

# **Otimização da colocação de cabos monocondutores nas Instalações Elétricas**

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Energia e Automação

Francisco José Mendes Ferreira

Leiria, março de 2026



# **Otimização da colocação de cabos monocondutores nas Instalações Elétricas**

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Energia e Automação

Francisco José Mendes Ferreira

Relatório de Estágio do Mestrado realizado sob orientação do Doutor Pedro José Franco Marques, Professor Coordenador da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, supervisão do Engenheiro Diogo Fernandes e do Engenheiro Bruno Duarte da empresa Alferpac - Projectos, Assistência e Obras Públicas, S.A.

Leiria, março de 2026



# **Originalidade e Direitos de Autor**

O presente relatório de estágio é original, elaborado unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para o elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado o Autor e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual o mesmo foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica - Energia e Automação, no ano letivo 2025/2026, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.



# **Dedicatória**

Aos meus pais, pelo apoio incondicional e por me ensinarem o valor do esforço. À minha namorada, pela paciência, compreensão e incentivo constante.



# Agradecimentos

A realização deste trabalho não teria sido possível sem o apoio e contributo de diversas pessoas, às quais gostaria de expressar o meu sincero agradecimento.

Ao Professor Doutor Pedro Marques, meu orientador académico, pela orientação científica, disponibilidade constante, rigor metodológico e pelos valiosos conselhos que foram fundamentais para a concretização deste trabalho.

À empresa Alferpac, por me ter proporcionado a oportunidade de realizar este estágio e por ter disponibilizado todos os recursos e dados necessários para o desenvolvimento deste estudo.

Ao Engenheiro Diogo Fernandes, meu orientador de estágio na Alferpac, pela confiança depositada, pela orientação técnica e pelo acompanhamento ao longo de todo o período de estágio.

Um agradecimento muito especial ao Engenheiro Bruno Duarte, que me acompanhou diariamente durante a maior parte do estágio, pela paciência, pela generosa partilha de conhecimentos, pelos ensinamentos práticos e pela disponibilidade constante em esclarecer as minhas dúvidas. O seu contributo foi essencial para o meu desenvolvimento profissional e para a realização deste trabalho.

A todos os colaboradores da Alferpac, pelo ambiente de trabalho positivo, pelo companheirismo e pela integração na equipa.

À minha família e namorada, pelo apoio incondicional, pela compreensão nos momentos de maior exigência e por sempre acreditarem em mim.

Aos meus amigos e colegas de curso, pela partilha de experiências, pelo apoio mútuo e pelos momentos de convívio que tornaram esta jornada académica mais enriquecedora.

A todos, o meu muito obrigado.



# Resumo

O presente relatório apresenta o trabalho desenvolvido durante o estágio presencial na empresa Alferpac - Projectos, Assistência e Obras Públicas, S.A., na Benedita, no âmbito da conclusão do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica - Energia e Automação, na Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

O estágio centrou-se em duas vertentes principais: a execução de atividades de projeto de sistemas elétricos (levantamentos em obra, dimensionamento de quadros elétricos, traçado de caminhos de cabos, projetos de iluminação, cálculos de correntes e dimensionamento de cabos e respetivas proteções, ventilação de postos de transformação e aumentos de potência) e o desenvolvimento de um estudo sobre o problema das indutâncias mútuas quando são utilizados cabos monocondutores em sistemas trifásicos.

O estudo analisou comparativamente oito configurações de condutores trifásicos em paralelo (cabos monocondutores), distribuídas por quatro geometrias principais (retangular, estratificada, horizontal e triangular), com o objetivo de minimizar correntes de circulação e perdas por efeito Joule. A metodologia baseou-se no desenvolvimento de um modelo computacional em Excel, fundamentado no artigo científico de S.-Y. Lee, que calcula indutâncias mútuas e quantifica o desempenho através do fator de perdas ( $\delta_t$ ).

Os resultados revelaram uma hierarquia clara de desempenho: o arranjo retangular espelhado (Cenário 1-A) destacou-se como solução ótima ( $\delta_t=1,00055$ ), enquanto a disposição estratificada permutada (Cenário 2-B) registou o pior desempenho ( $\delta_t=1,03264$ ). Verificou-se ainda que a eficácia da permutação de fases depende fortemente da geometria: em arranjos compactos, a simetria estrutural é preferível; na geometria horizontal, o espelhamento revela-se vantajoso. Estes resultados constituem uma ferramenta prática para a seleção de configurações que minimizem perdas energéticas e promovam uma operação mais sustentável.

**Palavras-chave:** indutâncias mútuas, correntes de circulação, condutores em paralelo, sistemas trifásicos, perdas por efeito Joule, otimização energética



# Abstract

The present report documents the work developed during the on-site internship at the company Alferpac - Projectos, Assistência e Obras Públicas, S.A., in Benedita, within the scope of the conclusion of the Master's in Electrical Engineering - Energy and Automation, at the School of Technology and Management of the Polytechnic Institute of Leiria.

The internship focused on two main fronts: the execution of electrical systems project activities (site surveys, sizing of electrical panels, cable path routing, lighting projects, current calculations and sizing of cables and respective protections, ventilation of transformer stations and power increases) and the development of a study about the problem of mutual inductances when single-core cables are used in three-phase systems.

The study analyzed comparatively eight configurations of three-phase conductors in parallel (single-core cables), distributed by four main geometries (rectangular, stratified, horizontal and triangular), with the objective of minimizing circulation currents and Joule effect losses. The methodology was based on the development of a computational model in Excel, based on the scientific article by S.-Y. Lee, which calculates mutual inductances and quantifies the performance through the loss factor ( $\delta_t$ ).

The results revealed a clear performance hierarchy: the mirrored rectangular arrangement (Scenario 1-A) stood out as the optimal solution ( $\delta_t = 1.00055$ ), while the permuted stratified layout (Scenario 2-B) recorded the worst performance ( $\delta_t = 1.03264$ ). It was also found that the effectiveness of phase permutation is strongly dependent on the geometry: in compact arrangements, structural symmetry is preferable; in the horizontal geometry, mirroring proves advantageous. These results provide a practical tool for the selection of configurations that minimize energy losses and promote a more sustainable operation of high-current electrical systems.

**Keywords:** mutual inductances, circulating currents, parallel conductors, three-phase systems, Joule effect losses, energy optimization



# Índice

<b>Originalidade e Direitos de Autor .....</b>	<b>v</b>
<b>Dedicatória .....</b>	<b>vii</b>
<b>Agradecimentos .....</b>	<b>ix</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>xix</b>
<b>Lista de Tabelas .....</b>	<b>xxi</b>
<b>Lista de Siglas e Abreviaturas .....</b>	<b>xxiii</b>
<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Enquadramento .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Objetivos do Estágio.....</b>	<b>2</b>
<b>1.3. Programa de Estágio e Relação com os Objetivos.....</b>	<b>2</b>
<b>1.4. Estrutura do Relatório .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Caracterização da Entidade de Acolhimento.....</b>	<b>5</b>
<b>3. Desenvolvimento do Estágio .....</b>	<b>9</b>
<b>3.1. Projeto de Iluminação de Emergência.....</b>	<b>11</b>
3.1.1. Enquadramento e Objetivos .....	11
3.1.2. Enquadramento Normativo e Regulamentar .....	12
3.1.3. Características da Instalação e Solução Adotada .....	12
3.1.4. Metodologia de Dimensionamento.....	14
3.1.5. Documentação Técnica Produzida .....	19
3.1.6. Dificuldades Encontradas e Soluções Adotadas.....	20
3.1.7. Resultados e Aprendizagens.....	20
<b>3.2. Projeto de Mobilidade Elétrica .....</b>	<b>22</b>

3.2.1.	Enquadramento e Objetivos .....	22
3.2.2.	Enquadramento Normativo e Técnico .....	22
3.2.3.	Características da Instalação e Solução Adotada .....	24
3.2.4.	Metodologia de Projeto e Dimensionamento .....	26
3.2.5.	Rede de Comunicações e Sistema de Gestão de Carga .....	27
3.2.6.	Documentação Técnica Produzida .....	29
3.2.7.	Dificuldades Encontradas e Soluções Adotadas.....	30
3.2.8.	Resultados e Aprendizagens .....	31
<b>3.3.</b>	<b>Projeto de Aumento de Potência .....</b>	<b>32</b>
3.3.1.	Enquadramento e Objetivos .....	32
3.3.2.	Enquadramento Normativo e Técnico .....	33
3.3.3.	Características da Instalação e Solução Adotada .....	34
3.3.4.	Metodologia de Projeto e Dimensionamento .....	35
3.3.5.	Quadro de Proteção dos Cabos.....	39
3.3.6.	Documentação Técnica Produzida .....	40
3.3.7.	Dificuldades Encontradas e Soluções Adotadas.....	41
3.3.8.	Resultados e Aprendizagens .....	42
<b>3.4.</b>	<b>Conclusão .....</b>	<b>43</b>
<b>4.</b>	<b>Estudo de Caso.....</b>	<b>45</b>
<b>4.1.</b>	<b>Enquadramento do Problema .....</b>	<b>45</b>
<b>4.2.</b>	<b>Fundamentação Teórica .....</b>	<b>45</b>
4.2.1.	O Fenómeno das Indutâncias Mútuas.....	45
4.2.2.	Correntes de Circulação e Impacto nas Perdas.....	46
4.2.3.	Estratégias de Mitigação.....	47
4.2.4.	Fator de Perdas como Índice de Avaliação .....	48
<b>4.3.</b>	<b>Metodologia de Análise .....</b>	<b>49</b>
4.3.1.	Especificações do Sistema.....	49
4.3.2.	Modelo de Cálculo Desenvolvido .....	50
4.3.3.	Configurações em Análise (Cenários 1-4).....	50
<b>4.4.</b>	<b>Apresentação e Análise de Resultados.....</b>	<b>52</b>

4.4.1.	Cenário 1 – Arranjo Retangular.....	53
4.4.2.	Cenário 2 – Disposição Estratificada.....	55
4.4.3.	Cenário 3 – Configuração Horizontal.....	58
4.4.4.	Cenário 4 – Arranjo Triangular .....	60
<b>4.5.</b>	<b>Discussão de Resultados.....</b>	<b>63</b>
4.5.1.	Desempenho por Geometria .....	63
4.5.2.	Estratégia Ótima de Disposição por Geometria .....	64
4.5.3.	Explicação Física dos Resultados.....	65
4.5.4.	Impacto Económico e Operacional.....	66
<b>4.6.</b>	<b>Recomendações Técnicas para a Empresa.....</b>	<b>68</b>
<b>4.7.</b>	<b>Limitações do Estudo .....</b>	<b>69</b>
<b>4.8.</b>	<b>Conclusões do Estudo de Caso .....</b>	<b>70</b>
<b>5.</b>	<b>Análise crítica e propostas de melhoria.....</b>	<b>71</b>
<b>5.1.</b>	<b>Reflexão sobre o Estágio .....</b>	<b>71</b>
5.1.1.	Aspetos Positivos.....	71
5.1.2.	Aspetos menos Positivos e Dificuldades Encontradas .....	71
5.1.3.	Competências Desenvolvidas .....	72
<b>5.2.</b>	<b>Propostas de Melhoria e Trabalho Futuro.....</b>	<b>73</b>
5.2.1.	Melhorias para a empresa e para o modelo .....	73
<b>6.</b>	<b>Conclusão .....</b>	<b>75</b>
<b>6.1.</b>	<b>Objetivos Alcançados .....</b>	<b>75</b>
<b>6.2.</b>	<b>Principais Resultados e Contributos.....</b>	<b>75</b>
<b>6.3.</b>	<b>Considerações Finais .....</b>	<b>76</b>
	<b>Referências bibliográficas.....</b>	<b>77</b>
	<b>Anexo A – Modelo de Cálculo em <i>Excel</i>.....</b>	<b>81</b>
	Estrutura do Modelo .....	81
	FolhaDados.....	82

FolhaCálculo.....	83
Considerações sobre a Implementação.....	86
<b>Anexo B – Material de Divulgação Interna.....</b>	<b>87</b>

# Lista de Figuras

Figura 1 - Sede da Alferpac na Benedita .....	7
Figura 2 – Luminária Eaton utilizada .....	14
Figura 3 - Simulação no <i>Dialux</i> .....	15
Figura 4 - Curvas Fotométricas .....	16
Figura 5 - Resultados da Simulação <i>DIALux</i> .....	17
Figura 6 - Detalhe da planta de iluminação de emergência .....	18
Figura 7 - Excerto do Mapa de Quantidades .....	19
Figura 8 - Excerto de Planta do Piso -1 .....	24
Figura 9 - Carregador VE Circutor.....	25
Figura 10 - Excerto de Diagrama de Ligação dos Quadros Elétricos existentes .....	26
Figura 11 - Esquema Unifilar do Quadro Elétrico existente – Q.G.PCVE.....	27
Figura 12 - Excerto do Diagrama de Distribuição da Rede <i>Ethernet</i> .....	28
Figura 13 - Celas dos transformadores .....	35
Figura 14 - Peça desenhada do Ventilador e Caixa de ventilação .....	37
Figura 15 - Caminhos de Cabos no PT.....	38
Figura 16 - Esquema do Q.PT .....	39
Figura 17 - Peça desenhada completa - PT.....	41
Figura 18 - Fórmula da Impedância mútua.....	46
Figura 19 - Fórmula do Fator de Perdas $\delta_t$ .....	48
Figura 20 - Cenário 1.....	51
Figura 21 - Cenário 2.....	51
Figura 22 - Cenário 3.....	52
Figura 23 - Cenário 4.....	52
Figura 24 - Gráfico de Comparação Geral .....	64
Figura 25 - FolhaDados (Dados a Colocar) Excel.....	82
Figura 26 - FolhaDados (Resultados) Excel.....	82
Figura 27 - FolhaCálculo (Matrizes de Cálculo) Excel .....	83

Figura 28 - Fórmula do cálculo das distâncias .....	84
Figura 29 - Fórmula de cálculo da Matriz das Impedâncias.....	84
Figura 30 - Matriz de conexão (K) .....	85
Figura 31 - Fórmula da Matriz Intermédia .....	85
Figura 32 - Fórmula de cálculo da Corrente do Cabo.....	86
Figura 33 - <i>Flyer</i> Desenvolvido .....	87

# Lista de Tabelas

Tabela 1 - Posições dos Condutores Cenário 1-A .....	53
Tabela 2 - Valores Finais das Correntes Cenário 1-A .....	53
Tabela 3 - Posições dos Condutores Cenário 1-B.....	54
Tabela 4 - Valores Finais das Correntes Cenário 1-B .....	54
Tabela 5 - Posições dos Condutores Cenário 2-A .....	55
Tabela 6 - Valores Finais das Correntes Cenário 2-A .....	56
Tabela 7 - Posições dos Condutores Cenário 2-B.....	56
Tabela 8 - Valores Finais das Correntes Cenário 2-B .....	57
Tabela 9 - Posições dos Condutores Cenário 3-A .....	58
Tabela 10 - Valores Finais das Correntes Cenário 3-A .....	58
Tabela 11 - Posições dos Condutores Cenário 3-B.....	59
Tabela 12 - Valores Finais das Correntes Cenário 3-B .....	59
Tabela 13 - Posições dos Condutores Cenário 4-A .....	60
Tabela 14 - Valores Finais das Correntes Cenário 4-A .....	61
Tabela 15 - Posições dos Condutores Cenário 4-B.....	61
Tabela 16 - Valores Finais das Correntes Cenário 4-B .....	62
Tabela 17 - Fatores de Perdas por Cenário e Configuração.....	63
Tabela 18 - Impacto Económico e Operacional .....	67



## Lista de Siglas e Abreviaturas

°	Grau (ângulo)
°C	Grau Celsius
Ω	Ohm (unidade de resistência elétrica)
A	Ampere (unidade de corrente elétrica)
BT	Baixa Tensão
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAE	Classificação Portuguesa de Atividades Económicas
DGEG	Direção-Geral de Energia e Geologia
f.e.m.	Força Eletromotriz
H	Henry (unidade de indutância)
Hz	Hertz (unidade de frequência)
IEEE	“Institute of Electrical and Electronics Engineers”
IP	<i>Ingress Protection</i> (Índice de Proteção)
ITED	Infraestruturas de Telecomunicações em Edifícios
kVA	Quilovolt-ampere
kW	Quilowatt
lx	Lux
m	Metro
mm	Milímetro
mm <sup>2</sup>	Milímetro quadrado (unidade de secção de condutor)
MT	Média Tensão
PT	Posto de Transformação
RFID	<i>Radio-Frequency Identification</i> (Identificação por Radiofrequência)
RSCIE	Regulamento de Segurança Contra Incêndios em Edifícios
RTIEBT	Regras Técnicas das Instalações Elétricas de Baixa Tensão
UTP	<i>Unshielded Twisted Pair</i> (Par Entrançado Não Blindado)
V	Volt (unidade de tensão elétrica)
VE	Veículo Elétrico
VEV	Variador Eletrónico de Velocidade
W	Watt



# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento

A engenharia eletrotécnica desempenha um papel fundamental na sociedade contemporânea, sendo essencial para o desenvolvimento e modernização das infraestruturas energéticas. Num contexto de crescente procura por eficiência energética e sustentabilidade, a otimização de sistemas elétricos constitui uma prioridade estratégica para empresas do setor. A correta conceção e dimensionamento de instalações elétricas não só garante maior fiabilidade operacional, como também contribui para a redução de perdas elétricas e custos operacionais, alinhando-se com os objetivos da transição energética.

O presente relatório documenta o estágio curricular realizado no âmbito do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica - Energia e Automação, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, referente ao ano letivo de 2025/2026. O estágio teve início a 25 de agosto de 2025, com uma duração total de 1040 horas presenciais, e foi desenvolvido na empresa Alferpac – Projectos, Assistência e Obras Públicas, S.A., sob a orientação do Engenheiro Diogo Fernandes (orientador na empresa) e do Professor Doutor Pedro Marques (orientador académico).

A Alferpac é uma empresa de referência no setor da engenharia eletrotécnica, com uma carteira diversificada de projetos de elevada exigência técnica. No contexto da sua atividade, a empresa identificou a necessidade de aprofundar o conhecimento sobre o comportamento de condutores em paralelo em sistemas trifásicos, particularmente no que respeita às correntes de circulação induzidas por indutâncias mútuas. Esta problemática, frequentemente negligenciada em projetos convencionais, tem impacto direto na eficiência energética, estabilidade operacional e longevidade dos condutores.

## **1.2.Objetivos do Estágio**

O estágio teve como objetivos principais:

- I. Complementar a formação académica através do contacto direto com a realidade profissional numa empresa de engenharia eletrotécnica, permitindo a integração dos conhecimentos teóricos adquiridos ao longo do curso em contextos práticos de elevada exigência técnica;
- II. Aplicar conhecimentos teórico-práticos adquiridos nas diversas unidades curriculares do mestrado, nomeadamente nas áreas de sistemas de energia elétrica, instalações elétricas, eletromagnetismo e análise de circuitos, contribuindo para a resolução de problemas reais enfrentados pela empresa;
- III. Desenvolver competências profissionais essenciais ao exercício da engenharia, incluindo trabalho em equipa, cumprimento de prazos, comunicação técnica e capacidade de adaptação às exigências do mercado de trabalho, facilitando assim a futura integração profissional;
- IV. Criar e consolidar hábitos de trabalho, autonomia, sentido crítico e responsabilidade profissional, características fundamentais para o desenvolvimento de uma carreira de excelência em engenharia eletrotécnica.

## **1.3.Programa de Estágio e Relação com os Objetivos**

O programa de estágio desenvolvido na Alferpac contemplou um conjunto diversificado de atividades que permitiram uma visão abrangente da atividade da empresa. As principais componentes do estágio incluíram o acompanhamento de projetos de instalações elétricas de média e baixa tensão, o contacto com processos de dimensionamento e seleção de equipamentos, a análise de configurações de condutores em instalações de grande potência, e o desenvolvimento de ferramentas de apoio à decisão técnica.

Destaca-se, como componente central do estágio, o desenvolvimento de um estudo comparativo sobre configurações de condutores trifásicos em paralelo, motivado por uma necessidade real identificada pela empresa. Este estudo visou analisar o impacto das

indutâncias mútuas na distribuição de correntes e nas perdas por efeito Joule, fornecendo à Alferpac diretrizes técnicas fundamentadas para a seleção ótima de configurações em projetos futuros. A investigação abrangeu oito configurações distintas, distribuídas por quatro geometrias principais (retangular, estratificada, horizontal e triangular), tendo sido desenvolvido um modelo computacional em Excel para quantificação e comparação do desempenho de cada arranjo.

A relação entre o programa de estágio e os objetivos propostos materializou-se através da aplicação prática de conhecimentos de eletromagnetismo, análise de sistemas trifásicos e eficiência energética na resolução de um problema concreto da empresa. O desenvolvimento do estudo exigiu autonomia na pesquisa bibliográfica, rigor metodológico na implementação do modelo de cálculo, e capacidade de análise crítica dos resultados obtidos, contribuindo simultaneamente para a formação do estagiário e para a criação de valor para a organização acolhedora.

#### **1.4. Estrutura do Relatório**

O presente relatório encontra-se organizado em seis capítulos. O Capítulo 1 corresponde a esta introdução, onde se apresenta o enquadramento, os objetivos e a estrutura do documento. O Capítulo 2 caracteriza a entidade de acolhimento, descrevendo a história, missão, estrutura organizacional e principais áreas de atividade da Alferpac. O Capítulo 3 documenta o desenvolvimento do estágio, descrevendo as principais tarefas e atividades realizadas ao longo do período de estágio. O Capítulo 4 apresenta o estudo de caso sobre otimização de configurações de condutores em paralelo, incluindo a fundamentação teórica, metodologia de análise, apresentação de resultados, discussão e recomendações técnicas. O Capítulo 5 contém uma análise crítica do estágio e propõe melhorias tanto ao nível da organização como do próprio processo formativo. Por fim, o Capítulo 6 sintetiza as principais conclusões do trabalho desenvolvido, refletindo sobre os contributos do estágio para a formação académica e profissional e identificando possíveis desenvolvimentos futuros.



## **2.Caracterização da Entidade de Acolhimento**

A Alferpac – Projectos, Assistência e Obras Públicas, S.A. é uma empresa portuguesa fundada em 28 de dezembro de 2001, com sede na Rua dos Frades, nº 9, Algarão, Benedita, no distrito de Leiria. Atua no setor da engenharia e construção, sendo o seu CAE (Código de Atividade Económica) principal 43210 – Instalação Elétrica, e opera sob a forma jurídica de sociedade anónima, com um capital social de 78.500 euros.

A empresa iniciou a sua atividade em Alfeizerão, com foco em serviços energéticos e instalações elétricas, expandindo progressivamente a sua atuação para todo o território nacional. Em 2017, o Grupo Auto Júlio adquiriu 70% do capital social, reforçando a capacidade financeira e estratégica da Alferpac e permitindo-lhe investir na área das energias renováveis e eficiência energética.

A missão da empresa é disponibilizar soluções técnicas de eficiência energética, aliando inovação tecnológica, sustentabilidade e rigor no cumprimento de prazos. A visão passa por consolidar-se como uma referência nacional no setor energético, destacando-se pela qualidade e pela inovação. Os seus valores fundamentais incluem o rigor, o profissionalismo, a inovação e a responsabilidade ambiental.

