies in the substation equipment's size can be avoided.*

*The work aims to optimize the selection of substation transformers, ensuring that the most economical, logical, and efficient equipment is chosen to support each substation's specific load. The tool developed as part of this work will improve energy management, reduce operational costs, and ensure environmental sustainability in AC/DC substation installations. This tool will provide a more accurate assessment of electrical load needs, offering a comprehensive system overview.*

*The Dissertation presents the calculation methodology and the respective algorithm to support the development of the calculation tool. A practical case study is presented for applying the tool, resulting in better use of all its features and optimization of the system.*

**Keywords:** *Substations, transformers, auxiliary services, consumption, diversity factor and sizing.*



# Agradecimentos

Esta etapa marca o culminar do meu percurso académico e é com grande satisfação que dedico este capítulo de agradecimentos a todos aqueles que desempenharam um papel fundamental ao longo desta jornada.

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha orientadora, Professora Doutora Eng<sup>a</sup>. Teresa Nogueira, pelo seu apoio contínuo, orientação sábia e total disponibilidade ao longo deste processo. Sem a sua orientação dedicada, este trabalho não teria sido possível.

Gostaria também de estender o meu agradecimento ao meu orientador externo e supervisor, Gestor de Projetos Marco Cunha, por todo o conhecimento transmitido, pela completa disponibilidade, ajuda e tempo dispensado durante este trabalho. Aos colaboradores da SISINT, pela sua contribuição, orientação e disponibilidade para esclarecer dúvidas ao longo do desenvolvimento deste projeto.

Além disso, não posso deixar de expressar a minha profunda gratidão à minha família, especialmente à minha mãe e pai, pelo seu apoio constante ao longo de esta jornada académica.

Por fim, gostaria de agradecer aos meus amigos pelo seu apoio e conselhos fornecidos.

A todos vocês, deixo o meu mais profundo agradecimento. Este trabalho não seria possível sem o apoio e contribuição de cada um de vocês.



# Índice

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1	Contextualização .....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Organização do documento.....	3
<b>2</b>	<b>As subestações no SEE .....</b>	<b>5</b>
2.1	Introdução .....	5
2.2	Tipos de subestações.....	8
2.2.1	Subestação de Transmissão .....	10
2.2.2	Subestação de Subtransmissão .....	10
2.2.3	Posto de Transformação .....	11
2.3	Principais Equipamentos de uma Subestação .....	12
2.3.1	Transformadores de Potência .....	12
2.3.2	Disjuntores .....	13
2.3.3	Seccionadores .....	13
2.3.4	Interruptor Diferencial .....	14
2.3.5	Relés.....	14
2.3.6	Para-raios .....	14
2.3.7	Recuperadores Automáticos .....	14
2.3.8	Fusíveis.....	14
2.3.9	Barramento .....	15
2.3.10	Baterias .....	15
2.3.11	Bateria de Condensadores .....	15
<b>3</b>	<b>Serviços Auxiliares .....</b>	<b>17</b>
3.1	Serviços Auxiliares de Corrente Alternada .....	17
3.2	Serviços Auxiliares de Corrente Contínua .....	19
3.3	Normas e Regulamentos .....	22
3.4	Complexidade de um Sistema Misto de HVDC e HVAC .....	22
<b>4</b>	<b>Caracterização da Metodologia Desenvolvida.....</b>	<b>27</b>
4.1	Procedimento de Dimensionamento do Transformador .....	27
4.2	Perfil de Consumo .....	28
4.2.1	Elaboração do Perfil de Cargas.....	29
4.2.2	Fator de Simultaneidade .....	33
4.2.3	Valor Corrigido do Consumo .....	35
4.3	Dimensionamento do Transformador de SA .....	36
4.4	Relatório .....	42
<b>5</b>	<b>Ferramenta Desenvolvida e Base de Dados .....</b>	<b>43</b>

5.1	Estrutura da Ferramenta .....	44
5.2	Base de Dados .....	46
5.3	Preenchimento dos Dados do Sistema .....	48
5.3.1	Página Inicial .....	49
5.3.2	Página do Perfil de Consumo .....	49
5.4	Exemplo e Validação da Metodologia .....	54
5.4.1	Consumos dos Equipamentos .....	54
5.4.2	Análise dos Consumos .....	56
5.5	Análise e Comparação de Resultados .....	59
<b>6</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>65</b>
6.1	Análise Conclusiva .....	65
6.2	Perspetivas Futuras .....	66

# Índice de Figuras

Figura 1 – Etapas de um Sistema Elétrico de Energia (Inteligente, 2020) .....	6
Figura 2 – Rede Nacional de Transporte .....	7
Figura 3 – Rede Nacional de Distribuição – Grande Porto (Santos, 2023) .....	8
Figura 4 – Subestações de Transmissão, Subtransmissão e Posto de Transformação (StudyElectrical, 2019) .....	12
Figura 5 – Grupo Gerador (ENGEFAR, n.d.) .....	19
Figura 6 – Transformador (Fontes de Energia, n.d.) .....	19
Figura 7 – Retificador (Adelco, n.d.) .....	19
Figura 8 – Arquitetura clássica dos Serviços Auxiliares DC (Santos, 2023) .....	20
Figura 9 – Arquitetura moderna dos Serviços Auxiliares DC (Santos, 2023) .....	20
Figura 10 - Exemplo de um alimentador e respetivos equipamentos constituintes (Santos, 2023) .....	21
Figura 11 - Armário de Baterias (Bainga, n.d.) .....	22
Figura 12 – Principais Passos da Metodologia .....	27
Figura 13 – Visão Geral do Processo de Dimensionamento .....	28
Figura 14 - Algoritmo para a Construção do Perfil de Consumo .....	29
Figura 15 – Especificações de Consumo do “ <i>Busbar Protection P747</i> ” .....	31
Figura 16 – Tabela Modelo do Perfil de Consumo .....	32
Figura 17 – Gráficos Modelo do Perfil de Consumo .....	32
Figura 18 - Fator de simultaneidade para quadros de distribuição (cf. IEC61439-2 tabela 101) .....	35
Figura 19 - Fator de simultaneidade de acordo com a função do circuito (EEP, 2011) .....	35
Figura 20 – Valores para diferentes PT .....	37
Figura 21 – Declaração das variáveis .....	38
Figura 22 – Conversão de Valores DC .....	39
Figura 23 – Escolha do Transformador .....	40
Figura 24 – Conversão de Valores DC e Escolha de Transformador sem Fator de Expansão ....	41
Figura 25 – Menu .....	45
Figura 26 – Estrutura da ferramenta .....	46
Figura 27 - Tipos de equipamentos .....	47
Figura 28 - Adicionar novos equipamentos .....	47
Figura 29 - Página inicial da ferramenta .....	49
Figura 30 - Opção de acesso ao perfil de consumo .....	50
Figura 31 - Perfil de consumo .....	50
Figura 32 - Escolha do Tipo de Equipamento .....	50
Figura 33 - Escolha do Equipamento .....	51
Figura 34 - Seleção Manual ou Listada do Fator de Simultaneidade .....	51
Figura 35 - Lista de Fatores de Simultaneidade .....	52
Figura 36 - Tabela de Consumos .....	52
Figura 37 - Botões de Atividade .....	52

Figura 38 - Tabela Auxiliar Detalhada para Disjuntores e Seccionadores .....	53
Figura 39 - Exportar PDF .....	53
Figura 40 - Adicionar Novo Equipamento.....	54
Figura 41 – Identificação do Documento.....	55
Figura 42 – Tabela de Consumo do <i>Distribution Board 1</i> .....	55
Figura 43 – Tabela Detalhada de Disjuntores e Seccionadores.....	55
Figura 44 – Tabela de Consumo do DB2.....	56
Figura 45 – Representação Gráfica do Consumo do DB1.....	57
Figura 46 - Representação Gráfica do Consumo do DB2.....	57
Figura 47 – Tabela de Consumo da Subestação .....	58
Figura 48 - Representação Gráfica do Consumo da Subestação.....	59
Figura 49 - Identificação do Dimensionamento do Transformador de Nairn.....	60
Figura 50 - Tabela de Consumos dos Valores Reaproveitados.....	60
Figura 51 - Tabela de Consumos do DB2 .....	61
Figura 52 - Tabela de Consumos do DB3 .....	61
Figura 53 - Perfil de Consumo de Nairn.....	62

# Índice de Tabelas

Tabela 1 - Serviços auxiliares de sistemas de transmissão HVDC (Kaushal & Hertem, 2019) ....25



# Acrónimos e Siglas

## Lista de Acrónimos

<b>AC</b>	Corrente Alternada
<b>DB1</b>	<i>Distribution Board 1</i>
<b>DB2</b>	<i>Distribution Board 2</i>
<b>DC</b>	Corrente Contínua
<b>DGEG</b>	Direção-Geral de Energia e Geologia
<b>EN</b>	Normas Europeias
<b>ERSE</b>	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
<b>HVAC</b>	Corrente Alternada de Alta Tensão
<b>HVDC</b>	Corrente Contínua de Alta Tensão
<b>IEC</b>	<i>International Electrical Commission</i>
<b>LCC</b>	Line Commutated Converter
<b>MDR</b>	Módulo de Díodos Redutores
<b>MSC</b>	Módulo de Supervisão e Controlo
<b>NP</b>	Normas Portuguesas
<b>NP EN</b>	Normas Portuguesas Harmonizadas com as Normas Europeias
<b>PNEC</b>	Plano Nacional de Energia e Clima
<b>PRE</b>	Produção em Regime Especial
<b>PRO</b>	Produção em Regime Ordinário
<b>RESP</b>	Rede Elétrica de Serviço Público
<b>RND</b>	Rede Nacional de Distribuição
<b>RNT</b>	Rede Nacional de Transporte
<b>RTIEBT</b>	Regras Técnicas das Instalações Eléctricas em Baixa Tensão
<b>RSSPTS</b>	Regulamento de Segurança de Subestações e Postos de Seccionamento

<b>SA</b>	Serviços Auxiliares
<b>SEE</b>	Sistema Elétrico de Energia
<b>SEN</b>	Sistema Elétrico Nacional
<b>VSC</b>	<i>Voltage Source Converter</i>
<b>VSG</b>	<i>Virtual Synchronous Generators</i>
<b>UPS</b>	<i>Uninterruptible Power Supply</i>

# 1 Introdução

## 1.1 Contextualização

A energia elétrica é fundamental para a vida cotidiana das sociedades modernas. O surgimento de novas tecnologias de produção de energia, a procura por eletrificação do consumo e a emergência das redes inteligentes fez com que os sistemas elétricos de energia evoluíssem e se expandissem significativamente nos últimos anos.

A primeira rede elétrica foi construída em 1882 na estação de Pearl Street, em Nova Iorque, com o objetivo principal de fornecer energia para uma rede de iluminação pública. Com isso, começaram as operações de produção, transporte e distribuição (Castro, 2011).

A iluminação da cidade de Cascais em comemoração do 15º aniversário do príncipe D. Carlos no início do século XIX também impulsionou o desenvolvimento energético em Portugal. Este evento marcou o início da Era de Eletrificação em Portugal, com o surgimento de pequenas empresas focadas na construção do maior número possível de instalações elétricas (EDP, 2019).

O papel das subestações é crucial para a complexidade do Sistema Elétrico Nacional (SEN). As subestações desempenham um papel fundamental na transmissão e distribuição eficaz de energia elétrica. Elas atuam como centros de controlo e distribuição, onde a energia é transformada, regulada e redirecionada para atender às necessidades específicas de diferentes instalações e consumidores (Energy, 2023). A capacidade de projetar subestações de forma eficiente e precisa é essencial para garantir a continuidade e a qualidade do fornecimento de energia elétrica numa sociedade cada vez mais dependente da eletricidade (EnerData, 2022).

Deste modo, as subestações são essenciais para o Sistema Elétrico de Energia (SEE) porque mudam níveis de tensão e protegem a rede de curto-circuito ou sobrecarga, além de controlar os fluxos de energia. As subestações garantem a continuidade do serviço reconfigurando a topologia do sistema em caso de falhas na rede.

Uma parte crucial do projeto é a determinação da carga elétrica necessária, que varia de acordo com a necessidade específica da instalação e as características dos equipamentos a serem alimentados. Com a crescente utilização de sistemas de corrente contínua (DC) em conjunto com os sistemas de corrente alternada (AC) tradicionais, a estimativa da carga AC/DC torna-se um desafio. Além disso, o dimensionamento adequado dos transformadores de serviços auxiliares, que fornecem energia aos sistemas de controlo, iluminação, aquecimento e outros serviços nas subestações, é fundamental para garantir a confiabilidade e eficiência operacional desses locais críticos.

## 1.2 Objetivos

O objetivo inicial desta dissertação passa por melhor compreender as subestações em relação aos sistemas elétricos de energia. Isto é iniciado com um estudo abrangente para identificar os vários tipos de subestações que estão presentes neste sistema, bem como os equipamentos essenciais associados a cada uma delas. Este primeiro nível de análise tem como objetivo construir uma base sólida para a compreensão das subestações como partes essenciais da infraestrutura elétrica. Posteriormente, a pesquisa terá foco nos serviços auxiliares de forma mais aprofundada, dividindo a análise em serviços auxiliares AC e DC.

Após esta análise teórica, o foco, é no principal objetivo desta dissertação, em que é proposto o desenvolvimento de uma ferramenta de cálculo que permita aos projetistas estimar com precisão a carga AC/DC necessária para subestações e, com base nessa estimativa, dimensionar os transformadores de serviços auxiliares de maneira eficiente. Essa ferramenta visa melhorar a capacidade de projetar subestações de forma mais inteligente, económica e sustentável, alinhando-se com os objetivos de eficiência energética e inovação tecnológica que são cruciais no cenário energético atual.

Para atingir o objetivo final foram definidas quatro fases essenciais:

1. Estudo das subestações e dos serviços auxiliares;
2. Criação do *dataset* de equipamentos;
3. Sistematização do cálculo das necessidades da instalação;
4. Desenvolvimento da ferramenta de dimensionamento.

### 1.3 Organização do documento

Esta seção é fundamental para guiar o leitor pela estrutura desta Dissertação, pois oferece uma compreensão completa da maneira como os tópicos abordados estão organizados.

No primeiro capítulo são destacados os objetivos do trabalho, a contextualização do problema e a calendarização, começando com uma breve introdução.

O segundo capítulo examina o sistema elétrico de energia de forma breve, com um foco específico nas subestações. Este capítulo aborda uma variedade de categorias de subestações existentes e oferece uma análise detalhada dos seus atributos distintos. Além disso, são discutidos os tipos de materiais mais comuns usados nestas instalações.

O terceiro capítulo aborda os sistemas auxiliares de corrente alternada (AC) e contínua (DC). Este tópico discute a importância destes sistemas no setor energético e nas subestações, enfatizando as suas funções essenciais para a operação eficaz das subestações e, por consequência, do sistema elétrico como um todo. O capítulo examina as características distintas de cada sistema, identificando as suas aplicações particulares e examinando as interações essenciais entre eles.

No quarto capítulo é descrita a abordagem adotada na ferramenta de cálculo. Este capítulo detalha os procedimentos essenciais para alcançar o propósito principal e usar a ferramenta de maneira adequada, explicando o processo completo para obter o perfil de consumo e a capacidade do transformador de serviços auxiliares.

No quinto capítulo, são fornecidos detalhes mais abrangentes sobre a estrutura da ferramenta. Ele aborda o *software* utilizado, a organização da ferramenta desenvolvida, a base de dados criada, instruções sobre como inserir os dados no sistema e, por fim, apresenta não só um exemplo que valida a metodologia, mas também uma comparação do dimensionamento de um projeto real utilizando a ferramenta desenvolvida e o método tradicional.

Por fim, no capítulo 6, é onde são apresentadas as principais conclusões.



## 2 As subestações no SEE

A presente Dissertação debruça-se sobre o dimensionamento de transformadores para serviços auxiliares presente em subestações. Neste sentido torna-se importante realizar uma breve introdução sobre o sistema elétrico de energia e subestações.

### 2.1 Introdução

O objetivo principal do Sistema Elétrico de Energia (SEE) é fornecer energia aos consumidores. A produção, transporte, distribuição e comercialização são as várias fases que compõem um SEE, representadas na Figura 1.

Em Portugal, até à publicação do Decreto-Lei n.º 15/2022, de 14 de janeiro, a produção de energia elétrica era enquadrada em dois regimes: PRO (Produção em Regime Ordinário) e PRE (Produção em Regime Especial). Com a publicação deste, simplificou-se o funcionamento do SEN (Sistema Elétrico Nacional), eliminando a distinção entre PRO e PRE, com a inevitável eliminação de dois procedimentos distintos de licenciamento da atividade de produção de eletricidade (Diário da República, 2022).

O Decreto-Lei n.º 15/2022, de 14 de janeiro, regula a organização e o funcionamento do SEN, concentrando-se em atividades como armazenamento, produção e autoconsumo. Isto está em conformidade com as estratégias de descarbonização do país, que incluem o Plano Nacional de Energia e Clima (PNEC) (DGEG, 2022; Diário da República, 2022).

A Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG) supervisiona a comunicação prévia, o registo e a licença para produção, autoconsumo e armazenamento, ajudando a tornar esses procedimentos mais sincronizados (DGEG, 2022).

A produção de energia atende aos requisitos específicos do tipo de produção proposto antes da injeção na rede elétrica pública. Os dispositivos de controlo prévio, também conhecidos como licenciamento, são ajustados à potência da central, garantindo acesso suficiente à atividade de produção. Esses instrumentos diferem de acordo com as características distintas de cada tipo de fabricação (DGEG, 2022).

Para a produção de eletricidade destinada ao autoconsumo, a potência instalada superior a 700 W e até 30 kW requer comunicação prévia. Além disso, inclui projetos de pesquisa e desenvolvimento, demonstrações e testes de tecnologias inovadoras em produção, armazenamento e autoconsumo com potência instalada dentro desse intervalo, incluindo o reequipamento de centros electroprodutores solares ou eólicos, desde que a potência instalada seja mantida ou reduzida em comparação com o procedimento inicial de controlo (DGEG, 2022; Diário da República, 2022).

Para a produção de eletricidade a partir de fontes de energia renovável com injeção total na rede elétrica de serviço público (RESP), um registo prévio e certificado de exploração são usados para substituir a comunicação, com potência instalada até 1 MW. Este processo também pode ser usado para produzir eletricidade para autoconsumo com potência instalada superior a 30 kW e até 1 MW, bem como para armazenar eletricidade autónoma com potência instalada até 1 MW (DGEG, 2022; Diário da República, 2022).

A produção de eletricidade a partir de fontes de energia não renovável e fontes de energia renovável com potência instalada superior a 1 MW requer licença, seja para autoconsumo ou injeção total na RESP. Além disso, inclui armazenamento de energia autónoma com potência instalada superior a 1 MW. Além de outras atividades não mencionadas neste quadro, as atividades de produção e armazenamento de eletricidade precisam de licença para passar por um processo de avaliação de impacto ambiental (AIA) ou avaliação de incidências ambientais, conforme estipulado pela legislação aplicável (DGEG, 2022; Diário da República, 2022).

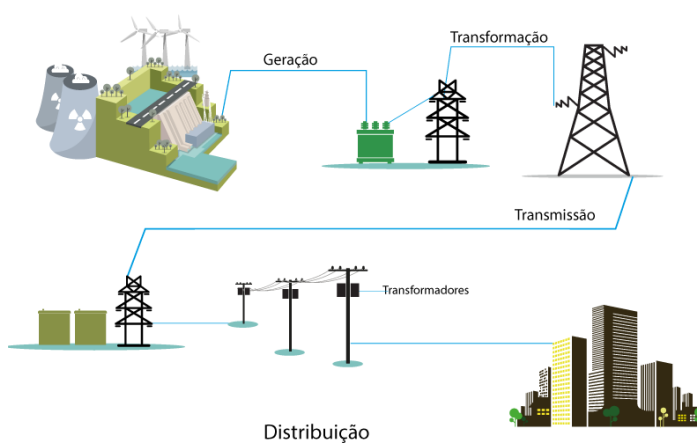


Figura 1 – Etapas de um Sistema Elétrico de Energia (Inteligente, 2020)

Tal como o nome sugere, a Rede Nacional de Transporte (RNT) é responsável pelo transporte de energia em Portugal, onde existem três níveis de tensão: 150 kV, 220 kV e 400 kV. A energia elétrica é transmitida até às subestações de distribuição ou entre várias subestações por meio da rede de transporte (Carneiro, 2019). Esta encontra-se representada na Figura 2.



Figura 2 – Rede Nacional de Transporte (Santos, 2023)

A principal responsabilidade da Rede Nacional de Distribuição (RND) é fornecer energia a todos os consumidores nos três níveis de tensão diferentes: baixa, média e alta. Utilizado para níveis de tensão de 60 kV, 30 kV, 15 kV, 10 kV, 6 kV e 400 230 V, sendo que o nível de tensão 6 kV é apenas utilizado em linhas mais antigas e tende a ser substituído (Santos, 2023).

Na Figura 3 é representada a Rede Nacional de Distribuição referente ao Grande Porto.



Dependendo do modo de instalação dos equipamentos, estas podem ser consideradas subestações Externas ou Ao Tempo ou subestações Internas ou Abrigada.

No caso de uma subestação Externa, os equipamentos são instalados de uma forma a que estão sujeitos às condições atmosféricas, condições estas que desgastam os materiais, exigindo manutenção mais frequente e que reduzem a eficácia do isolamento (Duailibe, 1999).

Já numa subestação Interna, os equipamentos não estão sujeitos às condições atmosféricas, estando assim “abrigados”. As subestações abrigadas podem consistir em cubículos metálicos, além de subestações isoladas a gás, tal como o hexafluoreto de enxofre ( $SF_6$ ) (Duailibe, 1999).

Dependendo do modo de construção e instalação podemos considerar as subestações como (StudyElectrical, 2019):

- **Subestação de Painéis Isolados a Ar:** utiliza equipamentos primários de subestação cujos terminais estão no ar.
- **Subestação Isolada a Gás:** utiliza isolamento sólido ou gasoso ( $SF_6$ ) para permitir que a folga fase-terra e fase-fase sejam drasticamente reduzidas.

As vantagens da poupança de espaço dos equipamentos isolados a gás/revestidos a metal podem ser significativas, especialmente para subestações de alta tensão em grandes cidades, onde é difícil obter espaço e o terreno é muito caro. Os equipamentos revestidos a metal também podem ser atrativos por outras razões, nomeadamente o impacto visual em áreas ambientalmente sensíveis e a operação em ambientes altamente poluídos (StudyElectrical, 2019).

As subestações isoladas a ar geralmente custam menos do que uma subestação equivalente isolada a gás. Quase todas as subestações de painéis isolados a gás são construídas em ambientes internos e podem ser facilmente construídas no subsolo para evitar qualquer preocupação ambiental, além de que o isolamento interno é independente da pressão atmosférica (StudyElectrical, 2019).