A Alferpac conta atualmente com cerca de 80 colaboradores, entre engenheiros, técnicos especializados e pessoal administrativo. A empresa dispõe de técnicos reconhecidos pela Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG), qualificados para projeto, execução e exploração de instalações elétricas e Infraestruturas de Telecomunicações em Edifícios e Infraestruturas de Telecomunicações em urbanizações (ITED/ITUR).

Organizacionalmente, a empresa estrutura-se em várias divisões: a Divisão de Projetos (OPPE), responsável pelo desenvolvimento de projetos elétricos e de telecomunicações; a Divisão de Quadros Elétricos (UNIQ), dedicada à conceção e fabrico de quadros elétricos; e a Divisão de Eficiência Energética, que atua em sistemas fotovoltaicos e auditorias energéticas.

O portefólio de clientes da Alferpac é diversificado, abrangendo os setores industrial, terciário, público e residencial, destacando-se as parcerias estratégicas com a EDP Comercial e a Vodafone. A empresa trabalha com fornecedores nacionais e internacionais de

equipamentos elétricos e de sistemas fotovoltaicos, assegurando elevados padrões de qualidade e fiabilidade técnica.

Nos últimos anos, a Alferpac tem registado um crescimento sustentado, acompanhando a transição energética e a expansão da mobilidade elétrica. O seu volume de negócios passou de cerca de 3 milhões de euros em 2017 para valores superiores a 10 milhões em 2024. Este crescimento tem sido suportado pela diversificação de serviços, pela aposta em inovação e pelas sinergias com o Grupo Auto Júlio.

Entre os principais desafios da empresa destacam-se a digitalização dos processos, a escassez de mão-de-obra qualificada, a forte competitividade do setor e a necessidade de constante atualização face às exigências regulamentares e tecnológicas.

A análise *SWOT* (*Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats*) evidencia como principais forças a experiência de mais de 20 anos, a equipa técnica qualificada, as parcerias estratégicas e o apoio do Grupo Auto Júlio. Entre as fraquezas surgem a dimensão relativamente reduzida e a dependência de grandes contratos. As oportunidades estão associadas ao crescimento das energias renováveis e da mobilidade elétrica, enquanto as ameaças incluem a pressão sobre margens e a escassez de técnicos especializados.

Em síntese, a Alferpac é uma empresa sólida e tecnicamente competente, com uma posição consolidada no setor energético nacional. A aposta em eficiência energética, mobilidade elétrica e inovação tecnológica coloca-a numa posição favorável para acompanhar os desafios da transição energética. O estágio desenvolvido na empresa decorreu num contexto de crescimento e modernização, permitindo contacto direto com projetos eletrotécnicos de elevada exigência técnica e aplicabilidade prática. A estrutura organizacional que suporta estas atividades está representada na Figura 1.



**Figura 1 - Sede da Alferpac na Benedita**



### 3.Desenvolvimento do Estágio

O estágio curricular na Alferpac, com duração total de 1040 horas presenciais distribuídas entre agosto de 2025 e março de 2026, proporcionou contacto direto com a realidade profissional da engenharia eletrotécnica através da participação em projetos diversificados de instalações elétricas de Baixa e Média Tensão (BT e MT). A atividade desenvolvida abrangeu tanto o acompanhamento de obras em curso como a elaboração de projetos técnicos completos, permitindo consolidar conhecimentos teóricos adquiridos ao longo do mestrado e desenvolver competências práticas essenciais ao exercício da profissão.

A integração na equipa técnica da empresa foi progressiva, iniciando-se com tarefas de apoio e levantamentos em obra, evoluindo posteriormente para responsabilidades de maior autonomia técnica, incluindo dimensionamento de equipamentos, elaboração de esquemas elétricos e preenchimento de memórias descritivas preexistentes e cálculos justificativos. O acompanhamento diário proporcionado pelo Engenheiro Bruno Duarte e a supervisão do Engenheiro Diogo Fernandes garantiram orientação técnica rigorosa e *feedback* constante, essenciais para o desenvolvimento das competências profissionais.

As atividades desenvolvidas podem ser categorizadas em quatro áreas principais de intervenção. Primeiramente, os projetos de iluminação de emergência, onde se dimensionaram sistemas de iluminação de segurança em edifícios de utilização coletiva, garantindo a conformidade com as exigências regulamentares das RTIEBT [1] e do RSCIE [2]. Em segundo lugar, os aumentos de potência e ventilação de Postos de Transformação (PT), que envolveram a análise da capacidade instalada, a seleção de transformadores de potência e de sistemas de ventilação forçada. Estas intervenções foram realizadas em conformidade com o RSSPTS (Decreto n.º 42895/60 e Decreto Regulamentar n.º 14/77) [3], bem como pelas normas IEC 61936-1 [4] e IEC 60076 [5] [6], que definem requisitos específicos para instalações de Média Tensão e transformadores. Adicionalmente, realizou-se o dimensionamento de cabos e caminhos de cabos, incluindo cálculos de correntes de serviço e de curto-circuito, quedas de tensão e capacidades de transporte. Por fim, procedeu-se à elaboração de esquemas de quadros elétricos, com a definição de arquiteturas de distribuição, seleção de equipamentos de proteção e comando, e a produção da respetiva documentação técnica para fabrico.

Adicionalmente, participou-se em projetos de Infraestruturas de Telecomunicações Em Edifícios (ITED) [7] e projetos de mobilidade elétrica [8] [9] [10], nomeadamente instalações de carregadores de veículos elétricos, áreas em forte crescimento na atividade da empresa. Contudo, devido a restrições de confidencialidade impostas pelos clientes ou por políticas internas da Alferpac, não é possível apresentar documentação detalhada de todos os projetos desenvolvidos. Respeita-se assim o compromisso de sigilo profissional, essencial à relação de confiança entre a empresa e os seus clientes, apresentando-se apenas os casos que obtiveram autorização expressa para divulgação ou cuja natureza genérica permite exposição sem comprometer interesses comerciais.

Este capítulo documenta três projetos representativos da diversidade de atividades desenvolvidas, selecionados por ilustrarem diferentes competências técnicas e áreas de aplicação da engenharia eletrotécnica. Para cada projeto, apresenta-se o enquadramento e objetivos, a metodologia de análise e dimensionamento, os principais resultados obtidos e as dificuldades encontradas, evidenciando a aplicação prática dos conhecimentos teóricos adquiridos durante o mestrado. A estrutura adotada permite demonstrar não apenas a execução técnica das tarefas, mas também a capacidade de análise crítica, tomada de decisão fundamentada e resolução de problemas complexos em contexto real de projeto.

Os projetos selecionados ilustram a abrangência da atividade desenvolvida e a variedade de competências mobilizadas: desde cálculos luminotécnicos e análise de autonomias de baterias, projetos térmicos de postos de transformação e cálculos de correntes de curto-circuito, até ao traçado de percursos de cabos e conceção de arquiteturas de distribuição elétrica. Cada projeto constituiu uma oportunidade de aprendizagem, confrontando o estagiário com desafios técnicos reais, prazos de execução exigentes e a necessidade de articulação com múltiplos intervenientes (clientes, fornecedores, equipas de instalação, entidades reguladoras).

A experiência adquirida ao longo destes meses de estágio permitiu compreender a complexidade inerente à atividade profissional do engenheiro eletrotécnico, que transcende largamente a aplicação de fórmulas e métodos de cálculo, exigindo capacidade de comunicação técnica, gestão de expectativas de clientes, interpretação crítica de regulamentação, e permanente atualização face à evolução tecnológica e normativa do setor. Os projetos apresentados nas secções seguintes refletem esta realidade multifacetada, demonstrando a articulação necessária entre conhecimentos teóricos sólidos, domínio de

ferramentas de cálculo e *software* especializado, e sensibilidade prática para as condicionantes de obra e exequibilidade das soluções propostas.

### **3.1. Projeto de Iluminação de Emergência**

#### **3.1.1. Enquadramento e Objetivos**

O projeto de iluminação de emergência constitui uma componente essencial da segurança contra incêndios em edifícios, uma vez que garante a visibilidade necessária para uma evacuação segura, sendo obrigatório em instalações industriais, comerciais e de utilização coletiva. Durante o estágio na Alferpac, foi desenvolvido um projeto completo de iluminação de emergência para uma instalação industrial, abrangendo o dimensionamento luminotécnico, a seleção de equipamentos e a produção de documentação técnica para execução e licenciamento.

Por questões de confidencialidade impostas pelo cliente e por políticas internas da empresa, não é possível identificar a instalação específica nem divulgar informações comerciais sensíveis. Contudo, o projeto desenvolvido ilustra de forma representativa a metodologia de trabalho e os requisitos técnicos aplicáveis a este tipo de instalações, permitindo demonstrar a aplicação prática dos conhecimentos adquiridos durante o mestrado.

O desenvolvimento deste projeto assumiu particular relevância no contexto do estágio, uma vez que permitiu a aplicação integrada de competências em diversas áreas da engenharia eletrotécnica: análise normativa e regulamentar, cálculo luminotécnico, utilização de *software* especializado, coordenação com outras especialidades e produção de documentação técnica completa. A complexidade da instalação industrial, com múltiplas áreas de produção, diferentes tipologias de espaços e requisitos específicos de segurança, conferiu ao projeto um carácter desafiante e formativo, exigindo rigor técnico, capacidade de análise crítica e autonomia na tomada de decisões.

### **3.1.2. Enquadramento Normativo e Regulamentar**

O dimensionamento da iluminação de emergência em Portugal segue as RTIEBT [1] e o RSCIE [2], complementados pelas normas EN 1838 [11] e EN 50172 [12], que definem os níveis mínimos de iluminância, autonomia e distribuição das luminárias. Nas vias de evacuação exige-se 1 lx ao longo do percurso e 5 lx em zonas críticas, como mudanças de direção, interseções, saídas de emergência, portas corta-fogo e escadas. Junto a equipamentos de combate a incêndio, como extintores e bocas-de-incêndio, devem ser garantidos 5 lx, assegurando rápida identificação e utilização.

Em espaços amplos com mais de  $60m^2$  ou ocupação superior a 50 pessoas, é obrigatória a iluminação antipânico, que deve garantir pelo menos 0,5 lx em toda a área e boa uniformidade, evitando desorientação durante a evacuação [11]. Em ambientes industriais, as sombras geradas por máquinas ou estruturas exigem estudo tridimensional e simulação luminotécnica cuidada.

A autonomia mínima das luminárias é de 1 hora em risco moderado e 3 horas em risco agravado [2]. Os blocos autónomos devem ativar-se automaticamente quando ocorre falha de alimentação [13], e as baterias devem garantir durabilidade adequada, variando normalmente entre 4–6 anos (Ni-Cd) e até 10 anos (Li-ion).

### **3.1.3. Características da Instalação e Solução Adotada**

A instalação industrial objeto do projeto apresentava características típicas de unidades de produção de média dimensão, compreendendo áreas de fabricação, zonas de armazenamento, corredores de circulação, áreas administrativas e instalações de apoio. A diversidade de espaços, com diferentes geometrias, pés-direitos e condicionantes arquitetónicas, exigiu uma abordagem flexível e adaptada às especificidades de cada zona. A instalação não dispunha de sistema centralizado de iluminação de emergência previamente implementado, pelo que a solução técnica adotada baseou-se integralmente em blocos autónomos distribuídos pela instalação.

Esta abordagem descentralizada, embora implique maior dispersão de equipamentos e um número superior de unidades a instalar, apresenta vantagens significativas do ponto de vista da fiabilidade e da manutenção. A fiabilidade descentralizada garante que a falha de um bloco, seja por defeito da bateria, do carregador ou do circuito de alimentação, não compromete o funcionamento dos restantes equipamentos, mantendo níveis adequados de iluminação nas restantes áreas. Em contraste, sistemas centralizados, embora mais compactos e eventualmente mais económicos em grandes instalações, concentram o risco de falha num único ponto, podendo comprometer toda a instalação em caso de avaria do sistema central de baterias ou do inversor.

A manutenção simplificada constitui outra vantagem relevante, uma vez que as intervenções podem ser realizadas de forma localizada, substituindo apenas os blocos autónomos defeituosos ou as baterias que atingiram o fim do seu ciclo de vida, sem necessidade de desativação de sistemas centrais que afetem múltiplas áreas. A flexibilidade de expansão revela-se particularmente importante em instalações industriais sujeitas a alterações de *layout* ou ampliações, permitindo adicionar novos blocos autónomos sem alterações significativas na instalação existente, bastando prever circuitos de alimentação adequados. Por fim, o cumprimento normativo é assegurado de forma robusta, uma vez que cada bloco autónomo incorpora bateria, carregador e sistema de comutação automática certificados pelo fabricante, com testes periódicos automatizados que verificam o estado de carga e a funcionalidade do sistema [13].

Os blocos garantem autonomia de 1 hora cumprindo os requisitos regulamentares para instalações de risco moderado [2]. A conformidade com as normas EN 62034 [13] e EN 1838 [11] assegura a adequação dos equipamentos às exigências normativas europeias. O Índice de Proteção IP65 e classificação IK10, adequados ao ambiente industrial, protegem os componentes internos contra penetração de poeiras e jatos de água, garantindo simultaneamente resistência mecânica elevada contra impactos. As baterias utilizadas são do tipo LiNiMnCoO<sub>2</sub> (óxido de lítio-níquel-mangânês-cobalto), tecnologia avançada que combina elevada densidade energética com excelente estabilidade térmica e ciclo de vida prolongado, características adequadas para aplicações de emergência em ambientes industriais, cujas especificações técnicas e aspeto visual são apresentados na Figura 2.



Figura 2 – Luminária Eaton utilizada

### 3.1.4. Metodologia de Dimensionamento

O desenvolvimento do projeto seguiu uma metodologia estruturada e sistemática, baseada nas melhores práticas de engenharia luminotécnica e nas recomendações das normas técnicas aplicáveis. A primeira etapa consistiu no levantamento e caracterização detalhada dos espaços da instalação industrial. Tratando-se de um cliente recorrente da Alferpac, as plantas arquitetônicas da instalação encontravam-se já disponíveis, incluindo a geometria e dimensões dos diversos espaços: áreas de produção, corredores de circulação, áreas administrativas, instalações sanitárias, armazéns e zonas técnicas. O projeto de segurança contra incêndios, incluindo a definição das vias de evacuação, localização das saídas de emergência, distâncias máximas de percurso e posicionamento dos meios de primeira intervenção (extintores portáteis e bocas-de-incêndio armadas) [2] [12], havia sido previamente desenvolvido por uma empresa especializada em segurança contra incêndios. Esta documentação constituiu a base de trabalho para o dimensionamento da iluminação de emergência, fornecendo informação essencial sobre os percursos críticos que exigem iluminação adequada e sobre os equipamentos de segurança que necessitam de níveis de iluminância superiores.

Procedeu-se à identificação da localização dos quadros elétricos e equipamentos críticos da instalação, essenciais tanto para prever os pontos de alimentação dos blocos autónomos como para assegurar iluminação adequada junto aos próprios quadros, facilitando intervenções técnicas. As condicionantes arquitetónicas e estruturais relevantes, como pé-direito variável, presença de estruturas metálicas complexas, pontes rolantes, equipamentos

de grande porte e zonas de armazenamento em altura, foram documentadas através de visita ao local e consulta das plantas existentes, uma vez que influenciam significativamente a distribuição luminosa e podem criar zonas de sombra que comprometem o cumprimento dos requisitos normativos.

O cálculo luminotécnico, etapa central do dimensionamento, foi realizado através do *software DIALux* [11], ferramenta amplamente reconhecida na indústria para simulação de iluminação, que permite modelar tridimensionalmente os espaços e simular com elevado grau de precisão a distribuição das iluminâncias em função das características fotométricas dos equipamentos e das propriedades refletoras das superfícies. A modelação tridimensional dos espaços envolveu a inserção das geometrias dos diversos compartimentos, das alturas úteis e dos pés-direitos, dos fatores de reflexão das superfícies (paredes, tetos e pavimentos) e das obstruções significativas que possam interferir com a propagação da luz, como equipamentos industriais de grande volume, estruturas metálicas, estantes de armazenamento ou divisórias interiores, conforme ilustrado na simulação tridimensional apresentada na Figura 3.

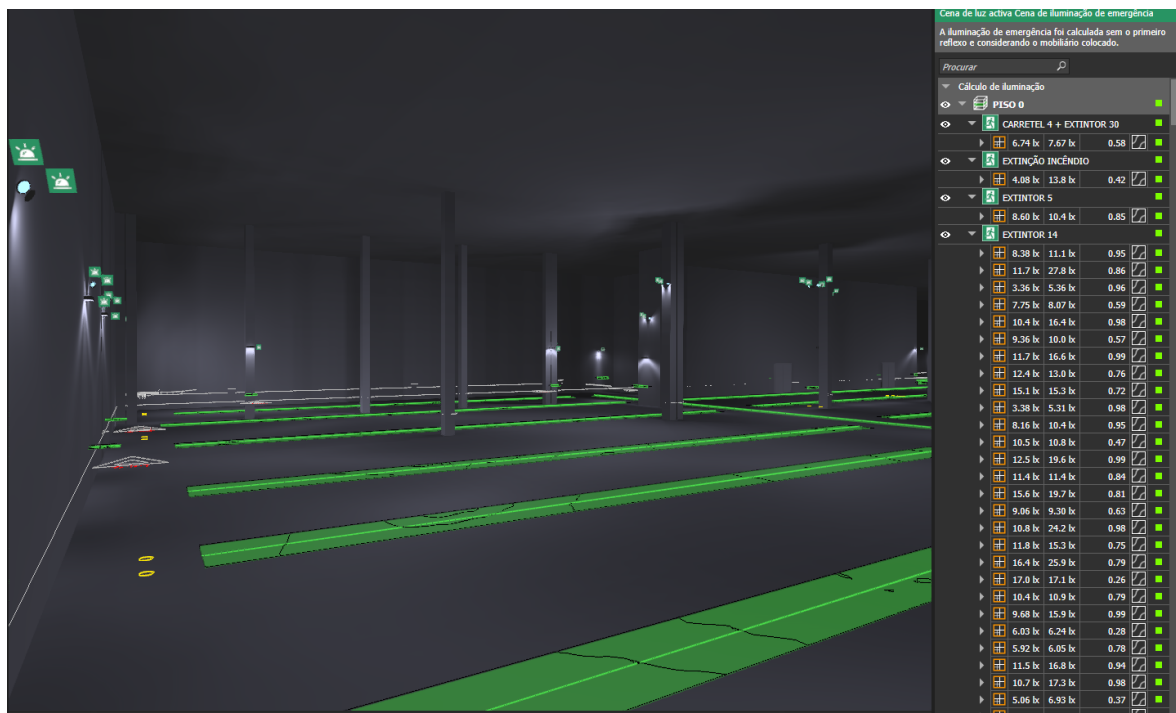


Figura 3 - Simulação no *Dialux*

O posicionamento preliminar das luminárias baseou-se em critérios de uniformidade e de cobertura eficaz das vias de evacuação, distribuindo os blocos autónomos de forma a

garantir, numa primeira aproximação, o cumprimento dos requisitos mínimos de iluminância. Esta distribuição inicial, embora fundamentada em boas práticas e em regras empíricas de espaçamento, requer invariavelmente ajustes através de simulação iterativa. A configuração dos blocos autónomos no *software* envolveu a introdução das características fotométricas específicas dos equipamentos, nomeadamente as curvas de distribuição luminosa (arquivos fotométricos) fornecidas pelo fabricante, que descrevem com precisão a intensidade luminosa em função da direção de emissão.

A simulação e otimização constituiu um processo iterativo de ajuste do posicionamento dos blocos autónomos até garantir o cumprimento integral dos requisitos normativos: 1 lx nas vias de evacuação horizontais, 5 lx nas mudanças de direção, interseções, saídas de emergência e junto a meios de intervenção, e 0,5 lx em áreas antipânico [2] [11]. Este processo exigiu múltiplas iterações, analisando os resultados de cada simulação, identificando zonas subdimensionadas ou com iluminância insuficiente, e reposicionando ou adicionando luminárias conforme necessário. A validação dos resultados envolveu a análise das curvas fotométricas ao nível do pavimento, representações gráficas que permitem visualizar intuitivamente a distribuição das iluminâncias e identificar eventuais não conformidades, conforme exemplificado na Figura 4 [12]. A verificação das curvas ao nível do pavimento, complementada por tabelas numéricas de iluminâncias em pontos específicos, permitiu confirmar o cumprimento dos requisitos em toda a extensão dos percursos de evacuação e das áreas antipânico, conduzindo ao ajuste final da disposição dos equipamentos, encontram-se detalhados na Figura 5.



Figura 4 - Curvas Fotométricas

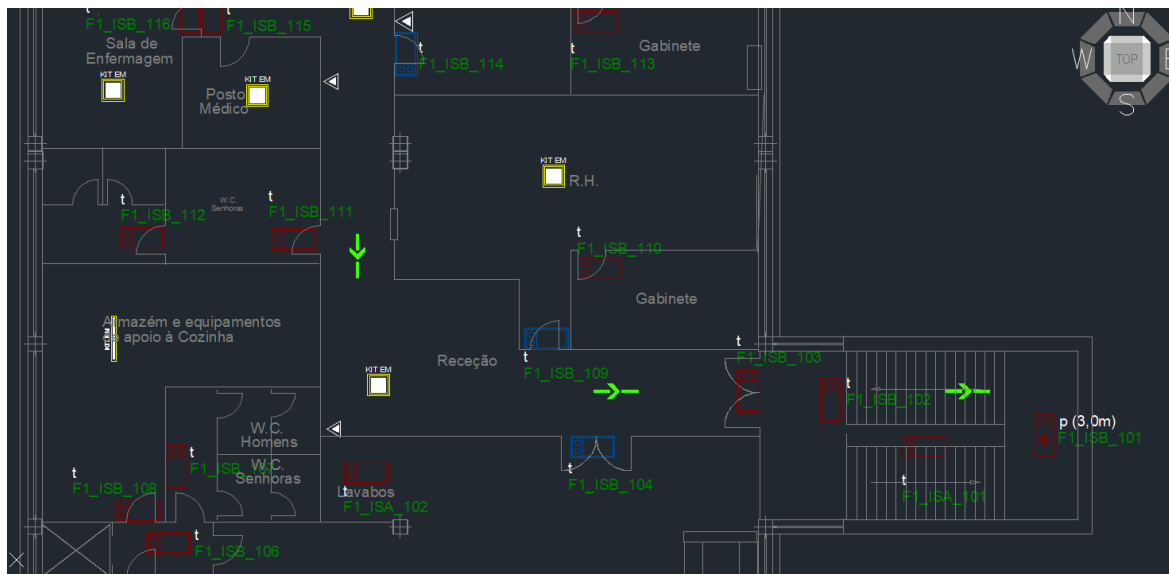
Superfícies antipânico

Propriedades	$E_{min}$ (Nominal)	$E_{max}$	$U_a$ (Nominal)	Índice
Superfície anti-pânico (ARMAZÉM E EQUIPAMENTO DE APOIO À COZINHA) Potência luminosa perpendicular (adaptivo) Altura: 0.000 m	4.03 lx (≥ 0.50 lx) ✓	62.7 lx	0.064 (≥ 0.025) ✓	AP7
Superfície anti-pânico (ARQUIVO) Potência luminosa perpendicular (adaptivo) Altura: 0.000 m	11.0 lx (≥ 0.50 lx) ✓	64.3 lx	0.17 (≥ 0.025) ✓	AP16
Superfície anti-pânico (CENTRO ENCOMENDAS) Potência luminosa perpendicular (adaptivo) Altura: 0.000 m	3.31 lx (≥ 0.50 lx) ✓	89.5 lx	0.037 (≥ 0.025) ✓	AP11
Superfície anti-pânico (COMPRAS) Potência luminosa perpendicular (adaptivo) Altura: 0.000 m	3.93 lx (≥ 0.50 lx) ✓	89.8 lx	0.044 (≥ 0.025) ✓	AP31
Superfície anti-pânico (COZINHA) Potência luminosa perpendicular (adaptivo) Altura: 0.000 m	8.83 lx (≥ 0.50 lx) ✓	63.1 lx	0.14 (≥ 0.025) ✓	AP30
Superfície anti-pânico (ENGENHARIA INDUSTRIAL) Potência luminosa perpendicular (adaptivo) Altura: 0.000 m	2.35 lx (≥ 0.50 lx) ✓	89.8 lx	0.026 (≥ 0.025) ✓	AP8
Superfície anti-pânico (GABINETE DIREÇÃO) Potência luminosa perpendicular (adaptivo) Altura: 0.000 m	1.22 lx (≥ 0.50 lx) ✓	5.46 lx	0.22 (≥ 0.025) ✓	AP34
Superfície anti-pânico (GABINETE) Potência luminosa perpendicular (adaptivo) Altura: 0.000 m	1.64 lx (≥ 0.50 lx) ✓	5.20 lx	0.32 (≥ 0.025) ✓	AP15
Superfície anti-pânico (GABINETE) Potência luminosa perpendicular (adaptivo) Altura: 0.000 m	43.4 lx (≥ 0.50 lx) ✓	91.6 lx	0.47 (≥ 0.025) ✓	AP18
Superfície anti-pânico (GABINETE) Potência luminosa perpendicular (adaptivo) Altura: 0.000 m	7.54 lx (≥ 0.50 lx) ✓	89.7 lx	0.084 (≥ 0.025) ✓	AP21
Superfície anti-pânico (GABINETE) Potência luminosa perpendicular (adaptivo) Altura: 0.000 m	0.84 lx (≥ 0.50 lx) ✓	5.22 lx	0.16 (≥ 0.025) ✓	AP22

Figura 5 - Resultados da Simulação *DIALux*

Com base nos resultados da simulação luminotécnica, procedeu-se à elaboração das plantas de execução em *software Computer-Aided Design (CAD)*, documentando com rigor e clareza a localização precisa de cada bloco autónomo. As plantas especificam a tipologia de montagem de cada luminária (parede, teto ou suporte especial), informação essencial para as equipas de instalação e para a orçamentação dos trabalhos. Os circuitos de alimentação e respetivos quadros de origem foram documentados, permitindo coordenar a instalação da iluminação de emergência com os circuitos elétricos existentes e garantir proteções adequadas. A sinalização de segurança associada, nomeadamente os pictogramas de saída de emergência que devem ser colocados em posições visíveis e iluminados pelos próprios blocos autónomos ou por sinalização fotoluminescente, foi igualmente representada nas plantas [2] [12]. Uma legenda técnica completa, com especificações dos equipamentos, símbolos gráficos e notas de execução, complementa a documentação, facilitando a interpretação por parte dos diversos intervenientes no processo construtivo. Na Figura 6,

apresenta-se um detalhe da planta de iluminação de emergência, onde é possível observar a localização dos blocos autónomos e a respetiva sinalização de saída.



**Figura 6 - Detalhe da planta de iluminação de emergência**

Foi elaborado um mapa de quantidades detalhado, discriminando o número de blocos autónomos por tipologia de montagem, por localização e por características técnicas específicas. Este documento, essencial para a gestão do projeto, serviu de base para a orçamentação e aquisição dos equipamentos junto de fornecedores, para o planeamento da execução e afetação de recursos humanos e materiais, para o controlo de obra e verificação de conformidade durante a instalação, e para a faturação e medições finais após conclusão dos trabalhos. O mapa especifica para cada luminária a referência comercial completa, as características técnicas relevantes (potência, fluxo luminoso, autonomia), a localização precisa identificada por código, e a justificação normativa da sua instalação, relacionando cada equipamento com os requisitos específicos que visa cumprir [11]. Um excerto deste documento detalhado, com a discriminação dos equipamentos e respetivas especificações, pode ser consultado na Figura 7.

1.1	FÁBRICA 1		
1.1.1	Fornecimento e montagem de luminária bloco autónomo LED permanente / não permanente do tipo EATON ATLANTIC LED, referência 40071354872, de montagem em parede, com características de acordo com o caderno de encargos e posição de acordo com as peças desenhadas	1	Un
1.1.2	Fornecimento e montagem de luminária bloco autónomo LED permanente / não permanente do tipo EATON ATLANTIC LED, referência 40071354872, de montagem em teto, com características de acordo com o caderno de encargos e posição de acordo com as peças desenhadas	123	Un
1.1.3	Fornecimento e montagem de luminária bloco autónomo LED permanente / não permanente do tipo EATON ATLANTIC LED, referência 40071354872, de montagem em calha, com características de acordo com o caderno de encargos e posição de acordo com as peças desenhadas	46	Un
1.1.4	Fornecimento e montagem de luminária bloco autónomo LED permanente / não permanente do tipo EATON ATLANTIC LED, referência 40071354872, de montagem em viga, com características de acordo com o caderno de encargos e posição de acordo com as peças desenhadas	16	Un
1.1.5	Fornecimento e montagem de luminária bloco autónomo LED permanente / não permanente do tipo EATON ATLANTIC LED, referência 40071354872, de montagem em suporte, com características de acordo com o caderno de encargos e posição de acordo com as peças desenhadas	35	Un

Figura 7 - Excerto do Mapa de Quantidades

### 3.1.5. Documentação Técnica Produzida

O projeto resultou na elaboração de um dossier técnico completo para licenciamento, incluindo memória descritiva, onde se caracteriza a instalação industrial, as suas áreas funcionais e o enquadramento normativo [1] [2]. A solução adota blocos autónomos EATON e é justificada face a alternativas, apresentando vantagens em fiabilidade, manutenção e flexibilidade. O dimensionamento luminotécnico, realizado em *DIALux*, comprova o cumprimento integral dos requisitos de iluminância, uniformidade e autonomia [11] [12].

Foram produzidas peças desenhadas em *software CAD (.dwg e .pdf)*, com localização detalhada dos equipamentos, legendas completas e notas técnicas, facilitando a execução em obra. Os relatórios luminotécnicos incluem curvas fotométricas, tabelas de iluminâncias, verificação regulamentar e visualizações 3D que apoiam a compreensão técnica e não técnica da solução.

O dossier integra ainda um mapa de quantidades detalhado, com referências comerciais, localizações e preços, útil para orçamentação e controlo económico. As especificações técnicas incluem fichas de produto, certificados, declarações de desempenho e manuais, essenciais para o licenciamento e manutenção futura. Por fim, os esquemas elétricos unifilares e multifilares documentam a arquitetura do sistema, facilitando diagnóstico, manutenção e futuras alterações, com identificação coerente entre todas as peças do projeto.

### **3.1.6. Dificuldades Encontradas e Soluções Adotadas**

O projeto enfrentou desafios técnicos significativos que exigiram soluções criativas e ajustadas às condicionantes arquitetônicas e operacionais da instalação industrial. A presença de equipamentos volumosos, estruturas metálicas, condutas e áreas de armazenamento criavam zonas de sombra que dificultavam o cumprimento dos níveis de iluminância. As soluções incluíram posicionamento estratégico das luminárias, uso de suportes especiais e, quando necessário, aumento do número de blocos autônomos para garantir conformidade normativa [11] [12].

A integração com a iluminação normal e com os circuitos elétricos existentes implicou análise detalhada dos quadros, da capacidade disponível e das proteções instaladas. Algumas zonas exigiram reforço de circuitos ou criação de novos quadros, obrigando a coordenação com a equipa elétrica da instalação e com a manutenção para garantir compatibilidade operacional.

A modelação 3D no *DIALux* também apresentou dificuldades, sobretudo na representação de obstruções, definição de refletâncias industriais e interpretação de resultados em situações complexas. O domínio progressivo do *software*, aliado à consulta de documentação técnica e validação cruzada com cálculos manuais, permitiu assegurar a fiabilidade das simulações e resultados.

### **3.1.7. Resultados e Aprendizagens**

O projeto de iluminação de emergência desenvolvido durante o estágio na Alferpac permitiu consolidar conhecimentos teóricos das áreas de Luminotécnica, Instalações Elétricas e Segurança, aplicando-os a um contexto real com elevados requisitos técnicos e responsabilidades ao nível da proteção de pessoas. Para além do domínio técnico, o estágio desenvolveu competências de gestão de projeto, autonomia, comunicação e trabalho sob pressão.

A interpretação e aplicação da regulamentação revelou-se central, permitindo transformar requisitos legais complexos em soluções práticas e fundamentadas, especialmente em situações onde as normas não são explícitas. O uso de ferramentas como *DIALux* e *software CAD* fortaleceu competências práticas essenciais, destacando a importância de compreender tanto as potencialidades como as limitações dos *softwares* e validar criticamente os resultados.

O projeto exigiu equilíbrio entre rigor normativo e viabilidade económica, promovendo uma abordagem integrada que considerou custos, manutenção e sustentabilidade. A produção de documentação técnica clara e adaptada a diferentes intervenientes reforçou competências de comunicação essenciais ao exercício da engenharia.

A resolução de problemas reais, muitas vezes sem soluções pré-definidas, desenvolveu capacidade de análise crítica, criatividade e tomada de decisão informada. O projeto foi aprovado pelas entidades reguladoras e implementado com sucesso, validando a qualidade do trabalho realizado. A participação na fase de execução permitiu compreender a importância da exequibilidade das soluções desde a conceção.

O estágio reforçou a consciência da responsabilidade ética associada aos sistemas de segurança, onde decisões técnicas têm impacto direto na proteção de vidas humanas. Foram igualmente desenvolvidas competências transversais como gestão de tempo, organização, adaptação ao contexto empresarial e comunicação interpessoal, essenciais para lidar com clientes, fornecedores e equipas multidisciplinares.

A reflexão crítica sobre todo o processo permitiu identificar aprendizagens, melhorias e a necessidade de formação contínua ao longo da carreira. Em síntese, o projeto constituiu uma experiência formativa completa que uniu teoria, prática e responsabilidade profissional, marcando a transição da formação académica para o exercício real da engenharia eletrotécnica.

## **3.2. Projeto de Mobilidade Elétrica**

### **3.2.1. Enquadramento e Objetivos**

O projeto de mobilidade elétrica foi desenvolvido para uma instalação com parques de estacionamento subterrâneos, no contexto da crescente procura por infraestruturas de carregamento de veículos elétricos. A instalação dispunha já de alguns pontos de carregamento, mas a gestão da unidade identificou a necessidade de expandir significativamente a capacidade instalada para responder às expectativas dos utilizadores e acompanhar a tendência de eletrificação da frota automóvel.

Por questões de confidencialidade impostas pelo cliente, não é possível identificar a instalação específica nem divulgar informações comerciais sensíveis. Contudo, o projeto desenvolvido ilustra de forma representativa a metodologia de trabalho e os requisitos técnicos aplicáveis a este tipo de instalações, que se têm tornado cada vez mais frequentes na atividade da Alferpac.

O desenvolvimento deste projeto assumiu particular relevância no contexto do estágio, uma vez que a mobilidade elétrica constitui uma área estratégica de crescimento para a empresa e para o setor energético em geral. O projeto exigiu a integração de competências em diversas áreas: análise de instalações elétricas existentes, dimensionamento de proteções e circuitos, conceção de redes de comunicação de dados, coordenação com sistemas de gestão de carga e produção de documentação técnica completa para execução e licenciamento.

### **3.2.2. Enquadramento Normativo e Técnico**

A instalação de infraestruturas de carregamento de veículos elétricos em Portugal segue um conjunto de normas e regulamentos específicos, que complementam as RTIEBT [1]. O Decreto-Lei n.º 39/2010, alterado pelo Decreto-Lei n.º 90/2014 [8], estabelece o regime jurídico aplicável à mobilidade elétrica, definindo requisitos técnicos para pontos de carregamento normais e rápidos. Complementarmente, é fundamental o cumprimento das diretrizes do Guia Técnico das Instalações Elétricas para Alimentação de Veículos Elétricos

(3.<sup>a</sup> edição) [10], publicado pela DGEG, que detalha as condições de segurança, esquemas de ligação e proteções obrigatórias para estas infraestruturas.

As normas IEC 61851 [9] definem os requisitos de segurança e funcionalidade dos sistemas de carregamento para veículos elétricos, abrangendo os modos de carregamento, os sistemas de comunicação entre veículo e infraestrutura, e os requisitos de proteção contra choques elétricos e sobreintensidades. A norma IEC 62196 [14] especifica as características das fichas, tomadas e conectores, garantindo interoperabilidade entre diferentes fabricantes e modelos de veículos.

Os carregadores de veículos elétricos são tipicamente classificados em função da potência disponibilizada: carregamento normal (até 22 kW em corrente alternada), carregamento semi-rápido (22 kW a 50 kW em corrente alternada) e carregamento rápido (superior a 50 kW, tipicamente em corrente contínua). No contexto de parques de estacionamento privados, os carregadores normais de 22 kW constituem a solução mais comum, oferecendo um compromisso equilibrado entre tempo de carregamento, custo de instalação e impacto na rede elétrica.

A proteção contra choques elétricos em instalações de carregamento exige particular atenção. As RTIEBT [1] estabelecem que os circuitos de alimentação dos pontos de carregamento devem ser protegidos por dispositivos diferenciais de alta sensibilidade (30 mA, tipo B ou tipo A com proteção contra correntes contínuas de defeito) [15], garantindo a deteção de correntes de fuga mesmo em presença de componentes contínuas resultantes da conversão eletrónica. A ligação equipotencial e o sistema de terras devem ser dimensionados considerando as correntes de defeito elevadas, características destes equipamentos.

A comunicação entre carregadores e sistemas de gestão de carga constitui um requisito essencial em instalações com múltiplos pontos de carregamento. A gestão dinâmica de carga permite otimizar a distribuição da potência disponível entre os diversos carregadores, evitando a sobrecarga da instalação e garantindo uma utilização eficiente da potência contratada. Esta funcionalidade assume particular relevância em instalações existentes, onde a margem de potência disponível pode ser limitada.

### 3.2.3. Características da Instalação e Solução Adotada

A instalação do projeto compreendia múltiplos pisos de estacionamento subterrâneo, com áreas de estacionamento destinadas a utilizadores residentes e visitantes. A infraestrutura elétrica existente incluía já alguns carregadores de veículos elétricos, instalados numa fase inicial, mas a capacidade instalada revelava-se claramente insuficiente face à procura crescente manifestada pelos utilizadores.

O levantamento técnico inicial, realizado através de visita ao local e consulta dos projetos elétricos existentes, permitiu caracterizar a instalação quanto à potência contratada e margem disponível, identificar os quadros elétricos existentes e respetivas capacidades, avaliar as distâncias e percursos de cabos até aos locais de instalação dos novos carregadores, caracterizar a rede de comunicações de dados existente e o sistema de gestão de carga implementado, e identificar condicionantes arquitetónicas e estruturais relevantes para a instalação. Na Figura 8 apresenta-se um excerto de planta do piso -1, onde se pode observar o percurso previsto para as infraestruturas de alimentação desde o quadro elétrico até aos pontos de carregamento (*PC1 a PC5*).

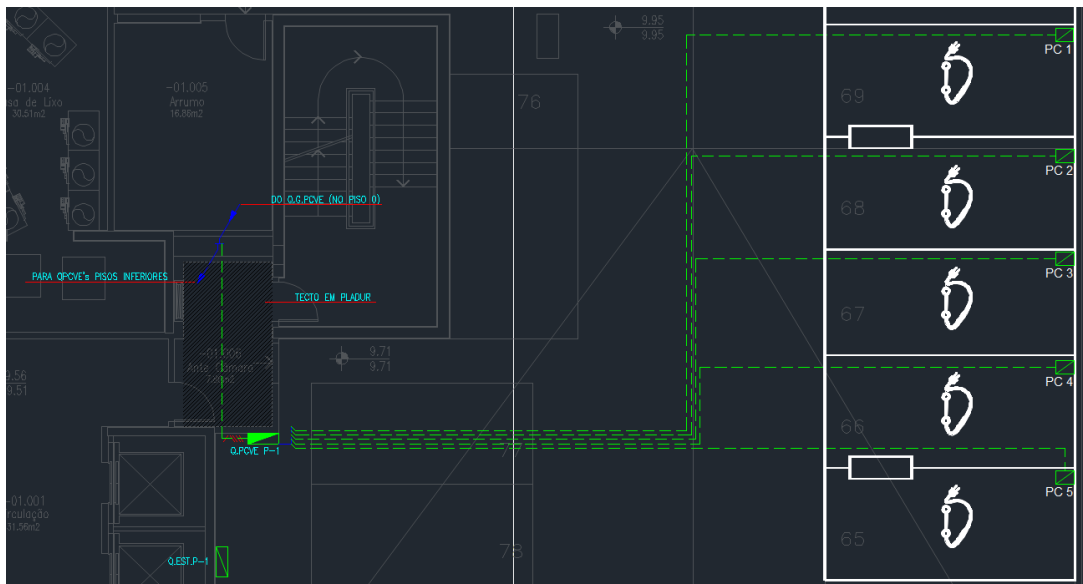


Figura 8 - Excerto de Planta do Piso -1

A análise da margem de potência disponível constituiu um aspeto importante do projeto. A potência contratada da instalação revelou-se adequada para suportar a expansão prevista dos pontos de carregamento, apresentando margem suficiente face aos consumos base existentes

(iluminação, ventilação, elevadores, climatização e carregadores já instalados). A instalação dispunha já de um sistema de gestão dinâmica de carga implementado para os carregadores existentes, sistema esse que seria expandido para integrar os novos pontos de carregamento, mantendo a otimização operacional e a diferenciação de perfis de utilizadores [10].

A solução técnica adotada baseou-se na expansão do sistema integrado de carregamento com gestão dinâmica de carga já existente na instalação. Os novos carregadores foram integrados no sistema de gestão, beneficiando da modulação inteligente da potência fornecida a cada carregador em função da ocupação instantânea e das prioridades definidas. O sistema permite diferenciar perfis de utilizadores, atribuindo maior potência a clientes prioritários ou com necessidades específicas, enquanto outros utilizadores podem operar com potências mais reduzidas conforme os seus requisitos.

Os carregadores selecionados, fornecidos pela *Circutor*, apresentam as seguintes características técnicas principais: potência nominal de 22 kW por ponto de carregamento (configuração trifásica 400V, 32A por saída), conformidade com as normas IEC 61851-1 [9] e IEC 62196-2 [14], grau de proteção IP54 adequado a ambientes de estacionamento, interface de comunicação *Ethernet* para integração com o sistema de gestão de carga existente, proteções integradas contra sobretensões, sobreintensidades e correntes de defeito à terra, e possibilidade de controlo de acesso através de cartão *Radio-Frequency Identification* (RFID) ou aplicação móvel. O modelo de carregador selecionado, é apresentado na Figura 9.



Figura 9 - Carregador VE Circutor

### 3.2.4. Metodologia de Projeto e Dimensionamento

O desenvolvimento do projeto seguiu uma metodologia estruturada, iniciando-se pela definição da arquitetura elétrica da solução. Com base no levantamento da instalação existente, foi necessário avaliar a capacidade remanescente dos quadros elétricos e identificar os pontos de ligação adequados para os novos carregadores. A distribuição dos carregadores pelos diversos pisos de estacionamento foi otimizada considerando a proximidade aos quadros existentes, minimizando os comprimentos de cabos, e a uniformidade da cobertura, garantindo disponibilidade equilibrada de pontos de carregamento em toda a instalação. Esta arquitetura elétrica, bem como a interligação entre os quadros de distribuição e os pontos de carregamento, está representada no diagrama de ligação da Figura 10.

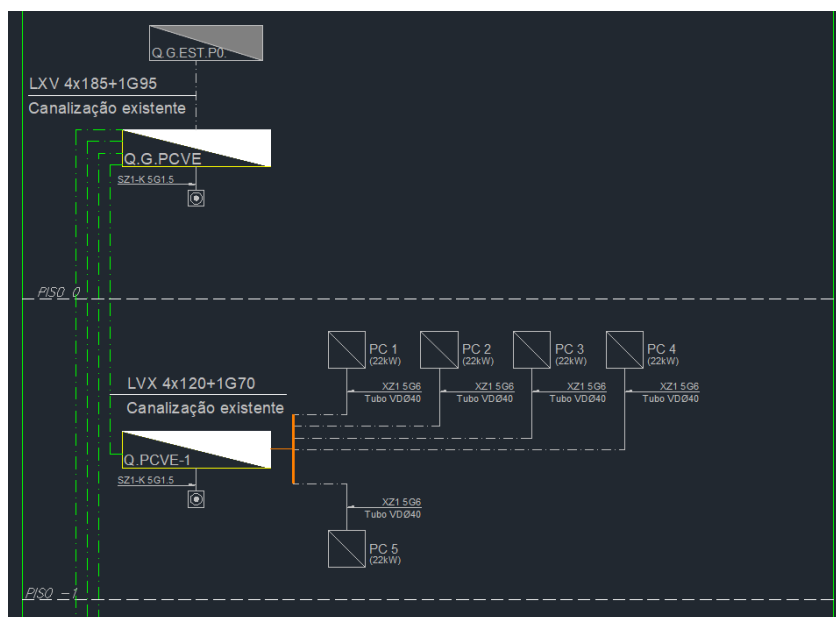


Figura 10 - Excerto de Diagrama de Ligação dos Quadros Elétricos existentes

Para cada novo carregador foi dimensionado um circuito dedicado, protegido por disjuntor diferencial de 32A tipo A, com sensibilidade de 30mA, seguindo a mesma arquitetura dos circuitos existentes. A secção dos cabos foi determinada considerando simultaneamente a capacidade de transporte de corrente e a limitação da queda de tensão [15], resultando na seleção de cabos do tipo XZ1 5G6, mantendo a uniformidade com os circuitos já instalados.

Os quadros elétricos existentes haviam sido previamente dimensionados prevendo a expansão da infraestrutura de carregamento, dispondo de capacidade e espaço físico adequados para acomodar as novas proteções sem necessidade de substituição ou instalação de quadros auxiliares. Os esquemas elétricos unifilares e multifilares foram atualizados em *software CAD*, documentando com rigor a nova arquitetura de distribuição, as características dos dispositivos de proteção instalados, e as secções e comprimentos dos novos cabos. Como exemplo desta atualização, a Figura 11 apresenta o esquema unifilar do quadro elétrico Q.G.PCVE, detalhando as proteções diferenciais de 30mA, Tipo *A Hi* e as respetivas canalizações XZ1 5G6 para os carregadores *PC1* e *PC2* [10].