Quanto ao nível de tensão uma subestação pode ser classificada em quatro categorias:

- **Baixa Tensão:** postos de transformação (PT) que tenham uma tensão até 1 kV;
- **Media Tensão:** subestações com níveis de tensão entre 1 kV e 45 kV;
- **Alta Tensão:** todas as subestações que tenham uma tensão entre 45 kV e 110 kV;
- **Muito Alta Tensão:** todas as subestações que tenham uma tensão superior a 110 kV.

### **2.2.1 Subestação de Transmissão**

As subestações de transmissão são encontradas onde a eletricidade entra na rede elétrica. Dado que a saída dos geradores de energia (como centrais elétricas ou parques eólicos) varia em tensão (superiores a 45 kV), esta deve ser convertida para um nível adequado às suas possibilidades de transmissão (NationalGrid, 2022).

A eletricidade é então comumente transmitida através de linhas aéreas de alta tensão apoiadas por postes de eletricidade e que podem percorrer grandes distâncias. Aumentar ou diminuir a tensão de forma adequada garantirá que ela chegue às redes de distribuição locais com segurança e sem perdas significativas de energia (NationalGrid, 2022; StudyElectrical, 2019).

Os transformadores da subestação de transmissão suportam o sistema de transmissão e os transformadores menores da subestação de transmissão e distribuição (StudyElectrical, 2019).

A subestação de transmissão contém equipamentos utilizados para seccionar o sistema de transmissão elétrica quando ocorre uma falha ou curto-circuito num dos circuitos (Duailibe, 1999; StudyElectrical, 2019).

Dependendo da tensão do sistema, os tipos e características dos equipamentos utilizados nas “*switching stations*” são idênticas aos utilizados nas estações de transmissão. As “*switching stations*” não alteram a tensão do sistema de um nível para outro e, portanto, não contêm transformadores de potência e geralmente operam em níveis de tensão de subtransmissão ou transmissão (United States Department of Agriculture, 2001).

Uma “*switching station*” é uma combinação de equipamentos de comutação e controlo dispostos para fornecer proteção de circuito e flexibilidade de comutação do sistema. Estas, cada vez são mais comuns nos sistemas de transmissão. Arranjos flexíveis de comutação numa rede de transmissão podem ajudar a manter um serviço confiável sob certas condições anormais ou de manutenção (United States Department of Agriculture, 2001).

### **2.2.2 Subestação de Subtransmissão**

Subestações de subtransmissão trata-se de subestações elétricas com equipamentos usados para converter linhas de transmissão de alta tensão (HV), muito-alta tensão (EHV) ou ultra-alta tensão (UHV) em linhas de subtransmissão de tensão intermediária ou para comutar circuitos de subtransmissão (StudyElectrical, 2019).

Os circuitos de subtransmissão e subestações estão localizados próximos a concentrações de alta carga, normalmente em áreas urbanas e alimentam Postos de Transformação.

### 2.2.3 Posto de Transformação

Posto de Transformação (PT) trata-se de uma instalação que transforma a corrente elétrica por um ou mais transformadores estáticos e usa a corrente secundária de todos os transformadores diretamente nos receptores. Além disso, pode usar condensadores para compensar o fator de potência (Gomes, 2021).

Um PT tem como objetivo alterar os níveis de tensão da eletricidade para que ela possa ser distribuída na área. Essa transformação de tensão é essencial para a transmissão e distribuição eficiente de energia elétrica, garantindo que os consumidores finais, incluindo residências, empresas e indústrias, a usem com segurança.

Normalmente, estas instalações transformam valores de alta tensão (HV) (45 a 110 kV), muito-alta tensão (EHV) (110 a 750 kV) ou ultra-alta tensão (UHV) (> 750 kV) em valores de média (1 a 45 kV) ou baixa (< 1 kV) tensão (Beleza, 2018; StudyElectrical, 2019).

A eletricidade é encaminhada do sistema de transmissão para um Posto de Transformação (PT), que irá baixar a tensão para que possa entrar nas nossas casas e empresas num nível utilizável. Isto é realizado através de uma rede de distribuição de linhas aéreas menores ou cabos subterrâneos em edifícios (NationalGrid, 2022).

As subestações localizadas no meio de uma área de carga são chamadas de Postos de Transformação. Estes podem estar próximos uns dos outros até cerca de 3,22 Km em áreas densamente povoadas, contendo transformadores de potência que reduzem a tensão dos níveis de subtransmissão para os níveis de distribuição (NationalGrid, 2022; StudyElectrical, 2019).

Os transformadores normalmente são equipados para regular a tensão do barramento do PT. Os disjuntores nas subestações de distribuição são instalados entre o barramento de baixa tensão e os circuitos de distribuição. Os circuitos de distribuição variam em capacidade de aproximadamente 5 MVA a 20 MVA. Grandes PT's possuem transformadores de potência com capacidade de até 100 MVA e servem como alimentação para até 10 circuitos de distribuição (StudyElectrical, 2019).

Caso os transformadores de potência não possuam equipamento de subcarga com comutação automática, normalmente é necessária a instalação de reguladores de tensão.

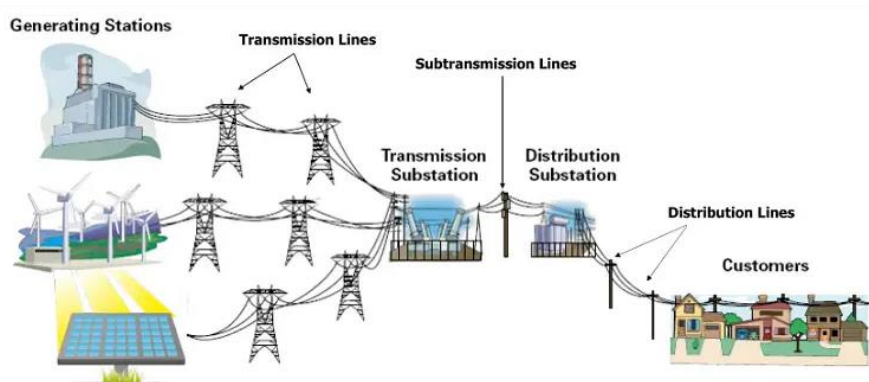


Figura 4 – Subestações de Transmissão, Subtransmissão e Posto de Transformação (StudyElectrical, 2019)

Em locais de produção distribuída, como os parques eólicos ou fotovoltaicos, pode ser necessária uma subestação coletora. Esta assemelha-se a um PT, embora o fluxo de energia seja na direção oposta, de muitas turbinas eólicas ou inversores para a rede de transmissão (Wartsila, 2022). Normalmente, para economia de construção, o sistema coletor opera em torno de 35 kV e a subestação coletora consegue aumentar a tensão para uma tensão de transmissão para a rede (Michigan Technological University, n.d.). A subestação coletora também pode fornecer correção do fator de potência, se necessário, medição e controle do parque eólico. Em alguns casos especiais, uma subestação coletora também pode conter uma estação conversora HVDC (*High-voltage direct current*) (Michigan Technological University, n.d.).

## 2.3 Principais Equipamentos de uma Subestação

Como o título indica, neste subtópico, serão abordados os principais equipamentos constituintes de uma subestação e adicionalmente a função de cada um.

### 2.3.1 Transformadores de Potência

Um transformador de potência é definido como um transformador que opera com altas tensões e correntes na rede do sistema de potência. É usado principalmente para aumentar ou diminuir o nível de tensão entre o gerador e os circuitos de distribuição. Este possui dois ou mais enrolamentos que são acoplados magneticamente através de um núcleo, sendo que uma corrente variável num enrolamento cria um fluxo magnético variável no núcleo, o que induz uma tensão variável nos outros enrolamentos. A relação das tensões nos enrolamentos primário e secundário depende do número de voltas em cada enrolamento (Electrical4U, 2023).

Os transformadores de potência são classificados como dispositivos estáticos porque não possuem partes móveis ou rotativas. Também são dispositivos passivos porque não produzem nem consomem energia elétrica, apenas a transferem de um circuito para outro (Electrical4U,

2023). Estes transformadores podem operar com alta eficiência e confiabilidade por longos períodos, dos quais destaco:

**Auto-transformador** - transformadores que para as funções de entrada e saída compartilham um único enrolamento, o que pode resultar em benefícios de custo e tamanho.

**Transformador de distribuição** - transformadores utilizados para diminuir a tensão a ser entregue aos clientes finais. São normalmente instalados em postes ou em câmaras subterrâneas e possuem uma potência que varia entre 50 e 1000 kVA (E-REDES, 2023). O enrolamento de média/alta tensão tem tensão de 12, 24 ou 36 kV, já o enrolamento de baixa tensão tem 230/400 V.

**Transformadores de Instrumentos** - transformadores utilizados para medir altas tensões e correntes num circuito, reduzindo-as para valores mais baixos que podem ser medidos por instrumentos convencionais. Estes incluem transformadores de intensidade (TI) e transformadores de tensão (TT) (Electrical4U, 2023).

### 2.3.2 Disjuntores

Os disjuntores são os aparelhos mais eficientes e mais complexos em uso nas redes elétricas, destinados à operação em carga, podendo a sua operação ser manual ou automática. São responsáveis pela interrupção e restabelecimento das correntes elétricas num determinado ponto do circuito, devendo ser instalados junto ao relé. O disjuntor interrompe correntes de defeito de um determinado circuito durante o menor espaço de tempo possível e interrompem também correntes de circuitos que operam a plena carga e em vazio, energizando os mesmos circuitos em condições de operação normal ou em falta (Circuit Globe, 2019; EVO, 2022).

A separação dos contatos condutores de corrente produz um arco. O arco é extinto por um meio adequado, como óleo dielétrico, vácuo, gás  $SF_6$ . Os disjuntores são necessários em todos os pontos de comutação da subestação elétrica (ElectricianWorld, 2019).

### 2.3.3 Seccionadores

Os seccionadores são dispositivos de comutação que podem ser abertos ou fechados somente sob nenhuma condição de corrente. Eles fornecem isolamento do circuito para fins de manutenção. Os seccionadores podem ser usados para desconectar disjuntores e pode ser aberto após o disjuntor. Depois de abrir o seccionador, este pode ser fechado para descarregar as cargas elétricas retidas no solo. Estes equipamentos apenas podem ser operados sem carga, embora possam ser operados sob tensão (Circuit Globe, 2019; Duailibe, 1999; ElectricianWorld, 2019).

### **2.3.4 Interruptor Diferencial**

O interruptor diferencial opera comparando a corrente que entra e sai de um circuito elétrico e é ativado se houver uma diferença significativa entre essas correntes. Isso interrompe o circuito e evita o risco de choque elétrico (Beleza, 2016; García, 2022).

### **2.3.5 Relés**

Os relés funcionam como interruptores controlados remotamente que respondem a estímulos elétricos ou físicos para abrir ou fechar um circuito. Assim, através da atuação sobre disjuntores, o isolamento dos trechos de localização de falhas é realizado, protegendo o equipamento contra danos e, portanto, perigos subsequentes como incêndio. O risco de vida é reduzido com a remoção da seção particularmente defeituosa (Circuit Globe, 2019; Duailibe, 1999; ElectricianWorld, 2019).

### **2.3.6 Para-raios**

O para-raios é um dispositivo de proteção instalado em edifícios e estruturas para direcionar descargas elétricas atmosféricas, como raios, de forma segura para o solo, protegendo assim a estrutura e os seus ocupantes contra danos e incêndios. Geralmente, consiste numa haste metálica elevada que atrai a descarga elétrica e a conduz para o solo, onde a eletricidade é dissipada de forma segura (Duailibe, 1999; EVO, 2022).

### **2.3.7 Recuperadores Automáticos**

O recuperador automático é fornecido para restaurar a continuidade do serviço após a interrupção de uma falta transitória. Os disjuntores de alta tensão usados para controlar linhas de transmissão aéreas e esquemas de proteção de distância para proteção de linhas são fornecidos com esse recurso (Circuit Globe, 2019).

### **2.3.8 Fusíveis**

O fusível destina-se a proteger o circuito contra curto-circuitos, sendo também um limitador da corrente de curto-circuito. É bastante utilizado na indústria para a proteção de motores. Estes dispositivos são altamente eficazes na proteção de circuitos de média tensão devido às suas notáveis características de resposta rápida ao tempo e à corrente. São capazes de controlar e limitar a corrente de curto-circuito de forma extremamente ágil devido aos tempos de atuação muito curtos. Graças à sua capacidade de suportar altas correntes, são empregados em sistemas que apresentam valores de curto-circuito consideravelmente elevados (Duailibe, 1999; EVO, 2022).

O fusível de cartucho de alta capacidade de ruptura é usado para proteção contra sobrecorrente de circuitos de baixa e alta tensão (ElectricianWorld, 2019).

### **2.3.9 Barramento**

É um dos elementos mais importantes de uma subestação. O barramento é um tipo de condutor que transporta uma corrente elétrica ao qual são feitas muitas conexões. Por outras palavras, barramento é um tipo de junção elétrica na qual ocorre a entrada e saída de corrente elétrica. Quando uma falha ocorre no barramento, todos os equipamentos do circuito conectados a essa seção devem ser desligados para fornecer isolamento completo no menor tempo possível, para evitar danos à instalação devido ao aquecimento dos condutores (Circuit Globe, 2019).

### **2.3.10 Baterias**

Nas centrais elétricas e subestações de grande capacidade, os circuitos de operação e controlo automático do sistema de relés de proteção, bem como os circuitos de iluminação de emergência, são alimentados por baterias. As baterias são montadas num determinado número de células acumuladoras dependendo da tensão operacional do respetivo circuito DC. As baterias de armazenamento são dois tipos de baterias de chumbo-ácido e baterias ácido-alcalinas (Circuit Globe, 2019).

### **2.3.11 Bateria de Condensadores**

A bateria de condensadores consiste num conjunto de condensadores conectados em série ou paralelo em que armazenam a energia elétrica na forma de cargas. Estas consomem corrente que aumenta o fator de potência da rede e também aumenta a capacidade de transferência de energia do sistema (Circuit Globe, 2019).



## 3 Serviços Auxiliares

Os serviços auxiliares de uma subestação referem-se a todos os dispositivos e equipamentos que não estão diretamente relacionados com a transformação ou transporte de energia. Estes desempenham funções importantes para garantir o funcionamento, segurança e eficiência da subestação, tais como monitorização, controlo e proteção.

### 3.1 Serviços Auxiliares de Corrente Alternada

Os sistemas auxiliares de corrente alternada (AC) usados numa subestação são normalmente utilizados para arrefecimento de transformadores, em bombas de óleo e comutadores de derivação de carga, compressores de ar de disjuntores e motores de carregamento, aquecedores de dispositivos externos, iluminação e para a casa de controlo. A casa de controlo normalmente inclui iluminação, aquecimento, ventilação e ar condicionado, entrada para carregador de bateria e bomba de água para poço (Csanyi, 2018)(Bolotinha, 2017).

Para que estes serviços possam existir é necessário cumprir alguns requisitos de projeto (Csanyi, 2018):

- **Carga consumida** – Deve-se tabular a potência de todas as cargas AC da subestação e aplicar um fator de potência a cada uma. A potência total é utilizada para dimensionar o transformador auxiliar.
- **Número de alimentadores primários** - Em subestações de distribuição pequenas, um transformador auxiliar normalmente é suficiente. À medida que o tamanho da subestação aumenta, a carga do cliente aumenta criticamente. Uma decisão deve ser tomada quanto à redundância dos serviços auxiliares da subestação à luz da economia e dos requisitos do cliente. Quando forem selecionadas alimentações duplas, deve-se

localizar duas fontes separadas e independentes para que a perda de uma não afete o serviço da outra e designar o menos confiável como fornecimento alternativo.

- **Entrada aérea ou subterrânea** - As fontes auxiliares podem ser linhas de distribuição aéreas ou subterrâneas. Ao enterrar dentro da propriedade da subestação, mesmo a partir de uma fonte aérea, recomenda-se uma proteção enterrada diretamente.
- **Cargas críticas** – Algumas cargas de baixa tensão devem-se manter sempre ativas como carregadores de baterias, arrefecimento do transformador, disjuntores e motores, luz de segurança, alarme de incêndio, aquecimento, entre outros. As cargas críticas para cada subestação devem ser determinadas. Essas cargas deverão ser atendidas por painel alimentado pela fonte normal e representando a carga mínima para transferência para alimentação alternativa.
- **Nível de tensão secundária** - Vários níveis de tensão secundária ou de utilização estão disponíveis para serviços auxiliares AC. Para efeitos de padronização, num determinado sistema de potência é melhor que apenas um nível seja selecionado.
- **Esquema de transferência** - Quando duas fontes, normal e alternativa, alimentam algum serviço auxiliar da subestação, deve ser estabelecido um meio de transferência de uma para outra.
- **Correntes de defeito** – O dispositivo de proteção tem de operar ou abrir durante a ocorrência de um defeito, de forma a evitar danos no equipamento.

Os equipamentos que podem ser necessários e fazer parte dos serviços auxiliares AC são (Bolotinha, 2017; Csanyi, 2018; Santos, 2023):

- Transformadores (Figura 6);
- Quadros elétricos;
- Equipamento de iluminação, aquecimento, ventilação, ar-condicionado e telecomunicação;
- Retificadores (Figura 7);
- Circuitos de força motriz dos disjuntores e seccionadores;
- Comando e sinalização de toda a aparelhagem MAT e AT;
- Grupo gerador de emergência (Figura 5).



Figura 7 – Retificador (Adelco, n.d.)



Figura 6 – Transformador (Fontes de Energia, n.d.)



Figura 5 – Grupo Gerador (ENGEFAR, n.d.)

### 3.2 Serviços Auxiliares de Corrente Contínua

Uma subestação pode ter um ou vários sistemas de corrente contínua (DC). Os fatores que afetam o número de sistemas são a necessidade de mais de um nível de tensão e a necessidade de duplicação de sistemas. Nos dias de hoje, os sistemas auxiliares DC em subestações operam no nível de 110 V ou 220 V, embora existam níveis mais baixos (Bolotinha, 2017; Csanyi, 2015).

Alguns sistemas na subestação podem exigir tensões mais baixas como fonte de alimentação auxiliar. Um exemplo típico destes sistemas seriam os dispositivos de telecomunicações óticas ou os equipamentos portadores de linha de energia, que normalmente requerem 48 V. Se o consumo de energia destes dispositivos for suficientemente baixo, a sua alimentação pode ser organizada com conversores DC/DC, alimentados pelo sistema DC de nível de tensão mais elevado (Csanyi, 2015).

Os principais componentes do sistema são o armário de baterias (Figura 11), o alimentador e o quadro de distribuição, incluindo o relé de monitoramento do sistema DC (Bolotinha, 2017). Numa instalação típica, especialmente com baterias de tamanho considerável, as baterias são instaladas numa sala de baterias separada (Csanyi, 2015). A ventilação da sala de baterias deve ser adequada, considerando o tipo e tamanho da bateria e o nível de temperatura na sala da bateria não deve exceder 25 °C, uma vez que temperaturas acima deste valor afetam significativamente a vida útil da bateria (Chen et al., 2022).

Na Figura 8 está representado o sistema clássico dos Serviços Auxiliares DC, ainda presente em algumas subestações. Estes sistemas são constituídos por vários módulos retificadores, dependendo da tensão pretendida.

Cada retificador está conectado a um grupo de baterias e os módulos retificadores estão ligados em paralelo.

Os Serviços Auxiliares DC mais recentes diferem dos clássicos. Nestes casos, os únicos componentes responsáveis pela transformação do nível de tensão para os equipamentos são um retificador e vários módulos conversores, como é observável na Figura 9.

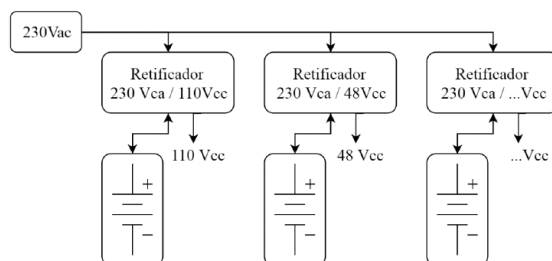


Figura 8 – Arquitetura clássica dos Serviços Auxiliares DC (Santos, 2023)

O módulo de díodos redutores (MDR) do alimentador é dimensionado para a carga máxima e garante que a tensão máxima permitida não seja excedida (Santos, 2023).

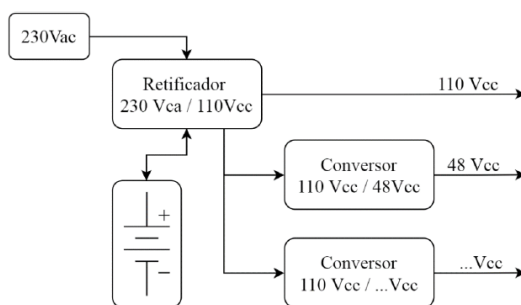


Figura 9 – Arquitetura moderna dos Serviços Auxiliares DC (Santos, 2023)

Relativamente ao módulo de supervisão e controlo (MSC) deve permitir realizar as seguintes funções:

- Comando, registo cronológico de acontecimentos, parametrização e monitorização de todo o sistema;
- Disponibilização de medidas, alarmes e respetiva sinalização;
- Permitir o acesso remoto de centro de engenharia;
- Telessinalização da falha do MSC.

Na Figura 10, apresenta-se um exemplo de um alimentador e os respetivos equipamentos constituintes.

Relativamente ao armário de baterias, estas devem ser instaladas em paralelo com os módulos retificadores e a carga.

O armário deve ter uma estrutura que permita a retenção de eletrólito derramado, ventilação e selado para evitar entrada de animais e prateleiras em degraus para facilitar a substituição ou manutenção das baterias.

Como o sistema DC fornece especialmente proteção de relés, controlo e circuitos de disjuntores, é bastante importante para a operação confiável e segura da subestação que o fornecimento de energia esteja sempre disponível (Thompson & Wilson, 2007). A necessidade deste fornecimento confiável torna-se ainda mais importante durante perturbações e falhas nos circuitos primários de alta ou média tensão. A importância desta energia auxiliar é crucial para a subestação, pois quanto maior o papel que a subestação desempenha do ponto de vista da rede, maiores serão as necessidades pelos sistemas de energia auxiliares DC da subestação (Csanyi, 2015).