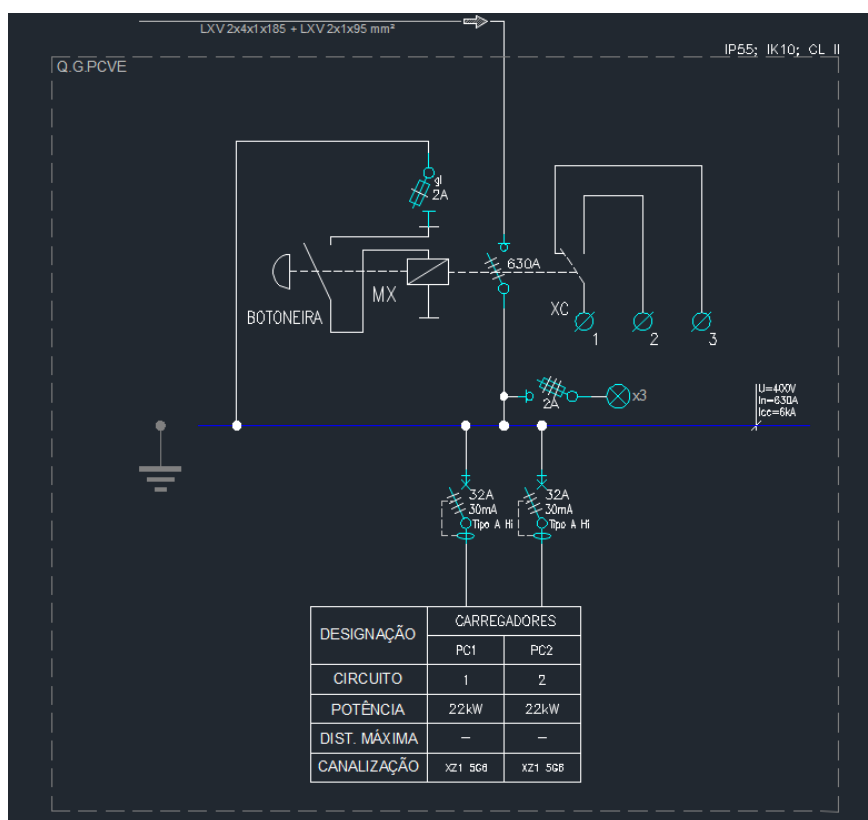


Figura 11 - Esquema Unifilar do Quadro Elétrico existente – Q.G.PCVE

### 3.2.5. Rede de Comunicações e Sistema de Gestão de Carga

A implementação do sistema de gestão dinâmica de carga exigiu o desenvolvimento de uma infraestrutura de comunicações robusta e fiável. Cada carregador de veículos elétricos incorpora uma interface de comunicação *Ethernet* que permite a troca de informações em tempo real com o controlador central do sistema de gestão de carga. Este controlador,

instalado num bastidor técnico centralizado, monitoriza continuamente a potência total consumida pela instalação e a potência disponível em cada instante, a potência consumida por cada carregador individual, o estado de cada sessão de carregamento (ativo, em espera, concluído), e os perfis de prioridade definidos para diferentes utilizadores ou zonas.

A rede de comunicações existente, baseada em *switches Ethernet* industriais, revelou capacidade insuficiente para suportar os novos carregadores. Foi necessário proceder à ampliação da rede através da instalação de *switches* adicionais, garantindo a cobertura de todos os pisos de estacionamento e a interligação ao bastidor central. A topologia de rede adotada seguiu uma arquitetura em estrela, com todos os *switches* de distribuição ligados diretamente ao *switch* central localizado no bastidor, sem interligações entre *switches* de piso, garantindo simplicidade de gestão e diagnóstico de falhas. Este esquema de comunicações, detalhando a ligação dos postos de carregamento *PCI* a *PC10* através dos diversos pisos, está ilustrado no diagrama de distribuição de rede da Figura 12.

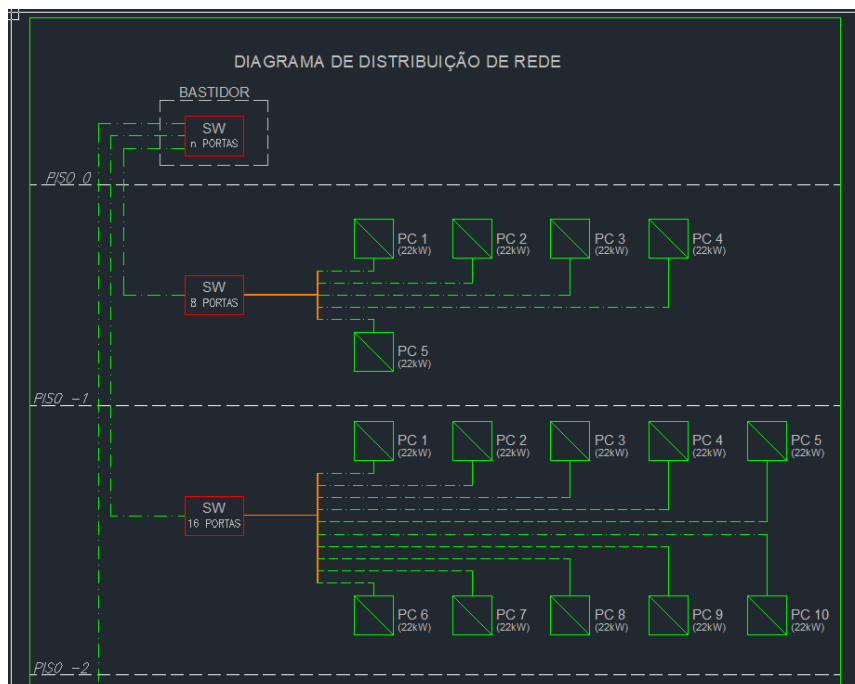


Figura 12 - Excerto do Diagrama de Distribuição da Rede *Ethernet*

A cablagem de dados foi executada de acordo com a norma EN 50173 para instalações de cablagem estruturada [16], utilizando exclusivamente cabos UTP Cat.6, uma vez que todos os percursos apresentavam distâncias inferiores a 90 metros, não havendo necessidade de recorrer a fibra ótica. Os cabos de dados foram instalados em caminhos de cabos paralelos

aos cabos de alimentação dos carregadores, garantindo o cumprimento das boas práticas de separação e mitigação de interferências [7], conforme as normas de compatibilidade eletromagnética aplicáveis.

O sistema de gestão de carga integra um algoritmo de distribuição dinâmica de potência baseado em prioridades e disponibilidade. Quando o consumo total da instalação se aproxima do limite contratado, o sistema reduz automaticamente a potência fornecida aos carregadores de menor prioridade, assegurando que os carregadores prioritários mantenham a potência adequada. Este processo é totalmente transparente para o utilizador e permite otimizar a utilização da capacidade disponível sem comprometer a estabilidade da instalação.

### **3.2.6. Documentação Técnica Produzida**

O projeto resultou na elaboração de um dossier técnico completo, estruturado de forma similar ao projeto de iluminação de emergência. A memória descritiva caracteriza a instalação existente, justifica a necessidade de ampliação da infraestrutura de carregamento, descreve a solução técnica adotada e o sistema de gestão dinâmica de carga, apresenta os cálculos justificativos do dimensionamento dos circuitos, e documenta o enquadramento normativo e regulamentar aplicável [10].

As peças desenhadas, desenvolvidas em *software CAD*, incluem plantas de localização dos carregadores em todos os pisos de estacionamento, com identificação dos circuitos de alimentação e percursos de cabos, esquemas elétricos unifilares dos quadros existentes modificados e dos novos quadros instalados, esquemas multifilares detalhados das ligações entre quadros e carregadores, diagrama de arquitetura da rede de comunicações, com localização dos *switches* e topologia de ligações, e pormenores de instalação e fixação dos equipamentos.

O diagrama de distribuição elétrica, representado na Figura 10, ilustra a arquitetura global do sistema, mostrando as ligações entre os diversos quadros elétricos (Q.PCVE nos diferentes pisos) e os respetivos carregadores (*PC1*, *PC2*, etc.). Este diagrama constitui uma ferramenta essencial para a compreensão da solução implementada e para as futuras operações de manutenção e expansão do sistema.

Os esquemas unifilares dos quadros, exemplificados na Figura 11, documentam em detalhe as proteções instaladas, incluindo os disjuntores diferenciais, e as características dos circuitos de alimentação de cada carregador. A representação normalizada facilita a leitura por parte dos técnicos de instalação e manutenção, garantindo a correta execução e operação do sistema.

As plantas de execução, ilustradas na Figura 8, mostram a implantação dos carregadores no contexto arquitetónico do estacionamento, com indicação dos percursos de cabos elétricos e de comunicações.

O dossier inclui ainda mapas de quantidades detalhados, especificando para cada carregador a referência comercial completa, potência nominal e características técnicas, localização precisa e identificação do circuito de alimentação, comprimento dos cabos e percurso associado, equipamentos de proteção e comunicação necessários, e estimativa de custos de equipamentos e instalação. As especificações técnicas dos equipamentos, incluindo fichas dos carregadores, *switches* de comunicação e materiais de instalação, complementam a documentação, sendo essenciais para a aquisição dos materiais e para o processo de licenciamento junto das entidades competentes [8].

### **3.2.7. Dificuldades Encontradas e Soluções Adotadas**

O projeto apresentou diversos desafios técnicos que exigiram soluções específicas, sobretudo ao nível da integração da nova infraestrutura com os sistemas existentes. Apesar das condicionantes iniciais, verificou-se que a potência disponível era suficiente para suportar os novos carregadores, evitando a necessidade de aumentar a potência contratada. Do mesmo modo, os quadros elétricos existentes já tinham sido preparados com capacidade adicional para expansões futuras, permitindo a ligação dos novos circuitos apenas com a instalação das proteções necessárias, sem necessidade de criar ou substituir quadros.

Os percursos de cabos na garagem subterrânea constituíram outro desafio relevante devido à configuração física do espaço, que incluía atravessamentos de estruturas, zonas estreitas e diversos elementos construtivos. Para ultrapassar estas condicionantes, foram adotadas soluções de encaminhamento adequadas, garantindo a organização dos cabos e a sua proteção mecânica ao longo das trajetórias previstas.

Relativamente à cablagem de dados, não foi necessária a utilização de fibra ótica, uma vez que todos os comprimentos se encontravam abaixo dos 90 metros, permitindo recorrer a cabos de cobre de categoria 6 sem comprometer o desempenho ou a fiabilidade das comunicações.

### **3.2.8. Resultados e Aprendizagens**

O projeto de mobilidade elétrica desenvolvido durante o estágio permitiu aplicar e consolidar conhecimentos de diversas áreas da engenharia eletrotécnica, desde o dimensionamento de instalações elétricas até à integração de sistemas de comunicação e controlo. A experiência revelou-se particularmente enriquecedora pela sua natureza multidisciplinar e pela necessidade de coordenação entre diferentes especialidades técnicas.

Do ponto de vista técnico, o projeto permitiu aprofundar competências em dimensionamento de circuitos de elevada potência, seleção de proteções elétricas, análise de sistemas de gestão de carga e otimização de recursos, projeto de redes de comunicação industrial, e integração de sistemas elétricos e eletrónicos. A necessidade de equilibrar requisitos técnicos, económicos e operacionais promoveu uma abordagem integrada característica dos projetos de engenharia reais.

A componente de gestão dinâmica de carga revelou-se particularmente interessante, ilustrando como soluções de controlo inteligente permitem otimizar recursos limitados e maximizar a capacidade instalada sem investimentos desproporcionados em infraestrutura. Esta experiência reforçou a compreensão da importância crescente dos sistemas de gestão de energia e da digitalização das instalações elétricas, tendências fundamentais na transição energética em curso.

A coordenação com fornecedores de equipamentos, a análise de especificações técnicas e a seleção de soluções adequadas ao contexto específico da instalação desenvolveram competências de avaliação crítica e tomada de decisão fundamentada. A necessidade de justificar tecnicamente as opções adotadas perante os orientadores e o cliente, promoveu capacidades de argumentação e comunicação técnica.

O projeto reforçou ainda a consciência da importância da documentação técnica rigorosa e completa. Os esquemas elétricos, plantas de execução e especificações produzidas constituem não apenas instrumentos para a fase de execução, mas também referências essenciais para as futuras operações de manutenção, expansão e resolução de avarias. A capacidade de produzir documentação clara, precisa e em conformidade com as normas e boas práticas da engenharia constitui uma competência fundamental frequentemente subvalorizada na formação acadêmica.

A mobilidade elétrica representa uma área em rápido crescimento, com implicações profundas na configuração das redes elétricas e nos padrões de consumo energético. A experiência adquirida neste projeto proporciona uma base sólida para futuros desenvolvimentos profissionais nesta área estratégica, onde a engenharia eletrotécnica desempenha um papel central na viabilização da transição para uma mobilidade mais sustentável.

### **3.3. Projeto de Aumento de Potência**

#### **3.3.1. Enquadramento e Objetivos**

O projeto de aumento de potência foi desenvolvido para uma instalação industrial que necessitava de expansão da capacidade elétrica instalada para alimentação de um Variador Eletrônico de Velocidade (VEV) destinado ao acionamento de motores de elevada potência. A solução técnica adotada baseou-se na instalação de um Posto de Transformação (PT) de Média Tensão, projetado inicialmente para comportar dois transformadores, embora apenas fosse instalado um, na fase inicial do projeto.

Por questões de confidencialidade impostas pelo cliente e por políticas internas da empresa, não é possível identificar a instalação específica nem divulgar informações comerciais sensíveis. Contudo, o projeto desenvolvido ilustra de forma representativa a metodologia de trabalho e os requisitos técnicos aplicáveis a instalações de elevada potência, permitindo demonstrar a aplicação prática dos conhecimentos adquiridos durante o mestrado.

O desenvolvimento deste projeto assumiu particular relevância no contexto do estágio, uma vez que permitiu a aplicação integrada de competências em diversas áreas da engenharia

eletrotécnica: dimensionamento de Postos de Transformação, projeto de sistemas de ventilação forçada, traçado de caminhos de cabos de Média e Baixa Tensão, coordenação de proteções e conceção de quadros elétricos. A complexidade técnica associada à interface entre Média Tensão, transformação e variadores eletrónicos de velocidade conferiu ao projeto um carácter desafiante e formativo.

### 3.3.2. Enquadramento Normativo e Técnico

A ventilação de postos de transformação constitui um aspeto crítico do projeto, regulamentado pela norma IEC 60076-2 [6], que estabelece os critérios de dissipação térmica e elevação de temperatura admissível nos transformadores. Para transformadores imersos em óleo mineral, a temperatura máxima do óleo não deve exceder 60 °C em relação à temperatura ambiente, enquanto a temperatura máxima dos enrolamentos não deve ultrapassar 105 °C em funcionamento contínuo.

A alimentação de variadores eletrónicos de velocidade através de transformadores exige considerações especiais quanto à configuração dos enrolamentos. A utilização de dois enrolamentos secundários, um em estrela (Y) e outro em triângulo ( $\Delta$ ), permite a implementação de sistemas de 12 pulsos, que reduzem significativamente o conteúdo harmónico injetado na rede. Esta configuração, designada por um duplo secundário desfasado, proporciona um desfasamento de 30° entre os sistemas trifásicos fornecidos ao VEV, resultando no cancelamento dos harmónicos característicos de ordem 5, 7, 17 e 19.

Os caminhos de cabos de Média Tensão devem respeitar distâncias de segurança e condições de instalação específicas, definidas na norma IEC 60502-2 e IEC 61936-1 [4]. A passagem de cabos através de elementos estruturais (paredes, lajes) exige a execução de carotes dimensionados adequadamente, com sistemas de selagem que garantam a estanquidade, a resistência ao fogo e a proteção mecânica dos cabos.

### 3.3.3. Características da Instalação e Solução Adotada

A instalação industrial em análise caracterizava-se pela necessidade de alimentação de motores de elevada potência através de variadores eletrônicos de velocidade, exigindo uma expansão substancial da capacidade elétrica instalada. O levantamento técnico inicial permitiu caracterizar as condicionantes existentes na instalação, que já era alimentada em Média Tensão. Este diagnóstico incluiu a análise da disponibilidade de fornecimento pela concessionária de energia, as distâncias entre o ponto de entrega existente e a localização proposta para o novo PT, os espaços disponíveis para instalação do equipamento e respectivos sistemas auxiliares, bem como as características dos motores a alimentar e os seus requisitos de potência.

A solução técnica adotada baseou-se na instalação de um PT compacto de interior, com as seguintes características principais: potência nominal de 1600 kVA por transformador, tensão primária de 6 kV, tensões secundárias duplas (690 V em estrela e 690 V em triângulo, desfasadas de 30°), refrigeração natural complementada por ventilação forçada.

O projeto contemplou, desde a sua conceção, a possibilidade de instalação futura de um segundo transformador idêntico, prevendo-se a duplicação da capacidade instalada sem necessidade de intervenções estruturais significativas. Esta abordagem faseada permite à empresa adequar o investimento às necessidades efetivas de expansão, mantendo a flexibilidade operacional. O projeto do PT foi dimensionado para acomodar dois transformadores em salas independentes, cada uma dedicada a um transformador específico, incluindo os respetivos sistemas de proteção e comando, e os quadros de distribuição de Baixa Tensão associados [1].

Para facilitar a instalação e eventuais operações de manutenção ou substituição dos transformadores, foram projetados e dimensionados carris metálicos embutidos no pavimento de cada sala. Estes carris, dimensionados para suportar o peso dos transformadores (4500 kg por unidade) e as cargas dinâmicas durante a movimentação, permitem o posicionamento preciso dos equipamentos. O sistema de movimentação baseia-se na utilização de um olhal fixo no chão, ao qual se liga uma cinta que permite tracionar o equipamento ao longo dos carris. As peças desenhadas especificam o perfil dos carris, o sistema de ancoragem ao betão da laje, as tolerâncias de nivelamento, a localização do olhal

e a localização exata na planta de cada sala, garantindo o alinhamento correto com as entradas de cabos e os sistemas de ventilação.

A solução com salas independentes proporciona vantagens operacionais significativas: isolamento de falhas, permitindo a manutenção de um transformador sem afetar o funcionamento do outro, flexibilidade na gestão térmica e acessibilidade melhorada para intervenções técnicas. Esta disposição física e a segregação das unidades de transformação, garantindo o cumprimento das distâncias de segurança normativas [3], podem ser observadas no detalhe das celas dos transformadores apresentado na Figura 13.

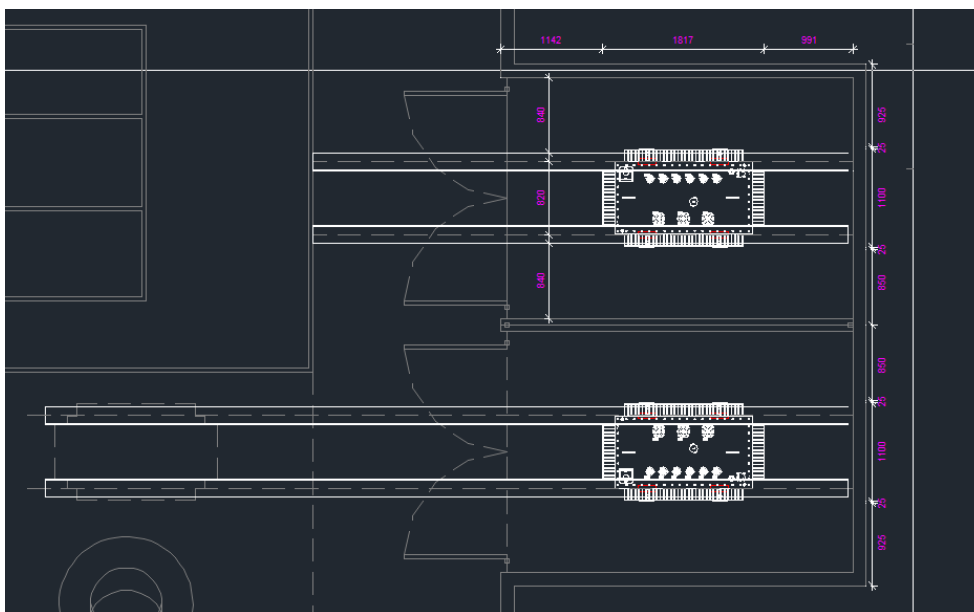


Figura 13 - Celas dos transformadores

### 3.3.4. Metodologia de Projeto e Dimensionamento

- **Cálculo Térmico e Sistema de Ventilação**

O cálculo térmico do PT constituiu uma das componentes mais críticas do projeto. As perdas totais do transformador, resultantes das perdas no ferro (em vazio) e das perdas no cobre (em carga), geram dissipação térmica que deve ser adequadamente removida para garantir a temperatura de funcionamento dentro dos limites normativos. As perdas totais foram calculadas com base nos dados técnicos do fabricante:

Perdas em vazio ( $P_0$ ): 1450W;

Perdas em carga ( $P_k$ ): 14000W à potência nominal;

Perdas totais à carga nominal:  $P_{Total} = P_0 + P_k$  (W). (1)

A ventilação natural, embora tecnicamente adequada para garantir a dissipação térmica dentro dos limites normativos, foi substituída por um sistema de ventilação forçada a pedido expresso do cliente. Esta decisão, motivada pela previsão de operação em regime contínuo próximo da potência nominal e pelo desejo de maximizar a margem de segurança térmica da instalação, exigiu o desenvolvimento de um sistema dimensionado para remover eficazmente o excesso térmico e assegurar temperaturas de funcionamento otimizadas, muito abaixo dos limites máximos especificados.

O dimensionamento do sistema de ventilação seguiu a metodologia estabelecida pela norma IEC 60076-2 [6], calculando o caudal de ar necessário através da expressão:

$$Q = \frac{P_{Total}}{\rho * c * \Delta T} \quad (2)$$

Onde:

Q: caudal de ar necessário ( $m^3/h$ );

$P_{Total}$ : perdas totais do transformador (W);

$\rho$ : massa volúmica do ar ( $\approx 1,21 \text{ kg}/m^3$ );

$c$ : calor específico do ar ( $\approx 1005 \text{ J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ );

$\Delta T$ : elevação de temperatura admissível (tipicamente 10-15 K).

Com base neste cálculo, foi desenvolvida uma solução customizada consistindo numa caixa de ventilação com as seguintes características: ventiladores axiais de baixo caudal em funcionamento contínuo, grelhas de admissão de ar exterior com filtros de partículas, sistema de controlo que mantém a ventilação permanentemente ativa com caudal constante, e construção em chapa de aço galvanizado com tratamento anticorrosivo e pintura adequada ao ambiente industrial. A caixa de ventilação foi especificamente dimensionada para otimizar o fluxo de ar, contribuindo para o aumento do caudal efetivo através da canalização e direcionamento adequado da corrente de ar sobre os transformadores.

As peças desenhadas desenvolvidas incluíram pormenores construtivos da caixa de ventilação, com dimensões, materiais e especificações de montagem, esquemas de implantação e fixação na estrutura do edifício, diagramas de ligação elétrica dos ventiladores e sistema de controlo, e especificações técnicas dos componentes (ventiladores, termostatos, filtros). Os pormenores construtivos da caixa de ventilação e o esquema de montagem do ventilador sobre a estrutura, incluindo as respetivas cotas de instalação e fixação, encontram-se detalhados na Figura 14.