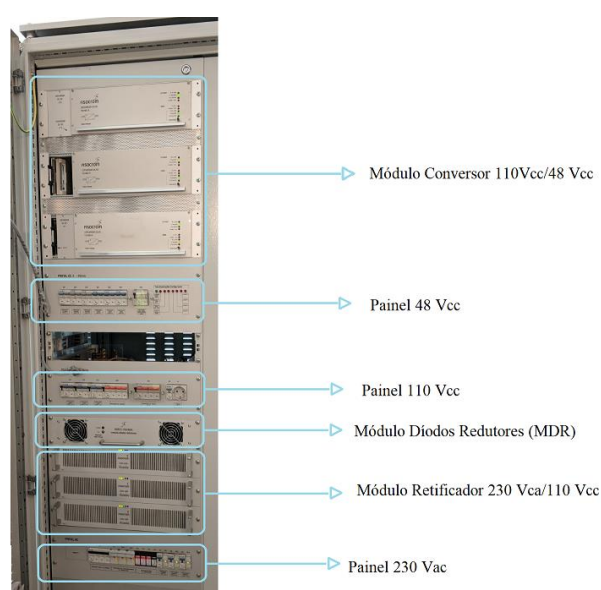


Figura 10 - Exemplo de um alimentador e respetivos equipamentos constituintes (Santos, 2023)

Os transformadores de serviços auxiliares são projetados para fornecer energia a sistemas ou equipamentos secundários de uma subestação. Eles desempenham um papel crucial na garantia do fornecimento de energia necessário para operações e serviços secundários, distintos dos principais processos de transmissão e distribuição de energia. Estes atuam em ambos os sistemas AC e DC referidos anteriormente.



Figura 11 - Armário de Baterias (Bainga, n.d.)

### 3.3 Normas e Regulamentos

As características, dimensionamento, instalação e ensaios dos equipamentos dos serviços auxiliares devem obedecer aos seguintes regulamentos (Bolotinha, 2017):

- RTIEBT (Regras Técnicas das Instalações Eléctricas em Baixa Tensão) – Portaria nº 949-A/2006 de 11 de Setembro;
- RSSPTS (Regulamento de Segurança de Subestações e Postos de Seccionamento) – Decreto nº 42895 de 31 de Março de 1960, alterado pelos Decretos Regulamentares nº 14/77 de 18 de Fevereiro e nº 56/85 de 6 de Setembro.

Relativamente às normas habitualmente utilizadas para a definição das características e ensaios destes equipamentos temos (Bolotinha, 2017):

- NP e NP EN (Normas Portuguesas e Normas Portuguesas Harmonizadas com as Normas Europeias);
- EN (Normas Europeias);
- IEC (*International Electrical Commission*).

### 3.4 Complexidade de um Sistema Misto de HVDC e HVAC

A transmissão de energia em Portugal é predominantemente feita em AC. Há interesse na utilização de sistemas de corrente contínua de alta tensão (HVDC) para facilitar a integração de energias renováveis, melhorar a eficiência da transmissão e resolver outros desafios da rede.

As redes eléctricas têm vindo a crescer tanto em termos de complexidade quanto de tamanho e essa complexidade acrescida deve-se às regulamentações que visam integrar sistemas de energias renováveis, ao aumento da eficiência, às técnicas avançadas de armazenamento de energia e à tecnologia eletrónica de potência. Os HVDC estão a tornar-se igualmente importantes devido ao envolvimento de fontes de energia renováveis *onshore* e *offshore*, como

a energia solar e eólica, uma vez que a saída do seu sistema de rede assíncrona AC tem de ser transformada em HVDC para efeitos de transmissão de energia à distância. Esta transformação deve-se ao facto de diminuir as despesas, maior capacidade de transferência de energia e menos perdas dielétricas (Javed et al., 2021).

O conceito de sistemas de rede híbridos de corrente alternada de alta tensão (HVAC) e corrente contínua de alta tensão (HVDC) traz uma enorme vantagem para reduzir a carga da linha AC, aumentar a utilização da infraestrutura de rede e reduzir os custos operacionais. No entanto, este apresenta problemas como desafios de integração, estratégias de controlo, controlo de otimização e segurança. Os objetivos combinados nas redes híbridas HVAC-HVDC são alcançar a regulação rápida da tensão e frequência DC, fluxo de energia ideal e operação estável durante condições normais e anormais (Javed et al., 2021).

Os sistemas de corrente contínua de alta tensão e conversor de fonte de tensão (VSC-HVDC) tornaram-se uma opção atraente para integrar recursos de energia renovável remotos e distantes da costa às principais redes AC, uma vez que têm a capacidade de ajustar e controlar dinamicamente a energia que fornecem aos sistemas AC para ajudar a manter a estabilidade e a confiabilidade desses sistemas.

O desejo de maior capacidade de transferência de energia e a dificuldade em garantir a prioridade para novas linhas AC em muitos países também resultou no aumento do uso de sistemas VSC-HVDC integrados que operam em paralelo com as linhas AC existentes. Foi afirmado que o controlo e a operação de sistemas VSC-HVDC são particularmente preocupantes para redes fracas com menor número de grandes unidades de geração síncrona (Shah et al., 2018).

Os sistemas HVDC podem participar ativamente no fornecimento de serviços auxiliares aos sistemas AC. Ao mesmo tempo, os sistemas HVDC também precisarão de serviços auxiliares, como balanço de energia, compensação de perdas, *black start* e restauração para um bom funcionamento (Kaushal & Hertem, 2019).

Com base nos requisitos de serviços auxiliares para sistemas AC, têm sido realizadas pesquisas para desenvolver a solução possível para fornecer serviços auxiliares de sistemas HVDC para sistemas AC e na literatura várias soluções possíveis foram propostas. A revisão da literatura sobre possíveis métodos para prestação de serviços auxiliares de sistemas HVDC baseados em LCC (*Line Commutated Converter*) e VSC (*Voltage Source Converter*) é apresentada abaixo (Kaushal & Hertem, 2019):

- **Sistema HVDC baseado em LCC:** Foram propostas algumas abordagens para controlar a tensão do sistema a partir de sistemas HVDC baseados em LCC. A análise de estabilidade de tensão para sistema HVDC de alimentação múltipla usando STATCOM foi apresentada por alguns autores. Outros apresentam vários métodos para fornecer serviços de controlo de frequência de sistemas HVDC, enquanto alguns autores propuseram uma abordagem de geradores síncronos virtuais (VSG) para fornecer

controle de frequência de parques eólicos. Métodos para fornecer serviço *black start* com sistemas HVDC baseados em LCC também foram detalhados, bem como métodos para amortecimento de oscilação de potência usando sistemas HVDC baseados em LCC para sistemas AC conectados.

- **Sistema HVDC baseado em VSC:** Há propostas de uma abordagem VSG para fornecer controle rápido de frequência e inércia virtual a partir das estações conversoras HVDC baseadas em VSC, propostas para fornecer suporte de frequência primária de parques eólicos *offshore* e também técnicas de controle de conversor HVDC. Outros autores discutiram as disposições para o serviço de controle de tensão do sistema AC a partir de sistemas HVDC, enquanto outros destacam o método para fornecer frequência a partir da energia armazenada no link HVDC. Há também estudos sobre capacidades de *black start* de sistemas HVDC baseados em VSC. Por fim, alguns autores destacaram os aspectos de controle para amortecimento de oscilações para sistemas HVDC baseados em VSC.

Com base na revisão da literatura, algumas das características distintivas dos sistemas HVDC e a sua possível utilização para fornecer serviços auxiliares foram resumidas na Tabela 1, assumindo que estejam disponíveis reservas suficientes nos sistemas para fornecer os serviços auxiliares considerados.

Tabela 1 - Serviços auxiliares de sistemas de transmissão HVDC (Kaushal & Hertem, 2019)

Sistema	Assíncrono		Síncrono		Offshore		Observações
	LCC	VSC	LCC	VSC	LCC	VSC	
Inércia	++	++	NA	NA	++*	+++*	Sistemas HVDC baseados em VSC oferecem melhor controlabilidade para conexões <i>offshore</i> .
FCR ( <i>Frequency Containment Reserve</i> )	++	++	NA	NA	++*	++*	Sistemas HVDC incorporados em zonas síncronas não podem fornecer Inércia e FCR.
FRR ( <i>Frequency Restoration Reserves</i> )	+++	+++	NA	NA	++*	++*	Sistemas HVDC fornecem melhor controlabilidade em comparação com os sistemas AC.
RR ( <i>Replacement Reserves</i> )	+++	+++	NA	NA	++*	++*	
Controlo de tensão	-	+++	-	+++	-	+++	Sistemas HVDC baseados em LCC não podem fornecer controlo de tensão e capacidade de <i>Black start</i> .
<i>Black start</i>	-	++	-	++	-	++	
Controlo de fluxo	+++	+++	+++	+++	-	-	Sistemas HVDC têm melhor capacidade de transporte de energia do que os sistemas AC.
Amortecimento de oscilações	++	+++	++	+++	+	+	Sistemas HVDC baseados em VSC têm melhores capacidades de amortecimento de oscilação.

Notas:

-; significa que os sistemas HVDC não podem fornecer o serviço.

++; são capazes de fornecer o serviço.

+++; são capazes de fornecer o serviço semelhante aos sistemas AC convencionais.

++++; são capazes de fornecer o serviço semelhante aos sistemas AC convencionais e podem fornecer o serviço melhor do que os sistemas AC.

\*; implica que o sistema HVDC requer controlos apropriados no lado *offshore* para fornecer este serviço.

NA; implica que não é possível prestar este serviço a partir do respetivo sistema HVDC.



## 4 Caracterização da Metodologia Desenvolvida

Este capítulo tem como finalidade apresentar a metodologia utilizada na implementação da ferramenta de cálculo, baseada nos consumos e fatores de simultaneidade dos equipamentos, que permite o dimensionamento de transformadores para serviços auxiliares numa subestação.

### 4.1 Procedimento de Dimensionamento do Transformador

A metodologia, apresentada na Figura 12, é composta essencialmente por duas fases: construção do perfil de consumo e dimensionamento do transformador. O resultado final será validado consoante dados previamente recolhidos de casos práticos reais e informações dos principais fabricantes.

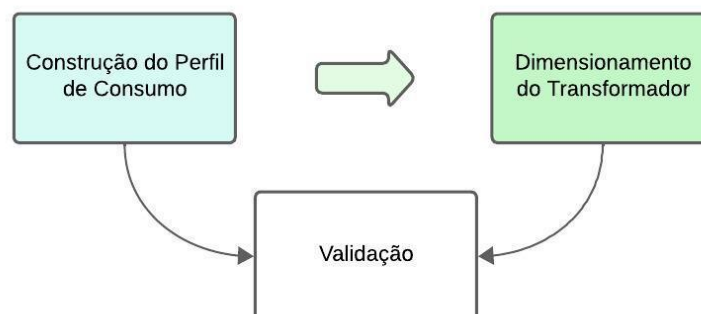


Figura 12 – Principais Passos da Metodologia

A metodologia proposta, tal como já foi referido anteriormente, tem como objetivo cumprir os requisitos inicialmente propostos: otimização e automatização do processo de dimensionamento, atualmente seguido pela empresa. Esta é tida como consistente, visto que resulta de um conjunto de informações e ideias retiradas do atual processo de dimensionamento da SISINT.

Na Figura 13 é apresentado um diagrama que expõe uma visão geral do processo.

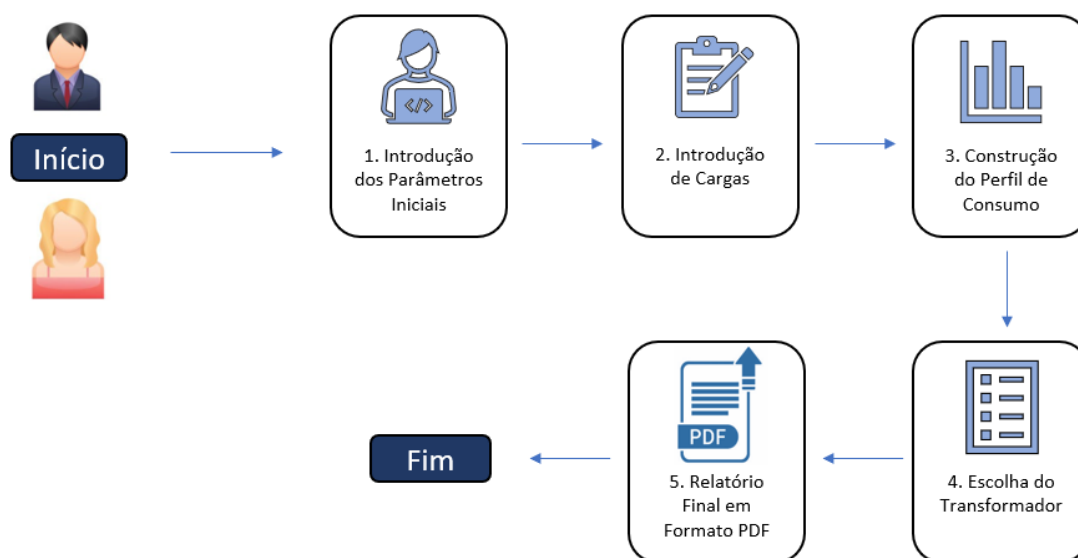


Figura 13 – Visão Geral do Processo de Dimensionamento

## 4.2 Perfil de Consumo

Como ponto de partida de todo o processo de dimensionamento, importa conhecer as necessidades da instalação, que permitirão a construção de um perfil de consumo.

Os perfis de consumo podem ser construídos usando o consumo máximo, mínimo ou médio dos equipamentos. Estas três opções disponíveis visam garantir um dimensionamento adequado do transformador, evitando o risco de "apagões" e garantindo um fornecimento de energia estável.

Ao levar em consideração o consumo máximo, garantimos que o transformador possa lidar com picos de energia e assumimos o pior cenário existente. Por outro lado, o consumo mínimo oferece uma perspetiva conservadora, garantindo que o transformador possa fornecer mesmo durante períodos de baixa procura. Esta opção é essencialmente utilizada quando prevalece a questão económica. Já o consumo médio, fornece uma estimativa mais sensata e real da carga típica de uma subestação. De qualquer forma, para garantir a confiabilidade do sistema elétrico, nesta ferramenta é considerado um nível de consumo sempre ativo e constante.

Para esta fase do projeto, foi desenvolvido o algoritmo que se encontra apresentado na Figura 14.

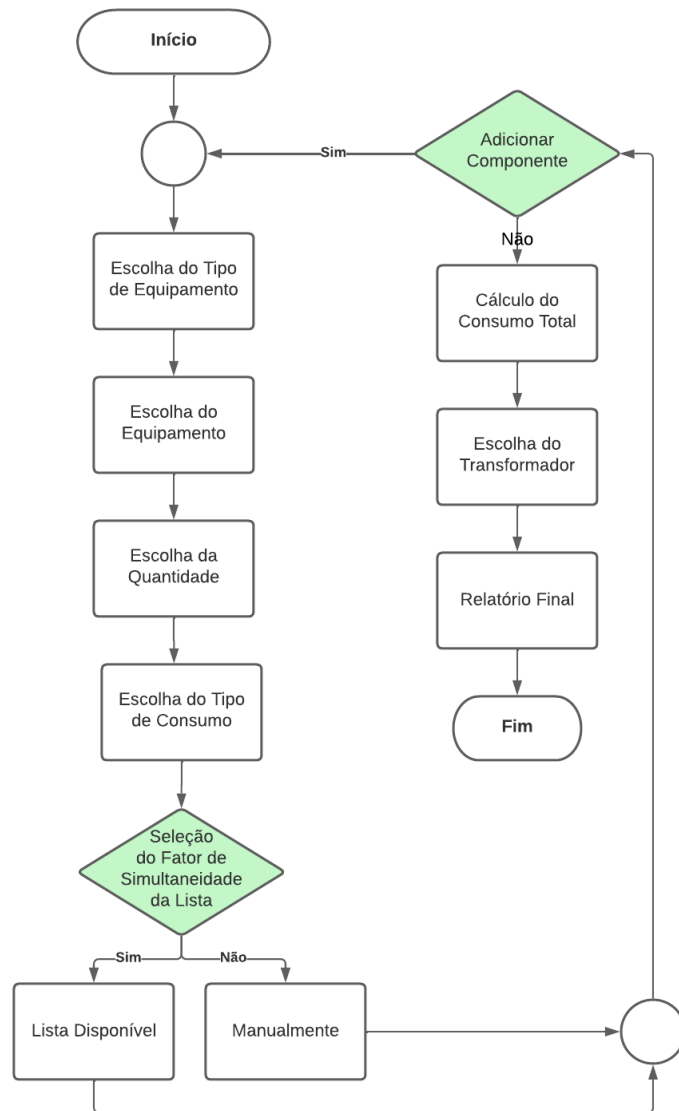


Figura 14 - Algoritmo para a Construção do Perfil de Consumo

#### 4.2.1 Elaboração do Perfil de Cargas

O processo de dimensionamento de transformadores de serviços auxiliares em subestações requer uma base de dados confiável e robusta que reflita com precisão as necessidades energéticas dos equipamentos envolvidos.

Os projetos já realizados pela empresa forneceram uma fonte importante de dados para a pesquisa, uma vez que ao examinar minuciosamente essas obras e os vários tipos de equipamentos que estavam presentes nas subestações, foi possível recolher valores relativos

aos níveis de consumo de energia de alguns equipamentos. É importante destacar que este método permitiu a obtenção de dados relativos a consumos para corrente contínua (DC) e corrente alternada (AC), o que cobre todas as necessidades de energia dos equipamentos.

A pesquisa foi complementada consultando os catálogos de vários fabricantes, além da análise das obras concluídas pela empresa. Esta etapa foi essencial para enriquecer os *datasets*, fornecendo valores de consumo de energia confiáveis e ampliando as opções para cada tipo de equipamento. Esta abordagem abrangente que leva em consideração uma variedade de modelos, características e eficiência energética foi possível graças à variedade de fabricantes consultados.

O consumo individual de cada equipamento foi o foco principal ao recolher informações dos *datasheets* dos fabricantes e das obras realizadas pela empresa. Para garantir que o consumo total da subestação é dimensionado de forma precisa e eficiente, essa métrica é essencial para o dimensionamento correto e adequado dos transformadores de serviços auxiliares.

Durante o processo de recolha de dados, especialmente ao consultar os catálogos dos fabricantes, foram sendo apresentados equipamentos com grande variedade de níveis de consumo energético que variam consoante determinados requisitos e características. Quando apenas uma opção de consumo é fornecida, esse valor é considerado tanto como o valor mínimo como valor máximo para o equipamento em questão. No entanto, nos casos em que múltiplas opções de consumo são apresentadas, optou-se por considerar o valor mais baixo como o consumo mínimo e o valor mais alto como o consumo máximo do equipamento.

Em alguns casos específicos, como nos equipamentos do tipo "*Transmission Protection*", "*Busbar Protection*" e "*Relays*", deparou-se com a necessidade de realizar cálculos para determinar o consumo energético. Nestes casos, optou-se por considerar o pior cenário de consumo do equipamento, ou seja, aquela em que o consumo é maior, e assim, este valor é utilizado tanto para o consumo mínimo como máximo. Esta abordagem assegura que os dados utilizados no dimensionamento dos transformadores de serviços auxiliares sejam representativos e abrangentes, resultando em estimativas precisas e confiáveis, mas que ao mesmo tempo também garantam o correto funcionamento da subestação sem correr o risco de sobrecargas.

Para demonstrar como esta última situação foi tratada, é apresentado um exemplo para o "*Busbar Protection P747*" e devemos ter em consideração a Figura 15 e a Equação 1. É possível encontrar esta equação no *datasheet* do equipamento.

$$\begin{aligned} \text{Consumo} = & \text{Quiscent Burden} + \text{Second Rear} + (0,9 \times \text{Input}) \\ & + (0,13 \times \text{Output}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{Consumo} = 11 + 1,25 + (0,9 \times 8) + (0,13 \times 8) = 20,49 \text{ W}$$

O “*Quiscent Burden*”, que apresenta o valor de 11 W, é a quantidade de energia que o dispositivo consome apenas para manter-se em funcionamento, mesmo quando não está a realizar nenhuma operação específica.

6.5 NOMINAL BURDEN	
Quiescent burden	11 W
2nd rear communications port	1.25 W
Each relay output burden	0.13 W per output relay
Each opto-input burden (24 - 27 V)	0.065 W max
Each opto-input burden (30 - 34 V)	0.065 W max
Each opto-input burden (48 - 54 V)	0.125 W max
Each opto-input burden (110 - 125 V)	0.36 W max
Each opto-input burden (220 - 250 V)	0.9 W max

Figura 15 – Especificações de Consumo do “*Busbar Protection P747*”

A “*Second Rear Communications Port*”, que representa o valor de 1,25 W, refere-se a uma segunda porta de comunicação de um dispositivo e é usada para estabelecer conexões de comunicação com outros dispositivos ou sistemas. Para o efeito, considerámos que está sempre em uso.

O manual técnico deste equipamento refere ainda que o número máximo de “*opto-input burden*” é de 8 e que o número máximo de “*output relay*” é também de 8. Como refere a Figura 15, estes valores devem ser multiplicados por 0,9 W (cenário de maior consumo) e 0,13 W, respetivamente.

Tendo em consideração as informações anteriores, torna-se fácil perceber como chegámos ao valor de consumo de 20,49 W deste equipamento. Este valor representa assim, o cenário de maior consumo que este dispositivo pode realizar.

Este processo foi replicado em muitos outros equipamentos das listas de equipamentos referidos anteriormente e apesar de haver pequenas diferenças nas suas fórmulas para cálculo do consumo, o método é sempre semelhante.

A definição de cargas é realizada exatamente através dos dados recolhidos, onde é possível selecionar o equipamento que pretendemos e obter de forma direta o consumo desse mesmo equipamento.

No processo de construção do perfil de consumo de energia, é crucial apresentar os dados de forma clara e acessível. Nesse sentido, são utilizadas duas formas de representação: tabelas e gráficos.

A primeira forma de apresentação é através de tabelas, onde os dados são organizados de maneira estruturada e detalhada. Durante a construção da tabela, os níveis de consumo DC e/ou AC são sempre discriminados para uma melhor compreensão do consumo em cada

equipamento. Na Figura 16 é apresentada uma tabela exemplo/modelo do perfil de consumo utilizada na ferramenta desenvolvida.

Circuit / Equipment	Quantity	Load DC (W)	Load AC (W)	Diversity Factor	Load DC (W) Adjusted	Load AC (W) Adjusted
AUX. BUILDING SUPPLIES DB1	1	0	125200	1	0	125200
AUX. BUILDING SUPPLIES DB2	1	0	14900	1	0	14900
AUX. BUILDING SUPPLIES DB3	1	0	42995	1	0	42995
LIGHTING DB	1	0	24230	1	0	24230
110V AC DISTRIBUTION BOARD	1	0	3080	1	0	3080
Total LVDC	-	0	-	-	0	-
Total LVAC	-	-	210405	-	-	210405

Figura 16 – Tabela Modelo do Perfil de Consumo

Além das tabelas, são utilizados gráficos para visualizar o perfil de consumo de forma mais intuitiva. Os gráficos proporcionam uma representação visual dos dados, permitindo identificar tendências e picos de consumo com facilidade. Novamente, é realizada a separação das cargas DC e AC. Na Figura 17 são apresentados os gráficos exemplo/modelo do perfil de consumo utilizados na ferramenta desenvolvida.

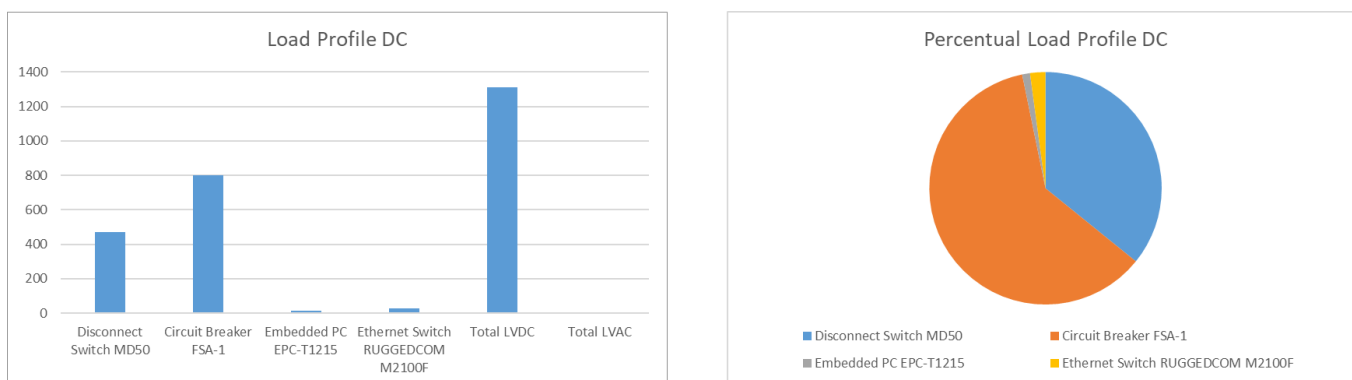


Figura 17 – Gráficos Modelo do Perfil de Consumo

Esta ferramenta conta também com uma Tabela Auxiliar para disjuntores e seccionadores. Esta separação deste tipo de equipamentos para uma análise mais detalhada é importante em três aspetos:

- Correntes máximas;
- Quedas de tensão;
- Dimensionamento de baterias ou UPS (*Uninterruptible Power Supply*).

O dimensionamento preciso dos disjuntores e seccionadores depende das correntes máximas que podem ser suportadas por esses equipamentos. Ao separá-los para uma análise mais detalhada, podemos garantir que as correntes máximas são adequadamente consideradas no dimensionamento do transformador.

As quedas de tensão nos circuitos de disparo dos disjuntores são vitais para garantir que eles funcionem da forma desejada. Uma análise detalhada dos consumos de bobines e motores dos disjuntores e seccionadores permite avaliar com precisão as quedas de tensão e garantir o disparo confiável desses dispositivos.

A disponibilidade contínua de energia elétrica é essencial numa subestação e através da análise dos consumos de bobines, motores e outros componentes dos disjuntores e seccionadores, podemos determinar as necessidades de energia constantes e de pico, o que é crucial para o dimensionamento adequado das baterias ou UPS utilizadas como fonte de energia de reserva.

Esta avaliação mais detalhada permite aos engenheiros da SISINT utilizar imediatamente esses valores sem ser necessário pesquisar pelas especificações dos equipamentos, agilizando assim o processo de dimensionamento e garantindo uma tomada de decisão mais eficiente e precisa.

Desta forma, é correto afirmar que os valores inseridos na “Tabela Detalhada” não afetam diretamente a escolha do transformador de serviços auxiliares nem o processo de dimensionamento da ferramenta, no entanto, são valores valiosos para outras atividades dentro da empresa no que toca a proteções, dimensionamento de baterias e dimensionamento de cabos, essencialmente.

#### **4.2.2 Fator de Simultaneidade**

Os equipamentos elétricos, selecionados com base nas suas características de potência, devem poder ser utilizados à potência máxima absorvida em serviço, tendo em conta os fatores de simultaneidade e as condições normais de serviço (RSIUEE, 2006).

As potências mínimas e os fatores de simultaneidade a considerar no dimensionamento das instalações elétricas devem ser fixadas de acordo com as necessidades e com as condições de exploração dos respetivos locais. Os circuitos devem ser dimensionados para a potência total dos aparelhos de utilização que por eles são alimentados, afetada dos fatores de simultaneidade (RSIUEE, 2006).

Ao dimensionarem-se os circuitos deve ter-se particular cuidado na previsão de aumentos de potência e da frequência de arranques do equipamento.

Todas as cargas individuais não estão, necessariamente, sempre a operar à potência nominal máxima nem necessariamente ao mesmo tempo. Os fatores de simultaneidade ( $k_s$ ), permitem determinar as exigências de potência máxima e de potência aparente, efetivamente, necessárias para dimensionar a instalação (Schneider Electric, n.d.).

Em condições normais de operação o consumo de energia de uma carga é por vezes inferior ao indicado como a sua potência nominal. Isto é bastante comum e justifica a aplicação de um fator na estimativa de valores realistas. Este fator deve ser aplicado a cada carga individual, com particular atenção aos motores elétricos, que raramente funcionam à plena carga. Numa

instalação industrial este fator pode ser estimado em média em 0,75 para motores (Schneider Electric, n.d.).

Para cargas de iluminação incandescente, o fator é sempre igual a 1. Para circuitos de tomadas, os fatores dependem inteiramente do tipo de aparelhos alimentados pelas tomadas em questão. Para Veículos Elétricos o fator de utilização será sistematicamente estimado em 1, uma vez que leva muito tempo para carregar completamente as baterias (várias horas) e um circuito dedicado que alimenta a estação de carregamento ou caixa de parede será exigido pelas normas.

A determinação dos fatores  $k_s$  é da responsabilidade do projetista, pois requer um conhecimento detalhado da instalação e das condições em que os circuitos individuais serão explorados. Por esta razão, não é possível fornecer valores precisos para aplicação geral.

É uma questão de experiência comum que a operação simultânea de todas as cargas instaladas de uma determinada instalação nunca ocorre na prática, ou seja, há sempre algum grau de diversidade e este fato é tido em conta para efeitos de estimativa através da utilização de um fator ( $k_s$ ).

Este fator é definido na IEC60050 - Vocabulário Eletrotécnico Internacional, conforme segue (Schneider Electric, n.d.):

**Fator de coincidência** = “Razão, expressa em valor numérico ou percentual, entre a procura máxima simultânea de um grupo de aparelhos elétricos ou consumidores num determinado período, e a soma das suas necessidades máximas individuais no mesmo período. De acordo com esta definição, o valor é sempre  $\leq 1$  e pode ser expresso em percentagem”

**Fator de diversidade** = “O recíproco do fator de coincidência. Isso significa que sempre será  $\geq 1$ ”.

**Nota:** Existe o fator de diversidade e de coincidência, no entanto, o fator de diversidade (que é  $\geq 1$ ) usa-se em substituição do fator de coincidência, logo, passa a ser  $\leq 1$ . O termo mais utilizado para isto é o Fator de Simultaneidade ( $k_s$ ).

O fator  $k_s$  é aplicado a cada grupo de cargas (por exemplo, sendo alimentadas por um quadro de distribuição ou subdistribuição).

As normas IEC61439-1 e 2 definem de forma semelhante o Fator de Simultaneidade para quadros de distribuição. A IEC61439-2 também afirma que, na ausência de um acordo entre o fabricante do conjunto e o usuário em relação às correntes de carga reais, a carga presumida dos circuitos de saída do conjunto ou grupo de circuitos de saída pode ser com base nos valores da Figura 18.

Se os circuitos forem principalmente para iluminação de cargas, é prudente adotar valores de  $k_s$  próximos da unidade.

Type of load	Assumed loading factor
Distribution - 2 and 3 circuits	0.9
Distribution - 4 and 5 circuits	0.8
Distribution - 6 to 9 circuits	0.7
Distribution - 10 or more circuits	0.6
Electric actuator	0.2
Motors ≤ 100 kW	0.8
Motors > 100 kW	1.0

Figura 18 - Fator de simultaneidade para quadros de distribuição (cf. IEC61439-2 tabela 101)

Os fatores  $k_s$  que podem ser usados para circuitos que alimentam cargas de ocorrência comum são mostrados na Figura 19. É fornecido na Norma IEC 60439.

Circuits Function	Diversity Factor (ks)
Lighting	0.9
Heating and air conditioning	0.8
Socket-outlets	0.7
Lifts and catering hoist	
For the most powerful motor	1
For the second most powerful motor	0.75
For all motors	0.8

Figura 19 - Fator de simultaneidade de acordo com a função do circuito (EEP, 2011)

#### 4.2.3 Valor Corrigido do Consumo

Ao finalizar a metodologia e efetuado o cálculo final, é ajustado o valor do consumo final consoante o fator de simultaneidade selecionado. Isto tanto é feito para os valores DC (Equação 2) como para os valores AC (Equação 3).

$$\text{Consumo DC Final} = \sum_{i=1}^n (CE\_DC_i \times Q_i \times FS_i) \quad (2)$$

$$\text{Consumo AC Final} = \sum_{i=1}^n (CE\_AC_i \times Q_i \times FS_i) \quad (3)$$

Em que:

- $CE_{DC_i}$ : Consumo do equipamento (DC);
- $CE_{AC_i}$ : Consumo do equipamento (AC);
- $Q_i$ : Quantidade;
- $FS_i$ : Fator de simultaneidade.

### 4.3 Dimensionamento do Transformador de SA

Na determinação do transformador de serviços auxiliares adequado para a subestação a ser dimensionada, é seguido um processo que garante que as necessidades de energia são atendidas. Inicialmente, é realizada uma análise dos consumos totais de energia, levando em consideração tanto os componentes de corrente contínua (DC) quanto os de corrente alternada (AC).

A primeira etapa envolve o preenchimento de uma tabela que detalha os consumos esperados em toda a subestação. Esta tabela inclui uma variedade de dispositivos e equipamentos que operam com diferentes requisitos de energia, sejam eles em corrente contínua ou alternada. Uma vez que os valores individuais de consumo são registados, é calculado o consumo total em DC e em AC, separadamente.

Para facilitar a comparação e a integração dos consumos de energia, os valores de consumo em DC são convertidos em valores equivalentes em AC. Esta conversão é realizada considerando-se que são utilizados retificadores. Esta conversão é feita da seguinte forma:

1. Existência de uma lista com retificadores de diferentes valores;
2. Seguindo um processo lógico, escolher aquele que melhor se adequa à situação;
3. Soma do poder de retificação até ultrapassar o valor total de consumo em DC. Desta forma, mesmo sobredimensionado, garantimos um intervalo de segurança e não assumimos que utilizamos 100% da potência instalada.

Com os valores totais de consumo em AC e DC devidamente harmonizados, eles são somados para obter o consumo total da subestação. Este valor total é então confrontado com os padrões e recomendações estabelecidos pela E-Redes (antiga EDP) para determinar a adequação do transformador de serviços auxiliares. O padrão a seguir é apresentado na Figura 20.

Além disso, existe a possibilidade de acrescentar um "Fator de Expansão" na análise. Este fator considera a expansão futura prevista da subestação, levando em conta os consumos adicionais projetados. Considerar este fator é fundamental para garantir que o transformador selecionado

seja capaz de atender não apenas às necessidades do presente, mas também às necessidades futuras, proporcionando uma solução sustentável e escalável.

O cálculo final do consumo total da subestação é obtido em Watt (W), no entanto, a escolha do transformador deve ser feita em kilovolt-ampere (kVA). Para resolver esta situação aplica-se a Equação 4.

$$P (kVA) = \frac{P (W)}{1000 \times FP} \quad (4)$$

Em que:

- P (W) é a potência em Watts;
- P (kVA) é a potência em kilovolt-ampere;
- FP é o Fator de Potência.

O fator de potência é uma medida que indica a eficiência com que a energia elétrica é utilizada num sistema, indicando a relação entre a potência ativa (que realiza trabalho) e a potência aparente (que inclui também a potência reativa, responsável pelo magnetismo nos circuitos). Um fator de potência próximo de 1 indica uma utilização eficiente da energia, enquanto valores mais baixos indicam um desperdício maior de energia devido à presença de potência reativa.

Na escolha do transformador considera-se um fator de potência igual a 1, de forma a simplificar.

Relação transformação AT/MT (kV)	Potência nominal TP (kVA)	Corrente curto-circuito máxima (trifásico simétrico) (kA)	Corrente curto-circuito máxima (fase-neutro) (kA)
10/0,42 ; 15/0,42	50	1,9	2,0
	100	3,9	4,0
	160	6,2	6,3
	250	9,7	9,9
	400	15,6	15,8
	630	24,5	24,9
30/0,42	50	1,6	1,6
	100	3,1	3,2
	160	5,0	5,1
	250	7,8	8,0
	400	12,5	12,7
	630	19,7	20,1

Figura 20 – Valores para diferentes PT

De forma a garantir este processo, são apresentados excertos do código desenvolvido que demonstram como se assegura esta metodologia na Figura 21, Figura 22, Figura 23 e Figura 24.

```

Sub CheckExpansion()
    Dim answer As String
    Dim expansionPercentage As Double
    Dim projectedLoad As Double
    Dim lastRow As Long
    Dim loadProfileSheet As Worksheet
    Dim novo_valor As Double
    Dim valor As Double
    Dim valor_inicial As Double
    Dim recommendationText As String ' Variável para armazenar o texto da recomendação

    ' Defina a planilha de perfil de carga
    Set loadProfileSheet = ThisWorkbook.Sheets("Load_Profile")

    ' Pergunta se deseja adicionar projeções futuras ou expansões a esta subestação
    answer = InputBox("Do you want to add any 'Expansion Factor' to this substation? (Yes/No)")

    ' Verifica a resposta
    If UCCase(answer) = "YES" Then
        ' Pede o valor da expansão em percentagem
        expansionPercentage = CDBl(InputBox("Write in percentage the 'Expansion Factor'."))

        ' Encontre a última linha na coluna O
        lastRow = loadProfileSheet.Cells(loadProfileSheet.Rows.Count, "O").End(xlUp).Row

        |
        'Obtenha o valor da última linha e décima quinta coluna
        valor = loadProfileSheet.Cells(lastRow, 15).Value

        ' Verificar a penúltima linha na coluna N
        valor_inicial = loadProfileSheet.Cells(lastRow - 1, "N").Value

        ' Inicializa o novo_valor
        novo_valor = 0
    
```

Figura 21 – Declaração das variáveis

O primeiro excerto, representado na Figura 21, começa por declarar as variáveis para armazenar respostas do utilizador, valores de percentagem, consumo total DC (valor\_inicial) e consumo total AC (valor).

De seguida, pergunta ao utilizador se deseja adicionar uma "Expansão" à subestação. Se optar por considerar uma expansão futura, é solicitada a percentagem de expansão e calculada a carga total a ser instalada. Se o utilizador não desejar adicionar uma expansão, calcula a carga projetada sem expansão e recomenda um transformador com base nisso.

```

' Verificar e adicionar os incrementos até que o novo valor seja maior que o inicial
Do While novo_valor <= valor_inicial
  Select Case valor_inicial
    Case Is > 30000
      novo_valor = novo_valor + 30000
    Case Is > 18000
      novo_valor = novo_valor + 18000
    Case Is > 11000
      novo_valor = novo_valor + 11000
    Case Is > 10000
      novo_valor = novo_valor + 10000
    Case Is > 9000
      novo_valor = novo_valor + 9000
    Case Is > 7500
      novo_valor = novo_valor + 7500
    Case Is > 5000
      novo_valor = novo_valor + 5000
    Case Is > 3200
      novo_valor = novo_valor + 3200
    Case Is > 2300
      novo_valor = novo_valor + 2300
    Case Is > 1700
      novo_valor = novo_valor + 1700
    Case Is > 1600
      novo_valor = novo_valor + 1600
    Case Is > 1200
      novo_valor = novo_valor + 1200
    Case Is > 1000
      novo_valor = novo_valor + 1000
    Case Is > 750
      novo_valor = novo_valor + 750
    Case Is > 450
      novo_valor = novo_valor + 450
    Case Is > 330
      novo_valor = novo_valor + 330
    Case Is > 220
      novo_valor = novo_valor + 220
    Case Is > 200
      novo_valor = novo_valor + 200
    Case Is > 160
      novo_valor = novo_valor + 160
    Case Is > 120
      novo_valor = novo_valor + 120
    Case Is > 30
      novo_valor = novo_valor + 30
  End Select
Loop

```

Figura 22 – Conversão de Valores DC

No excerto de código da Figura 22, é onde é “simulado” o uso do retificador. Consoante o valor total de consumo em DC, o novo valor retificado seguirá uma dessas opções. O ciclo só termina quando o novo valor retificado for maior que o valor inicial que representa o consumo total em DC.

No excerto da Figura 23, é onde é selecionado o transformador recomendado, baseado nos valores disponíveis da Figura 20.

```

projectedLoad = (valor + novo_valor) * (1 + expansionPercentage / 100)

' Constrói o texto da recomendação
recommendationText = "Transformer Recommended: "
If projectedLoad <= 50000 Then
    recommendationText = recommendationText & "50 kVA. Considering the Expansion Factor of " & expansionPercentage & "%."
ElseIf projectedLoad > 50000 And projectedLoad <= 100000 Then
    recommendationText = recommendationText & "100 kVA. Considering the Expansion Factor of " & expansionPercentage & "%."
ElseIf projectedLoad > 100000 And projectedLoad <= 160000 Then
    recommendationText = recommendationText & "160 kVA. Considering the Expansion Factor of " & expansionPercentage & "%."
ElseIf projectedLoad > 160000 And projectedLoad <= 250000 Then
    recommendationText = recommendationText & "250 kVA. Considering the Expansion Factor of " & expansionPercentage & "%."
ElseIf projectedLoad > 250000 And projectedLoad <= 400000 Then
    recommendationText = recommendationText & "400 kVA. Considering the Expansion Factor of " & expansionPercentage & "%."
ElseIf projectedLoad > 400000 And projectedLoad <= 630000 Then
    recommendationText = recommendationText & "630 kVA. Considering the Expansion Factor of " & expansionPercentage & "%."
ElseIf projectedLoad > 630000 Then
    recommendationText = recommendationText & "No recommendation available."
End If

' Exibe a MsgBox com o texto da recomendação
MsgBox recommendationText

ElseIf UCase(answer) = "NO" Then
    ' Encontre a última linha na coluna O
    lastRow = loadProfileSheet.Cells(loadProfileSheet.Rows.Count, "O").End(xlUp).Row

    ' Obtenha o valor da penúltima linha e décima quarta coluna
    valor = loadProfileSheet.Cells(lastRow, 15).Value

    ' Verificar a penúltima linha na coluna N
    valor_inicial = loadProfileSheet.Cells(lastRow - 1, "N").Value

    ' Inicializa o novo_valor
    novo_valor = 0

```

Figura 23 – Escolha do Transformador

Por fim, na Figura 24 repete-se e faz-se um processo semelhante de retificação, mas para o caso em que não existe “Fator de Expansão”. Além disso é também recomendado o transformador a utilizar que resulta da soma do novo valor retificado com o valor do consumo total em AC.

Assim, através do processo anterior, o transformador de serviços auxiliares recomendado é identificado, garantindo o fornecimento confiável e eficiente de energia para a subestação. O valor de consumo total é também apresentado ao utilizador pela ferramenta ao indicar o transformador ideal.

```

' Verificar e adicionar os incrementos até que o novo valor seja maior que o inicial
Do While novo_valor <= valor_inicial
  Select Case valor_inicial
    Case Is > 30000
      novo_valor = novo_valor + 30000
    Case Is > 18000
      novo_valor = novo_valor + 18000
    Case Is > 11000
      novo_valor = novo_valor + 11000
    Case Is > 10000
      novo_valor = novo_valor + 10000
    Case Is > 9000
      novo_valor = novo_valor + 9000
    Case Is > 7500
      novo_valor = novo_valor + 7500
    Case Is > 5000
      novo_valor = novo_valor + 5000
    Case Is > 3200
      novo_valor = novo_valor + 3200
    Case Is > 2300
      novo_valor = novo_valor + 2300
    Case Is > 1700
      novo_valor = novo_valor + 1700
    Case Is > 1600
      novo_valor = novo_valor + 1600
    Case Is > 1200
      novo_valor = novo_valor + 1200
    Case Is > 1000
      novo_valor = novo_valor + 1000
    Case Is > 750
      novo_valor = novo_valor + 750
    Case Is > 450
      novo_valor = novo_valor + 450
    Case Is > 330
      novo_valor = novo_valor + 330
    Case Is > 220
      novo_valor = novo_valor + 220
    Case Is > 200
      novo_valor = novo_valor + 200
    Case Is > 160
      novo_valor = novo_valor + 160
    Case Is > 120
      novo_valor = novo_valor + 120
    Case Is > 30
      novo_valor = novo_valor + 30
  End Select
Loop
projectedLoad = valor + novo_valor

' Constrói o texto da recomendação
recommendationText = "Transformer Recommended: "
If projectedLoad <= 50000 Then
  recommendationText = recommendationText & "50 kVA."
ElseIf projectedLoad <= 100000 Then
  recommendationText = recommendationText & "100 kVA."
ElseIf projectedLoad <= 160000 Then
  recommendationText = recommendationText & "160 kVA."
ElseIf projectedLoad <= 250000 Then
  recommendationText = recommendationText & "250 kVA."
ElseIf projectedLoad <= 400000 Then
  recommendationText = recommendationText & "400 kVA."
ElseIf projectedLoad <= 630000 Then
  recommendationText = recommendationText & "630 kVA."
Else
  recommendationText = recommendationText & "No recommendation available."
End If

' Exibe a MsgBox com o texto da recomendação
MsgBox recommendationText

Else
  MsgBox "Invalid input. Please enter Yes or No."
  Exit Sub ' Sai do sub procedimento se a entrada for inválida
End If

' Armazena o texto da recomendação na célula A44 da planilha "Load_Profile"
loadProfileSheet.Range("I36").Value = recommendationText

End Sub

```

Figura 24 – Conversão de Valores DC e Escolha de Transformador sem Fator de Expansão

## **4.4 Relatório**

A última funcionalidade da ferramenta desenvolvida é a criação de um relatório em formato PDF com as informações necessárias e perfis de consumo correspondentes.

Este documento permite resumir os equipamentos utilizados, bem como o consumo total da subestação, apresentando os gráficos de consumo. Além disso, é fornecida a recomendação de que tipo de transformador para serviços auxiliares deve ser adotado para a subestação em questão, assumindo, ou não, um fator de expansão para adições futuras na instalação. Desta forma, a análise torna-se mais simples e fácil.