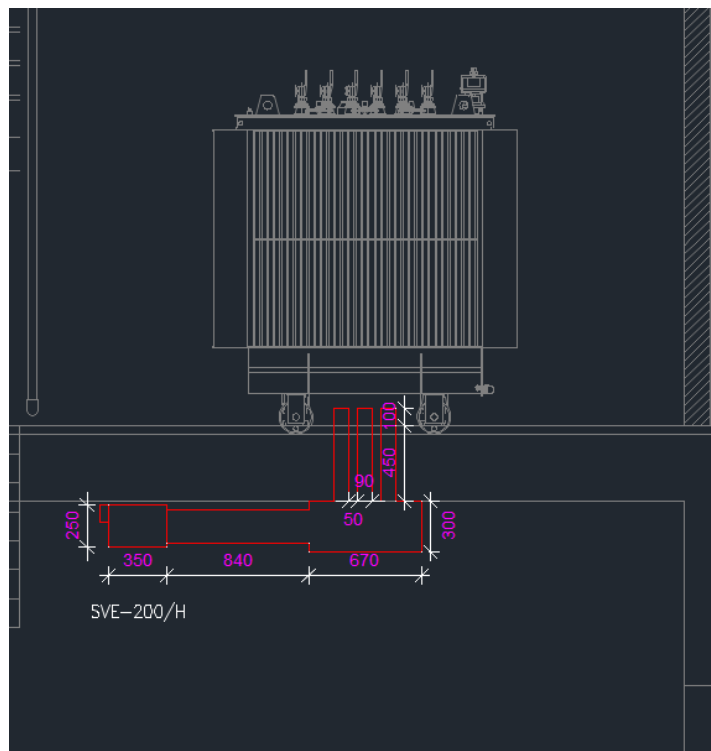


Figura 14 - Peça desenhada do Ventilador e Caixa de ventilação

- **Traçado de Caminhos de Cabos**

O projeto de caminhos de cabos abrangeu tanto os circuitos de Média Tensão (alimentação primária do transformador) como os circuitos de Baixa Tensão (saídas secundárias para o VEV). O traçado foi desenvolvido considerando múltiplas condicionantes: distâncias de segurança entre cabos de Média e Baixa Tensão, acessibilidade para manutenção e eventual substituição de cabos, proteção mecânica adequada ao ambiente industrial, minimização de comprimentos para redução de quedas de tensão e perdas, e conformidade com requisitos de resistência ao fogo e propagação de chamas [3].

Os cabos de média tensão, do tipo 3 x N2XSY (1x120/16 6/10 kV), foram dimensionados considerando a corrente nominal do transformador, as condições de instalação (temperatura ambiente, agrupamento) e a capacidade de transporte de corrente de curto-circuito [17]. O percurso foi traçado em caleiras metálicas dedicadas, segregadas dos circuitos de Baixa Tensão e devidamente identificadas conforme as normas de segurança [3]. Esta infraestrutura de suporte e a organização dos condutores nas calhas técnicas, garantem o correto raio de curvatura e a separação física entre cabos de potência e de sinal, detalhes esses que podem ser observados nos pormenores da Figura 15.

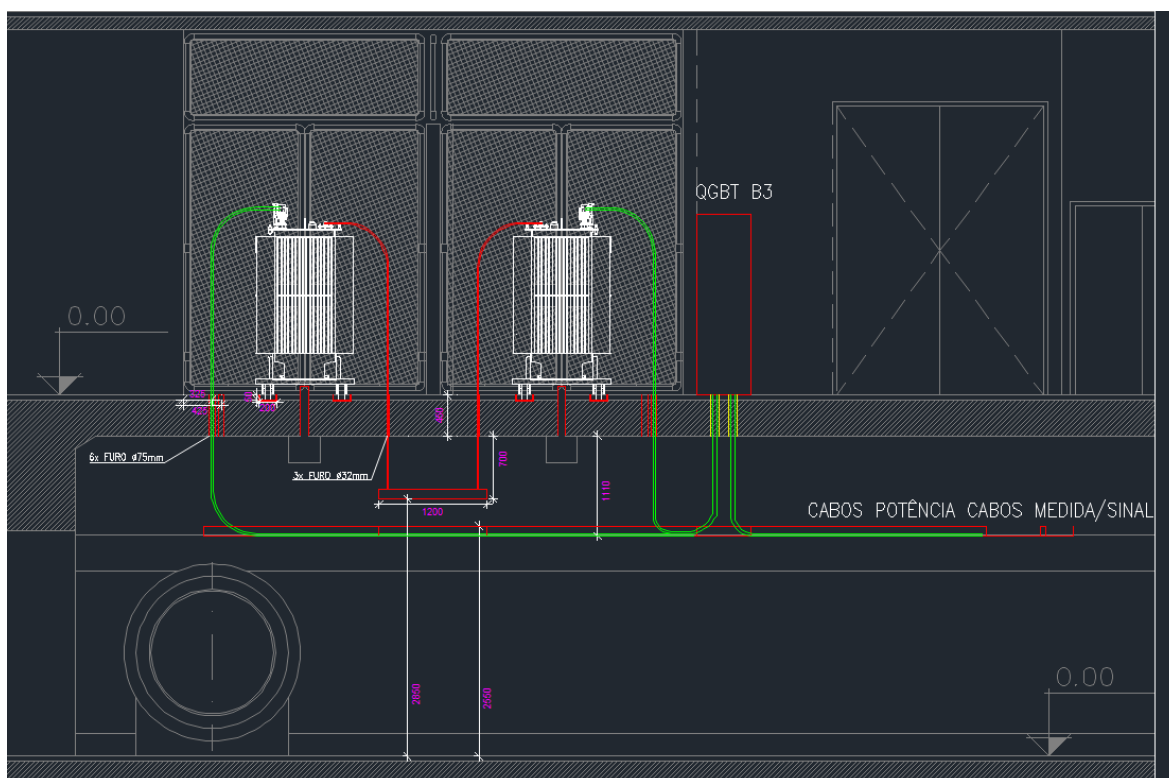


Figura 15 - Caminhos de Cabos no PT

Os cabos de Baixa Tensão, do tipo NYCWY 3x185/95 0,6/1 kV, foram dimensionados considerando a corrente nominal dos enrolamentos secundários do transformador [1], as condições de instalação e a capacidade de transporte de corrente de curto-circuito. O percurso foi traçado desde os secundários do transformador até ao VEV.

### 3.3.5. Quadro de Proteção dos Cabos

A interface entre o transformador e o VEV exigiu o desenvolvimento de um quadro elétrico dedicado à proteção e comando dos circuitos de alimentação. Este quadro, designado por Quadro de Proteção do PT (Q.PT), integra as seguintes funções principais: proteção contra sobreintensidades através de disjuntores de 1000 A selecionados adequadamente para cada enrolamento e proteção contra sobretensões. A rede de média tensão apresenta uma potência de curto-circuito de 220 MVA, o transformador de 1600 kVA possui uma tensão de curto-circuito de  $U_{cc}\% = 5,6\%$ , e a ligação entre os terminais do transformador e os disjuntores é realizada através de 5 m de cabo NYCWY (3×185/95) 0,6/1 kV. O esquema unifilar deste quadro, detalhando os enrolamentos em triângulo e estrela, bem como os dispositivos de proteção e seccionamento associados, encontra-se representado na Figura 16.

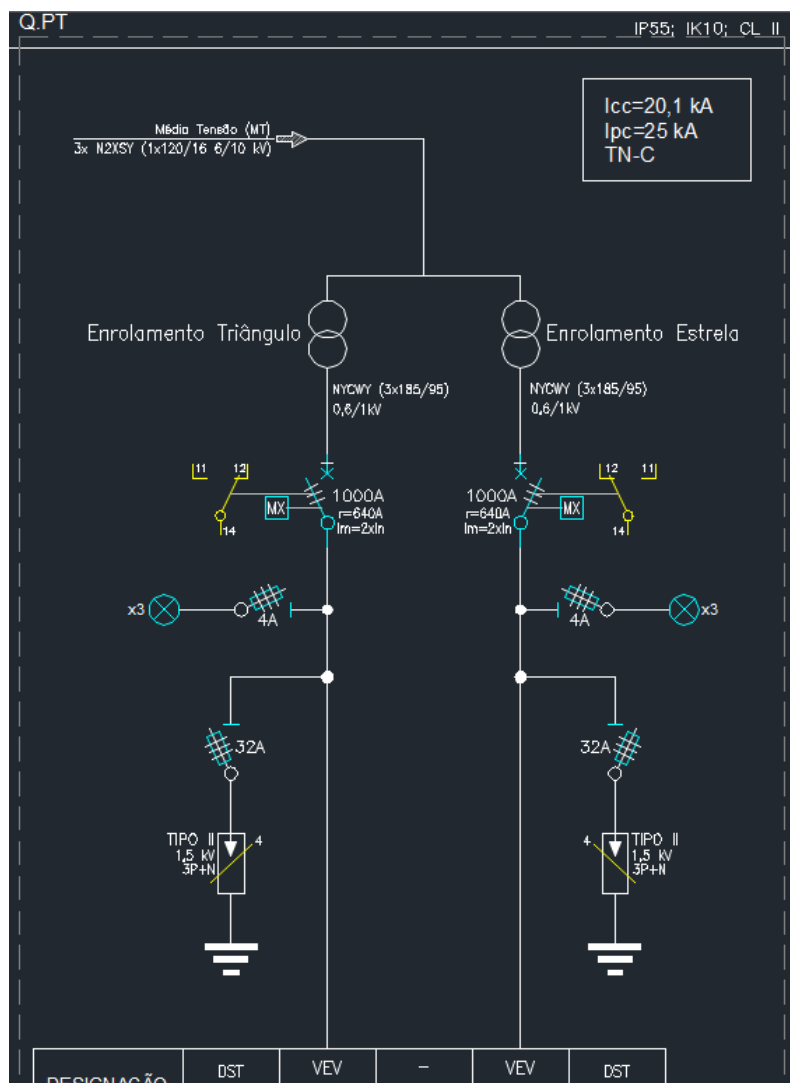


Figura 16 - Esquema do Q.PT

A seleção das proteções considerou as particularidades do variador eletrónico de velocidade. O esquema unifilar do quadro, apresentado na Figura 16, documenta a arquitetura de proteção implementada. O valor da corrente de curto-circuito ( $I_{cc}$ ), calculada para este ponto da instalação foi de 20,1 kA, tendo em conta a impedância da rede e as características dos condutores. Com base neste resultado, foram utilizados dispositivos de proteção com um poder de corte nominal ( $I_{pc}$ ) de 25 kA [1], garantindo assim a segurança da instalação em caso de defeito.

### **3.3.6. Documentação Técnica Produzida**

O projeto resultou na elaboração de um dossier técnico completo, estruturado em conformidade com os requisitos de licenciamento junto da DGEG e das entidades reguladoras [3]. A memória descritiva caracteriza a instalação existente e a necessidade de aumento de potência, justifica a solução técnica adotada (PT com duplo secundário desfasado), apresenta os cálculos térmicos e do sistema de ventilação, documenta o dimensionamento dos cabos de Média e Baixa Tensão, e descreve a arquitetura de proteção e comando implementada.

As peças desenhadas, desenvolvidas em *software CAD*, incluem: planta de implantação do PT com identificação de equipamentos e sistemas auxiliares, cortes e alçados do PT mostrando disposição dos transformadores e sistemas de ventilação, plantas de caminhos de cabos de média e baixa tensão, com identificação de percursos e fixações, pormenores de construção da caixa de ventilação forçada, detalhes dos carotes para passagem de cabos, esquemas elétricos unifilares do PT e do quadro de proteção do VEV, e esquemas multifilares detalhados das ligações entre transformador, quadro e VEV. A integração destas componentes, demonstrando a compatibilização entre as especialidades de engenharia eletrotécnica e construção civil, encontra-se exemplificada na peça desenhada da Figura 17.

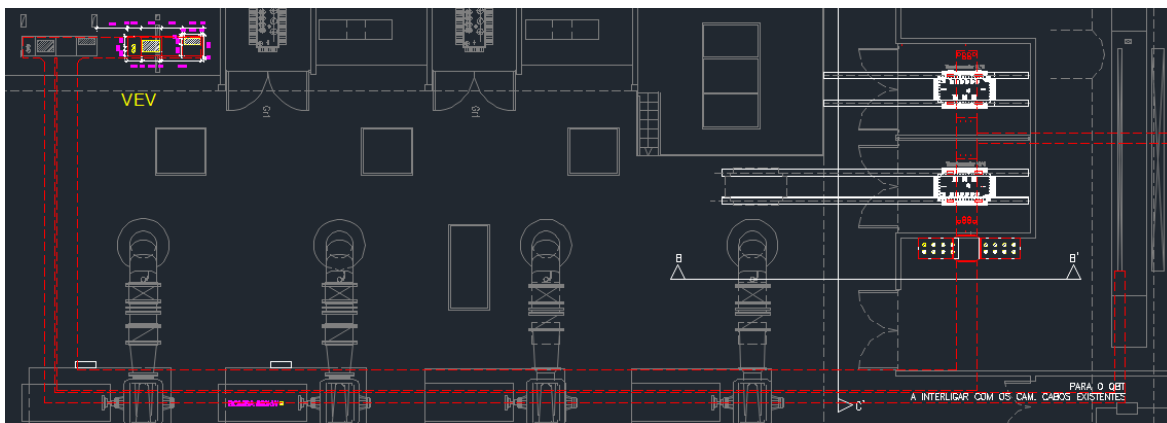


Figura 17 - Peça desenhada completa - PT

O projeto de ventilação forçada, desenvolvido especificamente para esta instalação, incluiu: cálculos térmicos justificativos do caudal de ar necessário, especificações técnicas dos ventiladores e sistemas de controlo, desenhos de fabrico da caixa de ventilação, com dimensões e materiais, e instruções de instalação e comissionamento. Esta componente constituiu um desenvolvimento original, uma vez que as soluções comerciais disponíveis não se adequavam às especificidades da instalação.

O dossier integra ainda: esquema de proteção e coordenação de proteções, com curvas características, estudos de correntes de curto-circuito em Média e Baixa Tensão, especificações técnicas dos equipamentos (transformador, quadros, cabos), certificados e declarações de conformidade dos equipamentos, e procedimentos de ensaio e comissionamento.

### 3.3.7. Dificuldades Encontradas e Soluções Adotadas

O projeto apresentou diversos desafios técnicos que exigiram soluções específicas e coordenação entre múltiplas especialidades. O dimensionamento do sistema de ventilação forçada revelou-se particularmente complexo, uma vez que as soluções comerciais disponíveis não se adequavam perfeitamente às características do transformador e às condicionantes espaciais da instalação. A solução desenvolvida consistiu no projeto customizado da caixa de ventilação, com cálculos térmicos específicos e seleção individual dos componentes (ventiladores, filtros).

A coordenação entre o projeto elétrico e as especialidades de estruturas e arquitetura foi essencial para garantir a viabilidade técnica da solução. A execução dos carotes para passagem de cabos de Média e Baixa Tensão exigiu análise estrutural prévia para confirmar que as aberturas não comprometiam a integridade dos elementos atravessados. A implantação da caixa de ventilação na cobertura do edifício requereu reforços estruturais localizados para suportar o peso dos equipamentos.

A interface entre o transformador de duplo secundário e o VEV exigiu particular atenção ao dimensionamento das proteções contra sobreintensidades. As correntes harmônicas geradas pelo variador e as características específicas da carga exigiram a seleção criteriosa dos disjuntores de proteção, com correntes nominais de 1000 A para cada enrolamento secundário e poder de corte adequado às correntes de curto-circuito calculadas ( $I_{cc}=20,1$  kA e  $I_{pc}=25$  kA). A coordenação entre as proteções de Média Tensão e as proteções de Baixa Tensão foi cuidadosamente estudada para garantir seletividade e continuidade de serviço. Através do ajuste das curvas tempo-corrente, assegurou-se que qualquer defeito é isolado apenas pela proteção mais próxima, evitando cortes no resto da instalação.

### **3.3.8. Resultados e Aprendizagens**

O projeto de aumento de potência constituiu uma experiência formativa abrangente que permitiu consolidar conhecimentos em múltiplas áreas da engenharia eletrotécnica. Do ponto de vista técnico, o projeto proporcionou competências em: cálculos térmicos de postos de transformação e sistemas de ventilação, projeto de instalações de média tensão, dimensionamento dos condutores, projeção de sistemas de proteção para variadores eletrônicos de velocidade, e coordenação multidisciplinar entre especialidades (elétrica, estruturas mecânicas).

O desenvolvimento da solução customizada de ventilação forçada revelou-se particularmente enriquecedor, exigindo a aplicação integrada de conhecimentos de transferência de calor, mecânica dos fluidos e sistemas de controlo. A necessidade de traduzir requisitos térmicos normativos em especificações técnicas de equipamentos concretos desenvolveu capacidades de engenharia de sistemas e integração de soluções.

O projeto reforçou a compreensão da importância da abordagem faseada em investimentos industriais de grande dimensão. A conceção do PT prevendo desde o início a instalação futura de um segundo transformador, sem comprometer a funcionalidade atual nem exigir alterações estruturais futuras, exemplifica boas práticas de projeto que conciliam necessidades imediatas com flexibilidade operacional de longo prazo.

A experiência adquirida neste projeto, complementando os desenvolvimentos dos projetos de iluminação de emergência e mobilidade elétrica, consolidou uma visão integrada da engenharia eletrotécnica, desde instalações de baixa complexidade até infraestruturas de elevada potência com interfaces de média tensão. Esta progressão de complexidade ao longo do estágio permitiu um desenvolvimento técnico gradual e consistente, preparando eficazmente para os desafios da vida profissional.

### **3.4. Conclusão**

O conjunto de projetos desenvolvidos ao longo do estágio na Alferpac proporcionou uma experiência formativa abrangente, cobrindo diferentes áreas da engenharia eletrotécnica com níveis crescentes de complexidade técnica.

Os três projetos apresentados ilustram diferentes vertentes da atividade profissional: o projeto de iluminação de emergência focou-se em segurança e conformidade regulamentar; o projeto de mobilidade elétrica abordou o dimensionamento elétrico integrado com sistemas de comunicação e gestão dinâmica de carga; e o projeto de aumento de potência envolveu instalações de média tensão, cálculos térmicos e desenvolvimento de soluções customizadas. Esta progressão permitiu consolidar conhecimentos em áreas fundamentais como cálculo luminotécnico, dimensionamento de circuitos de baixa e média tensão, análise térmica, projeto de quadros elétricos e integração de sistemas de controlo. O domínio de ferramentas profissionais (*Software CAD, DIALux, Excel*) e a produção de documentação técnica rigorosa foram competências essenciais desenvolvidas.

Para além das competências técnicas, o estágio promoveu o desenvolvimento de capacidades transversais como gestão de tempo, comunicação técnica, trabalho colaborativo e adaptabilidade. A participação no acompanhamento da execução dos projetos permitiu ainda

compreender as condicionantes práticas que influenciam as decisões de projeto e a importância da exequibilidade das soluções propostas.

## 4. Estudo de Caso

### 4.1. Enquadramento do Problema

A disposição geométrica dos condutores em sistemas elétricos trifásicos desempenha um papel determinante no desempenho global das redes de distribuição. Este estudo foi desenvolvido para a empresa Alferpac, com o objetivo principal de identificar a configuração ótima de condutores que minimize as correntes de circulação, através de uma análise comparativa das indutâncias mútuas entre condutores em paralelo.

As correntes de circulação que surgem devido a desequilíbrios nas indutâncias mútuas entre condutores em paralelo constituem uma fonte relevante de perdas adicionais, que afetam tanto a eficiência energética como a fiabilidade operacional. Esses efeitos indesejados traduzem-se em maior dissipação térmica, redução da vida útil dos materiais isolantes, necessidade de sobredimensionamento de equipamentos auxiliares e, conseqüentemente, em custos operacionais mais elevados.

### 4.2. Fundamentação Teórica

#### 4.2.1. O Fenómeno das Indutâncias Mútuas

Quando condutores elétricos percorridos por uma corrente elétrica são dispostos em paralelo, cada condutor gera um campo magnético variável no tempo que interage com os condutores adjacentes. Este fenómeno, designado por indutância mútua, resulta da Lei de *Faraday-Lenz*: a variação do fluxo magnético associado a um condutor gera uma força eletromotriz (f.e.m.) proporcional à taxa de variação desse fluxo no tempo.

A indutância mútua entre dois condutores quaisquer é determinada por três fatores principais:

1. **Distância entre condutores:** A intensidade do acoplamento magnético decresce com o afastamento entre condutores, seguindo aproximadamente uma relação logarítmica.
2. **Configuração geométrica:** A disposição relativa (horizontal, vertical, triangular) determina a simetria das indutâncias mútuas entre as diferentes fases.
3. **Ângulo de fase das correntes:** Condutores da mesma fase apresentam correntes em fase, enquanto condutores de fases diferentes têm correntes desfasadas de 120°, resultando em acoplamentos construtivos (somam-se) ou destrutivos (opõem-se).

A impedância mútua ( $Z_{jk}$ ) é calculada através da expressão:

$$\bar{Z}_{jk} = j\omega \left( \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \ln \frac{1}{D_{jk}} \right) \right)$$

Figura 18 - Fórmula da Impedância mútua

Onde:

$Z_{jk}$ : impedância mútua entre os condutores j e k ( $\Omega/m$ );

j: unidade imaginária;

$\omega$ : frequência angular (rad/s), com  $\omega = 2\pi f$ , sendo  $f = 50$  Hz;

$\mu_0$ : permeabilidade magnética do vácuo ( $4\pi \times 10^{-7}$  H/m);

$D_{jk}$ : distância entre os condutores j e k (m).

#### 4.2.2. Correntes de Circulação e Impacto nas Perdas

Num sistema ideal com condutores perfeitamente simétricos, as indutâncias mútuas entre todos os condutores de uma mesma fase seriam idênticas, resultando numa distribuição uniforme da corrente. Contudo, em configurações reais, assimetrias geométricas inevitáveis geram diferenças nas indutâncias mútuas, que se manifestam como:

- Impedâncias desiguais nos diversos caminhos paralelos disponíveis para a corrente;

- Redistribuição não uniforme da corrente total da fase pelos condutores paralelos;
- Correntes de circulação entre condutores da mesma fase, que não contribuem para o transporte útil de potência.

As perdas por efeito de *Joule* num condutor são proporcionais ao quadrado da corrente que o percorre  $P = R \cdot I^2$ . Assim, uma distribuição desigual de correntes amplifica desproporcionalmente as perdas totais. Considere-se um exemplo ilustrativo das perdas numa fase com três condutores:

Caso Ideal: Três condutores a transportar 303A cada

- Perdas totais:  $3 \times R \times (303)^2 = 275427R$

Caso Desequilibrado: Correntes de 250A, 303A e 356A

- Perdas totais:  $R \times [(250)^2 + (303)^2 + (356)^2] = 281045R$
- Aumento de perdas: 2,04%

Este exemplo simplificado demonstra como pequenos desequilíbrios geram perdas adicionais significativas, justificando a necessidade da otimização geométrica.

### 4.2.3. Estratégias de Mitigação

Perante este contexto, a investigação e a otimização de diferentes arranjos geométricos de condutores tornam-se essenciais para a mitigação das correntes de circulação e para a melhoria da qualidade da energia fornecida. As principais estratégias de mitigação incluem:

1. Simetria geométrica: Disposições que promovam distâncias equivalentes entre condutores de diferentes fases;
2. Permutação de fases: Alternância da sequência de fases ao longo do percurso para compensar assimetrias;
3. Transposição física: Rotação cíclica das posições dos condutores;
4. Espaçamento otimizado: Ajuste das distâncias para equilibrar indutâncias mútuas.

Ao reduzir as perdas através destas técnicas, obtém-se não apenas uma maior eficiência no transporte da energia elétrica, mas também uma operação mais estável, com menores níveis de distorção harmónica e menores exigências em termos de refrigeração e proteção.