## 5 Ferramenta Desenvolvida e Base de Dados

O objetivo deste capítulo é apresentar a ferramenta computacional desenvolvida, bem como a base de dados que suporta o algoritmo.

Como mencionado anteriormente, um dos objetivos principais desta ferramenta é automatizar o processo de dimensionamento do transformador de serviços auxiliares numa subestação, ou seja, no fundo pretende-se realizar o cálculo do consumo total da infraestrutura. De forma que este processo seja possível de se realizar, foi criada uma base de dados com diversos equipamentos.

A fim de tornar a ferramenta computacional interativa, intuitiva e de forma a atender às necessidades dos utilizadores, foram considerados alguns fatores:

- **Simplicidade de funcionamento** - A ferramenta deve ter uma interface fácil de entender e processos claros e diretos para o utilizador;
- **Compatibilidade** - A ferramenta deve ser compatível com diferentes sistemas operacionais, tornando-a acessível em vários ambientes;
- **Design apelativo** - O design deve ser apelativo e simples de forma a incentivar a adaptação e a utilização da ferramenta;
- **Programa em código aberto** - o código deve permitir a integração de novos módulos e informações, que podem ser adaptados às necessidades dos utilizadores;

- **Software moldável** - Um *software* modular e bem estruturado facilita a manutenção e atualização, permitindo adicionar novos recursos e corrigir erros com maior facilidade;
- **Desempenho** - O *software* deve ter um bom desempenho de forma a responder às necessidades de trabalho de forma rápida;
- **Linguagem** - Decidiu-se que a ferramenta seria estruturada em inglês já que corresponde a uma língua universal.

## 5.1 Estrutura da Ferramenta

O código desenvolvido e utilizado pela ferramenta foi desenvolvido em *Visual Basic for Applications* (VBA). O sistema de entrada e saída de dados foi desenvolvido em *Microsoft Office Excel*, devido à sua versatilidade, flexibilidade e facilidade de implementação.

A estrutura da ferramenta (Figura 26) foi projetada de forma a facilitar a execução das tarefas e tornar as informações mais fáceis de visualizar.

A ferramenta conta com vinte e quatro folhas de cálculo, das quais, três são as páginas principais e de utilização por parte do projetista: Página Inicial, Perfil de Consumo e Inserção de Novos Equipamentos. Das restantes páginas fazem parte os *datasets* separados por tipo de equipamentos e páginas de “ajuda” à construção das páginas principais.

O acesso às páginas principais é realizado através do menu lateral esquerdo, que permanece visível em todas as páginas de trabalho. No menu, representado na Figura 25, encontram-se incluídas as três páginas principais e as respetivas páginas secundárias. Pressionando o nome de cada uma delas, o utilizador é automaticamente redirecionado para a página correspondente.

O “*Export PDF*” é a funcionalidade que permite ao utilizador extrair em formato PDF o relatório final do dimensionamento realizado. Neste relatório é-nos fornecida a seguinte informação:

- Tabela de equipamentos e correspondentes fatores de simultaneidade e consumos;
- Consumo total dos equipamentos selecionados;
- Gráficos dos perfis de consumo;
- Tabela detalhada para disjuntores e seccionadores;
- Recomendação de transformador de serviços auxiliares considerando, ou não, o fator de expensão.

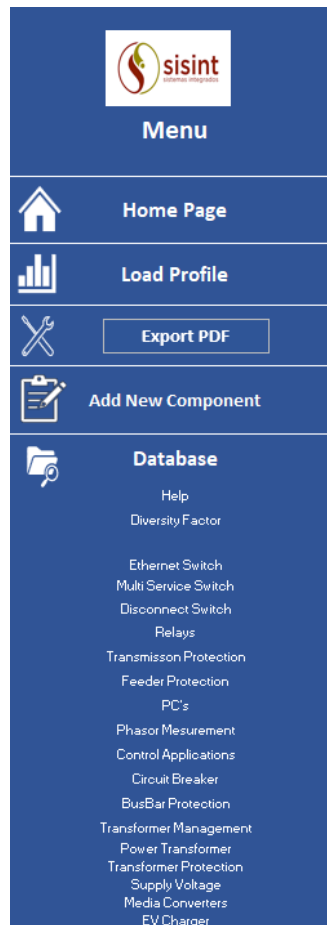


Figura 25 – Menu

Na Figura 26 pode-se observar um diagrama que representa, de forma generalizada, a maneira como esta ferramenta de cálculo está estruturada. Desta forma conseguimos perceber mais facilmente de que maneira é feita a interação entre os diferentes processos e o que faz parte de cada um deles.

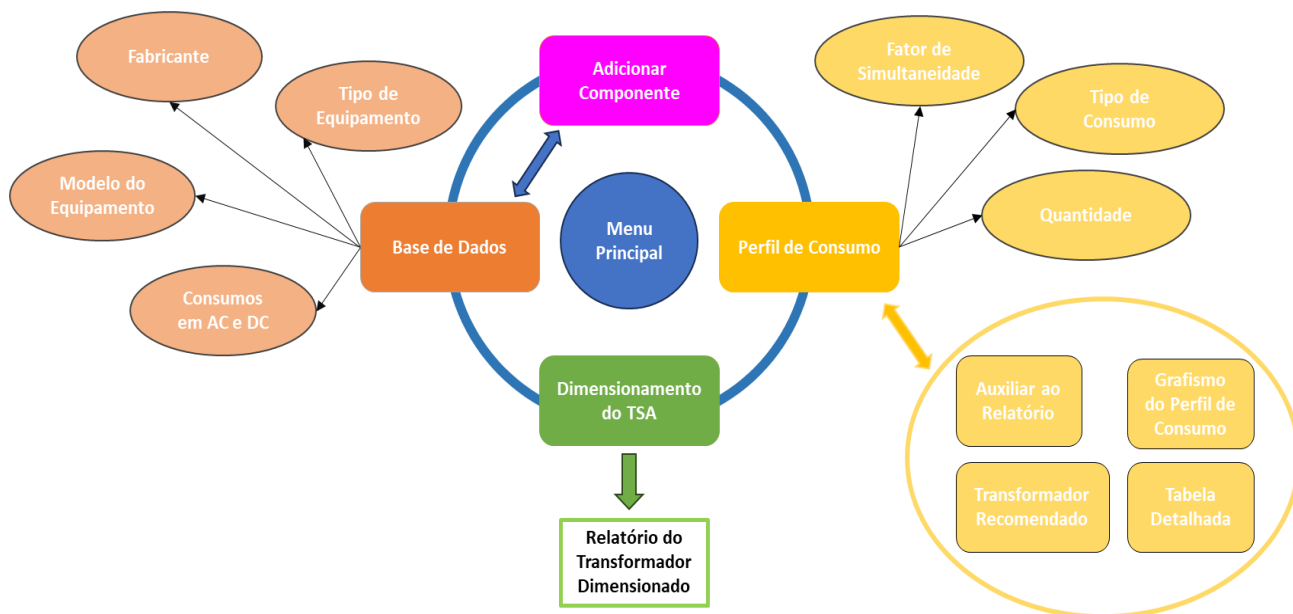


Figura 26 – Estrutura da ferramenta

## 5.2 Base de Dados

A base de dados criada serve como suporte para toda a ferramenta. É aqui que são armazenados os dados essenciais referentes a todos os tipos de equipamentos para que seja possível dimensionar o transformador de serviços auxiliares. Inicialmente, não existia qualquer sistema de armazenamento de dados, havendo a necessidade de consultar os diferentes fabricantes e inserir manualmente as características dos equipamentos em cada projeto.

De forma a facilitar o acesso aos dados e a sua organização, foi criada mais que uma base de dados, uma vez que existe uma grande diversidade de equipamentos. Em cada base de dados criada é indicado o tipo de equipamento, o modelo, fabricante, consumo mínimo e máximo do equipamento, tanto em DC como em AC.

A ferramenta permite adicionar novos equipamentos à base de dados, garantindo a flexibilidade e constante atualização das características dos equipamentos.

Desta forma, o primeiro passo na criação da base de dados foi identificar os principais fabricantes, sendo eles: Schneider, Siemens, ABB, GE, EFACEC, Advantech, entre outros.

Identificados os principais fabricantes, o segundo passo focou-se na pesquisa e recolha de informação dos vários equipamentos e modelos existentes no mercado.

Atualmente, a base de dados conta com 18 tipos de equipamentos e com 344 modelos distintos.

Na Figura 27 são apresentados os tipos de equipamentos presentes na base de dados.

- Electric Vehicle Chargers
- Ethernet Switches
- Multi Service Switches
- Circuit Breakers
- Disconnectors Switches
- Relays
- Transmission Protection
- Feeder Protection
- PC's
- Phasor Measurement
- Control Applications
- BusBar Protection
- Transformer Management
- Power Transformer
- Transformer Protection
- Supply Voltage
- Media Converters
- Others

Figura 27 - Tipos de equipamentos

Do “Others” fazem parte aquele tipo de equipamentos que se inserem nas categorias de motores, lâmpadas, tomadas ou outro tipo de equipamentos genéricos.

A base de dados pode ser consultada, alterada ou atualizada a qualquer altura pelo utilizador.

Como referido anteriormente, a ferramenta conta com a funcionalidade de adicionar novos equipamentos à base de dados. A forma de fazer isto é clicar no Menu em “Add New Component” que redirecionará para a folha “Add” como demonstra a Figura 28.

Add New Component

Type:  Add Component Clean Data In case of unknown

Model:

Manufacturer:

This section is only necessary for equipment of

↓

Minimum Consumption DC (W):

Maximum Consumption DC (W):

Minimum Consumption AC (W):

Maximum Consumption AC (W):

↑

In case of adding an Circuit Breaker or Disconnector don't need to fill this section.

Motor Minimum Consumption AC (W):

Motor Maximum Consumption AC (W):

Motor Minimum Consumption DC (W):

Motor Maximum Consumption DC (W):

Coil Minimum Consumption DC (W):

Coil Maximum Consumption DC (W):

Others AC (W) :

Figura 28 - Adicionar novos equipamentos

Nesta página o utilizador tem de preencher os campos seguintes:

- Tipo de equipamento;

- Modelo;
- Fabricante;
- Consumo mínimo DC;
- Consumo máximo DC;
- Consumo mínimo AC;
- Consumo máximo AC.

Caso o equipamento a adicionar seja um disjuntor ou seccionador, os campos identificados do lado direito devem também ser preenchidos, uma vez que necessitamos de dados mais detalhados para este tipo de equipamentos. Estes campos são:

- Consumo mínimo do motor AC;
- Consumo máximo do motor AC;
- Consumo mínimo do motor DC;
- Consumo máximo do motor DC;
- Consumo mínimo da bobine DC;
- Consumo máximo da bobine DC;
- Outro tipo de consumos AC. Pode estar a referir-se a aquecimento, arrefecimento, ar-condicionado, luzes de segurança ou alarmes.

Preenchidos os campos necessários basta seleccionar a opção *“Add Component”* e todas as informações do novo equipamento serão adicionadas à base de dados. Para adicionar outro equipamento, basta seleccionar a opção *“Delete”*, para apagar todo o conteúdo dos campos para serem preenchidos novamente.

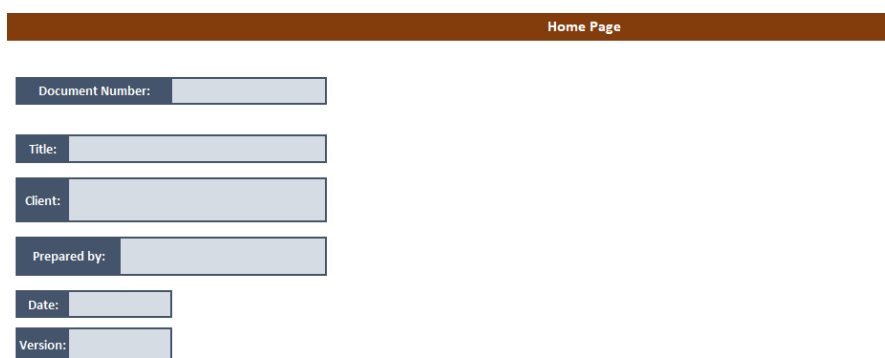
### **5.3 Preenchimento dos Dados do Sistema**

Nesta secção é apresentada a ferramenta de cálculo, de forma a perceber quais são as suas funcionalidades e a melhor forma de trabalhar com ela, garantindo que tiramos proveito de todas as funcionalidades disponíveis.

### 5.3.1 Página Inicial

A página inicial, como demonstra a Figura 29, é o ponto de partida da ferramenta, onde o utilizador preenche as informações iniciais para o documento:

- Número do documento;
- Título;
- Cliente;
- Autor;
- Data;
- Versão.



A imagem mostra a interface de usuário da página inicial da ferramenta. No topo, há uma barra de navegação com o texto "Home Page". Abaixo, há uma série de campos de entrada para preencher informações iniciais para um documento. Os campos são: "Document Number:", "Title:", "Client:", "Prepared by:", "Date:" e "Version:". Cada campo é precedido por um rótulo e seguido por um campo de texto cinza claro.

Figura 29 - Página inicial da ferramenta

Esta página tem como objetivo identificar o projeto de dimensionamento, bem como controlar as suas versões.

### 5.3.2 Página do Perfil de Consumo

Após o utilizador identificar devidamente o projeto, pode dar início ao dimensionamento do transformador acedendo à página do perfil de consumo. Para tal, basta selecionar a opção "*Load Profile*" no menu, conforme a Figura 30.



Figura 30 - Opção de acesso ao perfil de consumo

Após selecionada a opção anterior, somos deparados com a folha de trabalho demonstrada na Figura 31.

Figura 31 - Perfil de consumo

De forma a preencher os campos em vazio da melhor forma possível, é recomendado começar por preencher a opção “Choose Type”, como demonstra a Figura 32. Aqui é onde escolhemos o tipo de equipamento que queremos adicionar ao nosso perfil de consumo.

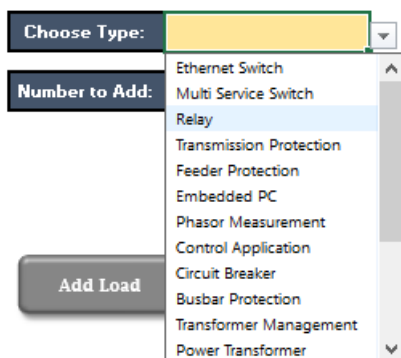
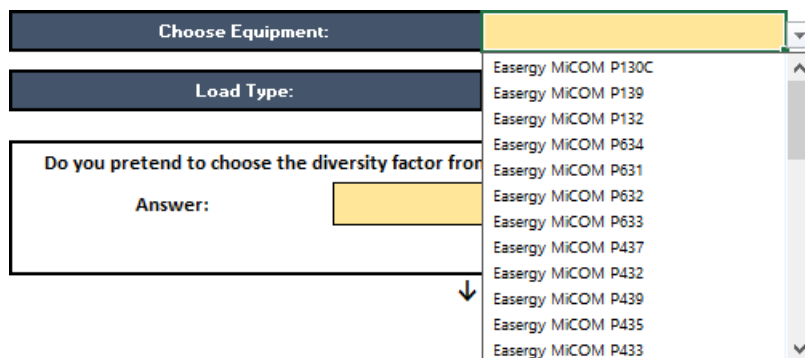


Figura 32 - Escolha do Tipo de Equipamento

De seguida, é aconselhável seleccionar, efetivamente, o equipamento. Por exemplo, na Figura 33, podemos observar os equipamentos/modelos disponíveis para um equipamento do tipo “Relay”.



The screenshot shows a web-based form with three main sections. The top section is titled "Choose Equipment:" and contains a dropdown menu that is open, displaying a list of equipment models: Easergy MICOM P130C, Easergy MICOM P139, Easergy MICOM P132, Easergy MICOM P634, Easergy MICOM P631, Easergy MICOM P632, Easergy MICOM P633, Easergy MICOM P437, Easergy MICOM P432, Easergy MICOM P439, Easergy MICOM P435, and Easergy MICOM P433. The middle section is titled "Load Type:" and is currently empty. The bottom section is titled "Do you pretend to choose the diversity factor from" and contains a label "Answer:" followed by a yellow input field.

Figura 33 - Escolha do Equipamento

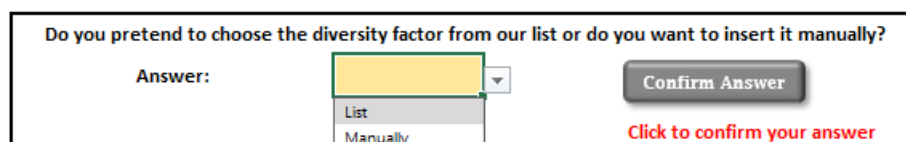
Feita a escolha do equipamento, podemos então indicar a quantidade que se pretende adicionar. Neste campo não existe valor máximo e deve ser inserido manualmente.

Tendo ultrapassado os passos anteriores, é importante escolher o “Load Type”, pois é aqui que vamos decidir se queremos optar por análise relativa aos consumos máximos, mínimos ou médios dos equipamentos. A escolha de um tipo de consumo diferente poderá corresponder a resultados diferentes, daí a importância de escolher de forma assertiva consoante as necessidades.

Outro campo bastante importante é a escolha do fator de simultaneidade. Aqui temos duas opções: seleção manual do fator de simultaneidade ou escolha do fator de simultaneidade através de uma lista que foi criada em análise com um conjunto de normas e regulamentos europeus.

A Figura 34 indica-nos precisamente as opções disponíveis. Caso opte pela opção “Manually” é possível escrever manualmente o fator de simultaneidade desejado. Caso seleccione a opção “List”, é apresentado um conjunto de opções que contêm um valor já pré-definido, como demonstra a Figura 35.

Independentemente da opção desejada, é sempre necessário confirmar a opção escolhida clicando no botão “Confirm Answer”.



The screenshot shows a form with the question "Do you pretend to choose the diversity factor from our list or do you want to insert it manually?". Below the question is a label "Answer:" followed by a dropdown menu. The dropdown menu is open, showing two options: "List" and "Manually". To the right of the dropdown menu is a button labeled "Confirm Answer". Below the button, there is a red text prompt: "Click to confirm your answer".

Figura 34 - Seleção Manual ou Listada do Fator de Simultaneidade

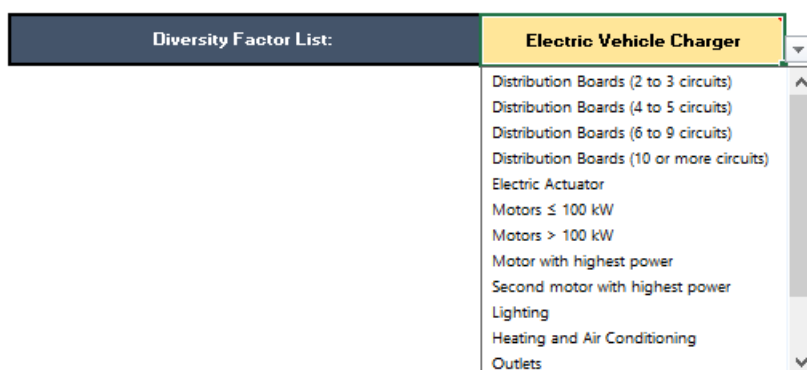


Figura 35 - Lista de Fatores de Simultaneidade

Uma vez que todos os campos estão devidamente preenchidos, podemos então adicionar o equipamento ao nosso perfil de consumo. Este processo é realizado clicando no botão “Add Load”.

Desta forma, o equipamento será adicionado à tabela de consumos com todas as características seleccionadas anteriormente como refere a Figura 36.

Circuit / Equipment	Quantity	Load DC (W)	Load AC (W)	Diversity Factor	Load DC (W) Adjusted	Load AC (W) Adjusted
---------------------	----------	-------------	-------------	------------------	----------------------	----------------------

Figura 36 - Tabela de Consumos

Os valores totais, tanto “Total LVDC” como “Total LVAC” são obtidos somando as colunas de consumo correspondentes ao clicar no botão “Calculate Total Load”.

O botão “Delete” serve apenas para limpar o conteúdo da tabela de consumos.

Caso existam equipamentos do tipo “Circuit Breaker” ou “Disconnecter”, como foi referido anteriormente na subsecção 4.2.1, necessitam de uma análise mais detalhada. Esta análise é obtida clicando no botão “Detailed Table” (Figura 37) que preenche a tabela da Figura 38.

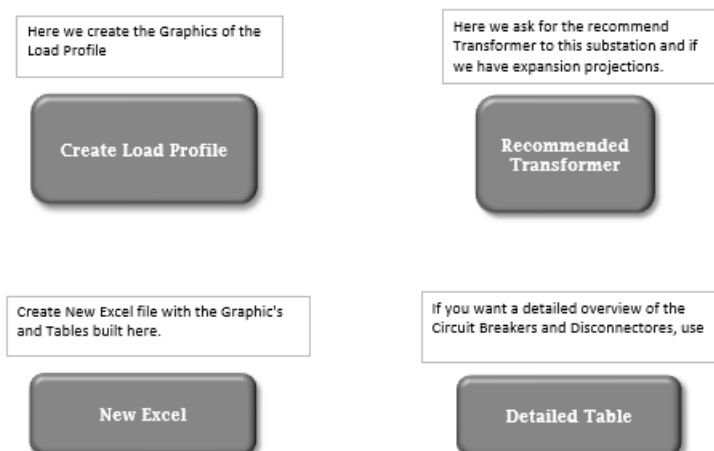


Figura 37 - Botões de Atividade

Desta forma, os botões apresentados na Figura 37 têm as seguintes funcionalidades:

- **“Create Load Profile”** – Este botão, consoante o que é adicionado à tabela de consumos, cria os gráficos de perfil de consumo;
- **“Recommended Transformer”** – Como o nome indica, este botão, recomenda o melhor transformador para a situação, seguindo o processo apresentado no subcapítulo 4.3, considerando ou não o Fator de Expansão.
- **“Detailed Table”** – Preenche a tabela detalhada para os equipamentos do tipo disjuntores e seccionadores;
- **“New Excel”** – A funcionalidade deste botão é criar um Excel com o cabeçalho preenchido inicialmente, tabelas construídas, gráficos criados e a recomendação do transformador que melhor se adequa à situação. Caso o ficheiro já exista, os dados são transferidos para esse ficheiro, mas numa folha nova para não apagar dados existentes.

Equipment	Motor Minimum AC (W)	Motor Maximum AC (W)	Motor Minimum DC (W)	Motor Maximum DC (W)	Coil Minimum (DC) (W)	Coil Maximum (DC) (W)	Others AC (W)

Figura 38 - Tabela Auxiliar Detalhada para Disjuntores e Seccionadores

Com o Excel pronto está tudo preparado para passar toda a informação para formato PDF. Isto faz-se selecionando no menu a opção **“Export PDF”**, como sugere a Figura 39.