#### 4.2.4. Fator de Perdas como Índice de Avaliação

Para avaliar quantitativamente o desempenho de diferentes configurações de cabos em paralelo, utiliza-se o Fator de Perdas ( $\delta_t$ ) [18], que quantifica as perdas totais do sistema. Este índice é definido pela expressão:

$$\delta_t = \frac{\sum_p \left( \sum_{h=1}^n I_{ph}^2 \right)}{\sum_p n \left( \frac{I_p}{n} \right)^2}$$

Figura 19 - Fórmula do Fator de Perdas  $\delta_t$

Onde:

$I_{ph}$  representa a corrente no cabo  $h$  da fase  $p$  (A);

$I_p$  é a corrente total da fase  $p$  (A);

$n$  é o número de cabos em paralelo por fase;

O numerador calcula as perdas reais baseadas na distribuição efetiva de correntes, enquanto o denominador representa as perdas numa situação ideal de distribuição uniforme. Assim,  $\delta_t$  funciona como fator de normalização:

- $\delta_t = 1,0$ : Distribuição perfeitamente equilibrada (caso ideal);
- $\delta_t > 1,0$ : Presença de desequilíbrio e perdas adicionais;
- Exemplo:  $\delta_t = 1,1$  significa perdas 10% superiores ao caso ideal.

Este indicador permite comparar objetivamente diferentes configurações geométricas e identificar soluções que minimizem as perdas energéticas e evitem sobreaquecimento localizado.

### **4.3. Metodologia de Análise**

#### **4.3.1. Especificações do Sistema**

As análises apresentadas baseiam-se nas seguintes especificações técnicas do sistema, tomando como caso de estudo a ligação elétrica entre um quadro elétrico e um motor de grande potência, com um comprimento de 100 m de cabo:

Características Elétricas:

- Potência nominal: 630kVA
- Tensão nominal: 400V
- Corrente por fase: 909A
- Número de condutores por fase: 3
- Frequência: 50Hz

Especificações dos Condutores:

- Tipo de cabo: LXV 240mm<sup>2</sup> monocondutor/alumínio
- Diâmetro exterior: 25,5mm
- Resistividade elétrica a 20°C:  $2,82 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$
- Comprimento dos condutores: 100m

### 4.3.2. Modelo de Cálculo Desenvolvido

Para facilitar os cálculos das indutâncias mútuas, foi criado um ficheiro *Excel* baseado no artigo científico "*A Cable Configuration Technique for the Balance of Current Distribution in Parallel Cables*", de autoria de San-Yi Lee (publicado no *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 18, No. 2, pp. 290-297, 2010) [18]. O modelo adotado simplifica as equações de impedância mútua, considerando distâncias entre cabos e ângulos de fase, mas não incorpora o efeito pelicular, a variação da resistência com a temperatura e o efeito de proximidade, o que se justifica pela natureza demonstrativa do estudo. Este trabalho foi concebido para permitir à empresa ilustrar, de forma clara e acessível, as vantagens das diversas disposições de cabos aos seus trabalhadores, sem a necessidade de um rigor extremo nos resultados, priorizando a compreensão prática e a aplicação em contextos reais de instalações elétricas. Adicionalmente, o estudo destaca a importância de configurações simétricas, como as recomendadas no artigo [18] (ex.: ABC/CBA/ABC para sistemas trifásicos), que promovem uma distribuição mais equilibrada de correntes e reduzem o sobreaquecimento em cabos em paralelo [15].

### 4.3.3. Configurações em Análise (Cenários 1-4)

Neste trabalho são analisados oito arranjos distintos, distribuídos em quatro cenários principais:

- **Cenário 1 - Arranjo retangular:** condutores dispostos em pares sobrepostos em formação retangular, separados por um espaçamento fixo de 25,5 mm, sendo estudadas disposições espelhadas e sequenciais (ver Figura 20).

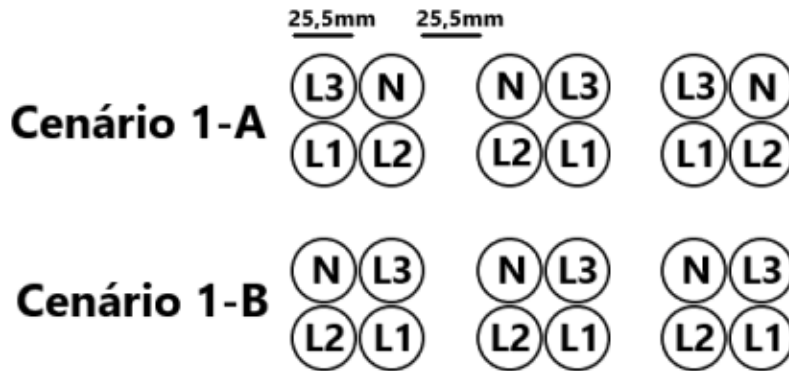


Figura 20 - Cenário 1

- **Cenário 2 - Disposição estratificada:** condutores organizados em camadas horizontais sobrepostas, considerando-se tanto o arranjo sequencial como aquele obtido pela permutação das fases (ver Figura 21).

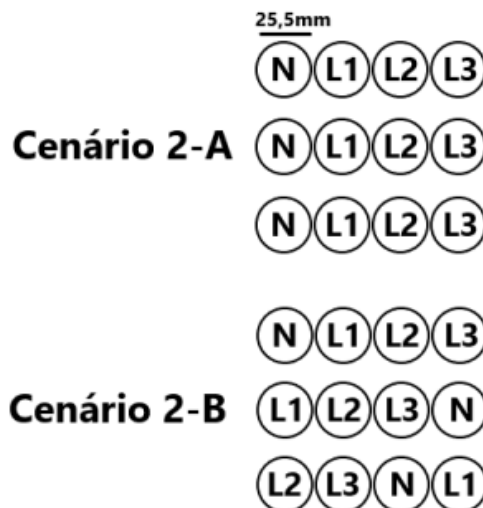


Figura 21 - Cenário 2

- **Cenário 3 - Configuração horizontal:** condutores alinhados em sequência contínua, com duas alternativas de análise: a sequência direta convencional e uma variação espelhada das posições das fases (ver Figura 22).

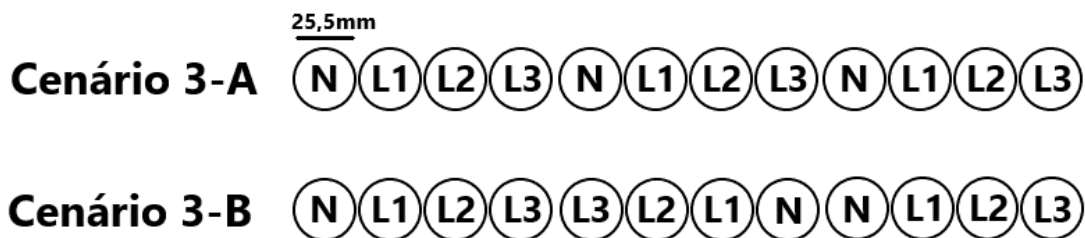


Figura 22 - Cenário 3

- **Cenário 4 - Arranjo em triângulo ou trevo:** formação compacta de condutores em geometria de trevo, em que serão estudadas disposições sequenciais e rotação anti-horária das fases (ver Figura 23).

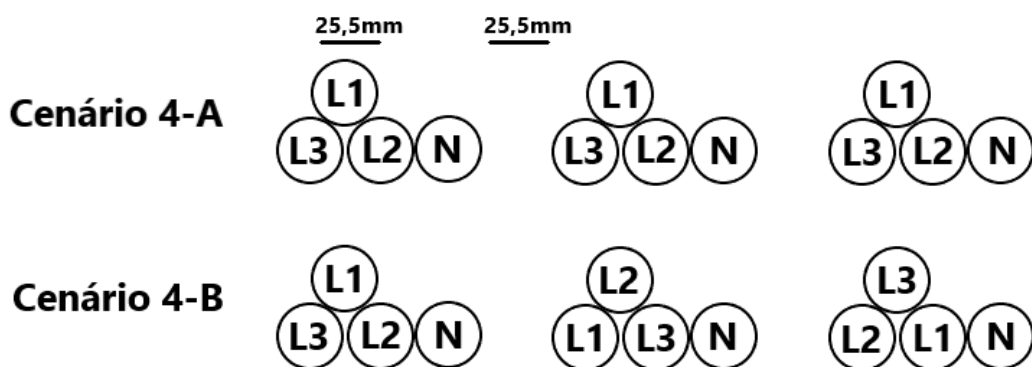


Figura 23 - Cenário 4

Assim, a análise comparativa dos cenários propostos busca evidenciar as configurações que asseguram melhor equilíbrio eletromagnético, favorecendo a mitigação das correntes de circulação e a diminuição das perdas, com vista a sistemas de distribuição mais estáveis e energeticamente eficientes.

#### 4.4. Apresentação e Análise de Resultados

Os resultados apresentados nas secções seguintes foram obtidos com base na folha de cálculo desenvolvida em *Microsoft Excel*, descrita em detalhe no Anexo A. Esta ferramenta constitui o modelo computacional de suporte ao estudo, sendo responsável pelo processamento

automático de todos os cálculos, nomeadamente a determinação das indutâncias próprias e mútuas, matrizes de impedâncias e distribuição de correntes nos condutores.

#### 4.4.1. Cenário 1 – Arranjo Retangular

##### Cenário 1-A:

Posições dos Condutores:

Tabela 1 - Posições dos Condutores Cenário 1-A

Condutor	x(m)	y(m)	Fase
1	0,0000	0,0000	L1
2	0,0255	0,0000	L2
3	0,0000	0,0255	L3
4	0,0255	0,0255	N
5	0,1020	0,0000	L1
6	0,0765	0,0000	L2
7	0,1020	0,0255	L3
8	0,0765	0,0255	N
9	0,1530	0,0000	L1
10	0,1785	0,0000	L2
11	0,1530	0,0255	L3
12	0,1785	0,0255	N

Valores Finais das Correntes:

Tabela 2 - Valores Finais das Correntes Cenário 1-A

Condutor	Corrente no condutor(A)	Ângulo de fase(°)	Fase
1	311,4978	1,5578	L1
2	297,8800	-120,1130	L2
3	309,9282	120,3891	L3
4	3,7520	55,4163	N
5	299,2072	-0,5551	L1
6	301,3701	-121,0624	L2
7	298,2371	119,4454	L3
8	3,2105	24,7108	N
9	298,4761	-1,0691	L1
10	309,8639	-118,8581	L2
11	300,8568	120,1490	L3
12	6,7156	-138,7130	N

Fator de Perdas  $\delta_t=1,00055$ .

**Cenário 1-B:**

Posições dos Condutores:

**Tabela 3 - Posições dos Condutores Cenário 1-B**

Condutor	x(m)	y(m)	Fase
1	0,0255	0,0000	L1
2	0,0000	0,0000	L2
3	0,0255	0,0255	L3
4	0,0000	0,0255	N
5	0,1020	0,0000	L1
6	0,0765	0,0000	L2
7	0,1020	0,0255	L3
8	0,0765	0,0255	N
9	0,1785	0,0000	L1
10	0,1530	0,0000	L2
11	0,1785	0,0255	L3
12	0,1530	0,0255	N

Valores Finais das Correntes:

**Tabela 4 - Valores Finais das Correntes Cenário 1-B**

Condutor	Corrente no condutor(A)	Ângulo de fase(°)	Fase
1	310,2710	2,8386	L1
2	277,8396	-120,4727	L2
3	311,2391	117,8420	L3
4	18,8607	101,3870	N
5	296,4904	1,5634	L1
6	309,4364	-119,5662	L2
7	307,2638	119,4424	L3
8	9,8218	-41,6428	N
9	303,6369	-4,4302	L1
10	321,7423	-120,0089	L2
11	291,1044	122,8965	L3
12	12,4976	-106,8188	N

Fator de Perdas  $\delta_t=1,00312$ .

**Análise comparativa do Cenário 1:**

A comparação entre as configurações revela diferenças significativas no desempenho. O Cenário 1-A (disposição espelhada) apresentou  $\delta_t=1,00055$ , com distribuição equilibrada das correntes entre cabos da mesma fase e correntes no neutro reduzidas. O Cenário 1-B

(disposição sequencial) registou  $\delta_t=1,00312$ , evidenciando um maior desequilíbrio, particularmente na fase L2 (277,8396A a 321,7423A), e correntes no neutro mais elevadas (até 18,8607A).

A superioridade do Cenário 1-A resulta da simetria espelhada, que equilibra as indutâncias mútuas entre condutores. A alternância das posições das fases entre grupos consecutivos minimiza o acoplamento magnético desigual característico de disposições sequenciais repetidas. Para o arranjo retangular com espaçamento de 25,5mm, a configuração espelhada constitui a solução preferencial, apresentando perdas apenas 0,055% superiores ao caso ideal, face aos 0,312% do Cenário 1-B.

#### 4.4.2. Cenário 2 – Disposição Estratificada

##### Cenário 2-A:

Posições dos Condutores:

Tabela 5 - Posições dos Condutores Cenário 2-A

Condutor	x(m)	y(m)	Fase
1	0,0255	0,0000	L1
2	0,0510	0,0000	L2
3	0,0765	0,0000	L3
4	0,0000	0,0000	N
5	0,0255	0,0255	L1
6	0,0510	0,0255	L2
7	0,0765	0,0255	L3
8	0,0000	0,0255	N
9	0,0255	0,0510	L1
10	0,0510	0,0510	L2
11	0,0765	0,0510	L3
12	0,0000	0,0510	N

Valores finais das Correntes:

Tabela 6 - Valores Finais das Correntes Cenário 2-A

Condutor	Corrente no condutor(A)	Ângulo de fase(°)	Fase
1	318,2094	1,5542	L1
2	308,6328	-118,2299	L2
3	304,1950	123,6794	L3
4	12,4277	37,1297	N
5	273,3608	-3,6203	L1
6	292,6506	-123,7355	L2
7	304,3783	112,6305	L3
8	24,8553	-142,8703	N
9	318,2094	1,5542	L1
10	308,6328	-118,2299	L2
11	304,1950	123,6794	L3
12	12,4277	37,1297	N

Fator de Perdas  $\delta_t=1,00584$ .

### Cenário 2-B:

Posições dos Condutores:

Tabela 7 - Posições dos Condutores Cenário 2-B

Condutor	x(m)	y(m)	Fase
1	0,0765	0,0000	L1
2	0,0000	0,0000	L2
3	0,0255	0,0000	L3
4	0,0510	0,0000	N
5	0,0000	0,0255	L1
6	0,0255	0,0255	L2
7	0,0510	0,0255	L3
8	0,0765	0,0255	N
9	0,0255	0,0510	L1
10	0,0510	0,0510	L2
11	0,0765	0,0510	L3
12	0,0000	0,0510	N

Valores das Correntes:

Tabela 8 - Valores Finais das Correntes Cenário 2-B

Condutor	Corrente no condutor(A)	Ângulo de fase(°)	Fase
1	344,5874	-19,5009	L1
2	290,0426	-127,3258	L2
3	341,2414	118,1966	L3
4	46,7785	8,0739	N
5	298,1563	12,9431	L1
6	319,1588	-118,5308	L2
7	303,3776	123,7584	L3
8	47,0549	-18,9182	N
9	297,5366	9,3324	L1
10	303,6401	-114,5572	L2
11	265,3601	118,0246	L3
12	91,2423	174,5374	N

Fator de Perdas  $\delta_t = 1,03264$ .

### Análise comparativa Cenário 2:

A comparação entre as configurações estratificadas revela diferenças substanciais no desempenho. O Cenário 2-A (disposição sequencial N-L1-L2-L3 repetida em três camadas) apresentou  $\delta_t=1,00584$ , com desequilíbrios notáveis entre camadas: a camada intermédia registou correntes significativamente inferiores às camadas superior e inferior, e correntes no neutro que atingiram 24,8553A na camada intermédia.

O Cenário 2-B (disposição com permutação de fases entre camadas) registou  $\delta_t=1,03264$ , com perdas adicionais cerca de 2,68 pontos percentuais superiores às do Cenário 2-A. Observou-se forte desequilíbrio entre condutores da mesma fase, com variações entre 265,3601A e 344,5874A, e correntes no neutro excecionalmente elevadas, atingindo 91,2423A na camada superior.

A configuração sequencial repetida (2-A) mantém simetria vertical e distribuição previsível das indutâncias mútuas. A permutação de fases (2-B), contrariamente ao esperado, amplifica os desequilíbrios ao quebrar a simetria vertical característica de arranjos estratificados. Para a disposição estratificada, a configuração sequencial repetida constitui a solução preferencial, apresentando perdas 0,58% superiores ao caso ideal, face aos 3,26% do Cenário 2-B.

#### 4.4.3. Cenário 3 – Configuração Horizontal

##### Cenário 3-A:

Posições dos Condutores:

Tabela 9 - Posições dos Condutores Cenário 3-A

Condutor	x(m)	y(m)	Fase
1	0,0255	0,0000	L1
2	0,0510	0,0000	L2
3	0,0765	0,0000	L3
4	0,0000	0,0000	N
5	0,1020	0,0000	L1
6	0,1275	0,0000	L2
7	0,1530	0,0000	L3
8	0,1785	0,0000	N
9	0,2040	0,0000	L1
10	0,2295	0,0000	L2
11	0,2550	0,0000	L3
12	0,2805	0,0000	N

Valores finais das Correntes:

Tabela 10 - Valores Finais das Correntes Cenário 3-A

Condutor	Corrente no condutor(A)	Ângulo de fase(°)	Fase
1	272,1747	3,4182	L1
2	297,2138	-124,7399	L2
3	319,9176	126,7784	L3
4	82,4149	173,1595	N
5	343,8775	0,3418	L1
6	302,3258	-117,3156	L2
7	307,9948	117,4422	L3
8	11,6798	-80,0956	N
9	294,0070	-3,5646	L1
10	310,9825	-118,0835	L2
11	284,6455	115,1603	L3
12	79,8372	1,2127	N

Fator de Perdas  $\delta_t=1,00868$ .

**Cenário 3-B:**

Posições dos Condutores:

Tabela 11 - Posições dos Condutores Cenário 3-B

Condutor	x(m)	y(m)	Fase
1	0,0255	0,0000	L1
2	0,0510	0,0000	L2
3	0,0765	0,0000	L3
4	0,0000	0,0000	N
5	0,1530	0,0000	L1
6	0,1275	0,0000	L2
7	0,1020	0,0000	L3
8	0,1785	0,0000	N
9	0,2295	0,0000	L1
10	0,2550	0,0000	L2
11	0,2805	0,0000	L3
12	0,2040	0,0000	N

Valores finais das Correntes:

Tabela 12 - Valores Finais das Correntes Cenário 3-B

Condutor	Corrente no condutor(A)	Ângulo de fase(°)	Fase
1	305,5063	-0,7424	L1
2	306,9959	-119,2634	L2
3	293,1095	117,8551	L3
4	12,0479	11,8300	N
5	300,5042	0,0038	L1
6	305,1560	-119,5670	L2
7	293,6636	117,7750	L3
8	6,6581	-165,8460	N
9	303,0408	0,7447	L1
10	296,9480	-121,2066	L2
11	323,4283	123,9663	L3
12	5,4020	-171,0349	N

Fator de Perdas  $\delta_t=1,00181$ .

**Análise comparativa Cenário 3:**

A comparação entre as configurações horizontais revela diferenças substanciais no desempenho. O Cenário 3-A (disposição sequencial N-L1-L2-L3 repetida) apresentou

$\delta_t=1,00868$ , com desequilíbrios pronunciados entre grupos: o grupo central registou correntes superiores (343,8775A na fase L1) face às extremidades (272,1747A), e correntes no neutro que atingiram 82,4149A no primeiro grupo.

O Cenário 3-B (disposição espelhada) registou  $\delta_t=1,00181$ , aproximadamente 4,8 vezes inferior ao Cenário 3-A. Observou-se distribuição significativamente mais equilibrada, com variações reduzidas entre grupos (300,5042A a 305,5063A na fase L1) e correntes no neutro consistentemente baixas, não ultrapassando 12,0479A, indicativo de um acoplamento magnético substancialmente mais simétrico.

O Cenário 3-B promove o cancelamento das induções mútuas assimétricas através do espelhamento da sequência central (L3-L2-L1), minimizando o acoplamento entre grupos adjacentes. Para a disposição horizontal, a configuração com espelhamento constitui a solução preferencial, apresentando perdas apenas 0,18% superiores ao caso ideal, face aos 0,87% do Cenário 3-A.

#### 4.4.4. Cenário 4 – Arranjo Triangular

##### Cenário 4-A:

Posições dos Condutores:

Tabela 13 - Posições dos Condutores Cenário 4-A

Condutor	x(m)	y(m)	Fase
1	0,0128	0,0255	L1
2	0,0255	0,0000	L2
3	0,0000	0,0000	L3
4	0,0765	0,0000	N
5	0,1148	0,0255	L1
6	0,1275	0,0000	L2
7	0,1020	0,0000	L3
8	0,1530	0,0000	N
9	0,2168	0,0255	L1
10	0,2295	0,0000	L2
11	0,2040	0,0000	L3
12	0,2550	0,0000	N

Valores finais das Correntes:

Tabela 14 - Valores Finais das Correntes Cenário 4-A

Condutor	Corrente no condutor(A)	Ângulo de fase(°)	Fase
1	312,6826	2,0820	L1
2	336,1950	-131,6322	L2
3	251,2806	118,5623	L3
4	47,3339	148,4752	N
5	287,5118	2,0951	L1
6	302,6110	-113,1685	L2
7	333,6468	117,9415	L3
8	64,1003	15,7190	N
9	309,9768	-4,0460	L1
10	281,0510	-113,5052	L2
11	324,8823	123,2272	L3
12	47,2201	-116,8878	N

Fator de Perdas  $\delta_t=1,01675$ .

#### Cenário 4-B:

Posições dos Condutores:

Tabela 15 - Posições dos Condutores Cenário 4-B

Condutor	x(m)	y(m)	Fase
1	0,0128	0,0255	L1
2	0,0255	0,0000	L2
3	0,0000	0,0000	L3
4	0,0765	0,0000	N
5	0,1020	0,0000	L1
6	0,1148	0,0255	L2
7	0,1275	0,0000	L3
8	0,1530	0,0000	N
9	0,2295	0,0000	L1
10	0,2040	0,0000	L2
11	0,2168	0,0255	L3
12	0,2550	0,0000	N

Valores finais das Correntes:

Tabela 16 - Valores Finais das Correntes Cenário 4-B

Condutor	Corrente no condutor(A)	Ângulo de fase(°)	Fase
1	295,8540	-3,2128	L1
2	301,3207	-119,1459	L2
3	311,6347	119,3168	L3
4	49,2492	176,0275	N
5	317,4326	1,7067	L1
6	293,4131	-122,2003	L2
7	296,7348	123,1599	L3
8	82,2810	24,6966	N
9	296,4048	1,3777	L1
10	314,5889	-118,7663	L2
11	301,3691	117,5960	L3
12	45,6583	-124,1400	N

Fator de Perdas  $\delta_t=1,00207$ .

#### **Análise comparativa Cenário 4:**

A comparação entre as configurações triangulares revela diferenças substanciais no desempenho. O Cenário 4-A (disposição repetida) apresentou  $\delta_t=1,01675$ , com desequilíbrios acentuados entre grupos: observaram-se variações pronunciadas entre condutores da mesma fase, com correntes entre 251,2806A e 336,1950A, e correntes no neutro entre 47,2201A e 64,1003A.

O Cenário 4-B (disposição com rotação de fases) registou  $\delta_t=1,00207$ , aproximadamente 1,47 pontos percentuais inferior ao Cenário 4-A. Observou-se uma distribuição mais equilibrada entre condutores da mesma fase (295,8540A a 317,4326A na fase L1), embora com correntes no neutro que atingiram 82,2810A no grupo central.