Figura 39 - Exportar PDF

Exportando com sucesso o PDF o relatório fica pronto para consulta.

Além destas opções, podemos ainda adicionar novos equipamentos, como referido na subsecção 5.3, clicando na opção **“Add New Component”** do menu como sugere a Figura 40.

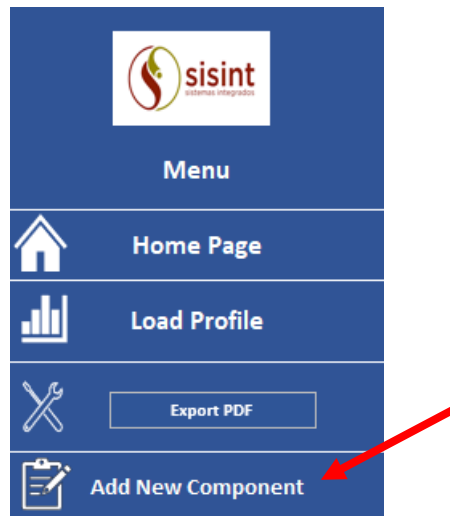


Figura 40 - Adicionar Novo Equipamento

## 5.4 Exemplo e Validação da Metodologia

Ao realizar o dimensionamento de transformadores de serviços auxiliares em subestações, é fundamental considerar todas as cargas existentes para um correto e preciso cálculo do consumo total da mesma. Na prática, este processo envolveria o cálculo dos consumos de múltiplos quadros de distribuição, bem como dos carregadores de baterias, entre outros dispositivos que possam existir.

Para este exemplo, concentrar-nos-emos em demonstrar a aplicação prática da metodologia desenvolvida, destacando apenas dois quadros de distribuição: o "*Distribution Board 1*" e o "*Distribution Board 2*". Esta simplificação permitirá ilustrar de forma clara e concisa o funcionamento da ferramenta de dimensionamento.

Para esta validação de metodologia é sempre considerado o valor máximo de consumo de cada equipamento, uma vez que não se pretende correr riscos de subdimensionar a subestação.

### 5.4.1 Consumos dos Equipamentos

Para iniciar este exemplo, devemos aceder à *Home Page* onde serão preenchidos os campos iniciais que identificam este documento. Como é indicado na Figura 41, começou-se por preencher os dados gerais relativos à subestação.

Preenchido o campo inicial podemos navegar no *Menu* para aceder ao *Load Profile*, onde serão construídos os perfis de consumo detalhados dos quadros de distribuição.

Cada perfil de consumo é construído e calculado na sua ordem, já que não podemos preencher a mesma tabela várias vezes ao mesmo tempo.

Na Figura 42 é apresentada a Tabela de Consumos para o quadro de distribuição 1, bem como todos os circuitos/equipamentos que dele fazem parte. O fator de simultaneidade escolhido para cada equipamento é maioritariamente referente ao que as Normas e Regulamentos Técnicos indicam. Na prática, este fator é normalmente escolhido pelo responsável do cálculo, uma vez que este depende de vários fatores.

O disjuntor e o seccionador selecionados são equipamentos que, de facto, não consomem potência para operar, no entanto o valor de consumo dado a cada um pode estar associado à quantidade de energia necessária para alimentar os mecanismos de operação, controlo e monitoramento.

Document Number:	IPP24
Title:	Substation XPTO
Client:	ISEP
Prepared by:	João Pereira
Date:	06/04/2024
Version:	1

Figura 41 – Identificação do Documento

Circuit / Equipment	Quantity	Load DC (W)	Load AC (W)	Diversity Factor	Load DC (W) Adjusted	Load AC (W) Adjusted
Circuit Breaker VD4/W	1	490	170	1	490	170
Disconnect Switch Compact NSX 250NA	1	500	20.5	1	500	20.5
Embedded PC EPC-B3588	1	500	0	0.5	250	0
Lights (LED)	8	0	240	0.9	0	216
Fan Motor TF 453/4/22	1	185	0	0.5	92.5	0
Heaters	5	750	0	0.8	600	0
Total LVDC	-	2425	-	-	1932.5	-
Total LVAC	-	-	430.5	-	-	406.5

Figura 42 – Tabela de Consumo do *Distribution Board 1*

Com os dados apresentados até ao momento, chegámos à conclusão de que este quadro de distribuição consome um total de 1932,5 W (DC) e 406,5 W (AC).

O passo seguinte seria apresentar a Tabela que detalha os consumos dos disjuntores e seccionadores. Os valores apresentados na Figura 43 não serão importantes para esta atividade, uma vez que para este cálculo, o importante é saber o consumo total do equipamento. No entanto, são dados valiosos a serem usados para outro tipo de cálculos e trabalhos realizados dentro da empresa SISINT.

Equipment	Motor Minimum AC (W)	Motor Maximum AC (W)	Motor Minimum DC (W)	Motor Maximum DC (W)	Coil Minimum (DC) (W)	Coil Maximum (DC) (W)	Others AC (W)
Circuit Breaker VD4/W	150	170	130	160	270	330	0
Disconnect Switch Compact NSX 250NA	0	0	500	500	-	-	20.5

Figura 43 – Tabela Detalhada de Disjuntores e Seccionadores

Pressionando o botão “New Excel” é criado um novo ficheiro em formato Excel, que é guardado por defeito na mesma pasta onde se encontra a ferramenta de cálculo. Assim os dados do DB1 ficam guardados.

Utilizando o botão “Delete” limpamos os dados do perfil de consumo referentes ao DB1 e podemos realizar de novo todo o processo anterior, mas agora para o *Distribution Board 2 (DB2)*. Neste caso, não teremos Tabela Detalhada de disjuntores e seccionadores, uma vez que não foram considerados para o quadro 2 deste exemplo.

Na Figura 44 é apresentada a tabela com os consumos totais correspondentes aos equipamentos selecionados para o DB2.

Circuit / Equipment	Quantity	Load DC (W)	Load AC (W)	Diversity Factor	Load DC (W) Adjusted	Load AC (W) Adjusted
EV Charger Three Phase INGEREV FUSION Wa	1	10	44000	1	10	44000
Embedded PC EPC-T4218	1	60	0	1	60	0
Control Application Relion REC650	1	32	0	1	32	0
Phasor Measurement Relion RES670	1	50	0	1	50	0
Ethernet Switch RUGGEDCOM M2200F	4	112	0	1	112	0
DC Motor KE94-60	1	260	0	0.8	208	0
Smoke Extraction	1	0	1000	0.5	0	500
Total LVDC	-	524	-	-	472	-
Total LVAC	-	-	45000	-	-	44500

Figura 44 – Tabela de Consumo do DB2

Neste quadro de distribuição optou-se por utilizar equipamentos distintos do primeiro quadro gerado, a fim de obter resultados diferentes. Desta forma obtém-se um total de 472 W (DC) e 45000 W (AC) para o DB2.

Mais uma vez, é necessário guardar os dados relativos ao DB2. Uma vez que já existe um ficheiro com o nome da subestação em utilização (criado ao guardar os dados do DB1), os dados do DB2 serão guardados no mesmo ficheiro onde foi guardado o DB1, mas numa nova folha. Este novo ficheiro é importante na medida em que no futuro podem ser feitas alterações a estes valores ou adicionar ou retirar equipamentos, caso necessário. Este encontra-se para consulta no Anexo A.

Nas situações em que são criados vários perfis de consumo diferentes para a mesma subestação, estes são guardados no mesmo ficheiro Excel em páginas diferentes, no entanto, caso se esteja a trabalhar numa subestação diferente das já trabalhadas anteriormente, um novo Excel é criado com o nome correspondente. Este processo é automático, pois a ferramenta através do nome do documento reconhece se este já existe ou não.

#### 5.4.2 Análise dos Consumos

A próxima etapa passa por fazer uma representação gráfica de como as cargas e o valor de consumo associado a cada uma delas está distribuído. A Figura 45 e Figura 46 demonstram precisamente isso, podendo-se concluir que de todos os equipamentos que fazem parte do DB1, os que consomem mais potência em DC são o disjuntor, seccionador e os aquecedores. Já em AC os que representam a maior fatia de consumo é o disjuntor e as luzes. Relativamente ao DB2, chega-se à conclusão de que o maior consumidor de potência em DC é o motor, enquanto o equipamento que mais consome potência em AC é o carregador de veículos elétricos.

O facto de ser possível representar os consumos numa componente gráfica é importante pois permite-nos analisar de forma imediata e clara quais os equipamentos que mais consomem na subestação, podendo atuar com mais eficácia e rapidez caso necessário.

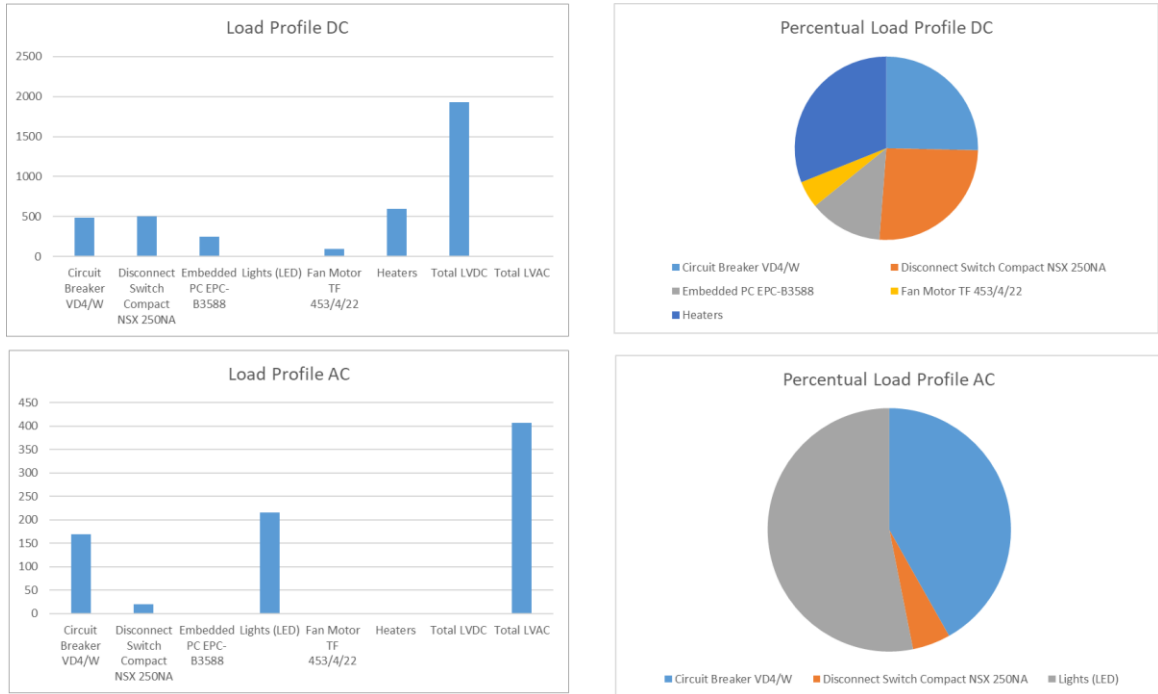


Figura 45 – Representação Gráfica do Consumo do DB1

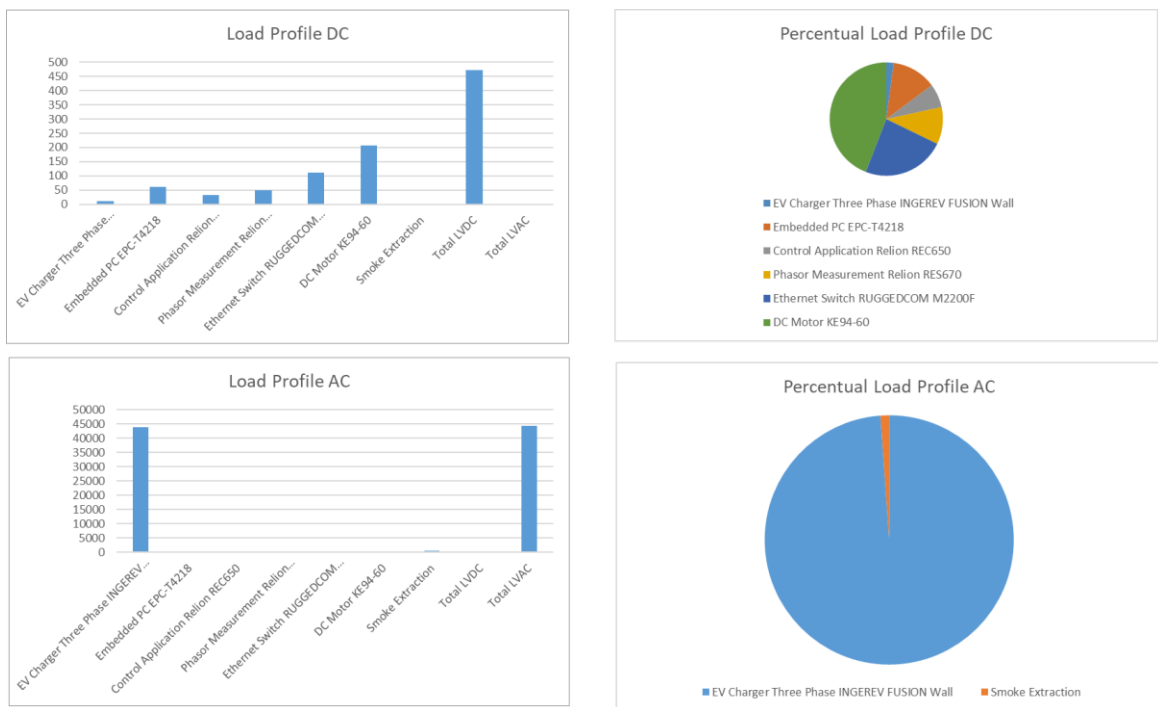


Figura 46 - Representação Gráfica do Consumo do DB2

Uma vez que a análise do DB1 e DB2 está completa é possível passar para a última fase que nos levará ao relatório final.

A ideia é fazer uma última análise semelhante às anteriores, mas no lugar dos equipamentos, substituímos pelos quadros de distribuição e pelos seus valores calculados anteriormente. Neste caso o preenchimento da Tabela de Consumos é manual, sendo que todo o processo restante é semelhante.

Desta forma, são obtidos os resultados representados na Figura 47 e Figura 48. Nesta última fase como estamos a realizar o cálculo total de consumo da subestação já podemos pedir o transformador recomendado para esta infraestrutura ao clicar no botão “*Recommended Transformer*”. A título de exemplo considerou-se uma expansão futura de 20% fazendo com que o transformador recomendado seja de 100 kVA, como está indicado em cima da Tabela de Consumos. Este valor foi calculado determinando, em primeiro lugar, os consumos totais que estão representados na tabela de consumos:

- **Consumo Total em LVDC:** 2404,5 W;
- **Consumo Total em LVAC:** 44906,5 W.

Em seguida, convertemos o consumo de corrente contínua (DC) para corrente alternada (AC) utilizando um retificador de 18000 (2x), que consultando o código da Figura 22, verificámos que é o retificador que se melhor adequa à situação, dando um total de 36000 W. Fazendo a soma do consumo total da subestação, obtemos o valor de 80906,5 W.

Considerando uma expansão de 20%, o consumo total passa a ser de 97087,8 W.

Para determinar o transformador ideal, é assumido um fator de potência igual 1, o que resulta num consumo, aproximadamente, de 97 kVA. Consultando a tabela da Figura 20, concluímos que o transformador recomendado é de 100 kVA. Tudo isto é um processo automatizado pela ferramenta desenvolvida.

Analisando os gráficos gerados podemos concluir que em termos de consumos associados a corrente contínua o DB1 é dominante e em termos de corrente alternada o DB2 é o que mais consome.

Após isto guardamos estas informações numa nova folha do novo Excel já criado e pode-se, finalmente, gerar o relatório em PDF selecionado a opção “*Export PDF*” na barra do Menu principal. Este documento encontra-se para consulta no Anexo A que resulta da junção dos três relatórios gerados num só.

Transformer Recommended: 100 kVA. Considering the Expansion Factor of 20%.

Circuit / Equipment	Quantity	Load DC (W)	Load AC (W)	Diversity Factor	Load DC (W) Adjusted	Load AC (W) Adjusted
Distribution Board 1	1	1932.5	406.5	1	1932.5	406.5
Distribution Board 2	1	472	44500	1	472	44500
Total LVDC	-	2404.5	-	-	2404.5	-
Total LVAC	-	-	44906.5	-	-	44906.5

Figura 47 – Tabela de Consumo da Subestação



Figura 48 - Representação Gráfica do Consumo da Subestação

## 5.5 Análise e Comparação de Resultados

Neste subcapítulo, objetiva-se conduzir uma análise comparativa do dimensionamento do transformador de serviços auxiliares da subestação Nairn, situada na Escócia. Este dimensionamento já terá sido realizado pela SISINT e será utilizado como exemplo para o replicar, mas utilizando a ferramenta de cálculo desenvolvida. No Anexo B.1 encontra-se o método de cálculo e o consumo total de toda a subestação utilizando o método antigo.

Conforme mencionado anteriormente neste documento, o método utilizado para estimar o consumo de uma subestação não é sempre o mais apropriado. Comumente, identifica-se em cada quadro de distribuição todos os componentes e equipamentos associados a eles, sendo que a pessoa responsável pelo dimensionamento decide arbitrariamente o consumo da maioria desses equipamentos, baseando-se muitas das vezes na sua experiência profissional (situação de Nairn).

Desta forma, serão comparados os valores finais de consumo da subestação de Nairn utilizando duas abordagens distintas. No final pretende-se perceber qual o desvio no valor final de consumo entre as duas técnicas, de forma a compreender as diferenças e as vantagens de utilizar a referida ferramenta.

De forma a simplificar o processo e também devido à falta de informação de alguns equipamentos, nomeadamente o seu modelo ou fabricante, optou-se por assumir os mesmos valores de consumo das seguintes tabelas representadas no : “Auxiliary Building Supplies Distribution Board 1”, das quatro diferentes baterias, do gerador, “110V AC Distribution Board” e do “LVAC Board Loadlist – Outgoing Supplies”.

Desta forma juntou-se os consumos das tabelas anteriores numa só, à qual deu-se o nome de DB1.

O primeiro passo é identificar o documento que vai ser criado como sugere a Figura 49.

Document Number:	NAIRN_REMAKE_2024
Title:	Nairn Substation
Client:	SISINT
Prepared by:	João Pereira
Date:	01/05/2024
Version:	1

Figura 49 - Identificação do Dimensionamento do Transformador de Nairn

Uma vez que alguns valores vão ser reaproveitados, opou-se pela próxima fase ser a construção da tabela de consumos desses valores num único “quadro de distribuição”, ou seja, assume-se que os valores da Figura 50 estão conectados ao mesmo ponto.

Circuit / Equipment	Quantity	Load DC (W)	Load AC (W)	Diversity Factor	Load DC (W) Adjusted	Load AC (W) Adjusted
Auxiliary Building Supplies DB1	1	34500	0	1	34500	0
Batteries	4	7000	0	1	7000	0
Auxiliary Diesel Generator Supply	1	4500	0	1	4500	0
LVAC Board Loadlist - Outgoing Supplies	1	65325	0	1	65325	0
110V AC Distribution Board	1	0	5000	1	0	5000
Total LVDC	-	111325	-	-	111325	-
Total LVAC	-	-	5000	-	-	5000

Figura 50 - Tabela de Consumos dos Valores Reaproveitados

Reunidos estes valores, pode-se avançar para a construção das tabelas de consumos que vão corresponder ao “Equipment Building Supplies Distribution Board 2” e “Auxiliary Equipment Supplies/External Lighting Distribution Board 3” também representados no Anexo B.1. Para estes quadros, a que vamos chamar de DB2 e DB3, respetivamente, é onde utilizaremos a base de dados da ferramenta desenvolvida, uma vez que já existem informações mais concretas relativamente aos modelos e/ou fabricantes dos equipamentos destes quadros de distribuição.

Relativamente ao tipo de consumo, optou-se pela utilização do consumo médio, de forma a garantir que o transformador dimensionado irá ter a capacidade necessária para operar sem falhas, mas também garantindo que não há um sobredimensionamento exagerado.

O cliente deste projeto indica nas suas especificações quais os valores de fator de simultaneidade que devem ser usados em determinados equipamentos, portanto para este exemplo os fatores usados são esses mesmos. Assim, podemos obter as tabelas de consumos do DB2 e do DB3 representadas na Figura 51 e na Figura 52, respetivamente.

Circuit / Equipment	Quantity	Load DC (W)	Load AC (W)	Diversity Factor	Load DC (W) Adjusted	Load AC (W) Adjusted
Heater 1 (Battery Room)	1	1500	0	1	1500	0
Heater 2	1	1500	0	0.5	750	0
Heater 3	1	1500	0	0.5	750	0
Heater 4	1	1500	0	0.5	750	0
Heater 5	1	1500	0	0.5	750	0
Total LVDC	-	7500	-	-	4500	-
Total LVAC	-	-	0	-	-	0

Figura 51 - Tabela de Consumos do DB2

Circuit / Equipment	Quantity	Load DC (W)	Load AC (W)	Diversity Factor	Load DC (W) Adjusted	Load AC (W) Adjusted
Light Linestra	4	0	240	0.5	0	120
13A Socket	2	0	787.7	0.5	0	393.85
Tubular Water Heater	1	0	500	0.5	0	250
Intertrip Panel	1	0	5500	1	0	5500
Floodlights	1	0	3000	1	0	4000
Comms Panel	1	0	1375	1	0	1375
Disconnect Switch MA-6	1	320	72.8	1	320	72.8
Disconnect Switch MA-7	1	320	72.8	1	320	72.8
Circuit Switcher 503CS	1	0	400	1	0	400
Circuit Switcher 403CS	1	0	400	1	0	400
Total LVDC	-	640	-	-	640	-
Total LVAC	-	-	12348.3	-	-	12584.45

Figura 52 - Tabela de Consumos do DB3

Uma vez tendo todos os quadros de distribuição construídos, a etapa seguinte será calcular o consumo total da subestação e dimensionar o transformador de serviços auxiliares. No projeto real foi considerada uma expansão futura da subestação de 20%, portanto, neste dimensionamento teve de se levar isso em consideração.