A rotação de fases do Cenário 4-B promove um melhor equilíbrio global através da compensação das induções mútuas entre grupos triangulares adjacentes. A disposição repetida do Cenário 4-A amplifica os desequilíbrios por acumulação sistemática de acoplamentos não compensados. Para a disposição triangular, a configuração com rotação de fases constitui a solução preferencial, apresentando perdas apenas 0,21 pontos percentuais superiores ao caso ideal, face aos 1,68 pontos percentuais do Cenário 4-A.

## 4.5. Discussão de Resultados

### 4.5.1. Desempenho por Geometria

A Tabela 17 sintetiza os fatores de perdas obtidos para todos os cenários analisados, permitindo uma comparação direta entre as configurações A e B de cada arranjo geométrico. A variação percentual entre as duas configurações de cada cenário indica qual a disposição mais favorável em termos de equilíbrio de correntes, sendo que valores negativos correspondem a uma melhoria da configuração B face à A, e valores positivos ao inverso.

A análise revelou uma hierarquia clara de desempenho:

- Melhor caso: Cenário 1-A (Retangular espelhado) –  $\delta_t=1,00055$ .
- Segundo: Cenário 3-B (Horizontal espelhado) –  $\delta_t=1,00181$ .
- Terceiro: Cenário 4-B (Triangular rodado) –  $\delta_t=1,00207$ .
- Pior caso: Cenário 2-B (Estratificado permutado) –  $\delta_t=1,03264$ .

Tabela 17 - Fatores de Perdas por Cenário e Configuração

Cenário	Geometria	Configuração A $\delta_t$	Configuração B $\delta_t$	Varição A->B
1	Retangular	1,00055	1,00312	+0,257(pp)
2	Estratificada	1,00584	1,03264	+2,680(pp)
3	Horizontal	1,00868	1,00181	-0,687(pp)
4	Triangular	1,01675	1,00207	-1,468(pp)

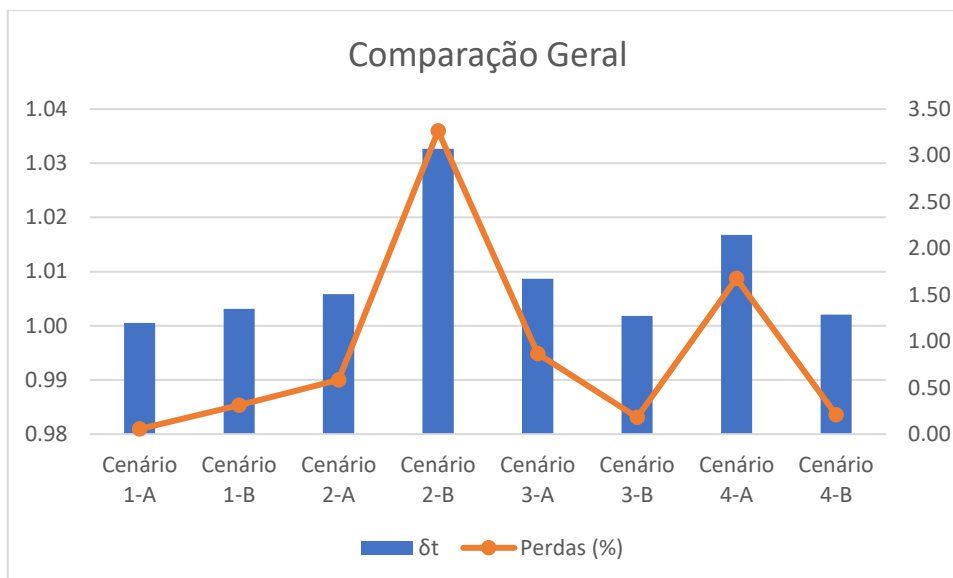


Figura 24 - Gráfico de Comparação Geral

A Figura 24 apresenta uma comparação geral entre todos os cenários analisados, com recurso a dois eixos verticais: as colunas azuis ( $\delta_t$ ) referem-se ao eixo da esquerda, com escala ajustada às variações subtis deste indicador, enquanto a linha laranja (Perdas %) refere-se ao eixo da direita, com escala de 0 a 3,5. O Cenário 2-B destaca-se como o caso mais desfavorável, ao passo que o Cenário 1-A representa a solução com menor impacto em termos de perdas e desequilíbrio. A geometria retangular apresentou o melhor desempenho absoluto, fruto da simetria nos acoplamentos magnéticos proporcionada pela disposição espelhada, enquanto a geometria estratificada registou o pior desempenho entre as geometrias, ao apresentar o  $\delta_t$  mais elevado (1,03264) e a maior dispersão entre configurações, com uma variação de 2,68 pontos percentuais.

#### 4.5.2. Estratégia Ótima de Disposição por Geometria

Um dos resultados mais relevantes deste estudo reside no facto de a estratégia ótima de disposição ser fortemente dependente da geometria de instalação:

Em geometrias compactas (retangular, estratificada e triangular):

- Na geometria retangular, o espelhamento (Cenário 1-A) supera a disposição repetida, com perdas extra de cerca de 0,257 pontos percentuais inferiores ao Cenário 1-B.

- Na geometria estratificada, a repetição de sequência (Cenário 2-A) supera a permutação de fases entre camadas (Cenário 2-B), com perdas 2,68 pontos percentuais inferiores.
- Na geometria triangular, a rotação de fases (Cenário 4-B) apresenta perdas de 1,468 pontos percentuais inferiores ao Cenário 4-A.
- Em todos os casos, a manutenção de uma estrutura simétrica adequada revela-se determinante.

Em geometrias lineares (horizontal):

- Cenário 3-B (espelhado): perdas de 0,687 pontos percentuais inferiores ao Cenário 3-A.
- O espaçamento entre grupos permite que o espelhamento opere eficazmente como mecanismo de compensação dos acoplamentos desiguais.

#### **4.5.3. Explicação Física dos Resultados**

Nas Geometrias Compactas, a proximidade entre condutores intensifica o acoplamento magnético mútuo. Na geometria retangular, o espelhamento (Cenário 1-A) revelou-se a estratégia mais eficaz, pois a simetria por reflexão promove o cancelamento dos campos entre grupos adjacentes. Na geometria estratificada, a repetição de sequência (Cenário 2-A) é preferível à permutação de fases entre camadas (Cenário 2-B), uma vez que esta destrói a simetria sem compensar os desequilíbrios gerados pelo forte acoplamento vertical. Na geometria triangular, a rotação de fases (Cenário 4-B) mostrou-se superior à disposição repetida, pela distribuição mais equitativa do acoplamento tridimensional.

Nas Geometrias Lineares, o espaçamento entre grupos reduz o acoplamento e permite que a simetria longitudinal opere como mecanismo de compensação. Na disposição horizontal, o espelhamento (Cenário 3-B) demonstrou ser a configuração mais eficiente, com os grupos extremos a compensarem mutuamente as assimetrias do grupo central [18].

#### 4.5.4. Impacto Económico e Operacional

Considerando uma operação contínua (8760 horas/ano) e um custo energético de 0,12€/kWh:

Considerando que a resistência do condutor é dada por:

$$R = \frac{\rho \times L}{s} \text{ (}\Omega\text{)} \quad (3)$$

Onde:

R: resistência do condutor ( $\Omega$ );

$\rho$ : resistividade elétrica do material condutor ( $\Omega.m$ );

L: comprimento do condutor (m);

s: secção transversal do condutor ( $m^2$ ).

Considerando uma resistividade do condutor de  $2,82 \times 10^{-8} \Omega .m$ , um comprimento de 100 metros e uma secção de  $240 \text{ mm}^2$  tem-se:

$$R \text{ (20}^\circ\text{C)} = (2,82 \times 10^{-8} \times 100) / (240 \times 10^{-6}) = 0,01175 \Omega$$

Para calcular as perdas ideais, foi assumida uma distribuição uniforme da corrente por fase, sendo a corrente de fase nominal de 909 A, igualmente distribuída pelos 3 condutores por fase, resultando em 303 A por condutor. As perdas totais são calculadas considerando as três fases e três condutores por fase:  $P_{ideal} = 9 \times (I)^2 \times R \text{ (W)}$

Onde:

$P_{ideal}$ : perdas totais ideais do sistema (W);

I: corrente por condutor (A);

R: resistência do condutor ( $\Omega$ ).

Perdas em caso ideal (distribuição uniforme):  $P_{ideal} = 9 \times (303)^2 \times 0,01175 = 9,709 \text{ kW}$

A Tabela 18 apresenta a análise económica comparativa dos cenários estudados, quantificando o impacto financeiro do desequilíbrio de correntes. Para cada configuração

são indicados o fator de perdas ( $\delta_t$ ), as perdas extra em kW relativamente ao cenário ideal, isto é, as perdas adicionais face a uma distribuição perfeitamente uniforme da corrente pelas três fases, e o respetivo custo anual adicional, correspondendo ao encargo económico extra decorrente do desequilíbrio face ao cenário ideal.

Tabela 18 - Impacto Económico e Operacional

<b>Configuração</b>	<b><math>\delta_t</math></b>	<b>Perdas Extra [kW]</b>	<b>Custo / ano (extra)</b>
<b>Cenário 1-A (ótimo)</b>	1,00055	0,00534	5,56€
<b>Cenário 3-B</b>	1,00181	0,01757	18,43€
<b>Cenário 4-B</b>	1,00207	0,02010	21,13€
<b>Cenário 2-A</b>	1,00584	0,05670	59,63€
<b>Cenário 2-B (pior)</b>	1,03264	0,31690	333,11€

Os resultados evidenciam que a escolha da geometria e disposição dos condutores tem um impacto direto nos custos de exploração, com uma diferença de cerca de 327€ por ano entre o melhor (Cenário 1-A) e o pior caso (Cenário 2-B). Este valor corresponde às perdas extra do Cenário 2-B face ao cenário ideal de distribuição uniforme de corrente, não contemplando os custos adicionais de manutenção associados ao sobreaquecimento dos condutores decorrente do desequilíbrio de correntes.

## 4.6.Recomendações Técnicas para a Empresa

Com base nos resultados obtidos e nas implicações práticas identificadas, definem-se diretrizes claras para a seleção e implementação das geometrias analisadas.

A geometria retangular compacta (Cenário 1-A) deve ser considerada a primeira escolha, sempre que as condições de espaço o permitam. Nesta configuração, recomenda-se a disposição espelhada, que assegura o melhor desempenho global, correntes mínimas no condutor neutro e uma distribuição de campo mais uniforme. A sua principal limitação reside na necessidade de espaço bidimensional, tanto em altura como em largura.

Como segunda opção, propõe-se a geometria horizontal linear (Cenário 3-B), especialmente adequada para instalações em túneis, galerias técnicas ou percursos longos. Também aqui se adota a disposição espelhada, garantindo um excelente compromisso entre desempenho e simplicidade, além de facilitar as operações de manutenção. A sua limitação principal é a exigência de espaço longitudinal disponível.

A geometria triangular (Cenário 4-B) constitui a terceira escolha, recomendando-se a sua aplicação em espaços confinados ou com restrições dimensionais significativas. Nesta configuração, deve ser utilizada a rotação de fases entre grupos, o que proporciona um desempenho satisfatório num arranjo compacto. Contudo, é essencial dimensionar adequadamente o condutor neutro central, de modo a garantir equilíbrio magnético e segurança operacional.

A geometria estratificada deve ser evitada sempre que possível, uma vez que apresenta a maior dispersão entre configurações (2,68 pontos percentuais) e o pior caso absoluto de todas as geometrias (Cenário 2-B,  $\delta_t=1,03264$ ), tornando-a a opção de maior risco em caso de configuração incorreta. Nos casos em que a sua utilização seja inevitável, deve-se empregar obrigatoriamente a configuração sequencial repetida (Cenário 2-A), evitando qualquer forma de permutação. Sempre que tecnicamente viável, recomenda-se considerar a transposição física dos condutores ao longo do percurso para mitigar desequilíbrios.

A abordagem correta de projeto deve seguir uma sequência lógica:

- Identificar a topologia predominante, distinguindo entre arranjos compactos com sobreposição vertical (retangular, estratificada ou triangular) e arranjos lineares (horizontal).
- Em geometrias compactas, privilegiar a simetria estrutural adequada, espelhamento na retangular, repetição na estratificada, e rotação de fases na triangular, evitando permutações. Em geometrias lineares, aplicar o espelhamento da sequência de fases.
- Validar os resultados através de cálculo, recorrendo a modelos analíticos ou numéricos como o desenvolvido neste estudo.
- Realizar medições em campo para confirmar as correntes reais após a instalação.

#### **4.7.Limitações do Estudo**

O modelo desenvolvido, embora robusto para análise comparativa, apresenta simplificações que devem ser consideradas:

1. Efeito pelicular não considerado: Em altas frequências ou correntes muito elevadas, a distribuição não uniforme da corrente na secção do condutor pode alterar os resultados.
2. Temperatura constante assumida: Variações de temperatura modificam a resistência e, conseqüentemente, as perdas.
3. Regime permanente: Fenómenos transitórios não foram analisados.
4. Configuração estática: Não foram consideradas transposições físicas ao longo do percurso.
5. Efeito de proximidade não considerado: Interações magnéticas complexas entre condutores muito próximos foram simplificadas.

Estas simplificações justificam-se pelo objetivo demonstrativo do estudo, mas devem ser consideradas em projetos de grande envergadura ou aplicações críticas, onde poderá ser necessário recorrer a ferramentas de simulação mais avançadas ou ensaios experimentais para validação final.

#### **4.8. Conclusões do Estudo de Caso**

O estudo desenvolvido permitiu avaliar, de forma quantitativa e comparativa, o impacto das diferentes configurações geométricas de condutores em paralelo sobre a distribuição de correntes e as perdas por efeito de Joule. A análise demonstrou que pequenas variações na disposição dos condutores podem originar desequilíbrios significativos nas indutâncias mútuas, resultando em correntes de circulação e perdas energéticas adicionais.

Entre as oito configurações analisadas, a configuração retangular espelhada (Cenário 1-A) revelou o melhor desempenho, apresentando um fator de perdas de 1,00055, correspondente a apenas 0,055% de perdas adicionais face ao caso ideal. Por outro lado, a disposição estratificada com permutação de fases (Cenário 2-B) apresentou o comportamento menos favorável, com desequilíbrios acentuados e fator de perdas de 1,03264.

Os resultados comprovam que a simetria geométrica é um elemento determinante na mitigação das correntes de circulação e que a permutação de fases não representa uma solução eficiente em geometrias compactas, como demonstrado pelo Cenário 2-B. Do ponto de vista económico, verificou-se que configurações inadequadas podem implicar custos adicionais superiores a 327€ por ano apenas em perdas elétricas.

Em síntese, o estudo fornece à empresa Alferpac uma base técnica sólida para a seleção de configurações otimizadas em instalações elétricas de elevada corrente, contribuindo para maior eficiência energética, operação mais estável e redução de custos de exploração.

## **5. Análise crítica e propostas de melhoria**

### **5.1. Reflexão sobre o Estágio**

#### **5.1.1. Aspetos Positivos**

O estágio na Alferpac revelou-se uma experiência profundamente enriquecedora, superando as expectativas iniciais. O acompanhamento técnico proporcionado destacou-se pela sua qualidade, em particular o apoio diário do Engenheiro Bruno Duarte, cuja disponibilidade, paciência e generosa partilha de conhecimentos práticos foram determinantes para o sucesso do estágio. A orientação do Engenheiro Diogo Fernandes garantiu uma visão estratégica dos projetos e uma compreensão profunda da operação da empresa.

A diversidade de atividades desenvolvidas permitiu uma aplicação abrangente dos conhecimentos teóricos adquiridos ao longo do mestrado. Desde levantamentos técnicos em obra, passando por dimensionamento de quadros elétricos e postos de transformação, até projetos de iluminação e aumentos de potência, cada tarefa constituiu uma oportunidade de consolidar conceitos teóricos através da sua materialização em soluções reais conforme as Regras Técnicas das Instalações Elétricas de Baixa Tensão [1] e as normas internacionais de segurança [15]. O facto de o estudo desenvolvido ter aplicabilidade prática imediata e impacto económico mensurável reforçou o sentido de contributo efetivo para a organização.

#### **5.1.2. Aspetos menos Positivos e Dificuldades Encontradas**

A transição do ambiente académico para o contexto profissional exigiu um período de adaptação, particularmente no que respeita ao ritmo de trabalho e à gestão simultânea de múltiplos projetos com prazos concorrentes.

O desenvolvimento do modelo computacional em *Excel* revelou-se tecnicamente mais exigente do que inicialmente antecipado. As limitações do *Excel* na manipulação nativa de matrizes complexas e operações de inversão matricial exigiram soluções criativas e

consumiram tempo significativo. A implementação de matrizes em blocos e a validação rigorosa dos cálculos intermédios constituíram desafios técnicos relevantes.

Algumas ferramentas de *software* utilizadas pela empresa não foram abordadas em profundidade durante o curso, exigindo aprendizagem autónoma e adaptação rápida. As simplificações adotadas no modelo, embora justificadas pelo objetivo demonstrativo do estudo, constituem limitações reconhecidas, a não incorporação do efeito pelicular, da variação de resistência com temperatura e do efeito de proximidade implica que os resultados devem ser interpretados como comparativos e indicativos.

### **5.1.3. Competências Desenvolvidas**

Do ponto de vista técnico, o estágio permitiu consolidar e expandir competências em múltiplas áreas: análise de sistemas trifásicos com condutores em paralelo conforme o modelo de S.-Y. Lee [18], cálculo de indutâncias mútuas e impedâncias, quantificação de perdas por efeito Joule, dimensionamento de instalações elétricas de baixa tensão, projetos de iluminação e ventilação de postos de transformação. O desenvolvimento do modelo computacional reforçou capacidades de modelação matemática, programação de fórmulas complexas e validação de resultados.

As competências transversais desenvolvidas revelaram-se igualmente valiosas: capacidade de trabalho em equipa multidisciplinar, comunicação técnica oral e escrita, gestão de tempo e prioridades, autonomia na resolução de problemas, adaptabilidade a diferentes contextos e exigências, e pensamento crítico na avaliação de soluções técnicas. A necessidade de justificar decisões técnicas perante os orientadores e colegas promoveu o desenvolvimento de capacidades de argumentação fundamentada e rigor metodológico.

## 5.2. Propostas de Melhoria e Trabalho Futuro

### 5.2.1. Melhorias para a empresa e para o modelo

#### Desenvolvimentos Imediatos

O modelo *Excel* criado durante o estágio poderá evoluir para uma ferramenta corporativa com interface gráfica intuitiva, dispensando conhecimentos avançados de *Excel*. A introdução de verificações automáticas de coerência e avisos para configurações críticas aumentaria a robustez do modelo. A criação de uma base de dados interna com geometrias e desempenhos típicos facilitaria a aplicação prática em futuros projetos.

Sugere-se ainda a realização de *workshops* internos sobre indutâncias mútuas, direcionados às equipas de projeto e instalação, para disseminar o conhecimento gerado e sensibilizar para o impacto das configurações de cabos no desempenho dos sistemas. A criação de uma norma interna ou guia técnico pela Alferpac, com diretrizes para seleção de configurações e critérios de instalação, facilitaria a uniformização de práticas, garantindo a conformidade com as exigências de competência técnica e segurança das RTIEBT [1].

#### Desenvolvimentos a Médio Prazo

A migração do modelo para *Python* ou *MATLAB* permitiria o tratamento nativo de números complexos e operações matriciais mais eficientes, bem como a integração com *software CAD* e a geração automática de relatórios técnicos padronizados.

#### Extensão, Validação e Disseminação do Trabalho

A precisão do modelo poderá ser reforçada incorporando efeitos físicos adicionais como o efeito pelicular, a variação da resistência com a temperatura e o efeito de proximidade. A validação experimental através de campanhas de medições em instalações reais ou ensaios laboratoriais controlados permitiria comparar os resultados teóricos com valores experimentais, consolidando a fiabilidade da ferramenta. O estudo poderá ainda ser expandido para uma análise de ciclo de vida e alargado a sistemas de média tensão, arranjos com múltiplos condutores por fase e galerias técnicas.



## **6. Conclusão**

O presente relatório documenta o estágio curricular de 1040 horas realizado na Alferpac, no âmbito do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica - Energia e Automação, do Instituto Politécnico de Leiria, decorrido entre agosto de 2025 e março de 2026.

### **6.1. Objetivos Alcançados**

Os objetivos inicialmente propostos foram plenamente alcançados. A participação em projetos reais de instalações elétricas, sistemas de iluminação de emergência, infraestruturas de mobilidade elétrica com gestão dinâmica de carga e postos de transformação com ventilação forçada, permitiu aplicar e consolidar conhecimentos de unidades curriculares fundamentais do mestrado, nomeadamente Sistemas de Energia Elétrica, Instalações Elétricas, Eletromagnetismo e Eficiência Energética. O estágio promoveu ainda o desenvolvimento de competências transversais essenciais ao exercício da profissão: comunicação técnica, gestão de prioridades, autonomia e trabalho em equipa multidisciplinar.

### **6.2. Principais Resultados e Contributos**

O estudo comparativo sobre configurações de condutores em paralelo produziu resultados quantitativos relevantes. A configuração retangular espelhada (Cenário 1-A) apresentou o melhor desempenho, com fator de perdas  $\delta_t=1,00055$ , enquanto a configuração estratificada permutada (Cenário 2-B) registou o pior desempenho, com  $\delta_t=1,03264$ . Um dos resultados mais relevantes consiste na demonstração de que a permutação de fases não constitui uma solução universal, apresentando eficácia fortemente dependente da geometria de instalação.

Do ponto de vista económico, a escolha inadequada da configuração pode resultar em custos adicionais superiores a 327€/ano apenas em perdas elétricas, para o sistema analisado (630

kVA, 909 A por fase, 3 condutores LXV 240 mm<sup>2</sup> por fase), sem considerar custos de manutenção acrescidos. A configuração ótima apresenta custos adicionais inferiores a 6€/ano, evidenciando o potencial de economia através da otimização geométrica.

Importa ainda referir que os desequilíbrios de corrente entre condutores em paralelo não se resumem apenas a impactos económicos, em situações mais gravosas, podem levar à ultrapassagem das correntes máximas admissíveis em determinados condutores do feixe, pondo em causa a segurança da instalação. Este aspeto é particularmente crítico, na medida em que a proteção é dimensionada com base na corrente máxima admissível do conjunto, não tendo em conta a distribuição desigual entre os condutores individuais. Assim, um condutor que suporte uma corrente significativamente superior à média do feixe pode atingir temperaturas de serviço excessivas, acelerando a degradação do isolamento e reduzindo o tempo de vida útil do cabo, sem que o dispositivo de proteção atue, uma vez que a corrente total do feixe pode permanecer dentro dos limites nominais. Em casos extremos, este fenómeno pode originar situações de risco de incêndio ou de falha prematura da instalação, com consequências técnicas e de segurança de difícil resolução em infraestruturas já construídas e em serviço. Por este motivo, a análise da distribuição de correntes entre condutores em paralelo não deve ser encarada como um exercício meramente académico ou de otimização energética, mas sim como uma exigência técnica fundamental no dimensionamento e na verificação de instalações elétricas de média e grande dimensão. O estudo forneceu à Alferpac diretrizes técnicas fundamentadas e um modelo computacional funcional implementado em Excel, detalhado no Anexo A.

### **6.3.Considerações Finais**

O estágio na Alferpac proporcionou uma transição consistente entre a formação académica e o exercício profissional da engenharia eletrotécnica. O trabalho desenvolvido não só consolidou a minha formação técnica, como gerou valor tangível para a organização, demonstrando a importância da aplicação de modelos científicos na resolução de problemas práticos do setor elétrico.