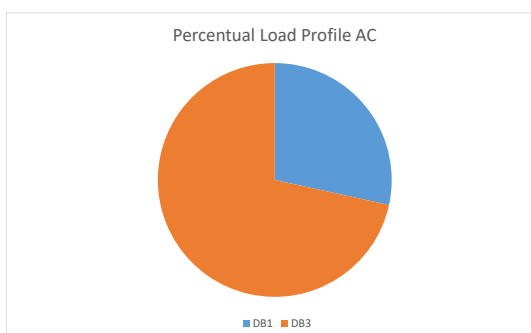
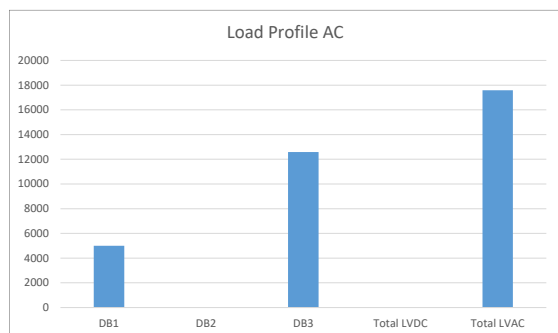
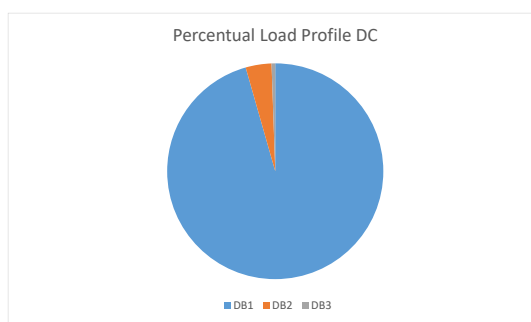
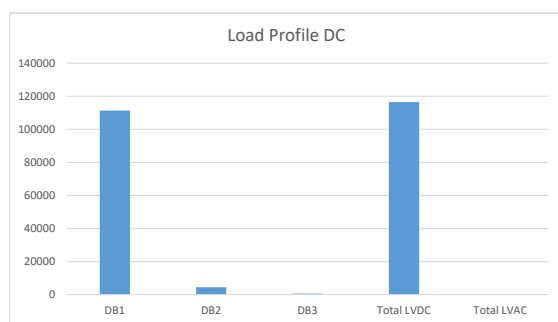
Na Figura 53 é possível analisar a tabela de consumos totais da subestação de Nairn, bem como os gráficos dos perfis de consumo. Esta informação é complementada pelo relatório gerado que se encontra disponível para consulta no Anexo B.2. Além de conter a informação relativa ao consumo geral, detalha também cada quadro de distribuição em pormenor.

Analisando os dois dimensionamentos podemos comparar e concluir que:

- O consumo total de Nairn sem a utilização da ferramenta desenvolvida foi estimado em 178,91 kVA, enquanto com a utilização da ferramenta o valor estimado foi de 165,10 kVA. Ou seja, libertou-se mais 13,81 kVA para consumo;

- Com a ferramenta é possível analisar detalhadamente o consumo dos seccionadores ou disjuntores que possam existir, como acontece no DB3;
- Utilizando a ferramenta é possível analisar gráficos que nos permitem detetar pontos máximos e mínimos de consumo;
- Através da ferramenta pode-se gerar um relatório que faz a análise detalhada de cada quadro de distribuição e depois do consumo total da subestação;
- Ao contrário do método antigo, a ferramenta desenvolvida indica-nos instantaneamente qual o transformador que se adequa melhor e que consegue suportar os valores de consumo calculados.

Circuit / Equipment	Quantity	Load DC (W)	Load AC (W)	Diversity Factor	Load DC (W) Adjusted	Load AC (W) Adjusted
DB1	1	111325	5000	1	111325	5000
DB2	1	4500	0	1	4500	0
DB3	1	640	12584.45	1	640	12584.45
Total LVDC	-	116465	-	-	116465	-
Total LVAC	-	-	17584.45	-	-	17584.45



#### Recommended Transformer for this Substation

The Total Substation Consumption is 165101,34 VA. Transformer Recommended: 250 kVA. Considering the Expansion Factor of 20%.

Figura 53 - Perfil de Consumo de Nairn

Neste exemplo embora para ambas as formas de dimensionamento do transformador a solução seja um transformador de 250 kVA, podem existir casos em que a diferença de cálculo entre os dois métodos resulte na escolha de um transformador com uma capacidade diferente. Isto não

só resultaria numa maior eficiência energética da subestação, bem como reduz os custos operacionais associados.

Após a análise de ambos os dimensionamentos podemos concluir que a utilização da ferramenta de cálculo consegue obter melhores resultados no que toca ao dimensionamento de transformadores para serviços auxiliares. Além disso, este *software* fornece-nos outras informações valiosas que o processo antigo não consegue fornecer, auxiliando não só outro tipo de trabalhos, bem como nos dá uma perceção rápida dos equipamentos de maior e menor consumo das instalações.



## 6 Conclusões

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões derivadas do desenvolvimento da ferramenta de cálculo para o dimensionamento de transformadores de serviços auxiliares em subestações. É destacado o impacto da ferramenta na simplificação e otimização do processo de dimensionamento, bem como na melhoria da eficiência e precisão na seleção de transformadores adequados para as necessidades específicas de cada subestação. Além disso, são discutidas as implicações práticas e benefícios potenciais da aplicação desta ferramenta na indústria. Ademais, são delineadas as perspectivas futuras para a continuação e aperfeiçoamento deste trabalho, apontando para oportunidades de aprimoramento.

### 6.1 Análise Conclusiva

Esta dissertação inicia discutindo o papel das subestações no Sistema Elétrico de Energia, enfatizando a importância do dimensionamento adequado dos transformadores de serviços auxiliares e a importância de fazer estimativas precisas da carga elétrica AC/DC.

A eficiência operacional e a confiabilidade das subestações dependem da integração dos sistemas de corrente alternada e corrente contínua, bem como dos problemas associados aos sistemas mistos de AC/DC.

O estudo inicial revela ser importante, uma vez que fornece informações úteis sobre o planejamento e operação eficazes de infraestruturas essenciais na área da energia, a fim de facilitar o processo de projeto de subestações, aumentando a eficiência energética e diminuindo custos, evitando desta forma sobredimensionamentos ou subdimensionamentos de transformadores de serviços auxiliares.

A ferramenta de cálculo desenvolvida representa um avanço significativo no dimensionamento de transformadores para serviços auxiliares nas subestações elétricas, uma vez que ao considerar as vantagens destacadas, como a otimização do dimensionamento, a facilidade de utilização e a geração de relatórios detalhados, podemos concluir que a sua implementação pode resultar em melhorias substanciais nestas instalações.

A otimização do dimensionamento proporcionada pela ferramenta contribui para evitar excessos ou deficiências no dimensionamento do transformador de serviços auxiliares, garantindo escolhas mais precisas e adequadas de equipamentos e principalmente, do próprio transformador. Isto não só assegura a eficiência energética das subestações, mas também reduz os custos operacionais associados.

Além disso, a facilidade de utilização da ferramenta, graças à sua interface intuitiva e design amigável, promove uma adoção mais fácil por parte dos utilizadores. Isto é essencial para garantir que a ferramenta seja amplamente utilizada e que os seus benefícios sejam maximizados. A capacidade de gerar relatórios detalhados em formato PDF faz com que fiquem registadas algumas informações essenciais e recomendações úteis para o dimensionamento do transformador, facilitando a tomada de decisões.

No que diz respeito à sustentabilidade ambiental, a capacidade da ferramenta de maximizar o dimensionamento dos transformadores de forma mais económica e eficiente contribui para a redução do impacto ambiental das subestações elétricas. A redução dos custos operacionais e a gestão eficaz da energia promovem práticas mais sustentáveis no setor.

## **6.2 Perspetivas Futuras**

Para garantir a eficácia contínua da ferramenta, recomenda-se a sua atualização constante com novos módulos, informações e recursos. Além disso, a realização de validações e testes adicionais é fundamental para garantir a precisão e confiabilidade dos resultados obtidos pela ferramenta.

De forma a assegurar um dimensionamento cada vez mais preciso e próximo da realidade recomenda-se no futuro a adicionar novos módulos de retificadores ou a utilizar uma abordagem diferente para que seja possível somar os consumos AC e DC num só, garantindo cada vez mais que não é feito um sobredimensionamento demasiadamente exagerado.

Além disto, para equipamentos de ventilação e aquecimento, nomeadamente ar-condicionado, perspetiva-se adicionar uma nova funcionalidade na ferramenta de cálculo que permita calcular o consumo deste tipo de equipamento levando em consideração a dimensão da sala onde se encontra. Esta seria uma adição muito importante, uma vez que a experiência demonstrou que a informação disponibilizada por muitos clientes da SISINT não é suficiente para averiguar o consumo do ar-condicionado já existente na subestação.

# Referências

- Adelco. (n.d.). *Retificadores/Carregadores de Baterias*. Retrieved 2 December 2023, from [https://www.adelco.com.br/pt\\_br/retificadores-industrias/](https://www.adelco.com.br/pt_br/retificadores-industrias/)
- Bainga. (n.d.). *BATERIAS INDUSTRIALES GANDIA, S.L.* Retrieved 2 December 2023, from <https://bainga.blogspot.com/2014/05/montaje-baterias-para-equipos-saiups.html>
- Beleza, J. (2016). *Esquemas de Ligação à Terra e Proteção das Pessoas em Instalações*.
- Beleza, J. (2018). *Operação e Planeamento dos Sistemas Eléctricos de Energia*.
- Bolotinha, M. (2017). *SUBESTAÇÕES - SERVIÇOS AUXILIARES*.  
<https://www.linkedin.com/pulse/subesta%C3%A7%C3%B5es-servi%C3%A7os-auxiliares-manuel-bolotinha/?originalSubdomain=pt>
- Carneiro, C. M. dos S. (2019). Rede Nacional de Transporte. *Neutro à Terra*.  
[https://recipp.ipp.pt/bitstream/10400.22/15429/1/NeutroATerra\\_N23\\_1S2019\\_Art1.pdf](https://recipp.ipp.pt/bitstream/10400.22/15429/1/NeutroATerra_N23_1S2019_Art1.pdf)
- Castro, R. (2011). *Uma Introdução às Energias Renováveis: Eólica, Fotovoltaica e Mini-hídrica* (IST, Ed.).
- Chen, P., Wang, C., & Wang, T. (2022). Review and prospects for room-temperature sodium-sulfur batteries. *Materials Research Letters*, 10(11), 691–719.  
<https://doi.org/10.1080/21663831.2022.2092428>
- Circuit Globe. (2019). *Electrical Substation Equipment*. <https://circuitglobe.com/electrical-substation-equipment.html>
- Csanyi, E. (2015). *Substation DC Auxiliary Supply - Battery and Charger Applications*.  
<https://electrical-engineering-portal.com/substation-dc-auxiliary-supply-battery-and-charger-applications>
- Csanyi, E. (2018). *AC Auxiliary Systems In Power Substations (Design Requirements and Equipment)*. <https://electrical-engineering-portal.com/ac-auxiliary-systems-power-substations#:~:text=Substation%20AC%20auxiliary%20systems%20are%20typically%20used%20to,and%20receptacles%2C%20motor-operated%20disconnecting%20switches%20and%20control%20house>.
- DGEG. (2022). *Produção de Energia Elétrica*. <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/energia-eletrica/producao-de-energia-eletrica/#:~:text=O%20Decreto-lei%20n.%C2%BA%2015%2F2022%2C%20de%2014%20de%20janeiro,das%20estrat%C3%A9gias%20nacionais%20para%20descarboniza%C3%A7%C3%A3o%2C%20nomeadamente%20o%20PNEC>

- Diário da República. (2022, January 14). *Decreto-Lei n.º 15/2022*.  
<https://diariodarepublica.pt/dr/legislacao-consolidada/decreto-lei/2022-177634029>
- Duailibe, P. (1999). *Subestações: Tipos, Equipamentos e Proteção*.  
<http://www.vieiraevarela.com.br/arquivos/SE.pdf>
- EDP. (2019, August 14). *Uma história de dois séculos: Portugal acende a primeira lâmpada*.  
<https://www.edp.com/pt-pt/historias-edp/uma-historia-de-dois-seculos-portugal-acende-a-primeira-lampada>
- EEP. (2011, November 14). *Diversity Factor*. <https://electrical-engineering-portal.com/demand-factor-diversity-factor-utilization-factor-load-factor>
- Electrical4U. (2023). *Power Transformers: Definition, Types, and Applications*.  
<https://www.electrical4u.com/electrical-power-transformer-definition-and-types-of-transformer/>
- ElectricianWorld. (2019). *Most Important Electrical Substation Equipment*.  
<https://electricianworld.net/electrical-substation-equipment/>
- EnerData. (2022). *Consumo Total de Energia*. <https://datos.enerdata.net/energia-total/datos-consumo-internacional.html>
- Energy, G. (2023). *Subestação*. <https://goldenergy.pt/glossario/subestacao/>
- ENGEFAR. (n.d.). *Grupos Geradores*. Retrieved 2 December 2023, from  
<https://www.engefar.com.br/grupos-geradores/>
- E-REDES. (2023). *TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA*.
- EVO. (2022). *Subestação: Equipamentos, classificação e exigências*.  
<https://evorepresentacao.com.br/noticias/subestacao-equipamentos-exigencias/>
- Fontes de Energia. (n.d.). *PREÇO DE TRANSFORMADOR*. Retrieved 2 December 2023, from  
<https://www.fontesdeenergia.com.br/preco-de-transformador>
- García, M. (2022, June 24). *O que é o diferencial elétrico e como funciona?*  
<https://selectra.es/energia/info/que-es/interruptor-diferencial>
- Gomes, A. (2021). *Postos de Transformação e Seccionamento*.
- Inteligente, E. (2020). *Como funciona: Transmissão de Energia Elétrica*.  
<https://energiainteligenteufjf.com.br/como-funciona/transmissao-de-energia-eletrica/>
- Javed, U., Mughees, N., Jawad, M., Azeem, O., Abbas, G., Ullah, N., Chowdhury, Md. S., Techato, K., Zaidi, K. S., & Tahir, U. (2021). A Systematic Review of Key Challenges in Hybrid HVAC–HVDC Grids. *Energies*, 14(17), 5451. <https://doi.org/10.3390/en14175451>

- Kaushal, A., & Hertem, D. Van. (2019). An overview of Ancillary Services and HVDC systems in European Context. *Energies*, 12(18), 3481. <https://doi.org/10.3390/en12183481>
- Michigan Technological University. (n.d.). *Distribution Substations*. Retrieved 22 October 2023, from <https://pages.mtu.edu/~avsergue/EET3390/Lectures/CHAPTER6.pdf>
- NationalGrid. (2022, August 22). *Energy Explained*. <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/what-is-a-substation>
- RSIUEE. (2006). *Regras Técnicas das Instalações Eléctricas de Baixa Tensão*.
- Santos, I. (2023). *Dimensionamento de baterias para serviços auxiliares*. Faculdade de Engenharia Universidade do Porto.
- Schneider Electric. (n.d.). *Estimation of actual maximum kVA demand*. Retrieved 16 February 2024, from [https://www.electrical-installation.org/en/wiki/Estimation\\_of\\_actual\\_maximum\\_kVA\\_demand#Diversity\\_factor\\_-\\_Coincidence\\_factor\\_.28ks.29](https://www.electrical-installation.org/en/wiki/Estimation_of_actual_maximum_kVA_demand#Diversity_factor_-_Coincidence_factor_.28ks.29)
- Shah, R., Sánchez, J. C., Preece, R., & Barnes, M. (2018). Stability and control of mixed AC–DC systems with VSC-HVDC: a review. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 12(10), 2207–2219. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.1140>
- StudyElectrical. (2019). *Electrical Substation: Equipment, Types, Components & Functions*. <https://studyelectrical.com/2019/04/electrical-substation-equipment-types-components-functions.html>
- Thompson, M. J., & Wilson, D. (2007). Auxiliary DC Control Power System Design for Substations. *2007 60th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, 522–533. <https://doi.org/10.1109/CPRE.2007.359922>
- United States Department of Agriculture. (2001). *Design Guide for Rural Substations*. [https://www.rd.usda.gov/files/UEP\\_Bulletin\\_1724E-300.pdf](https://www.rd.usda.gov/files/UEP_Bulletin_1724E-300.pdf)
- Wartsila. (2022). Collector substation. In *Marine and Energy Technology*. <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/collector-substation>



# Anexo A

## Transformer Sizing Report

Document Number: IFF24

Prepared: João Pereira

Title: Total Substation Consumption

Date: 06/04/2024

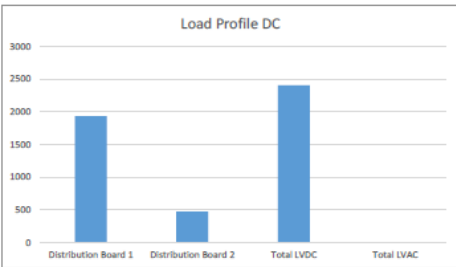
Client: ISEP

Version: 1

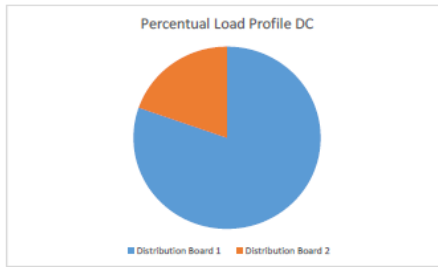
### 1. Load Profile

Table 1 - Load Profile

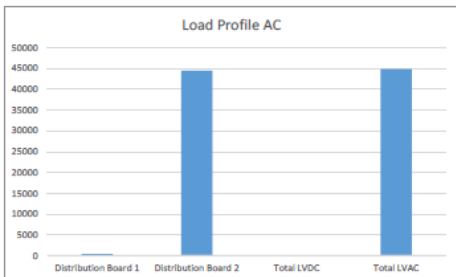
Circuit / Equipment	Quantity	Load DC (W)	Load AC (W)	Diversity Factor	Load DC (W) Adjusted	Load AC (W) Adjusted
Distribution Board 1	1	1932.5	406.5	1	1932.5	406.5
Distribution Board 2	1	472	44500	1	472	44500
Total LVDC	-	2404.5	-	-	2404.5	-
Total LVAC	-	-	44906.5	-	-	44906.5



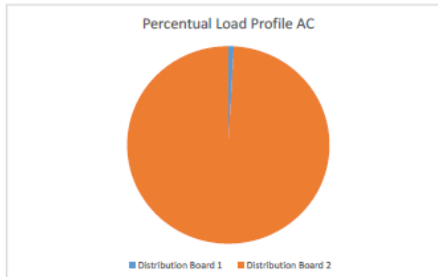
Graphic 1 - Load Profile DC



Graphic 2 - Percentual Load Profile DC



Graphic 3 - Load Profile AC



Graphic 4 - Percentual Load Profile AC

### Recommended Transformer for this Substation

Transformer Recommended: 100 kVA. Considering the Expansion Factor of 20%.

## Transformer Sizing Report

Document Number: IFF24

Prepared: João Pereira

Title: Distribution Board 2

Date: 06/04/2024

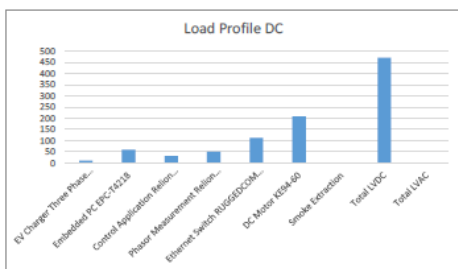
Client: ISEP

Version: 1

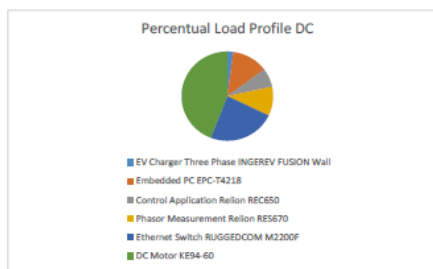
### 1. Load Profile

Table 1 - Load Profile

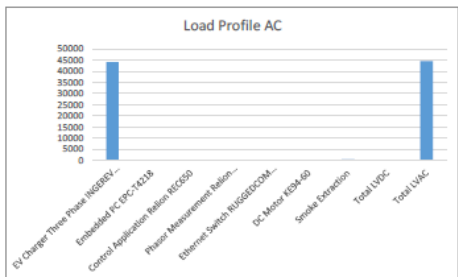
Circuit / Equipment	Quantity	Load DC (W)	Load AC (W)	Diversity Factor	Load DC (W) Adjusted	Load AC (W) Adjusted
EV Charger Three Phase INGEREV F	1	10	44000	1	10	44000
Embedded PC EPC-T4218	1	60	0	1	60	0
Control Application Relion REC650	1	32	0	1	32	0
Phasor Measurement Relion RES67	1	50	0	1	50	0
Ethernet Switch RUGGEDCOM M22	4	112	0	1	112	0
DC Motor KE94-60	1	260	0	0.8	208	0
Smoke Extraction	1	0	1000	0.5	0	500
Total LVDC	-	524	-	-	472	-
Total LVAC	-	-	45000	-	-	44500



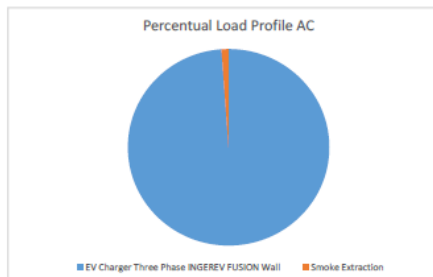
Graphic 1 - Load Profile DC



Graphic 2 - Percentual Load Profile DC



Graphic 3 - Load Profile AC



Graphic 4 - Percentual Load Profile AC

## Transformer Sizing Report

Document Number: IPP24

Prepared: João Pereira

Title: Distribution Board 1

Date: 06/04/2024

Client: ISEP

Version: 1

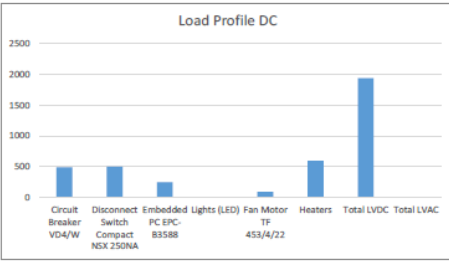
### 1. Load Profile

**Table 1 - Load Profile**

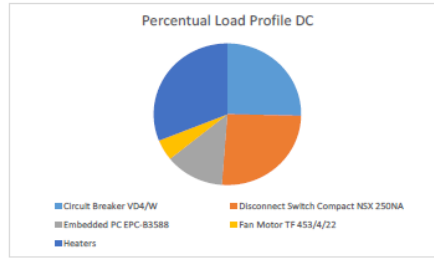
Circuit / Equipment	Quantity	Load DC (W)	Load AC (W)	Diversity Factor	Load DC (W) Adjusted	Load AC (W) Adjusted
Circuit Breaker VD4/W	1	490	170	1	490	170
Disconnect Switch Compact NSX	1	500	20.5	1	500	20.5
Embedded PC EPC-B3588	1	500	0	0.5	250	0
Lights (LED)	8	0	240	0.9	0	216
Fan Motor TF 453/4/22	1	185	0	0.5	92.5	0
Heaters	5	750	0	0.8	600	0
Total LVDC	-	2425	-	-	1932.5	-
Total LVAC	-	-	430.5	-	-	406.5