## Referências bibliográficas

- [1] C. E. Portuguesa, “Regras Técnicas das Instalações Elétricas de Baixa Tensão (RTIEBT). Portaria n.º 949-A/2006,” Diário da República, 1.ª série, N.º 173, 2006.
- [2] Portugal, “Portaria n.º 1532/2008. Regulamento de Segurança Contra Incêndios em Edifícios (RSCIE),” Diário da República, 1.ª série, N.º 250, 29 de dezembro, 2008.
- [3] Portugal, “Decreto Regulamentar n.º 14/77. Regulamento de Segurança de Subestações e Postos de Transformação,” Diário da República, I Série, N.º 41, 18 de fevereiro, 1977.
- [4] International Electrotechnical Commission, “IEC 61936-1: Power installations exceeding 1 kV a.c. - Part 1: Common rules,” IEC, 2010.
- [5] International Electrotechnical Commission, “IEC 60076-1: Power transformers - Part 1: General,” IEC, 2011.
- [6] International Electrotechnical Commission, “IEC 60076-2: Power transformers - Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers,” IEC, 2011.
- [7] ANACOM – Autoridade Nacional de Comunicações, “Manual ITED: Prescrições e Especificações Técnicas das Infraestruturas de Telecomunicações em Edifícios – 4.ª Edição,” 2020.
- [8] Portugal, “Decreto-Lei n.º 39/2010 (alterado pelo DL n.º 90/2014). Regime jurídico aplicável à mobilidade elétrica,” Diário da República, 1.ª série, N.º 82, 2010.
- [9] International Electrotechnical Commission, “IEC 61851-1: Electric vehicle conductive charging system - Part 1: General requirements,” IEC, 2017.
- [10] Direção-Geral de Energia e Geologia, “Guia Técnico das Instalações Elétricas para Alimentação de Veículos Elétricos. 3.ª edição,” DGEG, 2021.

- [11] European Committee for Standardization, “EN 1838: Lighting applications - Emergency lighting,” CEN, 2013.
- [12] European Committee for Standardization, “EN 50172: Emergency escape lighting systems,” CEN, 2004.
- [13] European Committee for Standardization, “EN 62034: Automatic test systems for battery powered emergency escape lighting,” CEN, 2006.
- [14] International Electrotechnical Commission, “IEC 62196-2: Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets - Conductive charging of electric vehicles - Part 2: Dimensional compatibility and interchangeability requirements for a.c. pin and contact-tube accessories,” IEC, 2016.
- [15] International Electrotechnical Commission, “IEC 60364-5-52: Low-voltage electrical installations - Part 5-52: Selection and erection of electrical equipment - Wiring systems,” IEC, 2009.
- [16] European Committee for Standardization, “EN 50173: Information technology - Generic cabling systems,” CEN, 2011.
- [17] International Electrotechnical Commission, “IEC 60502-2: Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 6 kV up to 30 kV - Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV up to 30 kV,” IEC, 2014.
- [18] S.-Y. Lee, “A Cable Configuration Technique for the Balance of Current Distribution in Parallel Cables,” *Journal of Marine Science and Technology*, 2010.
- [19] A. R. Miranda, “Circuitos com Cabos Unipolares em Paralelo por Fase,” *Electricidade*, 1994.
- [20] A. Rodrigues e E. Gonçalves, “Cabos monopolares instalados em paralelo: influência das indutâncias mútuas,” Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria, 2011.
- [21] H.-J. Choi e H.-H. Lee, “A Study on the Overheating of the Power Cable Tray,” em *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2013.

- [22] International Electrotechnical Commission, “IEC 60287-1-1: Electric cables - Calculation of the current rating - Part 1-1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses - General,” IEC, 2014.



## **Anexos**

### **Anexo A – Modelo de Cálculo em *Excel***

O modelo computacional desenvolvido neste estudo foi implementado em *Microsoft Excel*, constituindo uma ferramenta prática para a análise da distribuição de correntes em condutores paralelos. O ficheiro é composto por duas folhas principais "FolhaDados" e "FolhaCálculo", organizadas de forma a facilitar a utilização e garantir a integridade dos cálculos.

#### **Estrutura do Modelo**

O modelo apresenta duas folhas interdependentes:

Folha "FolhaDados" (Interface do Utilizador)

- Permite inserir os parâmetros de entrada;
- Mostra resultados numéricos e gráficos;
- Inclui representações esquemáticas das configurações analisadas.

Folha "FolhaCálculo" (Motor de Cálculo)

- Executa automaticamente todos os cálculos matemáticos;
- Determina as indutâncias próprias e mútuas, matrizes de impedâncias e correntes nos condutores;
- Contém todas as fórmulas implementadas diretamente no *Excel*, seguindo o método apresentado no artigo base do estudo.

Esta folha não deve ser alterada pelo utilizador, pois é o núcleo do processamento do modelo.

## FolhaDados

A "FolhaDados" é a interface principal, composta por três secções:

- Dados a Colocar
- Inserção dos parâmetros globais (raio, comprimento, corrente, resistividade, número de condutores).
- Tabela de posições (x, y) dos condutores.
- Apresentação esquemática dos cenários 1-A a 4-B, mostrando posições relativas, fases e espaçamentos.
- Resultados e Análises Gráficas
- Tabela com correntes e ângulos por condutor;
- Gráficos de barras (correntes por fase e neutro) e *piechart* (perdas por cenário);
- Indicadores de desempenho: fator de perdas, perdas e custos anuais.

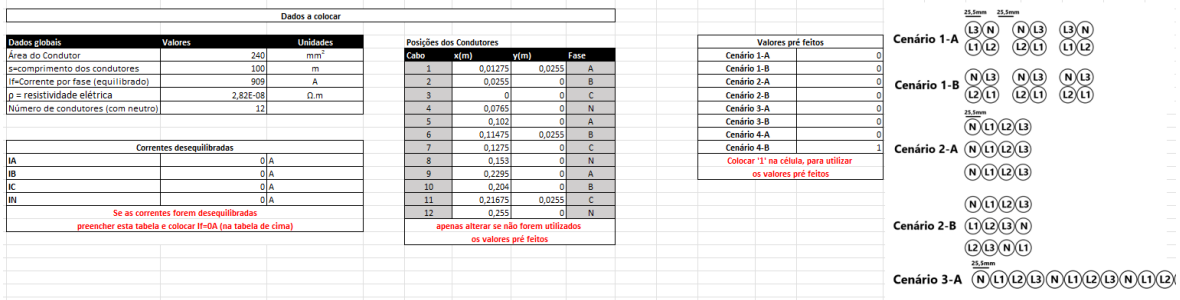


Figura 25 - FolhaDados (Dados a Colocar) Excel

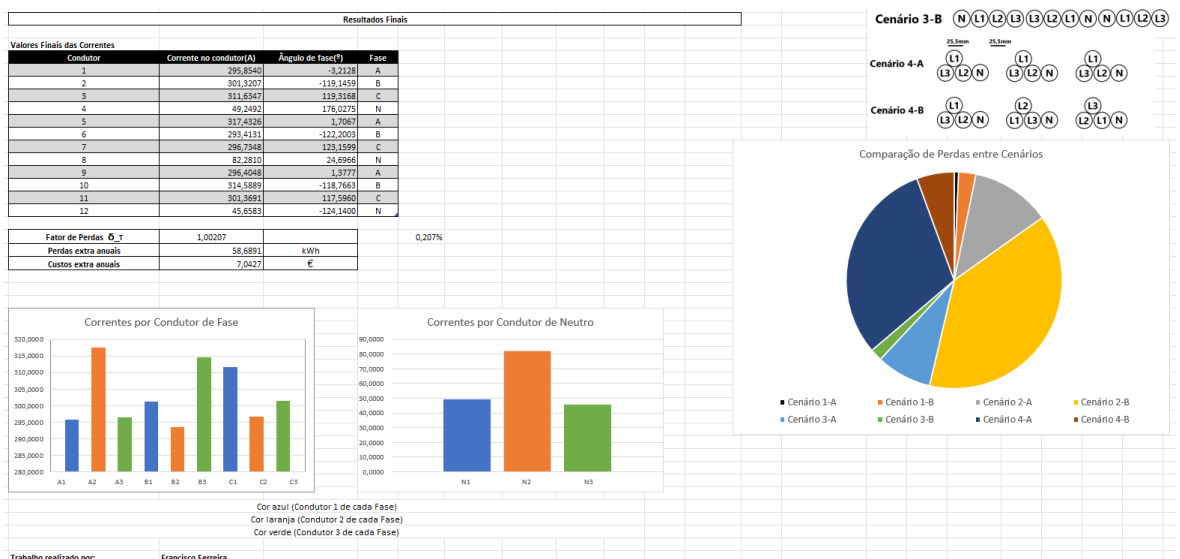


Figura 26 - FolhaDados (Resultados) Excel

## FolhaCálculo

A “FolhaCálculo” implementa o núcleo matemático do modelo, responsável pela determinação da distribuição de correntes nos condutores. As equações foram traduzidas diretamente para fórmulas do *Excel*, com adaptações específicas para permitir o tratamento de números complexos e operações matriciais (matrizes em blocos), uma vez que o *Excel* não suporta de forma nativa a inversão de matrizes com valores imaginários.

Não alterar Dados nesta folha, FOLHA DE CÁLCULO			Constantes auxiliares		Real	Imag(inário)	Unidades									
Valores de constantes			Id	314,1592654	-	-	rad/s									
Dados gerais			Limt	0,00000005	-	-	m/m									
Leitura do condutor	0,008740387	m	IA	0 A	Zint	0,001570796	Ω									
Incomprimento dos condutores	100	m	IB	0 A	Zmut	-	Ω									
Divergência dos condutores	0,11739	º	IC	0 A		0,009282181	Ω									
Id	1,55664E-06	T m/A	IN	0 A												
Frequência	50	Hz														
InCorrente por fase (equilibrado)	400	A														
ρ = resistividade elétrica	2,83E-06	Ω m														
Número de condutores (com neutro)	12															
Área do Condutor	240	mm <sup>2</sup>														
Matrizes dos Condutores			Trabalho realizado por: Francisco Ferreira													
Cabo			Matriz de distâncias													
Condutor	x(m)	y(m)	Fase	Condutor												
1	0,1275	0,0251	A	1	0	0,02859867	0,02859867	0,06866081	0,062821401	0,102	0,117549192	0,142549334	0,218244845	0,192942511	0,204	0,24
2	0,0293	0	B	2	0,02859867	0	0,0255	0,051	0,0765	0,092821401	0,102	0,1275	0,204	0,1785	0,192942511	0
3	0	0	C	3	0,02859867	0,0255	0	0,0765	0,092	0,117549192	0,1275	0,153	0,2295	0,204	0,218244845	0
4	0,0785	0	N	4	0,06866081	0,051	0,0765	0	0,0255	0,045970779	0,051	0,0765	0,153	0,1275	0,142549334	0
5	0,102	0	A	5	0,092821401	0,0765	0,102	0,0255	0	0,02859867	0,0255	0,051	0,1275	0,102	0,117549192	0
6	0,1475	0,0251	B	6	0,117549192	0,102	0,1275	0,051	0,0255	0,02859867	0	0,0255	0,102	0,0765	0,092821401	0
7	0,1275	0	C	7	0,142549334	0,1275	0,153	0,0765	0,051	0,045970779	0,0255	0	0,0765	0,051	0,06866081	0
8	0,153	0	N	8	0,18244845	0,204	0,2295	0,153	0,1275	0,117549192	0,102	0,0765	0	0,0255	0,02859867	0
9	0,2295	0	A	9	0,192942511	0,1785	0,204	0,1275	0,102	0,092821401	0,0765	0,051	0	0,0255	0,02859867	0
10	0,204	0	B	10	0,204	0,192942511	0,218244845	0,142549334	0,117549192	0,102	0,092821401	0,06866081	0,02859867	0,02859867	0	0,04
11	0,218244845	0,0251	C	11	0,24358848	0,2295	0,255	0,1785	0,153	0,142549334	0,1275	0,102	0,0255	0,051	0,045970779	0
12	0,255	0	N	12	0,24358848	0,2295	0,255	0,1785	0,153	0,142549334	0,1275	0,102	0,0255	0,051	0,045970779	0
Valores Físicos das Correntes			Matriz de impedâncias													
Condutor	Corrente no condutor(A)	Ângulo de fase(º)	Fase	Z(m)												
1	295,8540093	-3,212792376	A	1	0,031913843	0,022352463	0,022352463	0,01682999	0,014893622	0,014343145	0,013451661	0,012240067	0,009563873	0,010338121	0,009987973	0,0
2	301,3207431	-119,1458647	B	2	0,022352463	0,031913843	0,022352463	0,01682999	0,014893622	0,014343145	0,013451661	0,012240067	0,009563873	0,010338121	0,009987973	0,0
3	311,6364682	-119,3168183	C	3	0,022352463	0,022352463	0,031913843	0,01682999	0,014893622	0,014343145	0,013451661	0,012240067	0,009563873	0,010338121	0,009987973	0,0
4	49,34616933	176,0274932	N	4	0,014893622	0,01682999	0,01682999	0,031913843	0,022352463	0,022352463	0,02305349	0,018898317	0,012941093	0,014343145	0,013451661	0,0
5	317,4329416	1,706685012	A	5	0,014343145	0,014893622	0,013451661	0,01682999	0,022352463	0,031913843	0,022352463	0,019350636	0,013451661	0,014893622	0,014343145	0,0
6	291,4135527	-122,2002578	B	6	0,013451661	0,014343145	0,012941093	0,01682999	0,014893622	0,022352463	0,022352463	0,013451661	0,013451661	0,014343145	0,014893622	0,0
7	296,7347819	123,1599453	C	7	0,012240067	0,012941093	0,011795533	0,01682999	0,014893622	0,014343145	0,013451661	0,012240067	0,010338121	0,011795533	0,010629999	0,0
8	82,28103111	24,89656534	N	8	0,009563873	0,009987973	0,00924782	0,011795533	0,012941093	0,013451661	0,014343145	0,013451661	0,012941093	0,013451661	0,013524269	0,0
9	399,494849	1,377762429	A	9	0,010338121	0,010629999	0,009987973	0,00924782	0,012941093	0,013451661	0,014343145	0,014893622	0,014893622	0,014343145	0,013524269	0,0
10	314,5497451	-119,7663376	B	10	0,009987973	0,010338121	0,009563873	0,00924782	0,012240067	0,013451661	0,014343145	0,014893622	0,014893622	0,014343145	0,013524269	0,0
11	301,3609876	117,99596	C	11	0,008273588	0,00924782	0,008585921	0,008273588	0,012240067	0,012941093	0,014343145	0,014893622	0,014893622	0,014343145	0,013524269	0,0
12	45,65827936	-124,14001	N	12	0,008273588	0,008273588	0,008273588	0,008273588	0,012240067	0,012941093	0,014343145	0,014893622	0,014893622	0,014343145	0,013524269	0,0

Figura 27 - FolhaCálculo (Matrizes de Cálculo) Excel

## Estrutura Geral

O cálculo segue o método descrito no artigo de referência, baseado na formulação matricial de impedâncias e correntes. O processo é dividido em quatro etapas principais:

1. Determinação das distâncias entre condutores ( $D_{jk}$ ).
2. Cálculo das impedâncias próprias e mútuas ( $Z_{jj}$  e  $Z_{jk}$ ).
3. Formação e inversão da matriz de impedâncias ( $Z$ );
4. Cálculo das correntes em cada condutor ( $I_{cabo}$ ).

### Matriz de Distâncias

Cada elemento da matriz de distâncias é obtido pela fórmula:

$$D_{jk} = \sqrt{(x_j - x_k)^2 + (y_j - y_k)^2}$$

Figura 28 - Fórmula do cálculo das distâncias

onde:

- $X_j, Y_j$  : coordenadas do condutor  $j$
- $X_k, Y_k$ : coordenadas do condutor  $k$

Esta matriz permite determinar o espaçamento geométrico entre todos os condutores do sistema, informação essencial para o cálculo das impedâncias mútuas.

### Cálculo das Impedâncias

A matriz de impedâncias  $Z$  combina as impedâncias próprias (diagonais da matriz) e as impedâncias mútuas (fora da diagonal):

- Se  $j = k$ :

$$Z_{jj} = R + Z_{int} + C_{mut} \ln\left(\frac{1}{r}\right)$$

- Se  $j \neq k$ :

$$Z_{jk} = C_{mut} \ln\left(\frac{1}{D_{jk}}\right)$$

Figura 29 - Fórmula de cálculo da Matriz das Impedâncias

onde:

- $R$ : resistência do condutor ( $\Omega/m$ )
- $Z_{int}$ : componente de impedância interna do condutor ( $\Omega/m$ )
- $C_{mut}$ : acoplamento magnético entre condutores ( $\Omega/m$ )
- $r$ : raio do condutor (m)
- $D_{jk}$ : distância entre os condutores  $j$  e  $k$  (m)

### Construção da Matriz de Conexão (K)

A matriz K define a ligação entre condutores e fases. Cada linha representa um condutor e cada coluna uma fase ou neutro (A, B, C ou N). Os elementos da matriz indicam com valor “1” ou “0” a pertença de cada condutor a uma fase específica. Esta matriz é essencial para relacionar as correntes de fase ( $I_{fonte}$ ) com as correntes de condutor ( $I_{cabo}$ ).

Matriz de conexão K				
Cabo/Fase	A	B	C	N
1	1	0	0	0
2	0	1	0	0
3	0	0	1	0
4	0	0	0	1
5	1	0	0	0
6	0	1	0	0
7	0	0	1	0
8	0	0	0	1
9	1	0	0	0
10	0	1	0	0
11	0	0	1	0
12	0	0	0	1

Figura 30 - Matriz de conexão (K)

### Cálculo das Matrizes Intermédias

Com base nas definições anteriores, é possível obter a matriz de transformação M, que traduz o acoplamento entre fases e condutores:

$$M = K^T Z^{-1} K$$

Figura 31 - Fórmula da Matriz Intermédia

A inversão da matriz Z é fundamental nesta etapa, mas, como o *Excel* não suporta diretamente a inversão de matrizes complexas, foi necessário implementar:

- matrizes em blocos (separar parte real e imaginária);
- uso de matrizes dinâmicas para manipular automaticamente dimensões variáveis;
- operações manuais de inversão através de funções matriciais adaptadas.

Essas adaptações garantem que o modelo possa ser executado inteiramente no *Excel*, preservando a exatidão dos resultados.

## Determinação das Correntes nos Condutores

Finalmente, as correntes em cada condutor são obtidas pela expressão:

$$I_{cabo} = Z^{-1}KM^{-1}I_{fonte}$$

Figura 32 - Fórmula de cálculo da Corrente do Cabo

onde:

- $I_{fonte}$ : vetor de correntes de fase equilibradas (ou desequilibradas);
- $I_{cabo}$ : vetor resultante de correntes individuais em cada condutor.

Os resultados são apresentados na FolhaDados com representação numérica e gráfica. A metodologia completa de cálculo, desde as distâncias até às correntes finais, está implementada de forma totalmente automática através das fórmulas demonstradas, cujas implicações práticas são discutidas no subcapítulo seguinte.

## Considerações sobre a Implementação

A implementação do modelo em *Excel*, embora não seja a ferramenta mais convencional para cálculos matriciais complexos, oferece vantagens significativas no contexto deste trabalho:

- **Acessibilidade:** Não requer *software* especializado ou licenças adicionais.
- **Transparência:** Todas as fórmulas são visíveis e auditáveis.
- **Flexibilidade:** Permite adaptação rápida a novos cenários.
- **Integração:** Combina cálculos, tabelas e gráficos num único ficheiro.

As principais adaptações implementadas incluem:

- Separação de matrizes complexas em componentes real e imaginária.
- Uso de matrizes dinâmicas para ajuste automático de dimensões.


O modelo foi validado ao comparar os resultados com os apresentados no artigo de referência [18], confirmando um erro máximo inferior a 5% nas correntes calculadas.

## Anexo B – Material de Divulgação Interna


Como complemento ao estudo técnico desenvolvido, foi elaborado material de divulgação destinado a sensibilizar os trabalhadores da Alferpac para a problemática das indutâncias mútuas em sistemas trifásicos. O objetivo consistiu em traduzir os resultados da investigação em diretrizes práticas e acessíveis, aplicáveis diretamente em contexto de instalação.

### Guia Prático de Disposição de Cabos Trifásicos em Paralelo

✓ SE FOR POSSÍVEL ESPELHAR A DISPOSIÇÃO DOS CONDUTORES ENTRE GRUPOS:




Colunas/prateleiras (retangular)




Esteira horizontal (linha)

✗ SE NÃO FOR POSSÍVEL ESPELHAR:



Camadas sobrepostas (estratificada)



Triangular (espaço limitado)

✓ Usar **REPETIÇÃO** (mais seguro)

⚠ **NUNCA** permutar fases!

#### RESUMO

- 1 É possível espelhar entre grupos? → **ESPELHAR**
- 2 Camadas verticais? → **REPETIR**
- 3 Triangular? → **RODAR**

Estudo desenvolvido por Francisco Ferreira (2025) no âmbito do mestrado em Engenharia Eletrotécnica (ESTG – Politécnico de Leiria), em colaboração com a Alferpac.




Figura 33 - Flyer Desenvolvido

O *flyer* apresentado na figura anterior sintetiza as principais conclusões do estudo numa linguagem visual e direta, adequada a técnicos de instalação e equipas de obra. O material está estruturado em função das quatro geometrias analisadas no estudo, indicando para cada uma a disposição ótima dos condutores:

**Geometrias com Espelhamento entre Grupos:** Para as configurações retangular (colunas/prateleiras) e horizontal (esteira linear), o *flyer* recomenda a implementação de espelhamento da sequência de fases entre grupos consecutivos. Estas geometrias beneficiam

87

da alternância da disposição (ex: L1-L2-L3-N / N-L3-L2-L1 / L1-L2-L3-N), que promove o cancelamento das induções mútuas assimétricas e garante distribuição equilibrada das correntes.

**Geometrias com Repetição Sequencial:** Para a disposição estratificada (camadas sobrepostas verticais), indica-se que deve ser mantida a mesma sequência de fases em todas as camadas (ex: L1-L2-L3-N / L1-L2-L3-N / L1-L2-L3-N), evitando qualquer forma de permutação. Contrariamente à intuição comum, a permutação de fases nesta geometria amplifica os desequilíbrios em vez de os atenuar, devido à quebra de simetria vertical.

**Geometria Triangular com Rotação de fases:** Para a configuração triangular compacta, recomenda-se a implementação de rotação anti-horária das fases entre grupos consecutivos. Esta abordagem permite compensar os acoplamentos magnéticos desiguais característicos desta geometria.

O material estabelece ainda princípios fundamentais aplicáveis a qualquer instalação: usar a simetria estrutural adequada em cada geometria compacta, espelhamento na retangular, repetição na estratificada e rotação de fases na triangular, evitando permutações. O algoritmo de decisão simplificado em três passos permite aos técnicos de instalação selecionar rapidamente a abordagem correta: avaliar se é possível espelhar fases entre grupos (retangular), em disposições estratificadas aplicar repetição, e em configurações triangulares rodar as fases.

A representação esquemática das quatro geometrias facilita a identificação visual em contexto de obra, e a categorização clara entre configurações recomendadas e a evitar proporciona orientação prática. O material foi concebido para distribuição física junto das equipas de instalação e afixação em áreas técnicas da empresa, assegurando que os resultados da investigação se traduzem em práticas de instalação que promovem eficiência energética e qualidade técnica superior.