**Table 2 - Description of circuit breakers and disconnectors**

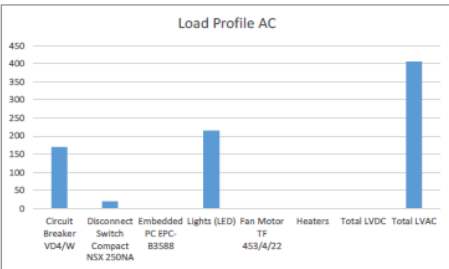
Equipment	Motor Minimum AC (W)	Motor Maximum AC (W)	Motor Minimum DC (W)	Motor Maximum DC (W)	Coil Minimum (DC) (W)	Coil Maximum (DC) (W)	Others AC (W)
Circuit Breaker VD4/W	150	170	130	160	270	330	0
Disconnect Switch Compact NSX 250NA	0	0	500	500	-	-	20.5



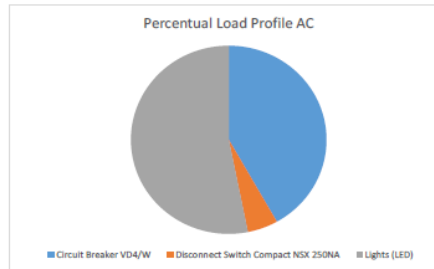
Graphic 1 - Load Profile DC



Graphic 2 - Percentual Load Profile DC



Graphic 3 - Load Profile AC



Graphic 4 - Percentual Load Profile AC

## **Anexo B.1**

## NAIRN 275/132kV LVAC LOADING SCHEDULE

### Auxiliary Building Supplies Distribution Board 1 (3PH & N)

	Quantity	Rating kW or kVA / Amps	Installed - Amp			Diversity Factor (SP-NET-SST-503)			Amp		
			L1 (R)	L2 (Y)	L3 (B)	100%	100%	100%	L1 (R)	L2 (Y)	L3 (B)
Essencial Services*	1	34500 W	80.00	80.00	80.00	100%	100%	100%	80.00	80.00	80.00
Average Installed 3-ph Load=			80.00	80.00	80.00	Total Average 3-ph Load=			80.00	80.00	80.00
			60.00 Amps						60.00 Amps		

\* At this time, for lack of designs, we assume full rating of fuse switch

### Equipment Building Supplies Distribution Board 2 (3PH & N)

	Quantity	Rating kW or kVA / Amps	Installed - Amp			Diversity Factor (SP-NET-SST-503)			Amp		
			L1 (R)	L2 (Y)	L3 (B)	100%	100%	100%	L1 (R)	L2 (Y)	L3 (B)
Heater 1 (Battery Room)	1	2000 W	8.70			100%	100%	100%	8.7	0.0	0.0
Heater 2	1	2000 W		8.70		50%	50%	50%	0.0	4.3	0.0
Heater 3	1	2000 W			8.70	50%	50%	50%	0.0	0.0	4.3
Heater 4	1	2000 W	8.7			50%	50%	50%	4.3	0.0	0.0
Heater 5	1	2000 W		8.70		50%	50%	50%	0.0	4.3	0.0
Average Installed 3-ph Load=			17.39	17.39	8.70	Total Average 3-ph Load=			13.04	8.70	4.35
			14.49 Amps						8.70 Amps		

### Auxiliary Equipment Supplies/External Lighting Distribution Board 3 (3PH & N)

	Quantity	Rating kW or kVA / Amps	Installed - Amp @ 110V AC			Diversity Factor (SP-NET-SST-503)			Amp (Primary)		
			L1 (R)	L2 (Y)	L3 (B)	50%	50%	50%	L1 (R)	L2 (Y)	L3 (B)
Control Room Lights	1	200 W	0.87			50%	50%	50%	0.12	0.00	0.00
13 Amp. Socket	1	13 A	13.00			50%	50%	50%	1.79	0.00	0.00
13 Amp. Socket	1	13 A			13.00	50%	50%	50%	0.00	0.00	1.79
Toilet / Battery Room Lights	1	200 W			0.87	50%	50%	50%	0.00	0.00	0.12
Water Heater / Tubular Heater	1	1500 W	6.52			50%	50%	50%	0.90	0.00	0.00
Intertrip Panel	1	7000 W		30.43		100%	100%	100%	0.00	8.37	0.00
FloodLights	1	4000 W	17.39			100%	100%	100%	4.78	0.00	0.00
Switch at Gate/ Light Building	1	320 W		1.39		50%	50%	50%	0.00	0.19	0.00
Comm's Panel	1	1375 W			5.98	100%	100%	100%	0.00	0.00	1.84
Circuit Switcher 503CS Supply	1	400 W			1.74	100%	100%	100%	0.00	0.00	0.48
Circuit Switcher 403CS Supply	1	400 W			1.74	100%	100%	100%	0.48	0.00	0.00
Disconnecter 303 Supply	1	400 W		1.74		100%	100%	100%	0.00	0.48	0.00
Disconnecter 603 Supply	1	400 W			1.74	100%	100%	100%	0.00	0.00	0.48
Total			39.52	33.57	23.33	Total Average 3-ph Load=			8.06	9.04	4.51
			82.85 Amps						10.81 Amps		

### 110V DC Battery Charger 1

	Quantity	Rating kW or kVA / Amps	Installed - Amp			Diversity Factor (SP-NET-SST-503)			Amp		
			L1 (R)	L2 (Y)	L3 (B)	100%	100%	100%	L1 (R)	L2 (Y)	L3 (B)
110V DC Battery Charger No.1	1	2500 W	10.87			100%	100%	100%	10.87	0	0
Average Installed 3-ph Load=			10.87	0	0	Total Average 3-ph Load=			10.87	0	0
			3.62 Amps						3.62 Amps		

### 110V DC Battery Charger 2

	Quantity	Rating kW or kVA / Amps	Installed - Amp			Diversity Factor (SP-NET-SST-503)			Amp		
			L1 (R)	L2 (Y)	L3 (B)	100%	100%	100%	L1 (R)	L2 (Y)	L3 (B)
110V DC Battery Charger No.2	1	2500 W		10.87		100%	100%	100%	0	10.87	0
Average Installed 3-ph Load=			0	10.87	0	Total Average 3-ph Load=			0	10.87	0
			3.62 Amps						3.62 Amps		

### 48V DC Battery Charger 1

	Quantity	Rating kW or kVA / Amps	Installed - Amp			Diversity Factor (SP-NET-SST-503)			Amp		
			L1 (R)	L2 (Y)	L3 (B)	100%	100%	100%	L1 (R)	L2 (Y)	L3 (B)
48V DC Battery Charger No.1	1	1000 W			4.35	100%	100%	100%	0	0	4.35
Average Installed 3-ph Load=			0	0	4.35	Total Average 3-ph Load=			0	0	4.35
			1.45 Amps						1.45 Amps		

### 48V DC Battery Charger 2

	Quantity	Rating kW or kVA / Amps	Installed - Amp			Diversity Factor (SP-NET-SST-503)			Amp		
			L1 (R)	L2 (Y)	L3 (B)	100%	100%	100%	L1 (R)	L2 (Y)	L3 (B)
48V DC Battery Charger No.2	1	1000 W			4.35	100%	100%	100%	0	0	4.35
Average Installed 3-ph Load=			0	0	4.35	Total Average 3-ph Load=			0	0	4.35
			1.45 Amps						1.45 Amps		

### Auxiliary Diesel Generator Supply

	Quantity	Rating kW or kVA / Amps	Installed - Amp			Diversity Factor (SP-NET-SST-503)			Amp		
			L1 (R)	L2 (Y)	L3 (B)	100%	100%	100%	L1 (R)	L2 (Y)	L3 (B)
Diesel Generator	1	4500 W			19.57	100%	100%	100%	0	0	19.57
Average Installed 3-ph Load=			0	0	19.57	Total Average 3-ph Load=			0	0	19.57
			6.52 Amps						6.52 Amps		

LVAC Board 400V/55-0-55V Transformer 5kVA - 110V AC Distribution Board											
	Quantity	Rating kW or kVA / Amps	Installed - Amp			Diversity Factor (SP-NET-SST-503)			Amp		
			L1 (R)	L2 (Y)	L3 (B)				L1 (R)	L2 (Y)	L3 (B)
110V Distribution Board	1	5000 W		22.73	22.73	100%	100%	100%	0	6.25	6.25
Average Installed 3-ph Load=			0.00	22.73	22.73				0.00	6.25	6.25
			15.15 Amps			Total Average 3-ph Load=			4.17 Amps		

LVAC Board Loadlist - Outgoing Supplies											
	Quantity	Rating kW or kVA / Amps	Installed - Amp			Diversity Factor (SP-NET-SST-503)			Amp		
			L1 (R)	L2 (Y)	L3 (B)				L1 (R)	L2 (Y)	L3 (B)
Transformer N°1 Supplies	1	9200 W	16.00	16.00	16.00	50%	50%	50%	8.0	8.0	8.0
Transformer N°2 Supplies	1	9200 W	16.00	16.00	16.00	50%	50%	50%	8.0	8.0	8.0
Transformer N°1 Services Control	1	2850 W	4.96	4.96	4.96	100%	100%	100%	5.0	5.0	5.0
Transformer N°2 Services Control	1	2850 W	4.96	4.96	4.96	100%	100%	100%	5.0	5.0	5.0
LVAC Board Socket - 400V 32A	1	32A	32	32	32	50%	50%	50%	16.0	16.0	16.0
EV Charging Station	1	44000 W	78.5	78.5	78.5	100%	100%	100%	78.5	78.5	78.5
PV Incomer	1	50 W	0.1	0.1	0.1	50%	50%	50%	0.0	0.0	0.0
Average Installed 3-ph Load=			150.5	150.5	150.5				118.5	118.5	118.5
			150.51 Amps			Total Average 3-ph Load=			118.47 Amps		

Total Load per Phase	Amp	210.44	213.32	221.83
Total Average 3-phase Load	Amp	215.20		
Total 3-phase Load + 20% Load Growth Prediction	Amp	258.24		

Normal & Standby Supply Minimum Rating	
Rating @ 400V	kVA 178.91

## **Anexo B.2**

## Transformer Sizing Report

Document Number: NAIRN\_REMAKE\_2024

Prepared: João Pereira

Title: Naim Substation\_TOTAL

Date: 01/05/2024

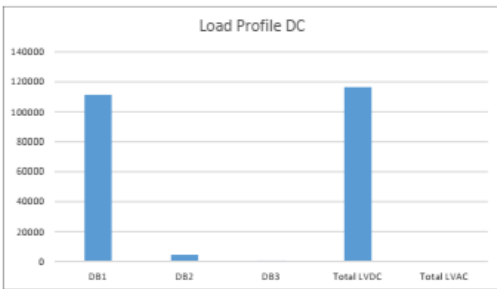
Client: SISINT

Version: 1

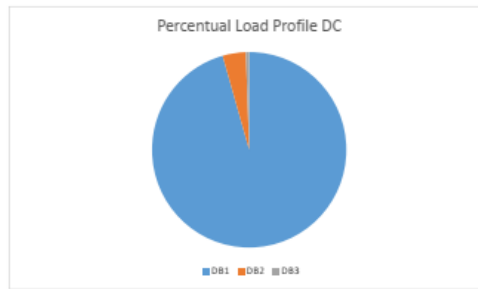
### 1. Load Profile

Table 1 - Load Profile

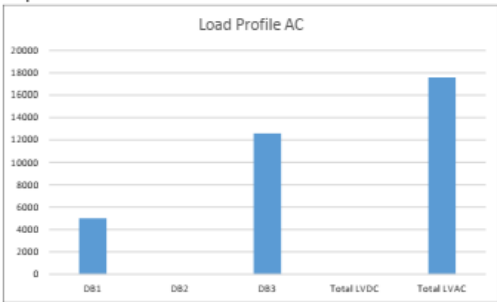
Circuit / Equipment	Quantity	Load DC (W)	Load AC (W)	Diversity Factor	Load DC (W) Adjusted	Load AC (W) Adjusted
DB1	1	111325	5000	1	111325	5000
DB2	1	4500	0	1	4500	0
DB3	1	640	12584.45	1	640	12584.45
Total LVDC	-	116465	-	-	116465	-
Total LVAC	-	-	17584.45	-	-	17584.45



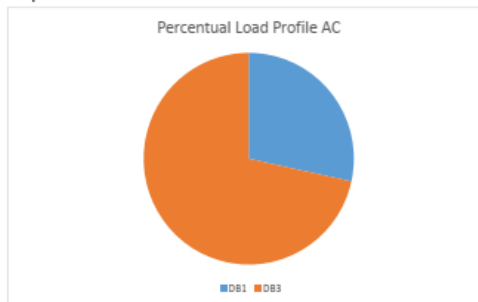
Graphic 1 - Load Profile DC



Graphic 2 - Percentual Load Profile DC



Graphic 3 - Load Profile AC



Graphic 4 - Percentual Load Profile AC

### Recommended Transformer for this Substation

The Total Substation Consumption is 165101,34 VA. Transformer Recommended: 250 kVA. Considering the Expansion Factor of 20%.

## Transformer Sizing Report

Document Number: NAIRN\_REMAKE\_2024

Prepared: João Pereira

Title: Naim Substation\_DB3

Date: 01/05/2024

Client: SISINT

Version: 1

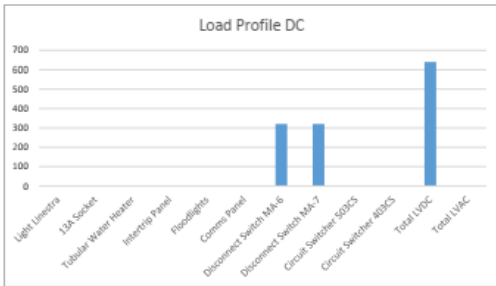
### 1. Load Profile

Table 1 - Load Profile

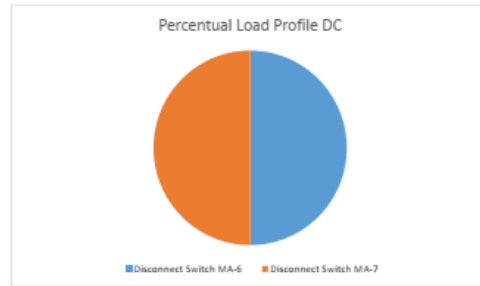
Circuit / Equipment	Quantity	Load DC (W)	Load AC (W)	Diversity Factor	Load DC (W) Adjusted	Load AC (W) Adjusted
Light Linestra	4	0	240	0.5	0	120
13A Socket	2	0	787.7	0.5	0	393.85
Tubular Water Heater	1	0	500	0.5	0	250
Intertrip Panel	1	0	5500	1	0	5500
Floodlights	1	0	3000	1	0	4000
Comms Panel	1	0	1375	1	0	1375
Disconnect Switch MA-6	1	320	72.8	1	320	72.8
Disconnect Switch MA-7	1	320	72.8	1	320	72.8
Circuit Switcher 503CS	1	0	400	1	0	400
Circuit Switcher 403CS	1	0	400	1	0	400
Total LVDC	-	640	-	-	640	-
Total LVAC	-	-	12348.3	-	-	12584.45

Table 2 - Description of circuit breakers and disconnectors

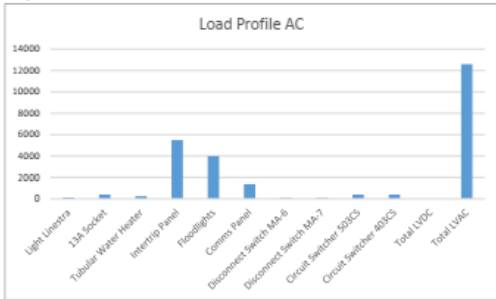
Equipment	Motor Minimum AC (W)	Motor Maximum AC (W)	Motor Minimum DC (W)	Motor Maximum DC (W)	Coil Minimum (DC) (W)	Coil Maximum (DC) (W)	Others AC (W)
Disconnect Switch MA-6	0	0	320	320	-	-	72.8
Disconnect Switch MA-7	0	0	320	320	-	-	72.8



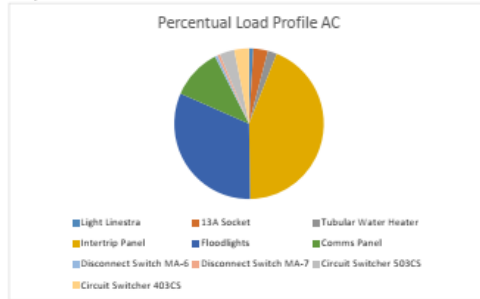
Graphic 1 - Load Profile DC



Graphic 2 - Percentual Load Profile DC



Graphic 3 - Load Profile AC



Graphic 4 - Percentual Load Profile AC

## Transformer Sizing Report

Document Number: NAIRN\_REMAKE\_2024

Prepared: João Pereira

Title: Naim Substation\_DB2

Date: 01/05/2024

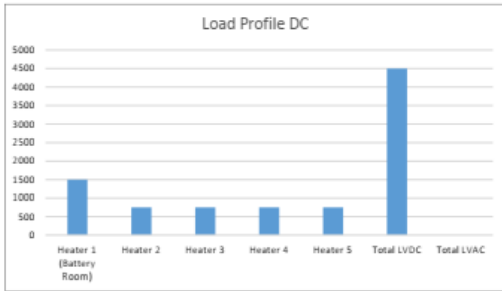
Client: SISINT

Version: 1

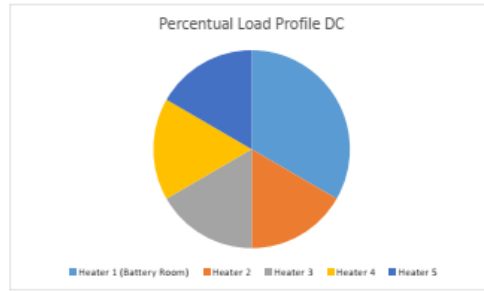
### 1. Load Profile

Table 1 - Load Profile

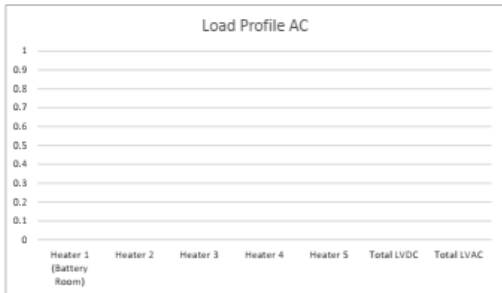
Circuit/ Equipment	Quantity	Load DC (W)	Load AC (W)	Diversity Factor	Load DC (W) Adjusted	Load AC (W) Adjusted
Heater 1 (Battery Room)	1	1500	0	1	1500	0
Heater 2	1	1500	0	0.5	750	0
Heater 3	1	1500	0	0.5	750	0
Heater 4	1	1500	0	0.5	750	0
Heater 5	1	1500	0	0.5	750	0
Total LVDC	-	7500	-	-	4500	-
Total LVAC	-	-	0	-	-	0



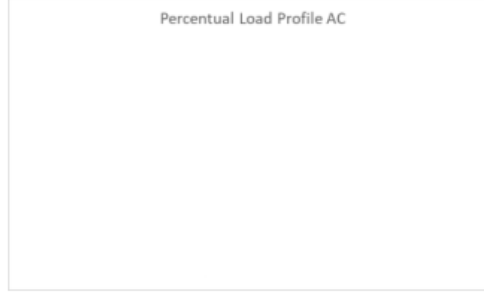
Graphic 1 - Load Profile DC



Graphic 2 - Percentual Load Profile DC



Graphic 3 - Load Profile AC



Graphic 4 - Percentual Load Profile AC

## Transformer Sizing Report

Document Number: NAIRN\_REMAKE\_2024

Prepared: João Pereira

Title: Nairn Substation\_DB1

Date: 01/05/2024

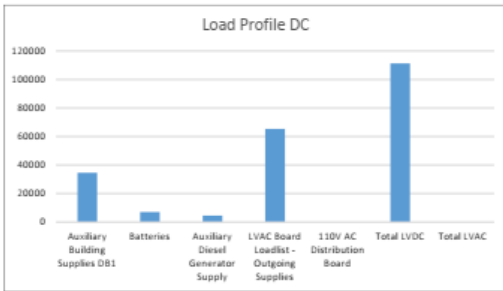
Client: SISINT

Version: 1

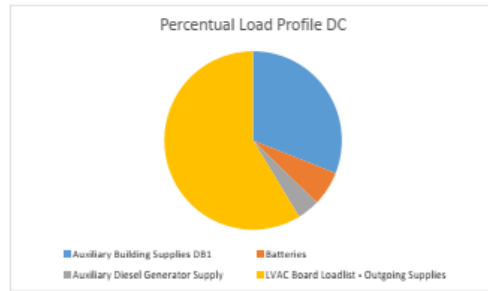
### 1. Load Profile

Table 1 - Load Profile

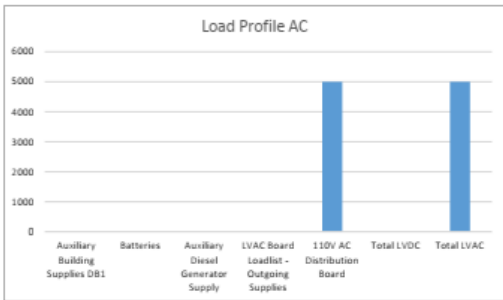
Circuit / Equipment	Quantity	Load DC (W)	Load AC (W)	Diversity Factor	Load DC (W) Adjusted	Load AC (W) Adjusted
Auxiliary Building Supplies DB1	1	34500	0	1	34500	0
Batteries	4	7000	0	1	7000	0
Auxiliary Diesel Generator Supply	1	4500	0	1	4500	0
LVAC Board Loadlist - Outgoing Sup	1	65325	0	1	65325	0
110V AC Distribution Board	1	0	5000	1	0	5000
Total LVDC	-	111325	-	-	111325	-
Total LVAC	-	-	5000	-	-	5000



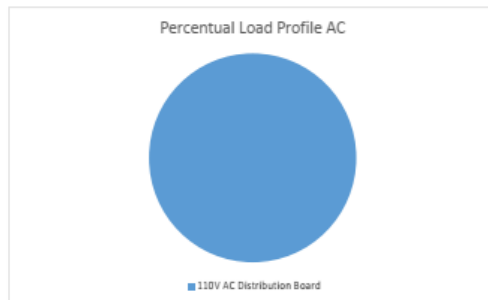
Graphic 1 - Load Profile DC



Graphic 2 - Percentual Load Profile DC



Graphic 3 - Load Profile AC



Graphic 4 - Percentual Load Profile AC

## **Anexo C**

## DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

---

### DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

ISEP, Porto, 25 de junho de 2024

*Yaco Pereira*